

*М. В. КАРПЕЦЬ, О. В. ГРЕЙДА*

### ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ

Виробництво високоякісного, конкурентоспроможного портландцементу є одним з актуальних завдань, які необхідні для відбудови України за умов знищення та пошкодження великої кількості інфраструктурних об'єктів. Технологія виробництва цементу є багатостадійною, енергозатратною. Однією з найперших і найважливіших стадій є стадія декарбонізації, яка супроводжується вивільненням CO<sub>2</sub> та утворенням розплаву суміші. Мета роботи полягала в удосконаленні процесу декарбонізації, яка є початковою стадією формування клінкерних мінералів при спіканні шихти. Досліджено вплив домішки NaF (1-5%) на вихідну сировину ПрАТ «Івано-Франківськцементу» вапняк, мергель та огарок в порівнянні з модельною реакцією. Доведено, що натрію фторит пришвидшує спікання вапняку та мергелю, а у випадку огарку, навпаки сповільнює. Дія мінералізатора в основному зводиться до зниження температури появи розплаву в суміші, що підвищує швидкість спікання цементного клінкеру. За цих умов утворюються сприятливі умови для розчинення CaO і C<sub>2</sub>S. Використання мінералізатора рекомендується під час прожарювання сировинних сумішей, які важко спікаються та містять кристалічний кварц і вапняк. Встановлено, що домішка NaF в кількості 2 % від маси, прискорює процес взаємодії CaO з SiO<sub>2</sub>, сприяє утворенню алюмінатної та феритної фаз за нижчих температур. Проведено рентгенофазовий аналіз, який доводить те, що мінералізатор доцільно використовувати при спіканні шихти. Дана робота є важливою для удосконалення технології виробництва портландцементу за рахунок зниження температури процесу декарбонізації за допомогою введення домішки NaF.

**Ключові слова:** портландцемент; вапняк; мергель; огарок; декарбонізація; мінералізація.

*M. V. KARPETS, GREYDA*

### PHYSICO-CHEMICAL FEATURES OF THE DECARBONIZATION PROCESS IN PORTLAND CEMENT PRODUCTION

The production of a high-quality, competitive Portland cement is one of the urgent tasks, which are necessary for the reconstruction of Ukraine in context of the deconstruction and damage of a large number of infrastructure objects. The technology of cement production is multi-stage and energy-intensive. One of the earliest and most important stages is the decarbonization, which is accompanied by the release of CO<sub>2</sub> and formation of a mixture melt. The aim of work was to improve the decarbonization process, which is the primary stage of clinker minerals formation during sintering of the bath. We have investigated on PJSC Ivano-Frankivskcement an effect of the additive NaF (1-5%) on the raw material: limestone, marl and pyrite cinders in comparison with the model reaction. It has been proven, that sodium fluoride accelerates sintering of limestone and marl, but in the case of pyrite cinder, on the contrary, it slows down. The action of mineralizer comes down to lowering the temperature, appearance of the melt in the mixture that accelerates speed of sintering and contains crystalline quartz and limestone. Under these conditions, favorable conditions are formed for dissolution of CaO and C<sub>2</sub>S. The use of the mineralizer is recommended by calcination of raw mixtures. It has been established that NaF additive in the amount of 2% by the mass accelerates the process of interaction between CaO and SiO<sub>2</sub>, promotes the formation of aluminate and ferrite phases at lower temperatures. X-Ray analysis was conducted, proving that the use of mineralizer is expedient during raw mixture sintering. This work is important for improving Portland cement production technology by reducing the temperature of the decarbonization process through the introduction of the NaF additive.

**Keywords:** Portland cement; limestone; marl; clinker; decarbonization; mineralization.

#### Вступ

Цемент – один із основних матеріалів, що застосовуються у всіх галузях будівництва. Використовується як гідравлічний в'язучий у розчинах і сумішах, необхідних для будівництва монолітних споруд та збірних конструкцій, проведення ремонтних робіт та оздоблювання будинків [1,2]. Портландцемент — найбільш популярний тип цементу, що отримується шляхом спікання шихти [3,4]. При цьому відбуваються наступні фази: декарбонізація (за температури 900 – 1200 °C) та високотемпературне спікання (1300 - 1450 °C) з формуванням клінкерних мінералів – аліту, беліту, алюмінатної і феритної фаз [5]. Аліт – це твердий розчин трикальцієвого силікату C<sub>3</sub>S і невеликої кількості Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO і ін. Беліт є другим за вмістом клінкерним мінералом і являє собою твердий розчин бета-двокальцієвого силікату (b-C<sub>2</sub>S) і невеликих кількостей Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та ін. Він твердіє повільно, однак неухильно нарощує міцність у часі. Алюмінати в клінкері представлені трикальцієвим алюмінатом 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A) – швидкотверднучим

мінералом, що твердне в перші строки з великим тепловиділенням. Алюмоферитна фаза являє собою твердий розчин різних алюмоферитів і в більшості клінкерів близька за складом до чотирьох кальцієвого алюмофериту C<sub>4</sub>AF.

Енергоємність цементної галузі викликає гостру необхідність пошуку способів її зменшення за рахунок зміни технологічних циклів виробництва портландцементів, а також широкого використання місцевих сировинних матеріалів і промислових відходів [6,7].

Типовий клінкер має склад: 67 % CaO, 22 % SiO<sub>2</sub>, 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і 3 % інших компонентів. Ці компоненти рідко містяться в необхідному співвідношенні в якому-небудь виді сировини. Тому, часто доводиться підбирати сировинну суміш, в складі якої більше вапняку, або, навпаки, більше ферум оксиду [8,9]. Двома основними компонентами сировинної маси, як правило, служить вапняк і глина, або вапняк і мергель.

Вапняк – це гірська порода, яка складається з кальцію карбонату і характеризується кристалічною

структурою, високої густини та міцності. Кристалічні вапняки містять кристали кальциту та домішки доломіту, феруму і мангану гідроксиди, глинисті домішки, кварц та ін. Для виробництва портландцементу придатний  $\text{CaCO}_3$  всіх геологічних формацій. Вапняк має переважно дрібнозернисту кристалічну структуру.

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – перший в Україні виробник портландцементів, який використовує вапняк найвищої якості (LL) з родовища в Івано-Франківській обл. [10,11].

Мергель – осадова порода, представляє собою гомогенну суміш кальциту, доломіту, глинистої речовини з домішками тонкого кварцового піску. Мергель – це вапняк з домішками кремнезему і глинистих порід, а також феруму оксид. В геологічному відношенні мергелі відносяться до осадових порід, які утворюються за одночасного осадження кальцію карбонату і глинистих речовин. Твердість його менша, ніж у вапняку і колір змінюється від жовтого до сіро-чорного, залежно від вмісту глинистих сполук.

**Мета роботи:** удосконалення процесу декарбонізації у виробництві портландцементу за рахунок введення мінералізатора під час спікання шихти.

рентгенофазовий аналіз на дифрактометрі Termo Ariel 9800 XT.

### Результати та обговорення

Проведені дослідження (табл.1) показали, що найбільші ВПП у вапняку та мергелю, а в огарку не значні. Ці втрати за рахунок виділення  $\text{CO}_2$  під час нагрівання, тому що вапняк і мергель містять  $\text{CaCO}_3$ , який розкладається.

З цієї таблиці видно, що сировинні матеріали мають домішки. Мергель і вапняк є основним джерелом  $\text{CaO}$ , який входить в процесі технології у цементний клінкер, а в огарку значний вміст  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  $\text{CaO}$  – це основний оксид в складі портландцементного клінкеру [12]. Незначні кількості лужних оксидів (0,2-0,3%) справляють мінералізуючий вплив на процес формування портландцементного клінкеру, що зумовлено зниженням температури утворення і збільшенням кількості рідкої фази, а також прискоренням розчинення беліту в розплаві за рахунок рухомості іонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ . Слід звернути увагу на те, у мергелю і огарку міститься значний вміст  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , яких у вапняку дуже мало. В огарку міститься велика кількість  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Таблиця 1.

### Хімічний склад сировини в % (за масою)

Сировина	ВПП	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$
Вапняк	43,03	1,23	0,412	0,210	54,5	0,340	0,06
Мергель	32,78	18,73	5,09	1,62	40,17	0,70	0,68
Огарок	5,87	12,70	3,33	68,10	1,18	0,42	5,02

### Виклад основного матеріалу

Для дослідження процесу декарбонізації проводились спікання в муфельній печі вапняку та огарку, мергелю та огарку,  $\text{CaCO}_3$  та  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , огарку та  $\text{CaCO}_3$ . В якості модельної реакції розглядали взаємодію кальцій карбонату (ч.д.а.) з ферум (III) оксидом (ч.д.а.). Досліди проводилися впродовж 2 год за ізотермічних умов за 600 - 850° С з інтервалом 50 °С. Співвідношення  $\text{CaCO}_3$  :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  було однакове у всіх зразках – 1:1. ВПП (втрати при прожарюванні) розраховували сумою виділеного  $\text{CO}_2$  та випаруваної  $\text{H}_2\text{O}$ . Одержану під час прожарювання суміш охолоджували в ексікаторі.

Для прискорення реакції розкладу  $\text{CaCO}_3$  та зниження температури та часу перебування сировинної суміші в зоні декарбонізації до сировини, яка входить до складу шихти (сирий цемент), в якості домішки додавали  $\text{NaF}$  в кількості 1% від маси. Рівномірність розподілу домішки, тобто мінералізатора, досягався методом “поступових розведень”. Для встановлення необхідної кількості домішки, досліджували вплив  $\text{NaF}$  в кількості 1-5% від маси. Для контролю результатів було проведено

Спочатку проводили дослідження окремо кожного компоненту шихти в порівнянні з модельною реакцією. Розрахунок ступеня розкладу визначали у % за різницею мас до та після спікання.

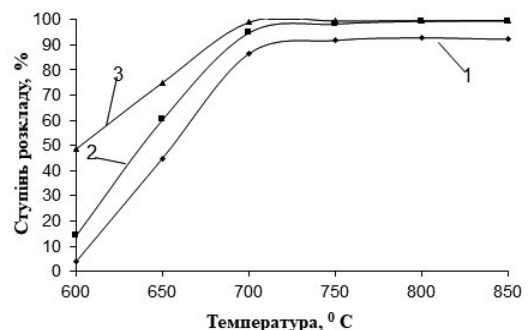


Рис. 1 - Порівняння декарбонізації  $\text{CaCO}_3$  у вапняку, мергелю та у модельній реакції:

1 – вапняк; 2 – модельна реакція; 3 – мергель

Як видно з рис. 1. найшвидше процес декарбонізації відбувається у мергелю, а у вапняку дещо повільніше, порівняно з модельною реакцією. За температури 700 °С відбувається повний розклад  $\text{CaCO}_3$  у всіх зразках. Подальше нагрівання не збільшує ступінь розкладу. Зменшення маси зразків відбувається за рахунок вивільнення  $\text{CO}_2$ .

Аналогічні дослідження впливу температури на ступінь розкладу проводили для огарку та модельної реакції (рис. 2). Огарок не містить кальцію карбонату, він має значну кількість ферум (III) оксиду. Механізм реакції буде відбуватися іншим шляхом [13].

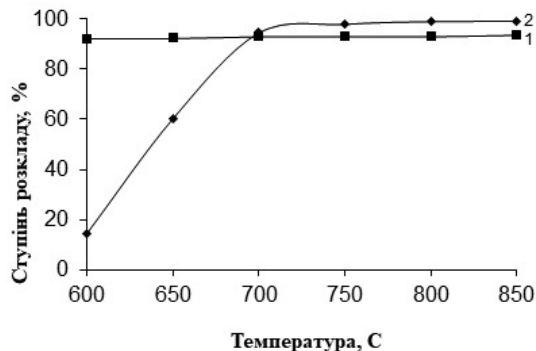


Рис. 2 - Порівняння реакційної здатності заліза (III) оксиду у огарку та у модельній реакції: 1 – огарок; 2 – модельна реакція

Ступінь розкладу модельної реакції за 700 °С становить 94 %, за подальшого збільшення температури він не значно збільшується. Термічний розклад огарку за температури 600°C повністю завершується. Це пояснюється тим, що наявні в огарку і мергелю домішки  $\text{SiO}_2$  прискорюють спікання, тому що утворюються кальцію силікати.

В процесі дослідження впливу домішки натрію фториду на складові шихти, а саме вапняк та мергель (рис. 3), а також огарок (рис.4) виявлено, що NaF доцільно використовувати для прискорення спікання вапняку, а у випадку мергелю та огарку домішка 1% NaF навпаки сповільнює декарбонізацію.

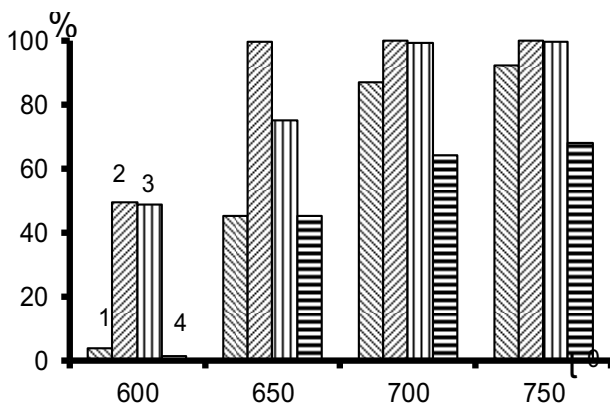


Рис. 3 - Вплив домішки на декарбонізацію вапняку та мергелю в залежності від температури: 1-вапняк; 2- вапняк з NaF; 3-мергель; 4- мергель з NaF

При додаванні домішки, NaF зв'язується з  $\text{SiO}_2$  з виділенням  $\text{SiF}_4$ . Отже, домішка NaF прискорює декарбонізацію тих компонентів, в яких міститься  $\text{CaO}$ .

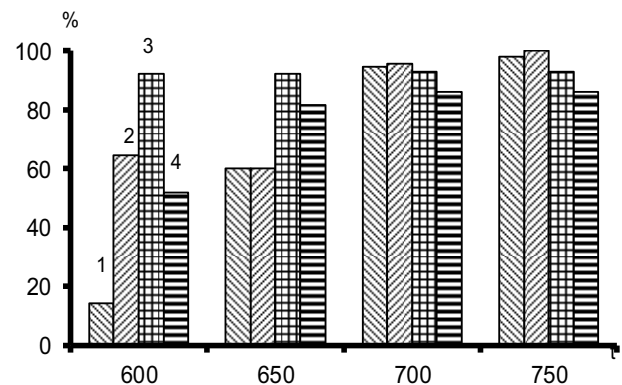


Рис. 4 - Вплив домішки на реакційну здатність модельної реакції та огарку: 1- модельна реакція; 2- модельна реакція +NaF; 3- огарок; 4- огарок з NaF

При внесенні мінералізатора в цементну шихту, склад якої відповідав умовам виробництва портландцементу (вапняк + мергель + огарок), отримано такі результати рис.5.

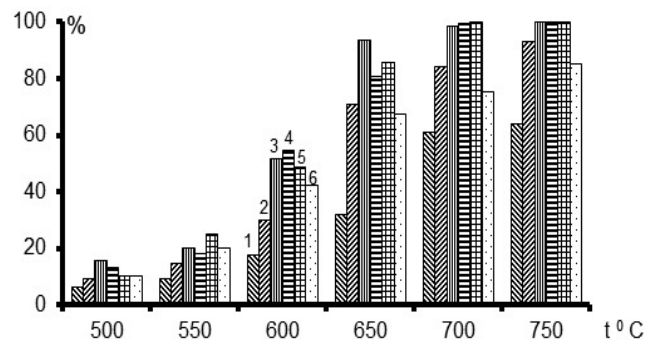


Рис. 5 - Вплив NaF на процес декарбонізації портландцементної шихти: 1- без NaF; 2 - 1% NaF; 3 - 2% NaF; 4 - 3% NaF; 5 - 4% NaF; 6 - 5% NaF

З отриманих результатів видно, що домішку NaF доцільно використовувати в кількості 2 % мас. частин, оскільки більша кількість мінералізатора негативно впливає на процес клінкероутворення.

Проведений рентгенофазовий аналіз трьох зразків цементної шихти: перший зразок «сира шихта», другий – спечений за 750°C, а третій з домішкою NaF отриманий за цієї ж температури (рис.6 а, б, в).

Отримані дифрактограми (рис. 6) підтвердили наші припущення і, як видно, домішка NaF проявила значний вплив на процес декарбонізації. На рис. 6.а показані піки основних вихідних компонентів ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), які входять до складу шихти, яка

поступає в піч для високотемпературного спікання. Кальцію карбонат різних модифікацій може утворюватися в вапняку та мергелю.

За температури  $750^{\circ}\text{C}$  (рис. 6.б) кальцію карбонат розклався на кальцію оксид і карбон (IV) оксид. Деяка частина  $\text{CaO}$  зв'язується з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з утворенням ортоалюмінату кальцію  $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2$ , а також з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  з утворенням  $\text{CaO}\cdot\text{CaFe}_2\text{O}_4$ , тобто за температури  $750^{\circ}\text{C}$  у незначній мірі появляється алюмінатна і феритна фази.

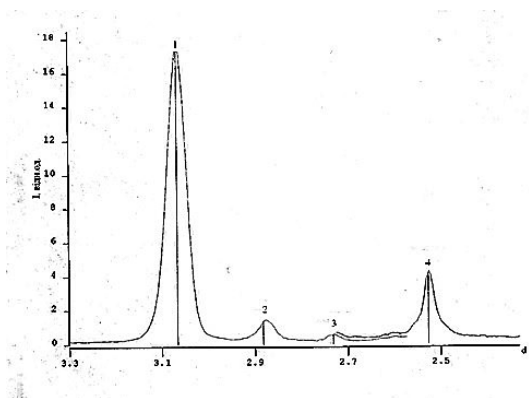


Рис.6.а

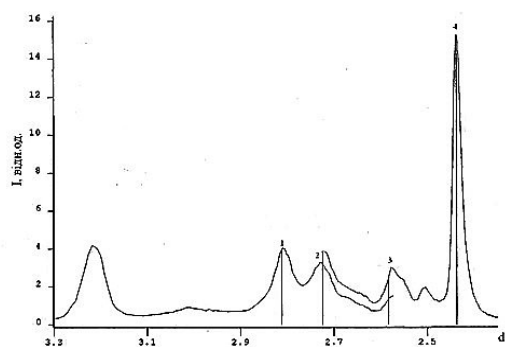


Рис.6.б

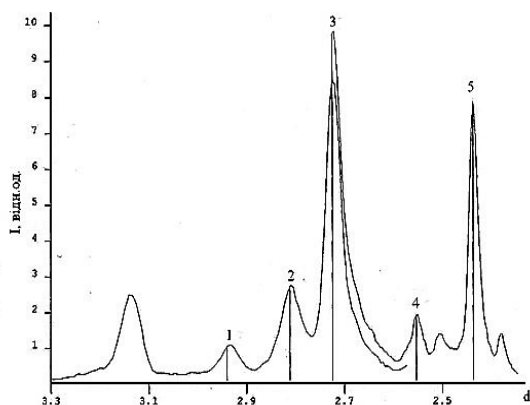


Рис.6.в

**Рис.6** - Вплив мінералізатора на декарбонізацію цементного клінкеру:

6.а – “сирий” зразок, де 1- $\text{CaCO}_3$  модифікації А;  
2- $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 4- $\text{CaCO}_3$  модифікації В;

6.б – спечений за  $750^{\circ}\text{C}$  без домішки: 1- $\text{CaO}\cdot\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ;  
2- $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2$ ; 3- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4- $\text{CaO}$ ;  
6.в – з добавкою  $\text{NaF}$ : 1-кріоліт; 2- $\text{CaO}\cdot\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ;  
3- $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2$ ; 4-пуцолан; 5- $\text{CaO}$

В процесі спікання цементної шихти з мінералізатором за температури  $750^{\circ}\text{C}$  отримана дифрактограма (рис. 6.в) значно відрізняється від попередньої: кількість незв'язаного кальцію оксиду наполовину зменшилась; зросла інтенсивність піку кальцію ортоалюмінату; виявлені мінерали кріоліт і пуцолан.

### Висновки

1. Досліджено реакційну здатність сировини ПрАТ “Івано-Франківськцемент”. Мергель та вапняк реагували з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і за швидкістю реакції було встановлено, що ступінь розкладу мергелю вищий, що свідчить про вищу його активність.

2. Виявлено вплив домішки (1-5 %  $\text{NaF}$ ) на процесі спікання вихідної сировини портландцементу. Мінералізатор варто використовувати у випадку вапняку і модельної реакції; і навпаки,  $\text{NaF}$  значно сповільнює швидкість реакції з мергелем і огарками. Встановлено, що  $\text{NaF}$  доцільно використовувати в кількості 2 %.

3. За допомогою рентгенофазового аналізу доведено, що домішка  $\text{NaF}$  до цементної шихти за  $750^{\circ}\text{C}$ , сприяє процесу декарбонізації та створює сприятливі умови для формування феритної та алюмінатної фаз, а також утворенню мінералів кріоліту та пуцолану.

4. Дана робота має важливе значення для удосконалення технології виробництва портландцементу за рахунок зниження затрат теплоенергії на процес декарбонізації та мінералізації.

### Список літератури

1. Дворкін Л.Й. Будівельні в'язучі матеріали. – Рівне: НУВГП, 2019. 622 с.  
<https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/789684.pdf>
2. Бузник О. О., Шабанова Т. М. Розробка складів білого портландцементу з використанням сировини України *Технологія та інженерія : тези доп. наук.-практ. конф.* Дніпро, 2019. С. 56–59.  
<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b57335bf-27bf-4120-bc19-e3e95d63a4b6/content>
3. Мішук Г., Дудзяний С. Аналітика діяльності підприємств України з виробництва цементу в умовах системних викликів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences.* 2023. № 324 (6). С. 241–246.  
DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-324-6-39>.
4. Круць Т. М., Гев'юк І. М., Саницький М. А. та ін. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості *Будівельні матеріали та вироб.* 2015. № 3–4. С. 16–19.  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii\\_2015\\_3-4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2015_3-4_4).
5. Круць Т. М., Горпинко О. Ф., Гев'юк І. М. та ін. Високоякісні швидкотвердучі портландцементи виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» *Будівельні матеріали та вироб.* 2018. № 1/2 (97). С. 34–37. ISSN 2413-9890.  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii\\_2018\\_34-35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2018_34-35)
6. Кропивницька Т. П. Лужноактивовані композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю та наномодифіковані бетони на їх основі : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів, 2020. 39 с.  
[https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1661/avtoreferatkrp\\_yvnyekatp.pdf](https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1661/avtoreferatkrp_yvnyekatp.pdf)

7. Кропивницька, Т., Саницький, М., Рудінська, Т., та Рихліцька, О. Розробка наномодифікованих швидкотвердіючих клінкер-ефективних бетонів на основі композитних порландцементів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2019, №6 (102). С. 38–48.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111>

8. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 6/6 (84). P. 50–57.

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84175

9. Ahmed A., Etonihu A., Nweze N. Analysis of chemical compositions of Portland cement and limestone from four geopolitical zones of Nigeria *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2022. № 10. P. 113–126.

DOI: 10.4236/jmmce.2022.102009

10. Scrivener K., John V., Gartner E. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry *Cement and Concrete Research*. 2018. №114. P.2–26.

DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

11. Krivenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T. Alkali-sulfate activated blended Portland cements *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 276. P. 9–14.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.276.9>

12. Лацик Н.В. Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря підприємств будівельної промисловості (на прикладі ПрАТ «Івано-Франківськцемент»): дис. ... доктора філософії: 101. Львів, 2025. 142 с.

<https://lpnu.ua/sites/default/files/2025/radaphd/31930/lacik-nataliya-disertaciya-ostatochniy-variant.pdf>

13. Карпець М.В., Лісняк С.С. Дослідження одержання магнітних матеріалів із використанням вапняку, мергелю та огарку. *Вісник Прикарпатського університету. Хімія*. Випуск IV. 2004. С.13-17

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&use\\_r=dMufNyoAAAAJ&citation\\_for\\_view=dMufNyoAAAAJ:abG-DnoFyZgC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&use_r=dMufNyoAAAAJ&citation_for_view=dMufNyoAAAAJ:abG-DnoFyZgC)

#### References

1. Dvorkin L. Y. *Building binding materials*. Rivne : NUWMNRU, 2019. 622 p.

<https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/789684.pdf>

2. Buznyk O. O., Shabanova T. M. Development of white Portland cement compositions using raw materials of Ukraine. *Technology and Engineering : abstracts of the sci.-pract. conf. (Dnipro, 2019)*. Dnipro, 2019. P. 56–59.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b57335bf-27bf-4120-bc19-e3e95d63a4b6/content>

3. Mishchuk H., Dudzianyi S. Analytics of the activities of Ukrainian cement production enterprises under systemic challenges. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2023. No. 324 (6). P. 241–246. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-324-6-39>.

4. Kruts T. M., Heviuk I. M., Sanytsky M. A. et al. Principles of sustainable development strategy in the cement industry. *Building*

*Materials and Products*. 2015. No. 3–4. P. 16–19. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii\\_2015\\_3-4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2015_3-4_4).

5. Kruts T. M., Horpynko O. F., Heviuk I. M. et al. High-quality rapid-hardening Portland cements produced by PJSC "Ivano-Frankivskcement". *Building Materials and Products*. 2018. No. 1/2 (97). P. 34–37. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii\\_2018\\_34-35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2018_34-35)

6. Kropyvnytska T. P. *Alkali-activated composite Portland cements with high early strength and nanomodified concretes based on them* : author's abstract of the diss. ... Dr. of Tech. Sciences : 05.23.05 / Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2020. 39 p.

<https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1661/avtoreferatkropyvnyckatp.pdf>

7. Kropyvnytska, T., Sanytsky, M., Rutsinska, T., & Rykhlitska, O. (2019). Rozrobka nanomodifikovanykh shvydkotverdiuchykh klinker-efektyvnykh betoniv na osnovi kompozytnykh portlandsementiv [Development of nanomodified fast-hardening clinker-efficient concretes based on composite portland cements]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (102)), 38–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185615>

8. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. No. 6/6 (84). P. 50–57.

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84175

9. Ahmed A., Etonihu A., Nweze N. Analysis of chemical compositions of Portland cement and limestone from four geopolitical zones of Nigeria. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2022. No. 10. P. 113–126.

DOI: 10.4236/jmmce.2022.102009

10. Scrivener K., John V., Gartner E. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018. No. 114. P. 2–26.

DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

11. Krivenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T. Alkali-sulfate activated blended Portland cements. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 276. P. 9–14.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.276.9>

12. Latsyk N. V. *Improving the level of environmental safety of atmospheric air at construction industry enterprises (on the example of PJSC "Ivano-Frankivskcement")* : diss. ... PhD : 101. Lviv, 2025. 142 p. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2025/radaphd/31930/lacik-nataliya-disertaciya-ostatochniy-variant.pdf>

13. Karpets M. V., Lisniak S. S. Research on obtaining magnetic materials using limestone, marl, and pyrite cinder. *Bulletin of Precarpathian University. Chemistry*. 2004. Vol. IV. P. 13–17.

[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&use\\_r=dMufNyoAAAAJ&citation\\_for\\_view=dMufNyoAAAAJ:abG-DnoFyZgC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&use_r=dMufNyoAAAAJ&citation_for_view=dMufNyoAAAAJ:abG-DnoFyZgC)

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Карпець Марія Василівна (Karpets Mariia)** – кандидат технічних наук, асистент кафедри біологічної та медичної хімії Івано-Франківського національного медичного університету, м. Івано-Франківськ, Україна, Тел.: +38(097)6263085, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2784-3124>; e-mail : [mkarpets1@gmail.com](mailto:mkarpets1@gmail.com)

**Грейда Ольга Василівна (Greyda Olga)** – учениця 10-В класу Ліцею №5 м. Івано-Франківська, слухачка секції хімії МАНУМ Івано-Франківської міської ради, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2181-7067> e-mail : [greidaola@gmail.com](mailto:greidaola@gmail.com)

Дата надходження статті: 10.03.26 р.

Дата прийняття до друку: 10.04.26 р.