

UDC 666.972

*Kugaevska T.S., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
ORCID 0000-0002-4394-4234 e-mail: strelanebo@ukr.net*

*Sopov V.P., DSc, Professor,
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture
ORCID 0000-0002-1908-0421 e-mail: vsopov@ukr.net*

*Shulgin V.V., PhD, Associate Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
ORCID 0000-0002-2573-8402 e-mail: shwlad17@gmail.com*

THE PRELIMINARY CONCRETE DELAY DURATION INFLUENCE ON ITS PROPERTIES AT THERMAL PROCESSING BY HOT AIR

Reducing energy consumption in the manufacture of concrete products of factory production is always an urgent task. The use of heated air for creating soft modes of heat treatment of concrete products is proposed. The influence of soft heat treatment modes on the dynamics of the concrete samples strength at an early age has been established. The expediency of using soft heat treatment modes with the obligatory use of hardening accelerators is shown. With this approach, the heat treatment of concrete samples with heated air contributes to increasing the concrete compression strength in the early term of hardening: at the age of 1 day 1.94 ... 2.12 times; at the age of 3 days 1.25 ... 1.41 times.

Keywords: heat treatment, concrete, soft mode, compressive strength.

УДК 666.972

*Кугаєвська Т. С., к.т.н., доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

*Сопов В.П., д.т.н., професор
Харківський національний університет будівництва та архітектури*

*Шульгін В.В., к.т.н. доцент
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО ВИТРИМУВАННЯ БЕТОНУ НА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ НАГРІТИМ ПОВІТРЯМ

Зниження енерговитрат при виробництві бетонних виробів заводського виготовлення завжди є актуальним завданням. Запропоновано використання нагрітого повітря з метою створення м'яких режимів теплової обробки бетонних виробів. Встановлено характер впливу м'якого режиму теплової обробки на динаміку набору міцності бетонних зразків. Показано необхідність застосування складних режимів теплової обробки з обов'язковим використанням прискорювачів твердіння. При такому підході теплова обробка бетонних зразків нагрітим повітрям сприяє підвищенню міцності на стиск бетону у ранні терміни твердіння: у віці 1 доби в 1,94...2,12 разу; у віці 3 діб в 1,25...1,41 разу.

Ключові слова: теплова обробка, бетон, м'який режим, міцність на стиск.

Вступ. Розроблення енергоощадних способів тепловологісної та теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів є одним із пріоритетних завдань бетонознавства. Одним із напрямків розвитку таких способів є використання сонячної енергії. Відомо, що підвищення температури витримування прискорює хімічні реакції гідратації, і таким чином благотворно впливає на ранню міцність бетону без будь-яких негативних наслідків для подальшої міцності [1–2]. Однак, згідно принципу відповідності О.П. Мchedлова-Петросяна, для забезпечення необхідних властивостей важливе значення має час прикладення і інтенсивність температурних впливів на бетон, що твердіє [3].

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Під час теплової обробки в об'ємі бетонних і залізобетонних виробів утворюються неоднорідні температурні поля (а при тепловологісній обробці – також неоднорідні поля вологовмісту). Ці фактори можуть призводити до створення внутрішніх механічних напружень і спричиняти в бетоні необоротні структурні зміни, неприпустиме зниження його міцності [4 – 10].

Для зменшення деструктивних процесів у бетонних і залізобетонних виробках під час тепловологісної або теплової обробки та для економії енергоресурсів застосовуються різні температурні режими [9, 10].

Серед низки заходів для уникнення вказаних явищ – попереднє витримування бетону. Основне призначення цього витримування – формування такої початкової структури бетону, яка надасть можливість сприймати деструктивні процеси, що відбуваються при тепловій обробці.

При геліотермообробці бетонних і залізобетонних виробів під світлопрозорим покриттям не відбувається їх попереднє витримування [11, 12]. Доцільність впровадження попереднього витримування бетону при геліотермообробці з використанням проміжного теплоносія [13, 14] не розглядається.

Наявність теплоти гідратації цементу під час попереднього витримування бетону позитивно впливає на структуроутворення [3, 15 – 17].

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. У джерелах [18 – 22] представлено спосіб теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів (які знаходяться в закритих формах) використанням нагрітого повітря. Повітря нагрівається або в колекторі сонячної енергії (рис. 1), або в електричному повітрянагрівачі.



Рис. 1: Використання колектора сонячної енергії для теплової обробки плит бетонних тротуарних

Цей спосіб не передбачає інтенсивного нагрівання бетону і тому не потребує здійснення попереднього витримування бетону з метою зменшення деструктивних процесів у ньому. Але попереднє витримування може бути сприятливим для кінетики набору міцності бетоном. Відповідні дослідження не здійснювалися.

Постановка завдання. Цілі досліджень:

– здійснити теплову обробку гідроізованих кубів (10×10×10 см) із важкого бетону з використанням нагрітого повітря (тривалість теплової

обробки зразків нагрітим повітрям – 3 год; загальний термін твердіння зразків у лабораторній камері – 21 год);

– встановити вплив тривалості попереднього витримування важкого бетону та вмісту прискорювача твердіння на міцність бетону при стиску у віці 1 та 3 діб (при твердінні бетону з використанням теплової обробки та без використання теплової обробки).

Основний матеріал і результати. Дослідження теплової обробки гідроізольованих бетонних кубів із використанням нагрітого повітря відбувалися в лабораторній установці (рис. 2).



Рис. 2: Лабораторна установка

У сонячні дні весняного, літнього та осіннього періодів року повітря нагрівалося в плоских колекторах сонячної енергії власної конструкції. У холодний період року і в хмарні дні весняного, літнього та осіннього періодів року для нагрівання повітря в колекторі енергії було використано інфрачервоний обігрівач (у виробничих установках потрібно використовувати електричний повітрянагрівач).

У дослідженнях використано датчики температури.

Склад бетону: 1:1,59:2,66; Ц = 417,3 кг/м³; П = 663,2 кг/м³; Щ = 1112,0 кг/м³; В/Ц = 0,44; використано портландцемент ДСТУ Б В.2.7-46:2010 ПЦ І-500-Н (у складі бетону – прискорювач твердіння на основі тіосульфата і роданіда натрію).

Планування досліджень та їх математично-статистична обробка здійснювалася з використанням рекомендацій джерела [23]. У таблиці 1 показано інтервали варіювання тривалості попереднього витримування бетону у закритій камері (τ_n) та вмісту добавки у складі бетону (d, відсоток від маси цементу в перерахункові на суху речовину). Межі варіювання вмісту добавки прийнято з урахуванням рекомендацій виробника.

Таблиця 1: Значення інтервалів варіювання факторів

| Код | Значення коду | Значення факторів | |
|---------------------|----------------|--|--|
| | | X ₁ (тривалість попереднього витримування бетону τ_n , год) | X ₂ (вміст добавки d, %) |
| Основний рівень | 0 | 1 | 1,4 |
| Інтервал варіювання | x ₁ | 1 | 0,6 |
| Верхній рівень | + | 2 | 2,0 |
| Нижній рівень | – | 0 | 0,8 |

На рисунках 3, 4 відображено зміну температури тверднучого в камері бетону (точка 1 плану дослідів). Значення факторів: $\tau_n = 2$ год; вміст добавки 2,0 %.

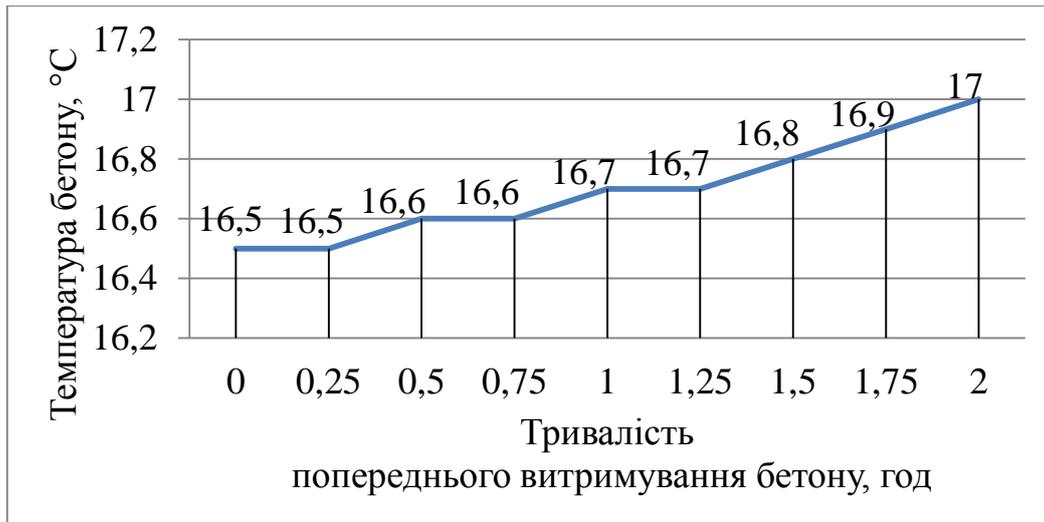


Рис. 3: Зміна температури бетону в період попереднього витримання

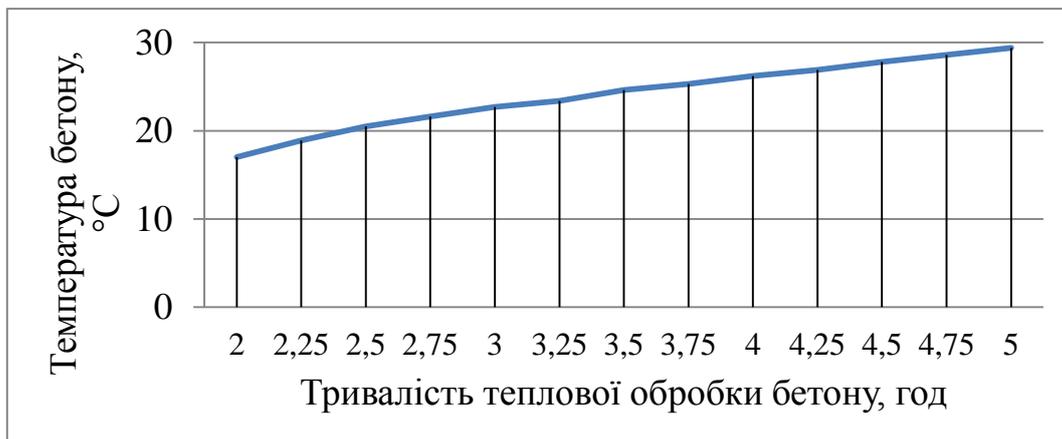


Рис. 4: Зміна температури бетону в період теплової обробки нагрітим повітрям

Упродовж 2 год попереднього витримання температура бетону підвищилася з 16,5 до 17,0°C ($\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$). Упродовж 3 год теплової обробки нагрітим повітрям температура бетону підвищилася з 17,0 до 29,4°C ($\Delta t = 12,4^\circ\text{C}$). Через 21 год тверднення бетону в камері його температура дорівнювала 23,8°C.

У наступних дослідах (точки плану експерименту 2 – 11) було створено аналогічну інтенсивність зростання температури бетону під час теплової обробки нагрітим повітрям.

У таблиці 2 показано міцність бетону на стиск у віці 1 доби та 3 діб при застосуванні теплової обробки (ТО) та при твердінні тільки в повітряних умовах залежно від тривалості попереднього витримування бетону ($\tau_{п}$, год) та вмісту добавки (d, %)).

Таблиця 2: Міцність бетону на стиск у віці 1 доби та 3 діб

| Точка плану | $\tau_{п}$, год | d, % | Міцність бетону на стиск, МПа | | | |
|-------------|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | | | у віці 1 доби | | у віці 3 діб | |
| | | | при застосуванні ТО | твердіння в повітряних умовах | при застосуванні ТО | твердіння в повітряних умовах |
| 4 | 0 | 0,8 | 13,340 | 6,279 | 20,153 | 14,245 |
| 8 | 1 | | 12,752 | | 19,206 | |
| 2 | 2 | | 12,166 | | 18,251 | |
| 6 | 0 | 1,4 | 14,193 | 6,755 | 21,632 | 15,421 |
| 9 | 1 | | 13,668 | | 20,574 | |
| 5 | 2 | | 13,125 | | 19,510 | |
| 10 | 1 | | 13,659 | | 20,569 | |
| 11 | 1 | | 13,658 | | 20,567 | |
| 3 | 0 | 2,0 | 15,074 | 7,218 | 23,085 | 16,593 |
| 7 | 1 | | 14,536 | | 21,925 | |
| 1 | 2 | | 13,981 | | 20,734 | |

У результаті математично-статистичної обробки експериментальних даних з використанням рекомендацій джерела [23] отримані рівняння:

– для бетону у віці 1 доби:

$$f_{ср1} = 13,667 - 0,5559x_1 + 0,8890x_2 - 0,0101x_1^2 - 0,0251x_2^2 + 0,0202x_1x_2;$$

критерій Фішера $F_p = 14,673 < 19,3$; рівняння регресії придатне для застосування;

– для бетону у віці 3 діб:

$$f_{ct3} = 20,580 - 1,0627x_1 + 1,3559x_2 - 0,0149x_1^2 - 0,0204x_2^2 - 0,1123x_1x_2;$$

критерій Фішера $F_p = 13,867 < 19,3$; рівняння регресії придатне для застосування.

Побудова діаграми (рис. 5) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$x_1: y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} + b_{12} x_1; \quad (1)$$

$$x_2: y = b_0 + b_1 + b_2 x_2 + b_{11} + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_2. \quad (2)$$

У цьому випадку при збільшенні тривалості попереднього витримування міцність бетону на стиск у віці 1 доби зменшується, а при збільшенні вмісту прискорювача твердіння (в досліджуваних межах) – підвищується (рис. 5).

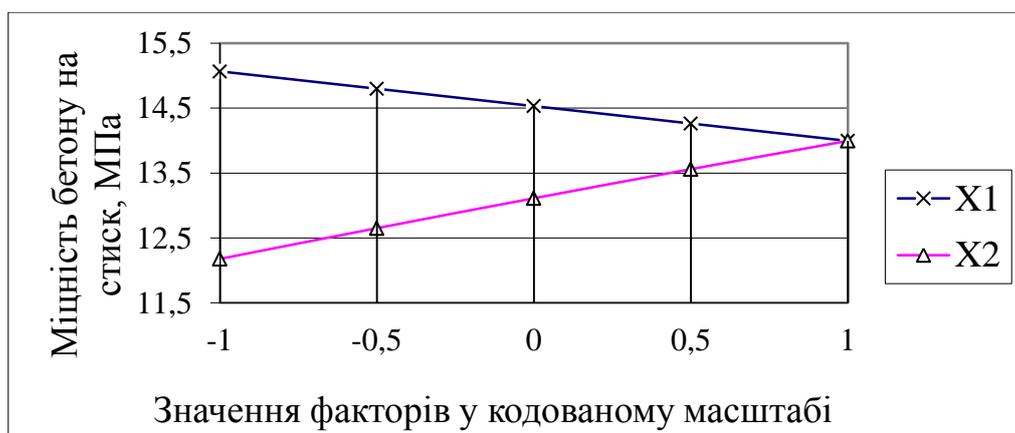


Рис. 5: Міцність бетону на стиск у віці 1 доби залежно від тривалості попереднього витримування (τ_p , год) та вмісту добавки (d,%) на максимальному рівні

Побудова діаграми (рис. 6) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$x_1: y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2; \quad (3)$$

$$x_2: y = b_0 + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2. \quad (4)$$

У цьому випадку на міцність бетону у віці 1 доби в межах факторів у кодовому масштабі $[-1 \dots 0[$ переважає вплив попереднього витримування, а в межах факторів у кодовому масштабі $]0 \dots 1]$ – вплив прискорювача твердіння (рис. 6).

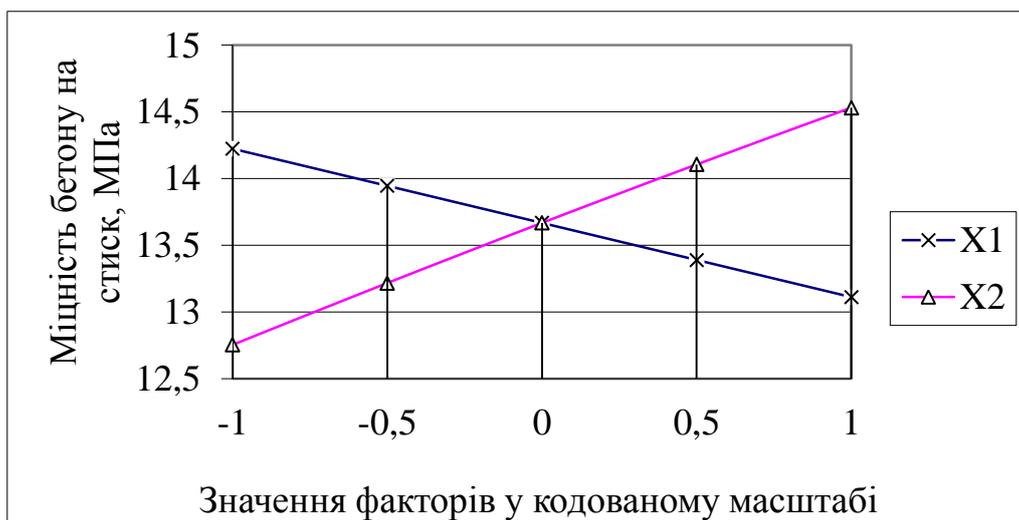


Рис. 6: Міцність бетону на стиск у віці 1 доби залежно від тривалості попереднього витримування (τ_p , год) та вмісту добавки (d ,%) на основному рівні

Побудова діаграми (рис. 7) здійснювалася за такими загальними залежностями:

$$x_1: y = b_0 + b_1 x_1 - b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} - b_{12} x_1 x_2; \quad (5)$$

$$x_2: y = b_0 - b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} + b_{22} x_2^2 - b_{12} x_1 x_2. \quad (6)$$

У цьому випадку при збільшенні тривалості попереднього витримування міцність бетону на стиск у віці 1 доби зменшується, а при збільшенні вмісту прискорювача твердіння (в досліджуваних межах) – підвищується (рис. 7).

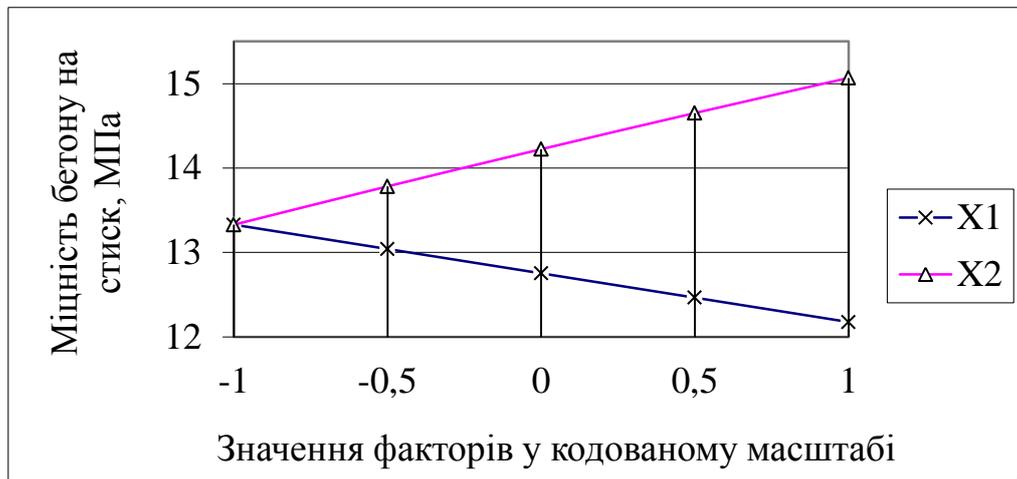


Рис. 7: Міцність бетону на стиск у віці 1 доби залежно від тривалості попереднього витримування (τ_n , год) та вмісту добавки (d,%) на мінімальному рівні

На рис. 8 показано аналіз результатів досліджень при вмісті добавки 0,8%.

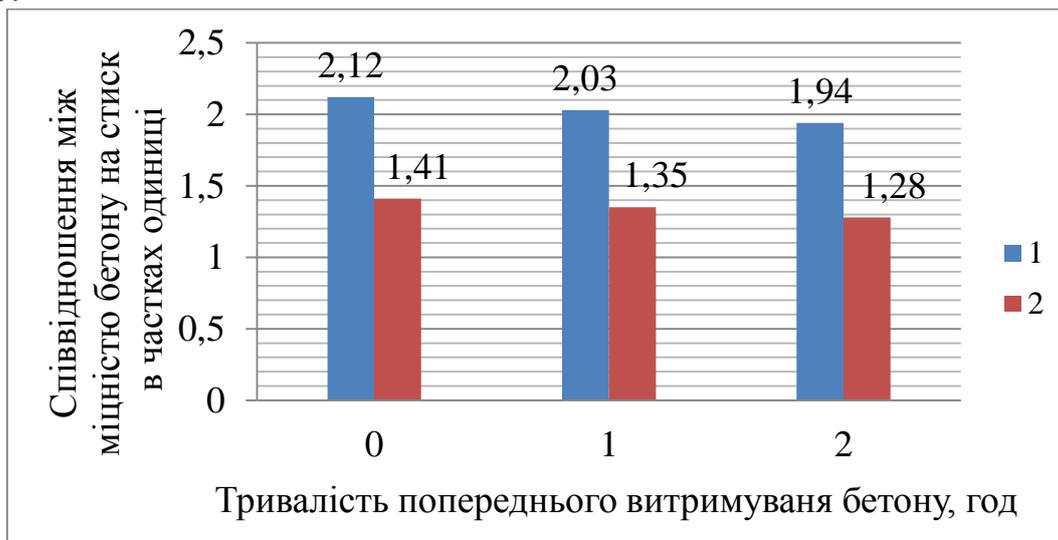


Рис. 8: Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки та без теплової обробки (вміст добавки 0,8%): 1 – у віці 1 доби; 2 – у віці 3 діб

Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки (при $\tau_{\text{п}} = 0$ год), та міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося без теплової обробки (вміст добавки 0,8%) :

– у віці 1 доби більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 4,2%, при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 8,5%;

– у віці 3 діб більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 4,3%, при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 9,2%.

На рис. 9 показано аналіз результатів досліджень при вмісті добавки 1,4%.

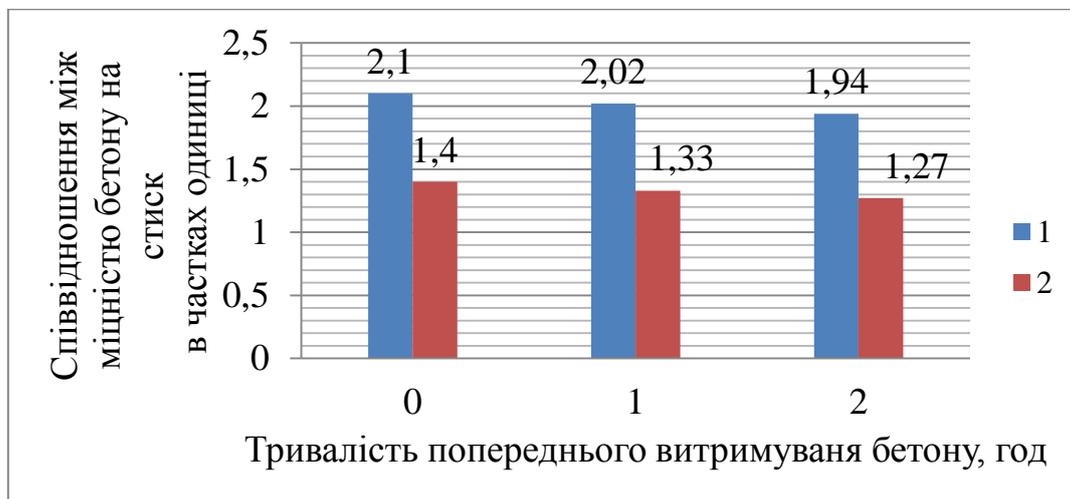


Рис. 9: Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки та без теплової обробки (вміст добавки 1,4%): 1 – у віці 1 доби; 2 – у віці 3 діб

Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки (при $\tau_{\text{п}} = 0$ год), та міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося без теплової обробки (вміст добавки 1,4%):

– у віці 1 доби більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 3,8%, при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 7,6% ;

– у віці 3 діб більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 5,0%, при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 9,3%.

На рис. 10 показано аналіз результатів досліджень при вмісті добавки 2,0%.

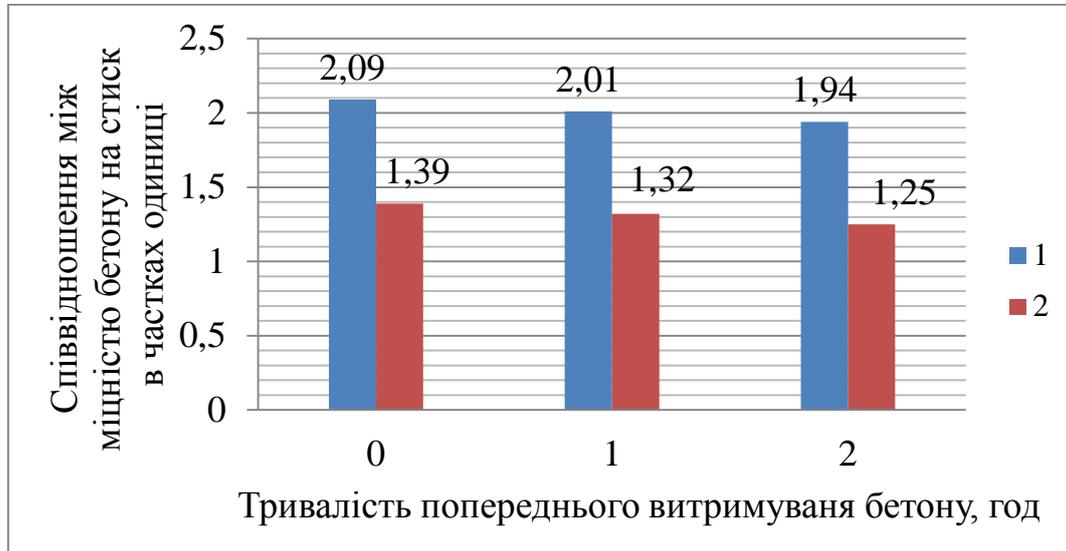


Рис. 10: Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням теплової обробки та без теплової обробки (вміст добавки 2,0%): 1 – у віці 1 доби; 2 – у віці 3 діб

Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки (при $\tau_{\text{п}} = 0$ год), та міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося без теплової обробки (вміст добавки 2,0%):

– у віці 1 доби більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 3,8%; при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 7,2%;

– у віці 3 діб більше, ніж аналогічне співвідношення при $\tau_{\text{п}} = 1$ год на 5,0%; при $\tau_{\text{п}} = 2$ год – на 10,1%.

При збільшенні вмісту прискорювача твердіння від 0,8% до 2% підвищується міцність бетону (у досліджуваному віці) як при застосуванні теплової обробки так і без теплової обробки. Тому за цих умов незначно змінюється співвідношення між міцністю на стиск бетону при його твердінні з використанням теплової обробки та без теплової обробки.

Висновки.

1. З'ясовано, що при м'якому режимі теплової обробки гідроізольованих зразків із важкого бетону (у складі якого – прискорювач твердіння) наявність попереднього витримування (1 та 2 год) погіршує інтенсивність його твердіння у віці 1 та 3 діб.

Співвідношення між міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося з використанням теплової обробки (при $\tau_n = 0$ год), та міцністю на стиск бетону, твердіння якого відбувалося без теплової обробки, більше, ніж аналогічне співвідношення:

– при $\tau_n = 1$ год на 3,8...4,2% у віці 1 доби та на 4,3%...5,0% у віці 3 діб (вміст прискорювача твердіння: 0,8%; 1,4%; 2,0%);

– при $\tau_n = 2$ год на 7,2... 8,5% у віці 1 доби та на 9,2 ...10,1% у віці 3 діб (вміст прискорювача твердіння: 0,8%; 1,4%; 2,0%).

2. Показано: міцність на стиск важкого бетону, твердіння якого відбувалося із застосуванням досліджуваної теплової обробки, перевищує міцність на стиск важкого бетону, твердіння якого відбувалося без теплової обробки:

– у віці 1 доби в 1,94...2,12 разу (вміст прискорювача твердіння: 0,8%; 1,4%; 2,0%);

– у віці 3 діб в 1,25...1,41 разу (вміст прискорювача твердіння: 0,8%; 1,4%; 2,0%).

3. Надалі потрібно провести дослідження міцності бетону у більш пізньому віці.

References

1. *Cebeci O. Z., Strength of concrete in warm and dry environment, Materials and Structures, (1987), 20, No. 118, pp. 270 – 72.*
2. *Neville A., Cement and concrete: their interaction in practice, in Advances in Cement and Concrete, American Soc. Civil Engineers, New York, (1994), pp. 1 – 14.*
3. *Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1988. – 304 с.*

4. Методика расчёта предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки / С. В. Федосов, В. И. Бобылев, А. М. Ибрагимов, А. М. Соколов // *Строительные материалы*. – 2011. – № 3. – С. 44 – 46.
5. Моделирование влияния градиентов температур на распределение напряжений на стадии гидратации бетонов / Ю. А. Абзаев, А. И. Гныря, С. В. Коробков и др. // *Вестник ТГАСУ*. – Томск: ТГАСУ, 2016. – № 3 (56). – С.129 – 138.
6. Степаненко И. В. Твердение бетонов в условиях контактного подвода теплоты / И. В. Степаненко // *Известия вузов. Строительство*. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2012. – № 10 (646). – С. 10 – 13.
7. Рахимов А. М. Исследование температурных полей в процессе пропаривания и остывания бетонных изделий в условиях повышенных температур среды / А. М. Рахимов, Б. Г. Жураев // *Символ науки*. – 2016. – № 2. – С. 72 – 73.
8. Шестаков Н. И. Методика расчёта термо- и влагонапряжённого состояния бетонных плит, подвергаемых тепловлажностной обработке / Н. И. Шестаков, К. В. Аксенчик // *Строительные материалы*. – 2012. – № 11. – С. 77 – 80.
9. Бибик М. С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // *Строительная наука и техника*. – 2010. – № 4. – С. 55 – 59.
10. Оптимизация режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий и конструкций / М. С. Бибик, И. И. Тулупов, В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр.* – Рівне : НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 22 – 30.
11. Dauzhanov N. T. Low-energy thermal processing technology of foamed concrete products in landfills using solar energy [Electronic resource] / N. T. Dauzhanov, B. A. Krylov. – Access mode: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/download/125>.
12. Use of solar energy for heliothermal treatment of concretes on the basis of alkali cements [Electronic resource] / Zh. T. Aymenov, B. K. Sarsenbayev, N. B. Sarsenbayev, Zh. A. Aldiyarov. – Access mode: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgssp/2/80/2/TC305-08/pdf>.
13. 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.

14. Ушкелбаева А. О. Гелиотермообработка полистиролбетонов, арболитов через гелиосистему с промежуточным теплоносителем / А. О. Ушкелбаева // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина. – Астана: КАТУ, 2015. – № 1 (84). – С.192 – 198.
15. 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. 37, №. 5. – P. 1041–1048.
16. Greensmith, Christopher Graeme. The effects of cement extenders and water to binder ratio on the heat evolution characteristics of concrete [Electronic resource] / Greensmith, Christopher Graeme. – Access mode: <http://wiredspace.wits.ac.za/handle/10539/1516>.
17. Uğur Öztürk A. Katkilarin çimento hamuru hidratasyon isisina etkileri [Electronic resource] / A. Uğur Öztürk. – Access mode: <http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/16/files/Dergiler/14/08.pdf>.
18. Кугаєвська Т. С. Використання сонячної енергії для теплової обробки плит бетонних тротуарних / Т. С. Кугаєвська, В. П. Сонов, В. В. Шульгін // Будівельні матеріали та вироби. – 2017. – № 5 – 6 (96). – С. 34 – 36. – Електронний ресурс: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/3065>.
19. Кугаєвська Т. С. Метод дослідження процесів теплової обробки бетонних виробів нагрітим повітрям / Т. С. Кугаєвська, В. В. Шульгін, В. П. Сонов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – № 2 (84). – С.245 – 249. – Електронний ресурс: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/1483>.
20. Кугаєвська Т. С. Комбіновані способи геліотермообробки бетонних виробів: монографія / Т. С. Кугаєвська. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – 308 с. – Електронний ресурс: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/1494>.
21. Kugaevska T. S. Development of methodology forecasting of intensity solidification concrete products in the alternative methods of heat treatment / T. S. Kugaevska // Energy, energy saving and rational nature use. – Oradea, Romania : Oradea University Press, 2015. – P. 4 – 52. – Електронний ресурс: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/1536>.

22. Кугаєвська Т. С. Аналіз інтенсивності нагрівання повітря в плоскому колекторі сонячної енергії / Т. С. Кугаєвська, В. В. Шультгін, В. П. Сопов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – № 3 (85). – С. 201 – 205
23. Руководство по подбору составов тяжёлого бетона. – М. : Стройиздат, 1979. – 103 с.