

**МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОТИ ГІДРАТАЦІЇ ЦЕМЕНТУ**

Кугаєвська Т.С., к.т.н., доцент,
Шульгін В.В., к.т.н., доцент,
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
strelanebo@yandex.ua

Сопов В.П., д.т.н., професор,
Харківський національний університет будівництва та архітектури
vsopov@ukr.net

Анотація. Удосконалено метод експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу з урахуванням того, що вказані процеси характеризуються відповідними критеріями. Проведено експериментальні дослідження набору міцності бетоном тротуарних плиток (у віці 1 доби, 3 діб, 7 діб та 28 діб). Встановлено, що різниця між міцністю при стиску бетону тротуарних плиток досліджуваного складу (котрі тверділи в тепловій камері та в повітряних умовах) після їх розпалублення – максимально можлива. Надалі ця різниця поступово зменшується і у віці 28 діб відсутня.

Ключові слова: бетонні вироби, тепла обробка, тепловиділення цементу, міцність бетону при стиску.

**МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЁТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА**

Кугаевская Т.С., к.т.н., доцент,
Шульгин В.В., к.т.н., доцент,
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
strelanebo@yandex.ua

Сопов В.П., д.т.н., профессор,
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
vsopov@ukr.net

Аннотация. Усовершенствован метод экспериментально-расчётных исследований процессов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий с использованием теплоты гидратации цемента с учётом того, что указанные процессы характеризуются соответствующими критериями. Проведены экспериментальные исследования набора прочности бетоном тротуарных плиток (в возрасте 1 суток, 3 суток, 7 суток и 28 суток). Установлено, что разница между прочностью при сжатии бетона тротуарных плиток исследуемого состава (которые твердели в тепловой камере и в воздушных условиях) после их распалубки – максимально возможная. Далее эта разница постепенно уменьшается и в возрасте 28 суток отсутствует.

Ключевые слова: бетонные изделия, тепловая обработка, тепловыделение цемента, прочность бетона при сжатии.

THE METHOD OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL RESEARCH OF THERMAL TREATMENT OF CONCRETE PRODUCTS USING CEMENT HYDRATION HEAT

Kugaevska T.S., PhD., Associate professor,

Shulgin V.V., PhD., Associate professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

strelanebo@yandex.ua

Sopov V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor

Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture

vsopov@ukr.net

Abstract. Thermal treatment of concrete and reinforced concrete products is carried out using a significant amount of heat. The use of chemical admixtures - accelerators of cement hardening can reduce the thermal treatment time. Under certain conditions, combined with the heat of hydration of cement it eliminates the heat treatment.

The forecast of the kinetics of strength development of concrete and reinforced concrete products only under the influence of the heat of hydration of cement is based on the method of experimental and computational research.

The method of experimental and computational investigations of the processes of hardening of concrete and reinforced concrete products only under the influence of the heat of hydration of cement has been improved. The sequence of the main stages of this research is shown. It is considered that these processes are characterized by the appropriate criteria.

Experimental investigations of the kinetics of strength development of concrete paving slabs at the age of 1 day, 3 days, 7 days and 28 days only under the influence of the heat of hydration of cement were conducted. It is found that the compressive strength of concrete paving slabs of one day of hardening in a thermally insulated chamber is 1,57 times higher than strength of the concrete control samples, aged 3 days – 1,19 times, at 7 days – 1,08 times. At the age of 28 days, the difference disappears.

Keywords: concrete products, thermal treatment, heat evolution of cement, concrete compressive strength.

Вступ. Теплова обробка бетонних та залізобетонних виробів є енергомістким процесом. Застосування хімічних добавок, які прискорюють твердіння цементу, надає можливість зменшити тривалість вказаного технологічного процесу, а за відповідних умов здійснювати теплову обробку цих виробів із використанням тільки теплоти гідратації цементу.

Прогнозування кінетики набору міцності бетонними і залізобетонними виробами (та інших властивостей цих виробів) при їх тепловій обробці з використанням тільки теплоти гідратації цементу здійснюється на основі відповідної методики експериментально-розрахункових досліджень.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Інтенсивність твердіння бетонних та залізобетонних виробів залежить від низки факторів, серед яких – склад бетону, мінералогічний склад цементу, вид хімічних добавок, температура твердіння, вид теплоносія і т. ін.

Температура твердіння бетонних та залізобетонних виробів обумовлюється (за інших рівних факторів) співвідношенням між надходженнями теплоти до камери та відповідними витратами і втратами теплоти. Якщо початкова температура сформованих бетонних чи залізобетонних виробів:

– нижча, ніж температура конструкцій камери, то нагрівання виробів здійснюється

внаслідок наявності тепловиділення цементу при гідратації та внаслідок теплообміну з конструкціями камери (за умови відсутності теплоносія);

– вища, ніж температура конструкцій камери, то нагрівання виробів здійснюється внаслідок наявності тепловиділення цементу при гідратації (за умови відсутності теплоносія).

Особливості тепловиділення цементу при гідратації відображено, зокрема, в роботах [1-6].

У низці робіт показано умови, при яких твердіння бетонних та залізобетонних виробів відбувається без застосування теплоносія. У патенті [7] Пługінім А.А., Пługінім А.М., Романенко О.В., Пługінім О.А., Калінінім О.А., Пługінім Д.А. та Мірошніченко С.В. показано особливості підбору складу та виготовлення особливошвидкотверднучого безпропарювального бетону, який може бути найефективніше використаний при виробництві залізобетонних шпал. Після формування бетонні вироби витримують в камері пропарювання без подачі пари при температурі не менше 30°C, або влітку при такій же температурі на відкритому майданчику протягом 12...18 год. У статті [8] Романенко О.В., Пługінім А.А. та Яковлевим В.О. наведено результати досліджень оптимального вмісту суперпластифікатора для одержання потрібної передаточної міцності залізобетонних шпал при їх виробництві без тепловологісної обробки. У статті [9] Петровою Т.М., Серенко А.Ф. та інш. проаналізовано принципи вибору комплексних добавок для безпропарювальної та малопрогрівної технології виробництва бетонних і залізобетонних виробів. У статті [10] Ложкінім В.П., Марцінкевичем В.Л. та Велецьким І.В. наведено результати лабораторних досліджень ефективності дії хімічних добавок, застосування яких дозволяє виготовляти бетонні вироби без теплової обробки.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. При аналізі умов, за яких доцільно здійснювати прискорення твердіння бетонних та залізобетонних виробів із використанням тільки теплоти гідратації цементу, необхідно зважати на кінетику зміни температури цих виробів в зазначеному процесі.

У статті [11] показано прогнозування зміни температури бетонних виробів за умови прискорення їх твердіння з використанням теплоти гідратації цементу. У статті [12] відображено основні положення методу прогнозування термінів набору міцності бетонними виробами при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу. У статті [13] наведено теплові баланси камери при тепловій обробці бетонних виробів в зазначених умовах.

Необхідно вдосконалити метод експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу: застосувати критерії, які характеризують відповідні процеси теплообміну.

Постановка завдання. Мета роботи – вдосконалення методу експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу з урахуванням того, що вказані процеси характеризуються відповідними критеріями.

Основний матеріал і результати. Розглядається метод експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу. Ці дослідження доцільно розділити на два етапи.

Мета проведення попереднього етапу досліджень – орієнтовне прогнозування інтенсивності твердіння бетонних та залізобетонних виробів при їх тепловій обробці з використанням теплоти гідратації цементу. Призначення основного етапу досліджень – більш точне прогнозування цього показника. Основний етап досліджень може проводитися без виконання попереднього етапу.

При проведенні основного етапу досліджень необхідно відтворити для бетонних зразків, які тверднуть у лабораторній камері, температурний режим твердіння бетонних

виробів, що знаходяться у виробничій камері (згідно з вибраними початковими умовами).

Послідовність проведення основного етапу досліджень наступна.

1. Створюється лабораторна камера, в якій здійснюється моделювання процесів теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу.

1.1. При моделюванні процесів тепло- і масообміну в лабораторній камері необхідно врахувати, що подібні явища відбуваються в геометрично подібних системах.

У випадку, що розглядається, геометрично подібними повинні бути зразки до виробів, а також – лабораторна тепла камера до виробничої теплової камери.

Умова стосовно геометричної подібності зразків до виробів не завжди може бути виконана. У випадках, коли бетонні вироби мають значну відмінність між їх товщиною, шириною та довжиною, виготовити геометрично подібні їм зразки для випробовування в лабораторній установці неможливо. Разом з тим і в цьому випадку необхідно наближено відтворювати в зразках модуль поверхні виробів.

1.2. При моделюванні процесів тепло- і масообміну в лабораторній камері необхідно виконати наступне положення теорії подібності: подібними є ті процеси, умови однозначності яких подібні, та чисельно однакові критерії подібності, складені з величин, що входять до умов однозначності.

У камері наявні процеси променевого та конвективного теплообміну та процеси масообміну.

Значення критеріїв Біо, Фур'є, Нуссельта та дифузійного критерію Нуссельта (відповідно критеріїв, які входять до складу залежностей, за допомогою яких визначаються критерії Нуссельта) в лабораторній та у виробничій камерах повинні бути однаковими.

Однаковими повинні бути ступені чорноти тіл, між якими відбувається променевий теплообмін.

Критерій Нуссельта дорівнює:

– для горизонтальної поверхні:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad (1)$$

– для вертикальної поверхні:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}, \quad (2)$$

де l, h – визначальні розміри, м;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С).

Критерій Нуссельта при природній конвекції: $Nu = f(Gr Pr)$.

Критерій Нуссельта при природній конвекції (з урахуванням наявності зовнішнього масообміну): $Nu = f(Ar Pr)$.

Критерій Прандтля дорівнює:

$$Pr = \frac{\nu}{a}; \quad (3)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с.

Критерій Грасгофа дорівнює:

– для горизонтальної поверхні:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}; \quad (4)$$

– для вертикальної поверхні:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot h^3}{\nu^2}; \quad (5)$$

Критерій Релея дорівнює:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (6)$$

Дифузійний критерій Нуссельта дорівнює:

$$Nu' = \beta \cdot \frac{L}{D}, \quad (7)$$

або
$$Nu' = \beta' \cdot \frac{L}{D'}. \quad (8)$$

Дифузійний критерій Нуссельта $Nu' = f(Ar Pr')$.

Для виробів, які мають форму пластини:

– критерій Фур'є дорівнює:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}; \quad (9)$$

– критерій Біо дорівнює:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}, \quad (10)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, m^2/s ;

τ – проміжок часу, s ;

δ – напівтовщина виробу, який має форму пластини, m ;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

Слід враховувати, що розміри бетонних зразків, форм та конструкцій лабораторної камери менші, ніж у виробничій камері, тому інтенсивність тепловіддачі внаслідок природної конвекції та інтенсивність масообміну відповідно змінюються.

2. Здійснюється теплова обробка бетонних зразків в лабораторній камері з використанням тільки теплоти гідратації цементу.

3. Визначаються властивості бетону.

4. Проводиться аналіз отриманих експериментальних даних. За необхідності виконуються додаткові експериментальні дослідження для корегування складу бетону та розроблення заходів щодо зменшення втрат теплоти камерою.

Застосування основного етапу досліджень є матеріаломістким, якщо необхідно проаналізувати: процес теплової обробки різних виробів; різні конструктивні варіанти камери, що проектується, і т. ін. У таких випадках доцільно виконати попередній етап досліджень теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу [12].

Приклад експериментальних досліджень. Здійснюється теплова обробка бетонних тротуарних плиток в лабораторній камері впродовж доби з використанням теплоти гідратації цементу. Розміри плиток – $20 \times 10 \times 4$ см. У складі бетону – гіперпластифікатор та прискорювач твердіння (дозування – згідно з рекомендаціями виробника). Порівнюється у визначені терміни (1 доба, 3 доби, 7 діб та 28 діб) міцність при стиску бетону тротуарних плиток, котрі тверділи в тепловій камері та в повітряних умовах.

На рис. 1 наведено приклад зміни температури бетонних тротуарних плиток в теплоізоляційній камері впродовж однієї доби. За перші 6 годин твердіння температура бетону зросла на $1,3^\circ C$, а через 22 години перевищувала початкову температуру на $12,7^\circ C$. Маса форм становить близько 7% від маси плитки, тому витрата теплоти на нагрівання форм – мінімально можлива.

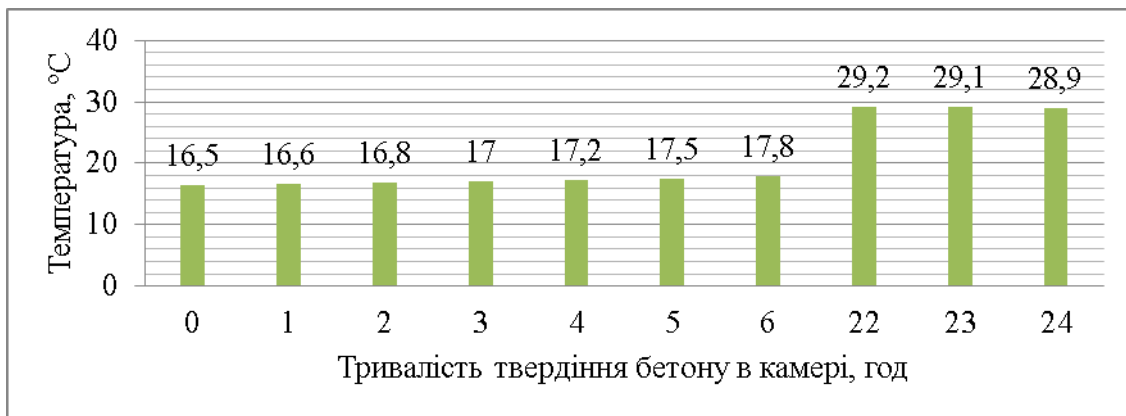


Рис. 1. Зміна температури бетонних тротуарних плиток

На рис. 2 показано порівняння міцності при стиску бетону тротуарних плиток, які першу добу тверділи в тепловій камері, та міцності при стиску бетону тротуарних плиток, які тверділи в умовах лабораторії.

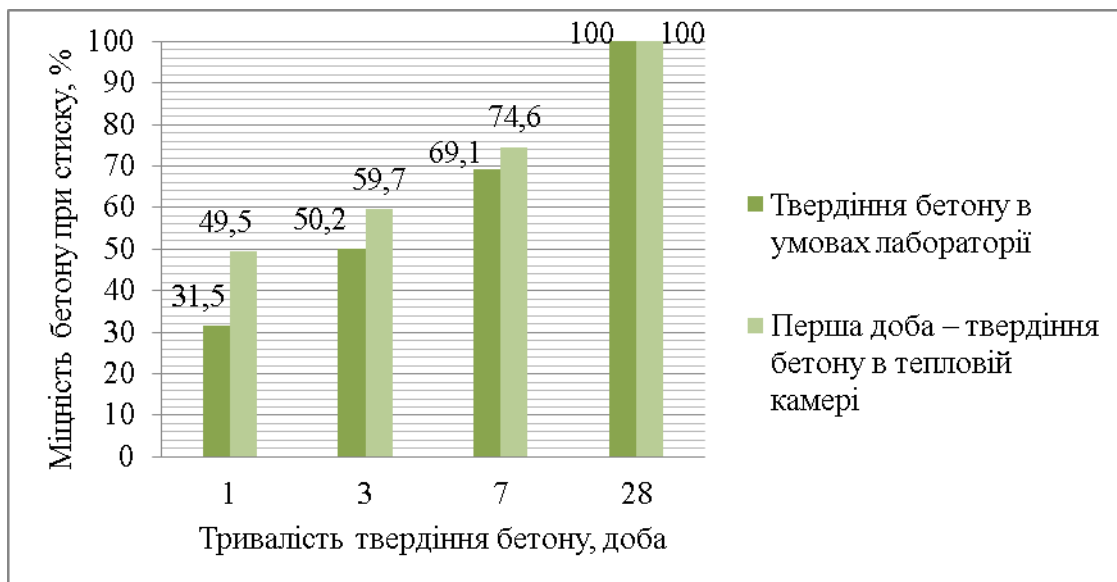


Рис. 2. Міцність при стиску бетону тротуарних плиток

Міцність при стиску бетону тротуарних плиток через добу їх твердіння в тепловій камері в 1,57 рази перевищувала міцність при стиску бетону контрольних тротуарних плиток, у віці 3 діб – в 1,19 рази, у віці 7 діб – в 1,08 рази.

Критерії подібності, які характеризують процеси тепло- і масообміну в досліджуваних умовах та в установці, що проектується, рівні.

Висновки.

1. Удосконалено метод експериментально-розрахункових досліджень процесів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу з урахуванням того, що процеси тепло- і масообміну в камері характеризуються відповідними критеріями.

2. Встановлено, що в досліджуваних умовах інтенсивність набору бетоном ранньої міцності зростає в 1,57 рази, що дозволяє підвищити оборотність форм порівняно з твердінням в природних умовах.

3. Надалі необхідно провести аналогічні дослідження при вищій (ніж в проведених експериментах) початковій температурі бетонної суміші.

Література

1. Запорожец И.Д. Тепловыделение бетона / И.Д. Запорожец, С.Д. Окороков, А.А. Парийский. – Л. – М. : Издат. лит. по строит., 1966. – 314 с.
2. Мчедлов-Петросян О.П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О.П. Мчедлов-Петросян, А.В. Ушеров-Маршак, А.М. Урженко. – М.: Стройиздат, 1984. – 224 с.
3. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / А.В. Ушеров-Маршак // В кн.: Калориметрия цемента и бетона: избранные труды. Под. ред. А.В. Ушерова-Маршака. – Х.: Факт, 2002. – 183 с.
4. Сопов В.П. Ранние стадии гидратации в присутствии добавок «Релаксол» / В.П. Сопов, Л.А. Першина, Л.Н. Решетник // В зб.: Хімічні і мінеральні добавки в бетон. За заг. ред. О.В. Ушерова-Маршака. – Х.: Колорит, 2005. – С. 176 – 186.
5. Лівша Р.Я. Оцінка екзотермії на ранній стадії тверднення цементобетонного покриття [Електронний ресурс] / Р.Я. Лівша, Л.О. Карасьова. – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/7655/1/25.pdf>.
6. Павлюк В.В. Оцінка тепловиділення цементу загальнобудівельного призначення, модифікованого хімічними добавками / В.В. Павлюк, Л.В. Терещенко, К.В. Бондар // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20. – С. 82 – 87.
7. Пат. № 99426. Україна. МПК (2012.01) G01N 33/38 (2006.01) C04B 28/00. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон / А.А. Пługін, А.М. Пługін, О.В. Романенко, О.А. Пługін, О.А. Калінін, Д.А. Пługін, С.В. Мірошніченко; заявник і власник Українська державна академія залізничного транспорту; заяв. 14.12.2011; опубл.10.08.2012; бюл. № 15.
8. Романенко О.В. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки / О.В.Романенко, А.А. Пługін, В.О.Яковлев // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2010.– Вип.115. С. 97 – 103.
9. Принципы выбора комплексных добавок для беспропарочной технологии производства бетона и железобетона / Т.М. Петрова, А.Ф. Серенко, М.И. Милачев, Д.М. Милачев // Строительные материалы. – 2010. – № 7. – С. 62, 63.
10. Ложкин В.П. Производство сборного железобетона без тепловой обработки [Электронный ресурс] / В.П. Ложкин, В.Л. Марцинкевич, И.В. Велецкий. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-sbornogo-zhelezobetona-bez-teplovoy-obrabotki>.
11. Кугаєвська, Т.С. Аналіз можливості прогнозування зміни температури бетонних виробів при їх твердінні без використання теплоносія в теплий період року / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування. Будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Випуск 1 (36), т. 2. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – С. 70 – 75.
12. Кугаєвська, Т.С. Основні положення методу прогнозування термінів набору міцності бетонними виробами при їх твердненні без використання теплоносія / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування. Будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Випуск 1 (40). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 302 – 310.
13. Кугаєвська, Т.С. Теплові баланси камери для теплової обробки бетонних виробів із використанням теплоти гідратації цементу / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін, В.П. Сопов // Науковий вісник будівництва. Випуск 1 (83). – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – С.138 – 143.

Стаття надійшла 24.11.2016