

УДК 666.972

ВПЛИВ СТУПІНЧАСТИХ РЕЖИМІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

Т. С. Кугаєвська, В. П. Сопов

ВЛИЯНИЕ СТУПЕНЧАТЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

Т. С. Кугаевская, В. П. Сопов

THE EFFECT OF STEPPED HEAT TREATMENT MODES ON THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

T. Kugaevska, V. Sopor

Проведено за ступінчастими режимами теплової обробку гідроізольованих зразків із важкого бетону з використанням нагрітого повітря. Зазначено, що ці експерименти є складовою частиною досліджень способу теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії (вироби знаходяться в закритих формах). Наголошено, що в хмарні дні та в холодний період року використовується електричний повітрянагрівач.

Підкреслено: в певних випадках порівняно нетривалою є періодична хмарність упродовж дня, і можна припустити, що в таких умовах незначним буде зменшення інтенсивності твердіння бетону внаслідок перерви в надходженні нагрітого повітря до камери.

Зазначено, що моделювання процесу нагрівання повітря в колекторі сонячної енергії здійснено за допомогою інфрачервоного нагрівача.

З'ясовано, що досліджувані ступінчасті режими теплової обробки нагрітим повітрям важкого бетону надають можливість у віці 1 доби в 1,59...1,76 разу збільшити міцність бетону на стиск порівняно з твердінням у повітряних умовах. Показано, що чим більшою є інтенсивність нагрівання бетону досліджуваного складу впродовж першої години теплової обробки (в межах від 4 до 8 °C), тим більшою є міцність на стиск бетону у віці 1 доби.

Рекомендовано з метою економії енергоресурсів в теплий період року при виникненні нетривалої періодичної хмарності не використовувати електричний повітрянагрівач.

Установлено, що в досліджуваних випадках температура бетону після теплової обробки за ступінчастими режимами через 4 год 15 хв становила 30 °C, а температура бетону через 22 год твердіння в камері дорівнювала 26,3...27,2 °C. Зазначено: така температура бетону наприкінці терміну твердіння в камері свідчить про те, що відбувається порівняно інтенсивна гідратація цементу. Рекомендовано для аналогічних випадків аналізувати

доцільність подовження періоду термосного твердіння бетону в камері

Ключові слова: бетон важкий, геліотермообробка, нагріте повітря, ступінчасті режими, міцність на стиск

Проведена по ступенчатим режимам тепловая обработка гидроизолированных образцов из тяжёлого бетона с использованием нагретого воздуха. Указано, что эти эксперименты являются составляющей частью исследований способа тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий с использованием воздуха, нагретого в коллекторе солнечной энергии (изделия находятся в закрытых формах). Отмечено, что в облачные дни и в холодный период года используется электрический воздушнонагреватель.

Подчёркнуто: в определённых случаях сравнительно непродолжительной будет периодическая облачность в течение дня, и можно предположить, что в таких условиях незначительным будет уменьшение интенсивности твердения бетона вследствие перерыва в поступлении нагретого воздуха в камеру.

Указано, что моделирование процесса нагревания воздуха в коллекторе солнечной энергии осуществлено с использованием инфракрасного нагревателя.

Определено, что исследуемые ступенчатые режимы тепловой обработки нагретым воздухом тяжёлого бетона дают возможность в 1,59...1,76 раза увеличить прочность бетона при сжатии в сравнении с твердением в воздушных условиях. Показано, что чем больше интенсивность нагревания бетона исследуемого состава в течение первого часа тепловой обработки (в пределах от 4 до 8 °С), тем больше прочность при сжатии бетона в возрасте 1 суток.

Рекомендовано с целью экономии энергоресурсов в тёплый период года при возникновении непродолжительной периодической облачности не использовать электрический воздушнонагреватель.

Установлено, что в исследуемых случаях температура бетона после тепловой обработки по ступенчатим режимам через 4 ч 15 мин была 30 °С, а температура бетона через 22 ч твердения в камере была 26,3...27,2° С. Указано: такая температура бетона при окончании твердения в камере свидетельствует о том, что происходит сравнительно интенсивная гидратация цемента. Рекомендовано для аналогичных случаев анализировать целесообразность продления периода термосного твердения бетона в камере

Ключевые слова: бетон тяжелый, гелиотермообработка, нагретый воздух, ступенчатые режимы, прочность на сжатие

1. Вступ

Ефективність використання бетону визначається економією матеріальних і енергетичних ресурсів при забезпеченні відповідної якості та застосуванні екологічно чистих технологічних процесів.

Найбільш енергоємним технологічним процесом при виготовленні бетонних і залізобетонних виробів є тепла обробка, яка здійснюється з метою прискорення їх твердіння. Постійне зростання вартості енергоресурсів змушує

виробників виключати термообробку з процесу виробництва. У результаті збільшується витрата в'язучого або використовується цемент більш високої якості, застосовуються спеціальні добавки – прискорювачі твердіння, збільшується необхідність виділення великих площ для дозрівання бетонних і залізобетонних виробів, а також зменшується оборотність форм.

Все це вимагає від виробників пошуку нових ефективних способів теплової обробки вказаних виробів. Одним із шляхів зменшення собівартості бетонних і залізобетонних виробів (при збереженні експлуатаційних властивостей) є використання сонячної енергії в поєднанні з різними видами хімічних добавок. Але переважна більшість способів геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів призначена для впровадження в умовах спекотного клімату.

Необхідно створювати такі способи комбінованої геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів, які можуть бути впроваджені для низки виробів у різних кліматичних умовах.

Експерименти, відображені в цій роботі, є складовою частиною досліджень способу теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в електричному повітрянагрівачі (вироби знаходяться в закритих формах). Цей спосіб призначено для впровадження не тільки в умовах спекотного клімату. Наведені в роботі експерименти спрямовані на пошук додаткових шляхів економії енергії при застосуванні досліджуваного комбінованого способу геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У статтях [1–3] показано результати досліджень оптимальних режимів геліотермообробки виробів і конструкцій з різних видів бетонів із застосуванням проміжного теплоносія в кліматичних умовах Республіки Казахстан. У статті [1] зазначено, що в досліджуваних умовах за добу бетон набирає 50...60 % від проектної міцності, а в особливо спекотні дні міцність бетону за добу досягає 70...75 %. У цій статті наголошено, що вироби після розпалублення розташовують на складі і накривають брезентом або поліетиленовою плівкою. У статті [4] доведено ефективність застосування комбінованої цілорічної геліотермообробки залізобетонних виробів в кліматичних умовах Узбекистану. У статті [5] наведено експериментальні дослідження стосовно використання сонячної енергії для прискорення твердіння бетонних виробів. Цей спосіб передбачає на першому етапі застосування в якості теплоносія пари. Сонячна енергія використовується після розпалублення виробів. У статті незначена необхідність гідроізоляції виробів при їх зберіганні після розпалублення.

Комбіновані способи геліотермообробки виробів і конструкцій, показані в статтях [1–4], призначені для впровадження в умовах спекотного клімату. Спосіб використання сонячної енергії для прискорення твердіння бетонних виробів, наведений в статті [5], може бути впроваджений за обґрунтуванням в довільних кліматичних умовах.

У публікаціях [6–9] відображено напрацювання стосовно комбінованого способу геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів (які знаходяться в закритих формах) із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в електричному повітрянагрівачі. Указаний спосіб може бути застосований за техніко-економічним обґрунтуванням у місцевостях з різним кліматом. У статтях [7, 8] наведено експериментально обґрунтовані рекомендації стосовно недоцільності впровадження попереднього витримування бетону при досліджуваних м'яких режимах теплової обробки. У статті [9] показано особливості теплової обробки плит бетонних тротуарних повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії, в умовах міста Полтава (Україна). Експериментально встановлено, що тепла обробка за м'якими режимами покращує структуру цементного каменю, сприяє формуванню дрібнодисперсних, більш міцних новоутворень [6–10]. Дослідження вказаного комбінованого способу геліотермообробки були проведені при безперервному надходженні до камери нагрітого повітря впродовж вибраного терміну (з подальшим термосним твердінням бетону).

Спільною перевагою низки способів геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів відносно традиційних способів їх теплової чи тепловологісної обробки є не тільки економія енергоресурсів, а також м'які режими, при яких відбувається прискорення їх твердіння [1–4, 6–9].

При геліотермообробці особливий вплив на температуру твердіння виробів набуває наявність теплоти гідратації цементу.

Дослідження тепловиділення цементу при гідратації здійснюються на протязі низки десятиліть. Серед таких напрацювань – результати, відображені в публікаціях [11–17]. У роботах [11, 12] показано вплив на теплоту гідратації цементу різних домішок: золи та інш. [11]; діатоміту, молотої цегли та інш. [12]. У публікації [13] проаналізовано періодичність тепловиділення в системі цемент-вода при гідратації і твердінні. У статті [14] обґрунтована відповідність інтенсивності тепловиділення цементного тіста і кінетики набору міцності. У статтях [15, 16] показано вплив на теплоту гідратації цементу: пластифікаторів [15, 16]; прискорювачів тужавлення, комплексних добавок [16]. У статті [17] наведено результати напрацювань стосовно визначення теплоти гідратації цементу при твердінні бетонної суміші. Дослідження тепловиділення цементу при гідратації сприяли розвитку теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів з використанням тільки теплоти гідратації цементу. Такі напрацювання відображено, наприклад, у статті [18].

Загальною проблемою, яка стосується будь-якого із способів геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів, є різна інтенсивність надходження сонячної енергії до поверхні теплообміну як впродовж року, так і впродовж доби. Застосування додаткового (резервного) джерела теплоти дозволяє розв'язати цю проблему [1–9].

Розвиток способів геліотермообробки бетонних виробів також потрібно спрямовувати на використання ефективних колекторів сонячної енергії, відображених, наприклад, у статтях [19, 20].

В умовах виникнення нетривалої періодичної хмарності доцільно вишукувати можливості зменшення енергетичних витрат, пов'язаних з використанням додаткового джерела теплоти.

Це стосується і досліджуваного комбінованого способу геліотермообробки бетонних і залізобетонних виробів [6–9]. З метою економії енергоресурсів можна запропонувати не застосовувати електричний повітрянагрівач під час короткочасної хмарності.

Виникає необхідність у визначенні низки показників при порівняно неінтенсивній та порівняно нетривалій тепловій обробці бетону, яка обумовлена наявністю періодичної хмарності. Серед цих показників:

- температурні умови твердіння бетону впродовж теплової обробки нагрітим повітрям та під час подальшого термосного твердіння (важливе значення для створення температурного режиму твердіння бетону має інтенсивність тепловиділення при гідратації цементу, яка обумовлюється низкою факторів, частину яких відображено в публікаціях [11–18]);

- кінетика набору міцності бетоном і т. і.

Але відповідні дослідження складно провести в натурних умовах, оскільки не завжди можна передбачити погодні умови. Тому доцільно спочатку провести низку експериментів з використанням лабораторної установки, яка надасть можливість моделювання ступінчастих режимів теплової обробки нагрітим повітрям.

Слід підкреслити, що напрацювання стосовно ступінчастих режимів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії, доцільно застосовувати для аналізу додаткової економії енергоресурсів при довільних способах геліотермообробки цих виробів.

3. Ціль і завдання досліджень

Метою роботи є аналіз впливу на міцність важкого бетону при стиску досліджуваних ступінчастих режимів теплової обробки нагрітим повітрям.

Для досягнення вказаної мети були поставлені такі завдання:

- провести теплову обробку гідроізованих зразків із важкого бетону досліджуваного складу нагрітим повітрям за обумовленими ступінчастими режимами (з подальшим термосним твердінням) і визначити температуру бетону наприкінці перерви в подачі теплоносія до камери та при завершенні термосного твердіння в камері;

- визначити: міцність на стиск важкого бетону у віці 1 та 28 діб, твердіння якого відбувається з використанням теплової обробки та без теплової обробки; міцність на стиск важкого бетону, твердіння якого відбувається в нормальних температурно-вологісних умовах упродовж 28 діб;

- з'ясувати вплив на міцність важкого бетону досліджуваного складу у віці 1 та 28 діб перерви в подачі теплоносія до камери після першої години теплової обробки та інтенсивності нагрівання бетону впродовж першої години теплової обробки відповідно до досліджуваних ступінчастих режимів;

- надати рекомендації стосовно доцільності застосування ступінчастих

режимів теплової обробки важкого бетону з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії.

4. Матеріали та методи досліджень теплової обробки важкого бетону нагрітим повітрям

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

У роботі застосовувались портландцемент ПЦ І-500-Н (ДСТУ Б В.2.7-46:2010), пісок кварцовий з модулем крупності $M_k=1$, щебінь гранітний фракції 5–10 мм, хімічна добавка – прискорювач твердіння. Склад бетону: 1:1,55:2,65; $\rho_c=420,8 \text{ кг/м}^3$; $\rho_p=652,3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{щ}=1116,3 \text{ кг/м}^3$; $V_c/V_p=0,44$.

Теплова обробка бетону в сонячні дні здійснюється з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії. У хмарні дні та в холодний період року у виробничих умовах потрібно застосовувати електричний повітрянагрівач. Лабораторні дослідження в такі періоди відбуваються з використанням повітря, нагрітого в колекторі енергії за допомогою інфрачервоного обігрівача (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторна установка для досліджень теплової обробки бетону з використанням нагрітого повітря [6–8]

Указана лабораторна установка була використана при проведенні низки досліджень теплової обробки бетонних зразків та плит бетонних тротуарних. Частина з цих експериментів відображена у [6–8].

4.2. Методика досліджень теплової обробки важкого бетону нагрітим повітрям

Теплова обробка важкого бетону відбувалася за таких умов:

- застосовано зразки із важкого бетону (10×10×10 см); для гідроізоляції зразків використано поліетиленову плівку;
- попереднє витримування бетону не здійснювалося (враховано відповідні рекомендації [7, 8]);

– тривалість ступінчастих режимів теплової обробки бетону нагрітим повітрям становила 4 год 15 хв; за цей термін бетон нагрівався до температури 30 °С; у роботі свідомо прийнято порівняно нетривалий термін теплової обробки бетону нагрітим повітрям;

– загальна тривалість твердіння бетону в лабораторній камері – 22 год;

– варіюються: інтенсивність нагрівання бетону впродовж першої години теплової обробки (в межах від 4 до 8 °С); тривалість перерви в надходженні теплоносія до камери (перерва відбувається після першої години теплової обробки і змінюється в межах від 0,5 до 1,5 годин).

Після твердіння в лабораторній камері бетонні зразки зберігались в повітряних умовах протягом 1 або 28 діб, а також в нормальних температурно-вологісних умовах протягом 28 діб.

У проведених дослідженнях моделювання процесу теплової обробки бетону повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії, було здійснено з використанням інфрачервоного обігрівача. Це надає можливість:

– проводити експерименти в довільний період року;

– регулювати інтенсивність нагрівання бетону;

– планувати тривалість і періодичність перерв у подачі теплоносія до камери.

Вибір меж варіювання інтенсивності підвищення температури бетону впродовж першої години та рішення стосовно температури бетону наприкінці періоду теплової обробки нагрітим повітрям прийнято з урахуванням попередніх експериментальних досліджень теплової обробки бетонних зразків і плит бетонних тротуарних з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії. Частина вказаних досліджень відображена у [6, 9].

Інтервали варіювання інтенсивності підвищення температури бетону впродовж першої години (Δt_1 , °С) і тривалість перерви в надходженні теплоносія до камери після першої години теплової обробки (τ_p , год) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Інтервали варіювання досліджуваних факторів

Код	Значення коду	Досліджувані фактори	
		x_1 (Δt_1 , °С)	x_2 (τ_p , год)
Основний рівень	0	6	1,0
Інтервал варіювання	x_i	2	0,5
Верхній рівень	+	8	1,5
Нижній рівень	–	4	0,5

Матрицю планування досліджень ступінчастих режимів теплової обробки бетону показано в табл. 2.

Матриця планування досліджень

Точка плану	Значення факторів			
	кодований вигляд		натуральний вигляд	
	x_1	x_2	x_1 (Δt_1 , °C)	x_2 (τ_n , год)
1	+1	+1	8	1,5
2	+1	-1	8	0,5
3	-1	+1	4	1,5
4	-1	-1	4	0,5
5	+1	0	8	1,0
6	-1	0	4	1,0
7	0	+1	6	1,5
8	0	-1	6	0,5
9	0	0	6	1,0
10	0	0	6	1,0
11	0	0	6	1,0

При плануванні експериментів та їх математично-статистичній обробці використано рекомендації, які застосовано при виконанні експериментальних досліджень, відображених у публікаціях [6–8].

Визначення міцності на стиск бетонних зразків і обробка результатів експериментів здійснювалися відповідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

5. Результати досліджень впливу на міцність важкого бетону теплової обробки нагрітим повітрям

У проведених досліджах:

- середня початкова температура бетонної суміші становила 16,8 °C;
- температура бетону наприкінці теплової обробки нагрітим повітрям дорівнювала 30 °C;
- максимальне зниження температури бетону наприкінці перерви в подачі теплоносія: 0,2 °C (точка плану 3);
- мінімальна температура бетону після 22 год твердіння в камері становила 26,3 °C (точка плану 3); максимальна температура бетону після 22 год твердіння в камері дорівнювала 27,2 °C (точка плану 2).

Результати досліджень міцності бетону на стиск у віці 1 доби f_{ct1} наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Міцність бетону на стиск у віці 1 доби

Точка плану	f_{ct1} , МПа	Точка плану	f_{ct1} , МПа	Точка плану	f_{ct1} , МПа
1	23,185	5	23,739	9	23,168
2	24,131	6	22,595	10	23,163
3	21,680	7	22,427	11	23,161
4	23,337	8	23,732		

Математично-статистична обробка експериментальних даних (міцності бетону на стиск у віці 1 доби за умови твердіння з використанням теплової обробки) надала можливість отримати рівняння:

$$f_{ct1}=23,173+0,5739x_1-0,6515x_2-0,0957x_2^2+0,1778x_1x_2.$$

Критерій Фішера $F_p=9,7351<19,3$, відповідно рівняння придатне для застосування.

Міцність бетону на стиск при твердненні в повітряних умовах становить: через 1 добу 13,677 МПа; через 28 діб 39,351 МПа.

Міцність бетону на стиск при твердінні в нормальних температурно-вологісних умовах у віці 28 діб дорівнює 39,702 МПа.

Клас бетону В30.

Мінімальне значення міцності на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки, у віці 28 діб дорівнює 42,746 МПа (точка плану 3), максимальна значення цього показника – 42,925 МПа (точка плану 2). Різниця між цими показниками становить 0,4 %.

Міцність бетону на стиск у віці 28 діб при твердінні з використанням теплової обробки перевищує міцність бетону на стиск, твердіння якого відбувалося:

– без теплової обробки: в 1,086 разу (для точки плану 3); в 1,091 разу (для точки плану 2);

– в нормальних температурно-вологісних умовах: в 1,077 разу (для точки плану 3); в 1,081 разу (для точки плану 2).

У табл. 4 та на рис. 2–9 показано кількісний аналіз впливу на міцність бетону досліджуваного складу у віці 1 доби перерви в подачі теплоносія до камери та інтенсивності нагрівання бетону впродовж першої години при досліджуваних ступінчастих режимах теплової обробки.

Таблиця 4

Співвідношення між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби

Точка плану	Δt_1 , °C	τ_n , год	f_{ct1} , МПа	Співвідношення між значеннями f_{ct1} , %, якщо за 100 % прийнято f_{ct1} :	
				в точці плану 2	при $\tau_n=0,5$ год (окремо для кожного значення Δt_1)
3	4	1,5	21,680	89,84	92,90
6		1,0	22,595	93,64	96,82
4		0,5	23,337	96,71	100
7	6	1,5	22,427	92,94	94,50
9–11		1,0	23,164	95,99	97,61
8		0,5	23,732	98,35	100
1	8	1,5	23,185	96,08	96,08
5		1,0	23,739	98,38	98,38
2		0,5	24,131	100	100

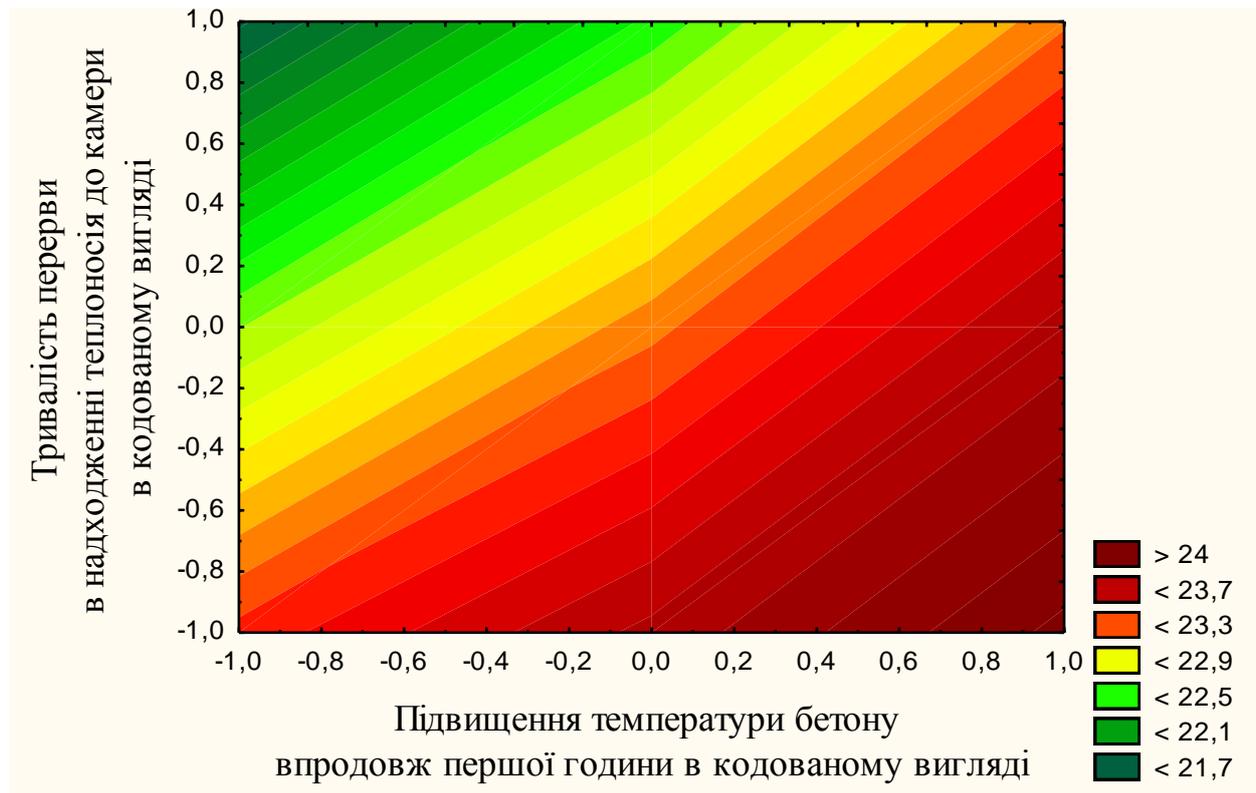


Рис. 2. Ізолінії поверхні функції відгуку міцності на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки, МПа, у віці 1 доби

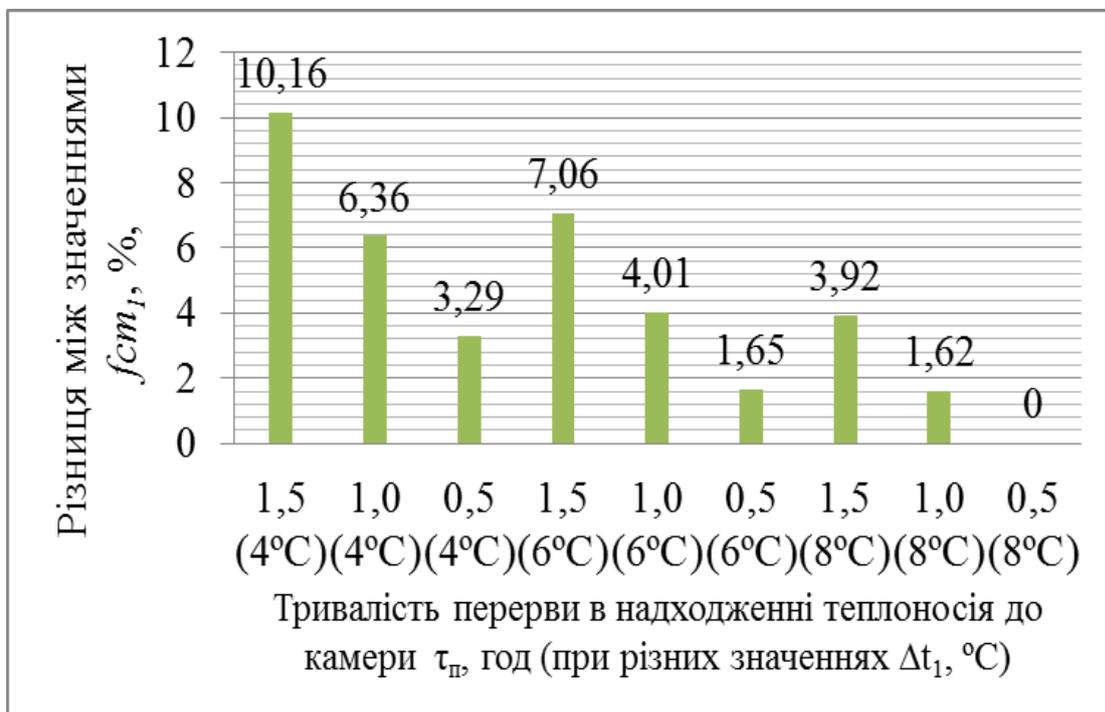


Рис. 3. Різниця між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби при відмінних значеннях τ_p і Δt_1 , якщо за 100 % прийнято f_{ct1} при: $\tau_p=0,5$ год; $\Delta t_1=8$ °C (точка плану 2)



Рис. 4. Різниця між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби при $\Delta t_1=6\text{ }^\circ\text{C}$, якщо за 100 % прийнято f_{ct1} при $\tau_p=0,5$ год (точка плану 8)

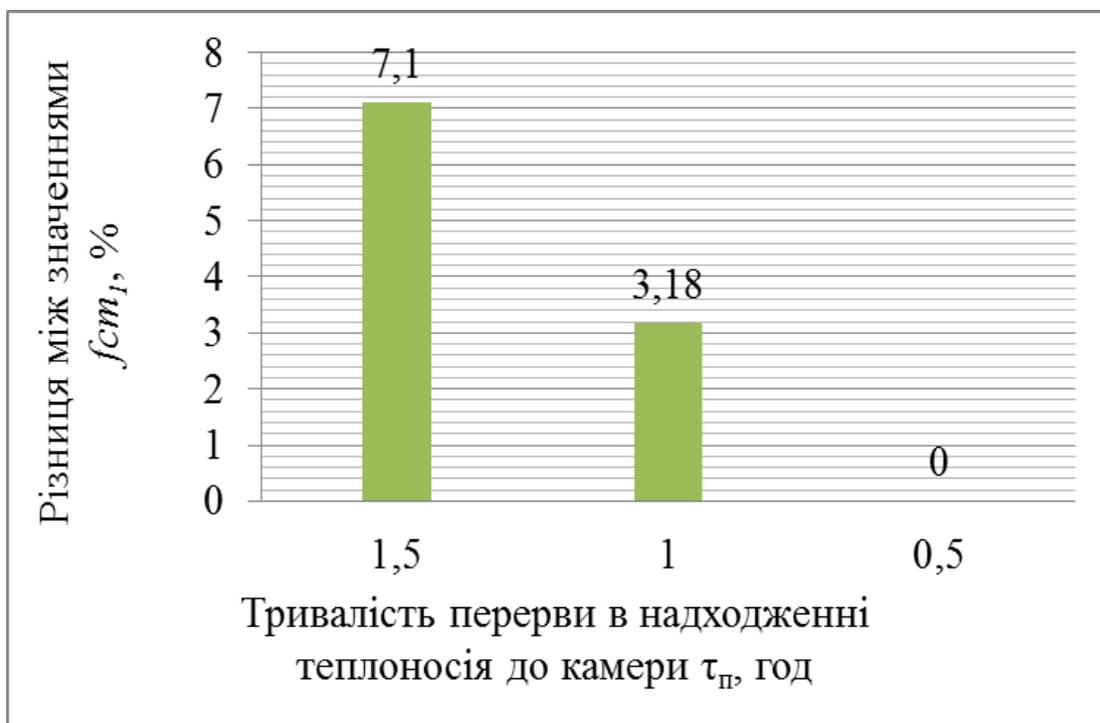


Рис. 5. Різниця між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби при $\Delta t_1=4\text{ }^\circ\text{C}$, якщо за 100 % прийнято f_{ct1} при $\tau_p=0,5$ год (точка плану 4)

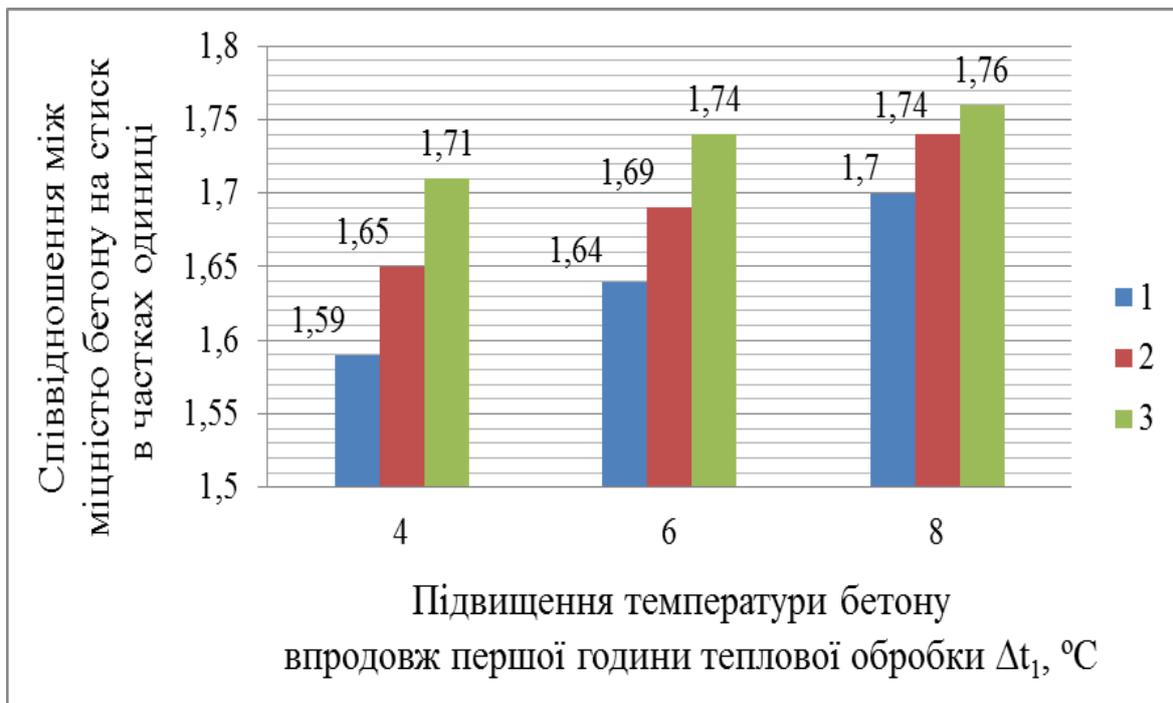


Рис. 6. Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки та без теплової обробки, у віці 1 доби: 1 – при $\tau_n=1,5$ год; 2 – при $\tau_n=1,0$ год; 3 – при $\tau_n=0,5$ год

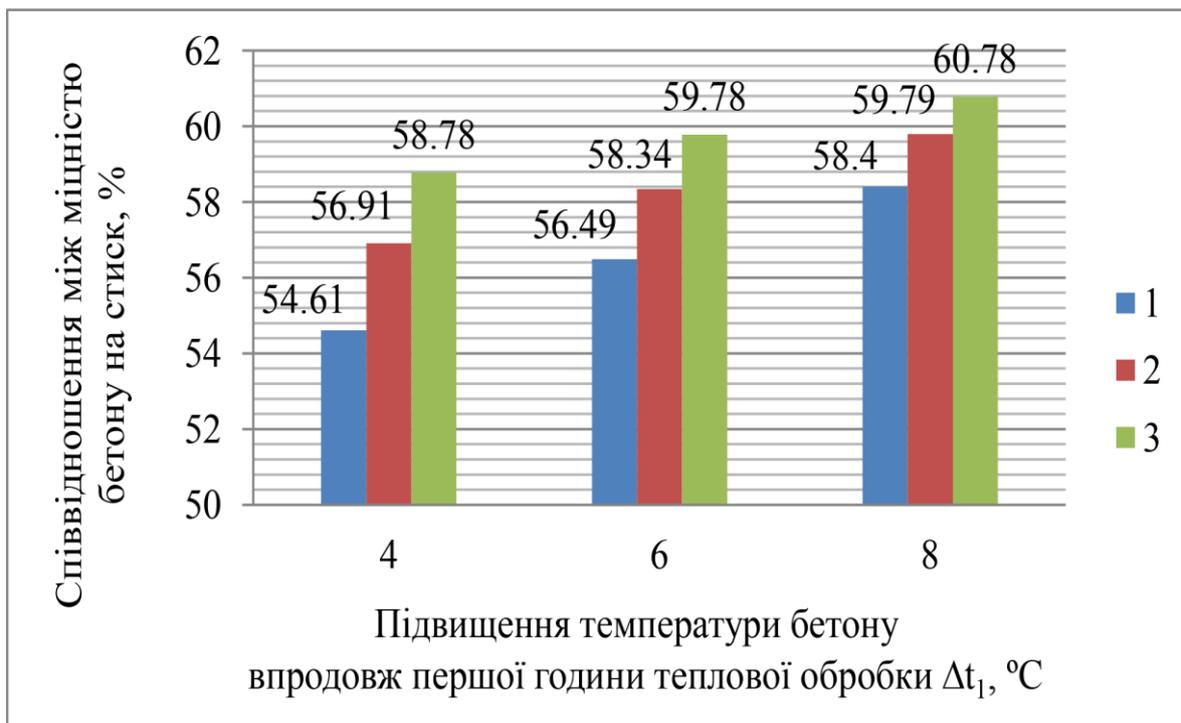


Рис. 7. Співвідношення між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби (твердіння бетону відбувалося з використанням теплової обробки) та у віці 28 діб (твердіння бетону відбувалося в нормальних температурно-вологісних умовах): 1 – при $\tau_n=1,5$ год; 2 – при $\tau_n=1,0$ год; 3 – при $\tau_n=0,5$ год

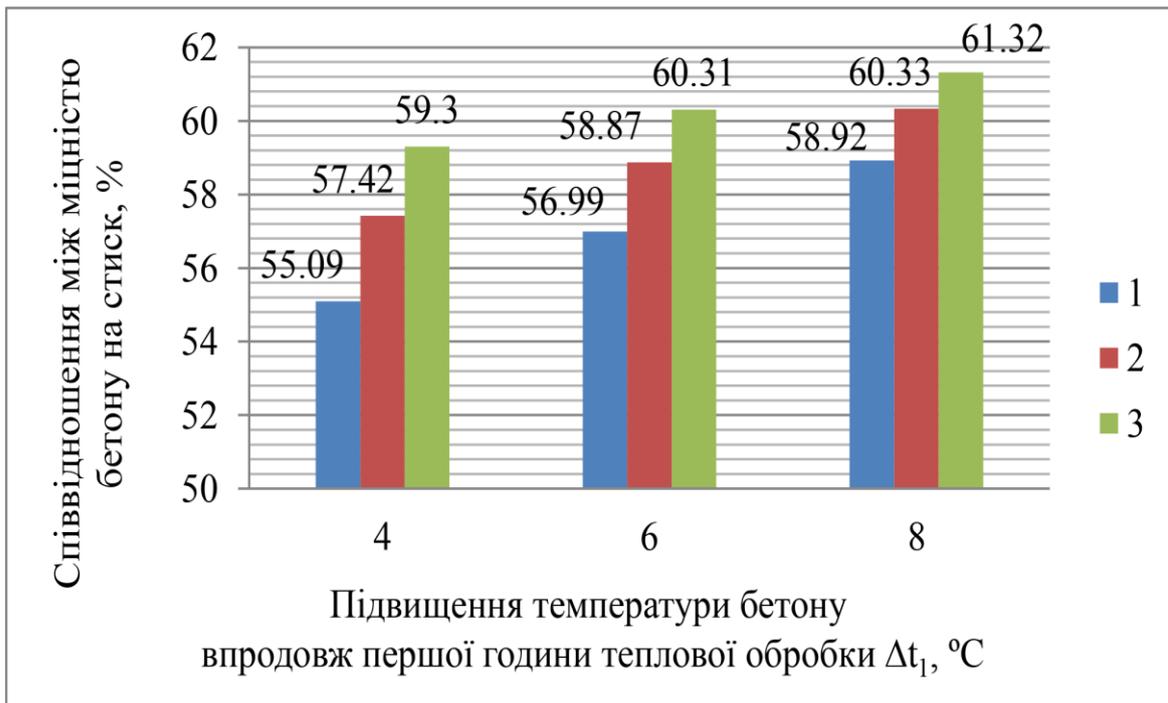


Рис. 8. Співвідношення між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби (твердіння бетону відбувалося з використанням теплової обробки) та у віці 28 діб (твердіння бетону відбувалося в повітряних умовах): 1 – при $\tau_n=1,5$ год; 2 – при $\tau_n=1,0$ год; 3 – при $\tau_n=0,5$ год



Рис. 9. Співвідношення між міцністю бетону на стиск у віці 1 доби (твердіння – без використання теплової обробки) та міцності бетону у віці 28 діб, твердіння якого відбувалося: 1 – в нормальних температурно-вологісних умовах; 2 – в повітряних умовах

Теплова обробка нагрітим повітрям за ступінчастими режимами надає можливість підвищити інтенсивність твердіння бетону в ранньому віці порівняно з твердінням у повітряних умовах.

6. Обговорення результатів досліджень впливу на міцність важкого бетону теплової обробки нагрітим повітрям

1. У проведених дослідженнях здійснено моделювання процесів теплової обробки важкого бетону повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії, за умови наявності нетривалої періодичної хмарності. Використано інфрачервоний обігрівач.

Перевагою досліджень є те, що:

– обумовлену в роботі інтенсивність підвищення температури бетону за допомогою нагрітого повітря прийнято з урахуванням попередніх експериментальних даних, отриманих із застосуванням колектора сонячної енергії [6, 9];

– лабораторна установка (рис. 1) надає можливість відтворити інтенсивність теплової обробки бетону з використанням нагрітого повітря за вибраними температурними режимами в довільний період року.

Але необхідно зважати на такі чинники:

– експерименти проведено в лабораторних, а не в натурних умовах;

– при моделюванні теплової обробки бетонних виробів з використанням бетонних зразків неможливо відтворити геометричну подібність зразків до виробів.

Надалі потрібно провести відповідні дослідження в натурних умовах у виробничо-лабораторній установці [9]. Перевага таких експериментів відносно лабораторних досліджень очевидна. Але й недолік є очевидним: неможливо відтворити в натурних умовах заздалегідь запланований ступінчастий режим теплової обробки бетону нагрітим в колекторі сонячної енергії повітрям (обумовлений нетривалою періодичною хмарністю).

Крім того, в натурних умовах не завжди можливо уникнути періодичної хмарності при проведенні запланованої безперервної теплової обробки бетону повітрям, нагрітим в колекторі сонячної енергії.

2. Теплова обробка бетону з використанням нагрітого повітря навіть при порівняно неінтенсивному підвищенні температури впродовж нетривалого часу (до 30 °C за 4 год 15 хв) і при наявності перерви в подачі теплоносія до камери (впродовж 0,5...1,5 год) надає можливість прискорити твердіння бетону у ранньому віці (табл. 3).

Цей фактор пояснюється тим, що:

– під час надходження теплоносія відбувається підвищення температури бетону, і відповідно інтенсифікуються процеси твердіння згідно з правилом Вант-Гоффа [10];

– на температурний режим бетону в період перерви в подачі теплоносія до камери та під час термосного твердіння впливає наявність теплоти гідратації цементу [11–18].

Максимальна різниця між міцністю бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки та без теплової обробки, наявна після завершення зазначеного технологічного процесу (рис. 6–8). Отримані результати узгоджуються з даними, відображеними у [6–9] при використанні безперервних режимів теплової обробки нагрітим повітрям важких бетонів

інших складів (з подальшим термосним твердінням).

Міцність на стиск бетону досліджуваного складу, твердіння якого відбувалося в повітряних і в нормальних температурно-вологісних умовах, у віці 28 діб відрізняються незначно. Міцність на стиск бетону у віці 28 діб при твердінні з використанням теплової обробки перевищує ці показники в 1,08..1,09 разу. Указані дані надають можливість зробити такий висновок: твердіння виробів із важкого бетону після досліджуваної теплової обробки в кліматичних умовах міста Полтава (Україна) не потребує додаткових заходів стосовно гідроізоляції їх поверхонь (на відміну від способу геліотермообробки та кліматичних умов, відображених в [1]).

Міцність на стиск бетону, твердіння якого здійснювалося з використанням теплової обробки, становить 54,61...60,78 % від цього показника для бетону, твердіння якого відбувалося в нормальних температурно-вологісних умовах (рис. 7). Отримані дані узгоджуються з показниками (50...60 %), наведеними в [1].

3. З'ясовано, що чим більшою є інтенсивність нагрівання бетону досліджуваного складу впродовж першої години теплової обробки (в межах від 4 до 8 °С), і чим меншою є перерва в подачі теплоносія до камери, тим більшою є міцність на стиск бетону у віці 1 доби (табл. 3,4, рис. 2–8).

Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними у [6–9] при застосуванні безперервних режимів теплової обробки нагрітим повітрям важких бетонів інших складів (з подальшим термосним твердінням).

4. Відображені дослідження спрямовані на зменшення енергетичних витрат у процесі теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів.

Застосування цементів із значним тепловиділенням при гідратації сумісно з відповідними хімічними добавками надає можливість в умовах нетривалої хмарності регулювати процес твердіння бетонних виробів без застосування електричного повітрянагрівача.

Потрібно продовжити опрацювання різних видів ступінчастих режимів теплової обробки бетону нагрітим повітрям з метою визначення додаткових шляхів економії енергоресурсів у цьому технологічному процесі для певного виду і складу бетону, для певного періоду року і т. і.

7. Висновки

1. Проведено дослідження теплової обробки гідроізольованих бетонних зразків нагрітим повітрям за обумовленими ступінчастими режимами: тривалість теплової обробки бетону нагрітим повітрям становила 4 год 15 хв; бетон нагрівався до температури 30 °С; загальний термін твердіння бетону в камері – 22 год; змінювалася інтенсивність нагрівання бетону впродовж першої години теплової обробки та тривалість перерви в надходженні теплоносія до камери після першої години теплової обробки.

З'ясовано, що в досліджуваних випадках температура бетону після нагрівання повітрям за ступінчастими режимами через 22 год твердіння в камері дорівнювала 26,3...27,2 °С. Така температура бетону наприкінці терміну твердіння в камері свідчить про те, що відбувається порівняно інтенсивна

гідратація цементу. Рекомендовано для аналогічних випадків аналізувати доцільність подовження терміну термосного твердіння бетону в камері.

2. Визначено міцність на стиск важкого бетону досліджуваного складу в обумовленому віці.

Міцність на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки, становить:

- у віці 1 доби 21,680...24,131 МПа;
- у віці 28 діб 42,746 МПа...42,925 МПа.

Міцність на стиск бетону, твердіння якого відбувалося в повітряних умовах, дорівнює: через 1 добу 13,677 МПа; через 28 діб 39,351 МПа.

Міцність бетону на стиск при твердінні в нормальних повітряно-вологісних умовах у віці 28 діб становить 39,702 МПа.

3. З'ясовано, що міцність бетону на стиск при збільшенні тривалості перерви в надходженні теплоносія до камери від 0,5 до 1,0 год зменшується на 1,62...3,18 %, а від 0,5 до 1,5 год – на 3,90...7,10 %.

Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки та без теплової обробки, у віці 1 доби:

- при $\tau_{\text{п}}=1,5$ год дорівнює 1,59...1,70;
- при $\tau_{\text{п}}=1,0$ год дорівнює 1,65...1,74;
- при $\tau_{\text{п}}=0,5$ год дорівнює 1,71...1,76.

Установлено, що максимальні показники в межах кожного значення тривалості перерви в подачі теплоносія $\tau_{\text{п}}$ отримано при максимальних значеннях інтенсивності підвищення температури бетону впродовж першої години $\Delta t_1=8^{\circ}\text{C}$, а мінімальні показники – при $\Delta t_1=4^{\circ}\text{C}$.

4. Рекомендовано в теплий період року при тепловій обробці виробів із важких бетонів з використанням повітря, нагрітого в колекторі сонячної енергії або в електричному повітрянагрівачі, за умов виникнення нетривалої періодичної хмарності не застосовувати електричний повітрянагрівач. Натомість потрібно впроваджувати ступінчасті режими теплової обробки цих виробів, що надасть можливість економії енергоресурсів.

Рекомендовано накопичувати дані стосовно допустимої тривалості перерв у подачі нагрітого повітря та їх кількості для досліджуваних умов.

Література

1. Аруова Л. Б. Использование солнечной энергии для гелиотермообработки бетона в Республике Казахстан / Л. Б. Аруова, Н. Т. Даужанов // Вестник МГСУ. – М. : НИУ МГСУ, 2012. – № 10. – С. 142-145.

2. Даужанов Н. Т. Оптимизация параметров гелиокрышки, используемой при комплексной гелиотермообработке изделий из пенобетона / Н. Т. Даужанов, Б. А. Крылов, Л. Б. Аруова // Технологии бетонов. – 2016. – № 9 – 10. – С. 36-38.

3. Турдажиева Э. Н. Использование солнечной энергии при производстве бетонных и сборных железобетонных конструкций / Э. Н. Турдажиева,

Н. А. Иранова, Г. З. Тайтокурова // Известия Ошского технологического университета. – Ош : ОшГУ, 2016. – Т. 2. – С. 87-90.

4. Усманов Ф. Б. Определение расхода дополнительной энергии при круглогодичной эксплуатации гелиополигонов по выпуску сборного железобетона / Ф. Б. Усманов, Р. К. Ибодов, Ф. С. Хикматов // Молодой ученый. – 2016. – № 2 (106). Часть III. – С. 247-250.

5. Guettala S. Mechanical characteristics of concrete under initial steam curing using solar energy / S. Guettala, B. Benammar // Revue des Energies Renouvelables. – 2016. – Vol 19, № 1. – P. 147- 156.

6. Kugaevska T. S. Development of methodology forecasting of intensity solidification concrete products in the alternative methods of heat treatment [Text] / T. S. Kugaevska // Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea, Romania: Oradea University Press, 2015. – P. 4-52.

7. Kugaevska T. The preliminary concrete delay duration influence on its properties at thermal processing by hot air / T. Kugaevska, V. Sopov, V. Shulgin // International journal of engineering & technology. – Science Publishing Corporation, 2018. – Vol 7, № 3.2. – P. 225-228.

8. Кугаєвська Т. С. Аналіз міцності бетону при м'якому режимі теплової обробки нагрітим повітрям [Текст] / Т. С. Кугаєвська, В. В. Шульгін, В.П. Сопов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2018. – Т. 91, № 1. – С. 179-185.

9. Кугаєвська Т. С. Використання сонячної енергії для теплової обробки плит бетонних тротуарних [Текст] / Т.С. Кугаєвська, В. П. Сопов, В. В. Шульгін // Будівельні матеріали та вироб. – 2017. – № 5 – 6 (96). – С. 34-36.

10. Sopov V. Effect of heat treatment on the formation cement stone microstructure [Text] / V. Sopov, T. Kugaevska, V. Shulgin, H. Durachenko // International journal of engineering & technology. – Science Publishing Corporation, 2018. – Vol 7, № 4.8. – P. 323-327.

11. Fatima A. Al-Qadri. Effect of some admixtures on heat of hydration reaction of cement pastes produced in Yemen, Saudi Arabia, and Egypt / Fatima A. Al-Qadri, A.M. Saad, Affaf Ahmed Aldlaee // Journal of Engineering Sciences, Assiut University. – 2009. – Vol 7, №. 5. – P. 1041-1048.

12. Кинетика изменения тепловыделения наполненных цементных композитов [Текст] / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, Г. Р. Нугаева, П. С. Козлов // Вестник ВРО РААСН. – Нижний Новгород ВРО РААСН, 2010. – Вып 13. – С. 200-203.

13. Лотов В. А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении [Текст] / В. А. Лотов, Е. А. Сударев, Ю. А. Иванов // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 35-37.

14. Несветаев Г. В. Тепловыделение при гидратации и предел прочности цементного камня [Текст] / Г. В. Несветаев, Та Ван Фан // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 3 (16). – С.129.

15. Бутакова М. Д. Влияние добавок на тепловыделение цементов [Текст] / М. Д. Бутакова, Р. Ф. Галяув, А. С. Сартаков // ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – Челябинск : ЮУрГУ, 2016. – Т. 16, № 4.– С. 38-41.

16. Павлюк В. В. Оцінка тепловиділення цементу загальнобудівельного призначення, модифікованого хімічними добавками [Текст] / В. В. Павлюк, Л. В. Терещенко, К. В. Бондар // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20. – С. 82-87.

17. Проведение калориметрического анализа в процессе гидратации бетонных смесей на установке ИТ-7С [Текст] / А. А. Мендрул, З. А. Бурова, Л. В. Декуша и др. // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 2. – С. 105-112.

18. Кугаєвська Т. С. Прискорення твердіння плиток бетонних тротуарних без використання теплоносія [Текст] / Т. С. Кугаєвська // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – Т. 89, № 3. – С. 172-176.

19. Performance analysis of solar flat plate collector / S. Irfan Sadaq, S. Nawazish Mehdi, M. M. Ishrath, Afroz Mehar, NBV. Lakshmi Kumari // International Journal of Mechanical And Production Engineering. – 2015. – Vol 3, № 5. – P. 69-74.

20. Sunil. K. Amrutkar. Solar Flat Plate Collector Analysis / Sunil. K. Amrutkar, Satyshree Ghodke, Dr. K. N. Patil // Journal of Engineering (IOSRJEN) . – 2012. – Vol 2, № 2, – P. 207-213.

References

1. Aruova L. B., Dauzhanov N. T. (2012). Ispol'zovaniye solnechnoy energii dlya geliotermoobrabotki betona v Respublike Kazakhstan. Vestnik MGSU, 10, 142-145.

2. Dauzhanov N. T., Krylov B. A., Aruova L. B. (2016). Optimizatsiya parametrov geliokryshki, ispol'zuyemoy pri kompleksnoy geliotermoobrabotke izdeliy iz penobetona. Tekhnologii betonov, 9-10, 36-38.

3. Turdazhiyeva E. N., Iranova N. A., Taytokurova G. Z. (2016). Ispol'zovaniye solnechnoy energii pri proizvodstve betonnykh i sbornykh zhelezobonnykh konstruktsiy. Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta., 2, 87-90.

4. Usmanov F. B., Ibodov R. K., Khikmatov F. S. (2016). Opredeleniye raskhoda dopolnitel'noy energii pri kruglogodichnoy ekspluatatsii geliopoligonov po vypusku sbornogo zhelezobetona. Molodoy uchenyy, 2 (106), III, 247-250.

5. Guettala S., Benammar B. (2016). Mechanical characteristics of concrete under initial steam curing using solar energy. Revue des Energies Renouvelables, 19, (1), 147- 156.

6. Kugaevska T. S. (2015). Development of methodology forecasting of intensity solidification concrete products in the alternative methods of heat treatment. Energy, energy saving and rational nature use. Oradea, Romania: Oradea University Press, 4-52.

7. Kugaevska T., Sopov V., Shulgin V. (2018). The preliminary concrete delay duration influence on its properties at thermal processing by hot air. International journal of engineering & technology, 7 (3.2), 225-228.

8. Kugaevska T. S., Shulgin V. V., Sopov V.P. (2018). Analiz mitsnosti betonu pry m"yakomu rezhymi teplovoyi obrobky nahritym povitryam Naukovyy visnyk budivnytstva, 91, 179-185.

9. Kugaevska T.S., Sopov V.P, Shulgin V.V. (2017). Vykorystannya sonyachnoyi enerhiyi dlya teplovoyi obrobky plyt betonnykh trotuarnykh. *Budivel'ni materialy ta vyroby*, 5-6 (96), 34-36.
10. Sopov V., Kugaevska T., Shulgin V., Durachenko H. (2018). Effect of heat treatment on the formation cement stone microstructure. *International journal of engineering & technology*, 7, (4.8), 323-327.
11. Fatima A. Al-Qadri, Saad A.M., Affaf Ahmed Aldlaee (2009). Effect of some admixtures on heat of hydration reaction of cement pastes produced in Yemen, Saudi Arabia, and Egypt. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 7 (5), 1041-1048.
12. Selyayev V. P., Kupriyashkina L. I., Nugayeva G. R., Kozlov P. S. (2010). Kinetika izmeneniya teplovydeleniya napolnennykh tsementnykh kompozitov *Vestnik VRO RAASN. Nizhny Novgorod VRO RAASN*. 13, 200-203.
13. Lotov V. A., Sudarev Ye. A., Sudarev, Ivanov YU. A. (2011). Teplovydeleniye v sisteme tsement-voda pri gidratatsii i tverdenii. *Stroitel'nyye materialy*, 11, 35-37.
14. Nesvetayev G. V., Ta Van Fan (2013). Teplovydeleniye pri gidratatsii i predel prochnosti tsementnogo kamnya. *Internet-zhurnal «Naukovedeniye»*, 3 (16), 129.
15. Butakova M. D., Galyaev R. F., Sartakov A. S. (2016). Vliyaniye dobavok na teplovydeleniye tsementov. *YUUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura. Chelyabinsk. YUUrGU*, 16, 4, 38-41.
16. Pavlyuk V. V., Tereshchenko L. V., Bondar K. V. (2010). Otsínka teplovidíleniya tsementu zagal'nobudivel'nogo pryznachennya, modifikovanogo khímíchnimi dobavkami. *Resursoyekonomní materialy, konstruktsií, budívlí ta sporudi: zb. nauk. pr. Rívné: NUVGP*, 20, 82-87.
17. Mendrul A. A., Burova Z. A., Dekusha L. V. i dr. (2010). Provedeniye kalorimetricheskogo analiza v protsesse gidratatsii betonnykh smesey na ustanovke IT-7S. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 32, 2, 105-112.
18. Kugaevska T.S. Priskorenniya tverdínnya plitok betonnykh trotuarnykh bez vikoristannya teplonosíya (2017). *Naukoviy vísnik budívnitstva. Kharkív: KhNUBA, KhOTV ABU*, 89, 3, 172-176.
19. Irfan Sadaq S., Nawazish Mehdi S., Ishrath M. M., Afroz Mehar, NBV. Lakshmi Kumari (2015). Performance analysis of solar flat plate collector. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 3, (5), 69-74.
20. Sunil. K. Amrutkar. Satyshree Ghodke, Dr. K. N. Patil (2012). Solar Flat Plate Collector Analysis. *Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 2 (2), 207-213.