

УДК 666.9.022

ВПЛИВ ДОБАВКИ МЕЛЕНОГО ВАПНЯКУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕКЗОТЕРМІЧНИЙ РОЗІГРІВ ЦЕМЕНТНОВМІЩУЮЧИХ КОМПОЗИЦІЙ**INFLUENCE OF GROUND LIMESTONE ADMIXTURE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS AND EXOTHERMIC HEATING OF CEMENT-BASED COMPOSITIONS**

Момот М.В., аспірант, ORCID: 0009-0008-9718-7022; **Стрельцов К.О.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-5463-7395 (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Momot Maksym, graduate student ORCID: 0009-0008-9718-7022; **Streltsov Kostiantyn, Ph.D.**, Associate Professor ORCID: 0000-0002-5463-7395 (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

Важливою проблемою в практиці виробництва мінеральних в'язучих речовин є створення оптимальних співвідношень портландцементу з мінеральними добавками, зокрема, з меленим вапняком. Такий цемент одержують як сумісним помелом портландцементного клінкеру, гіпсового каменю та вапняку так і змішуванням портландцементу з меленим вапняком. В роботі розглядається питання, які пов'язані з розглядом впливу кількості меленого вапняку (5... 20 %) на насипну та істинну густину, питому поверхню, тепловиділення та міцність цементного каменю при стиску у 3-х, 7-ми та 28-и добовому віці. В процесі дослідження встановлено, що зростання вмісту меленого вапняку у змішаному в'язучому від 0 до 20 % незначно впливає як на насипну так і на істинну густину, знижуючи їх, відповідно, на 1,5 та на 4,0 %. В значно більшій мірі зростання витрати меленого вапняку дасться ознаки на екзотермії в'язучого. Так, при відсутності добавки меленого вапняку до в'язучого максимальний розігрів композиції складає 45,6 °С, а при наявності 20 % вапняку екзотермічний розігрів не перевищує 38,7 °С. Більш того, введення до складу цементу 20 % меленого вапняку викликає зниження (35 %) міцності цементного каменю, особливо в ранньому, 3-х добовому віці. В марочному, 28-и добовому віці, падіння міцності при стиску не перевищує 30 %. В зв'язку з цим стає очевидним необхідність використання суперпластифікуючих добавок в технології виготовлення бетонних сумішей або збільшувати витрату цементу.

An important problem in the practice of producing mineral binders is the development of optimal proportions of Portland cement with mineral additives, particularly ground limestone. Such cement can be produced either by the joint grinding of Portland cement clinker, gypsum stone, and limestone, or by mixing Portland cement with ground limestone. This paper considers issues related to the influence of the amount of ground limestone (5...20 %) on bulk and true density, specific surface area, heat release, and compressive strength of cement stone at 3, 7, and 28 days of hardening.

The study established that an increase in the content of ground limestone in the blended binder from 0 to 20 % slightly affects both bulk and true density, reducing them by 1,5 % and 4 %, respectively. A much more noticeable effect of the increased content of ground limestone is observed in the exothermic behavior of the binder. In particular, in the absence of ground limestone, the maximum heating of the composition reaches 45,6 °C, whereas with 20 % limestone the exothermic temperature rise does not exceed 38,7 °C.

At the same time, the introduction of 20 % ground limestone into the cement composition causes a decrease (35 %) in the compressive strength of the cement stone, especially at the early age of 3 days. At the later age of 28 days, the reduction in compressive strength does not exceed 30 %. In this regard, it becomes evident that the use of superplasticizing admixtures in the technology of concrete mix production is necessary, or the cement consumption should be increased.

Ключові слова: портландцемент, мінеральна добавка, вапняк, тепловиділення, структуроутворення, цементний камінь.

Portland cement, mineral additive, limestone, heat release, structure formation, cement stone.

Вступ. В технології виготовлення портландцементу II-го типу широке розповсюдження одержав портландцемент з використанням в якості мінеральної добавки до нього меленого вапняку (до 20 % за масою). Такий цемент одержують як сумісним помелом портландцементного клінкеру з вапняком та добавкою двоводного гіпсу так і за рахунок ретельного змішування портландцементу з меленим вапняком. В цьому разі заміна частини портландцементу меленим вапняком сприяє не тільки зниженню ціни на в'язуче, але і сприяє одержанню в'язучого зі зниженим тепловиділенням, що позитивно відображається на властивостях бетонних та залізобетонних виробів, особливо масивних. Більш того, зростання вимог до охорони довкілля вимагає від цементників все більших зусиль до розширення об'ємів виробництва саме таких цементів.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що тонкомелені мінеральні добавки до портландцементу приймають участь у структуроутворенні цементного каменю за рахунок утворення додаткової поверхні, на якій висаджуються

продукти новоутворень [1,2]. Вплив мінеральних добавок на процес гідратації та структуроутворення можливо коригувати їх концентрацію та хімічною активністю[3]. Для мінеральних добавок з відносно низькою хімічною активністю важливу роль відіграє поверхнева енергія часток. Експериментально встановлено, що вона зростає із зменшенням розміру часток. Зростання питомої поверхні в'язучого забезпечує зростання максимальної міцності цементного каменю, та його довговічність[4]. Підвищення міцності цементного каменю та бетону на його основі за рахунок використання мінеральних наповнювачів досягається тим, що тонкодисперсні частки мінеральної добавки, які розташовуються всередині зерен цементу, утворюють центри кристалізації, прискорюючи при цьому процес структуроутворення. Формування таких центрів кристалізації здійснюється на реакційних поверхнях тонкодисперсної мінеральної добавки, що позитивно відображається на механічних характеристиках цементного каменю[5].

Серед різновидів мінеральних добавок до цементів загально-будівельного призначення достатньо популярними є тонкомелені карбонатні добавки, які дозволяють покращити структуру цементного каменю, активуючи при цьому реакції гідратації з утворенням гідрокарбоалюмінатів кальцію[6,7]. На сьогоднішній день в країнах ЄС є проблема, яка пов'язана із дефіцитом граншлаку у виробництві цементу[8]. Вирішення цієї проблеми можливо за рахунок використання вапняку в якості альтернативного складового компоненту цементу[9]. Вивченню впливу тонкомелених вапняків на властивості бетонів розглядаються у роботах як вітчизняних так і закордонних вчених[10]. Тонкомелений вапняк сприяє зменшенню пористості між відносно грубими зернами портландцементу, що приводить до збільшення щільності цементного каменю. Промислове виробництво портландцементу з вапняком (ПЦ II/A-B) передбачає максимальну витрату вапняку до в'язучого, яка складає 20 %. У зв'язку з цим представляє інтерес вивчити вплив кількості вапняку у портландцементі, а саме 5, 10, 15 і 20 %, на фізико-механічні характеристики як цементного тіста так і каменю на його основі.

Постановка мети дослідження. Мета запропонованої роботи полягає у визначенні впливу меленого вапняку (5...20 %) до портландцементу на фізико-механічний характеристики цементного тіста та каменю на його основі.

Методи дослідження. Розглянуті у статті питання пов'язані з розглядом впливу меленого вапняку у кількості 20 % від маси портландцементу на насипну та істинну густину, а також на питому поверхню в'язучого, тепловиділення та міцність цементного каменю при стиску у віці 3-х, 7-ми та 28-и діб твердіння. Для визначення впливу кількості меленого вапняку у в'язучому на міцність при стиску виготовлялися зразки-балочки розміром 4×4×16 см із цементно-вапнякових композицій заданої рухливості (розплив конусу композиції складав 120 мм).

Результати досліджень. В дослідженнях використовувався портландцемент ПЦ-I, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010. «Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови». Мінеральний склад портландцементного клінкеру включає в себе, мас. %: С3S – 55...60; С2S – 15...20; С3А – 7...10; С4АF – 10...15. Роль карбонатної добавки до цементу виконував мелений вапняк Одеського кар'єру «Південь». Вапняк перед застосуванням висушувався до постійної маси і розмелювався до питомої поверхні 315 м²/кг. В'язуче отримували ретельним змішуванням портландцементу з віддозованою кількістю мelenого вапняку.

Визначення впливу добавки мelenого вапняку до цементу на насипну густину змішаного цементу свідчить про те, що зростання вмісту вапняку у в'язучому приводить до зменшення його насипної густини, табл. 1.

Таблиця 1

Насипна густина змішаного цементу, кг/м³

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	100
Мелений вапняк, %	0	5	10	15	20	0
Насипна густина змішаного цементу, кг/м ³	982	978	975	972	969	940

Що стосується впливу добавки мelenого вапняку на істинну густину змішаного цементу, то слід відмітити, що введення в цемент до 20 % мelenого вапняку викликає зменшення істинної густини з 3,02 г/см³ (вапняк відсутній) до 2,95 г/см³ (10 % мelenого вапняку). Зростання вмісту мelenого вапняку до 20 % викликає зниження істинної густини до 2,90 г/см³, табл. 2.

Таблиця 2

Істинна густина змішаного цементу, г/см³

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	100
Мелений вапняк, %	0	5	10	15	20	0
Істина густина змішаного цементу, г/см ³	3,02	2,98	2,95	2,93	2,90	2,62

Вміст мelenого вапняку відображається також і на питомій поверхні змішаного в'язучого. Зростання кількості вапняку від 0 до 20 % викликає зниження його питомої поверхні з 382 м²/кг до 369 м²/кг тобто майже на 10 %, табл. 3.

Таблиця 3

Питома поверхня суміші портландцементу і вапняку, м²/кг

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	100
Мелений вапняк, %	0	5	10	15	20	0
Питома поверхня суміші портландцементу і вапняку, м ² /кг	382	380	375	372	369	315

В практиці визначення екзотермії цементу найбільше розповсюдження одержав термосний метод. Одержані результати свідчать про те, що керуючи вмістом меленого вапняку у портландцементі можливо в широкому діапазоні керувати екзотермією змішаного в'язучого.

Підтвердженням впливу вмісту меленого вапняку у портландцементі на кінетику його екзотермічного розігріву є експериментальні дані, наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

Екзотермічний розігрів цементно-водних композицій з добавкою меленого вапняку

№	Вміст меленого вапняку у змішаному в'язучому, %	Початкова температура композиції, °С	Екзотермічний розігрів, °С, через годин						
			2	4	6	8	10	12	14
1	0	20	20,7	21,8	28,0	38,0	45,6	45,0	44,5
2	5	20	20,5	21,2	27,5	36,1	44,2	43,3	42,0
3	10	20	20,5	20,8	25,0	33,5	42,0	40,6	40,8
4	15	20	20,3	20,7	24,2	32,0	40,0	39,5	38,1
5	20	20	20,2	20,5	23,0	30,0	37,8	38,7	37,0

Графічне відображення впливу вмісту меленого вапняку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементного тіста наведено на рис. 1.

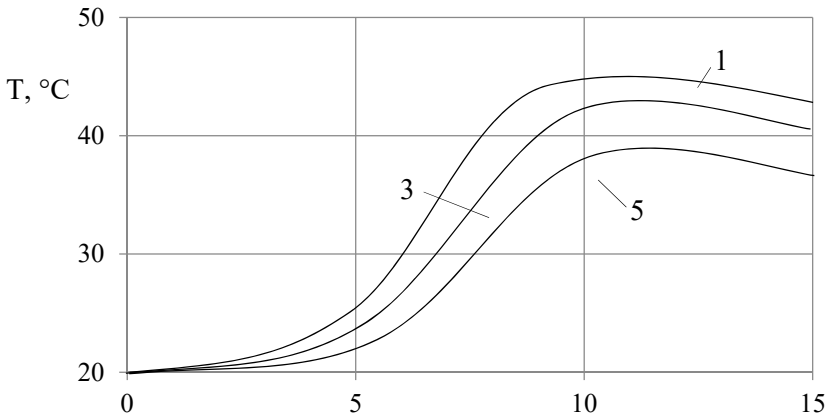


Рис. 1. Вплив вмісту меленого вапняку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементних композицій: τ , ГОД
1, 3, 5 – цемент з вмістом меленого вапняку відповідно 0 %, 10 % і 20 %

В табл. 5 приведені дані, які відображають інтенсивність екзотермічного розігріву цементної композиції з вмістом меленого вапняку в ній від 0 до 20 %.

Таблиця 5

Інтенсивність екзотермічного розігріву портландцементу з добавкою меленого вапняку

№	Портланд цемент, %	Мелений вапняк, %	Інтенсивність екзотермічного розігріву, °С/год, через годин						
			2	4	6	8	10	12	14
1	100	0	0,35	0,60	3,15	5,00	3,80	-	-
2	95	5	0,25	0,35	3,15	4,30	4,10	-	-
3	90	10	0,25	0,15	2,10	4,20	4,20	-	-
4	85	15	0,15	0,20	1,70	3,90	4,00	-	-
5	80	20	0,10	0,20	1,30	3,50	3,90	0,50	-

Експериментальні дані свідчать про те, що зростання вмісту меленого вапняку у в'язучому в даному інтервалі приводе як до зниження максимальної інтенсивності розігріву композиції (від 5 °С/год до 3,9 °С/год) так і до її відтермінування (від 8 год до 10 год).

Заключним етапом дослідження було визначення впливу добавки меленого вапняку до цементу (0...20 %) на міцність на стиск цементного каменю у віці 3-х, 7-ми, 14-и, 21-ї та 28-и діб твердіння. Склади цементно-вапнякових композицій наведені у табл. 6.

Таблиця 6

Міцність на стиск цементного каменю з добавкою вапняку

№	Цемент, %	Вапняк	В/Т	Терміни твердіння зразків, МПа				
				3 доби	7 діб	14 діб	21 доба	28 діб
1	100	0	0,335	25,3	37,9	47,5	52,5	54,0
2	95	5	0,335	23,7	35,5	45,0	49,5	51,9
3	90	10	0,335	22,0	34,2	41,5	47,5	49,0
4	85	15	0,335	19,0	28,7	35,9	42,1	44,5
5	80	20	0,335	16,6	26,1	32,5	37,1	40,5

Графічне відображення впливу терміну твердіння та кількості меленого вапняку на міцність цементного каменю наведено на рис. 2.

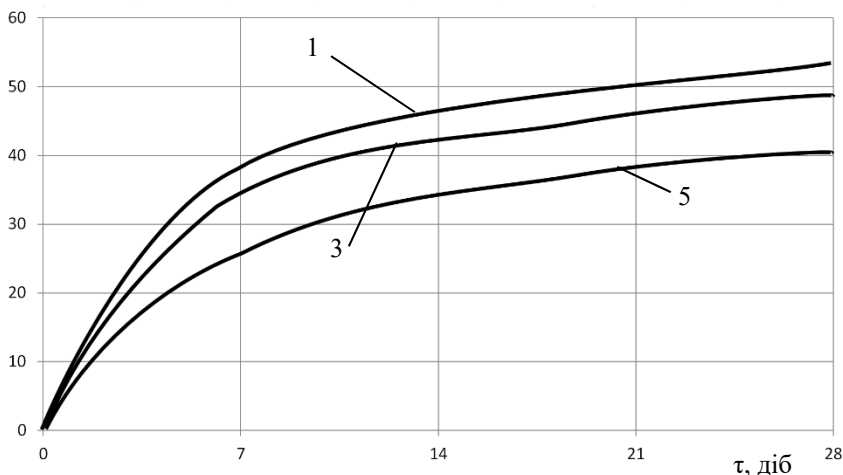


Рис. 2. Вплив терміну твердіння на міцність цементного каменю:
1, 3, 5 – вміст меленого вапняку в складі змішаного в'язучого 0, 10 та 20 % відповідно

Аналізуючи експериментальні дані, наведені у табл. 6, слід відзначити, що введення до портландцементу меленого вапняку викликає зниження міцності цементного каменю. Слід відмітити, що процент зниження міцності цементного каменю зменшується із зростанням терміну твердіння. Так, якщо для цементного каменю з 20 %-ою витратою меленого вапняку в 3-х добовому віці міцність при стиску R_{ct} не перевищує 66 % (16,6 МПа) від контролю (25,3 МПа), то в 7-и добовому віці вона складає 69 %, а в 28-и доповому віці не більше 25 % від контролю.

Висновки і рекомендації: 1. Зростання вмісту (за масою) меленого вапняку в портландцементі від 0 до 20 % викликає зниження насипної густини в'язучого з 980 до 970 $\text{кг}/\text{м}^3$, а істинної густини – з 3,02 до 2,90 $\text{г}/\text{см}^3$.

2. Введення до складу портландцементу меленого вапняку викликає зниження максимальної величини екзотермічного розігріву з 45,9 °С (мелений вапняк відсутній) до 38,7 °С (вміст меленого вапняку у в'язучому складає 20 %).

3. Введення до складу цементу меленого вапняку (20 %) викликає зниження міцності цементного каменю в 3-х добовому віці на 35 %; в 7-и добовому - на 31 %, а в 28-и добовому віці на 25 %. Одержані результати свідчать про те, що зростання терміну твердіння сповільнює падіння міцності цементного каменю за рахунок добавки меленого вапняку.

1. Кривенко П.В., Петропавловський О.М., Гелевера О.Г. Цементи з високим вмістом мінеральних домішок природного і техногенного походження. Будівництво України. 2006. №1.С. 39-45.

Kryvenko P.V., Petropavlovskiy O.M., Helevera O.H. Tsementy z vysokym vmistom mineralnykh domishok pryrodnoho i tekhnogennoho pokhodzhennia. Budivnytstvo Ukrainy. 2006. №1.S. 39-45.

2. Гуняк О.М. Пуцоланові добавки до портландцементів транспортного будівництва. Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. №877. 2018. С.88-93.

Huniak O.M. Putsolanovi dobavky do portlandtsementiv transportnoho budivnytstva. Visnyk NU «Lvivska politehnika». Teoriia i praktyka budivnytstva. №877. 2018. S.88-93.

3. Котів Р.М., Кропивницька Т.П., Саницький М.А. Низькоенергоємні декоративні цементи та будівельні штукатурні розчини на їх основі. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26. С.217-224.

Kotiv R.M., Kropyvnytska T.P., Sanytskyi M.A. Nyzkoenerhoiemni dekaratyvni tsementy ta budivelni shtukaturni rozchyny na yikh osnovi. Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy. 2013. Vyp. 26. S.217-224.

4. Мюллер К. Характеристики композиционных цементів. Cement Interna Tional. Киев.2008. №1.С.44-56.

Miuller K. Kharakterystyky koprozysyonnykh tsementiv. Cement Interna Tional. Kyev.2008. №1.S.44-56.

5. Козлова В.В., Манюха А.Ш. Влияние карбонатосодержащих добавок на свойства композиционных цементов. Цемент и его применение. 2012. №3. С. 53-57.

Kozlova V.V., Maniukha A.Sh. Vlyianyie karbonatosoderzhashchykh dobavok na svoistva kompozysyonnykh tsementov. Tsement y ego pryumenenye. 2012. №3. S. 53-57.

6. Химические и минеральные добавки в бетон/Под. Общ. Редакцией Умерова-Маршак А.В. Харків. 205.С.86-91.

Khymycheskye y myneralnye dobavky v beton/Pod. Obshch. Redaktsyei Umerova-Marshaka A.V. Kharkiv. 205.S.86-91.

7. Чепурна С.М. Бетон підвищеною водонепроникністю та корозійною стійкістю з добавкою високодисперсної крейди. Дис. на здобуття наукового ступеня к. т. н. Харків. 2018. 202 с.

Cherpurna S.M. Beton pidvyshchenoiu vodonepronyknosti ta koroziinoi stiikosti z dobavkoiu vysokodypersnoi kreidy. Dys. na zdobuttia naukovooho stupenia k. t. n. Kharkiv. 2018. 202 s.

8. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку. Будівельні матеріали та виробі. 2019. №1-2 (100). С. 18-24.

Sanytskyi M.A., Kropyvnytska T.P., Heviuk I.M. Shvydkotverdnuchi portlandtsementy z dobavkoiu vapniaku. Budivelni materialy ta vyroby. 2019. №1-2 (100). S. 18-24.

9. Хозин В.Г., Хохряков О.В. Карбонатные цементы низкой водопотребности. Технология бетонов. 2009. №11-12. С. 10-12.

Khozyn V.H., Khokhriakov O.V. Karbonatnye tsementy nyzkoj vodopotrebnosti. Tekhnolohyia betonov. 2009. №11-12. S. 10-12.

10. Саницький М.А. Модифіковані композиційні цементи/ М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Т.С. Марків// Львів: Вид-во Львів. Політехніки.2010.132 с.

Sanytskyi M.A. Modifikovani kompozytsiini tsementy/ M.A. Sanytskyi, Kh.S. Sobol, T.S. Markiv// Lviv: Vyd-vo Lviv. Politekhniky.2010.132 s.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	31.03.2026	Received	31.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	10.04.2026	Received in revised form	10.04.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.