

*Т.С. Кугаєвська, к.т.н., доцент
В.В. Шульгін, к.т.н., доцент
М.О. Юрченко, магістрант*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ТЕПЛОВІ БАЛАНСИ КАМЕРИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ БЕТОННИХ ВИРОБІВ НАГРІТИМ ПОВІТРЯМ

Розглянуто конструктивні особливості камери (що проектується), призначеної для теплової обробки бетонних тротуарних плиток нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям. Проаналізовано особливості процесів теплообміну, що відбуваються в цій камері. Розроблено відповідні теплові баланси, необхідні для пошуку оптимальних конструктивних рішень та прогнозування зміни температури тверднучих бетонних виробів залежно від кліматичних умов.

Ключові слова: *бетонні вироби, тепла обробка, нагріте повітря, сонячна енергія.*

*Т.С. Кугаевская, к.т.н., доцент
В.В. Шульгин, к.т.н., доцент
М.А. Юрченко, магистрант*

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ТЕПЛОВЫЕ БАЛАНСЫ КАМЕРЫ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НАГРЕТЫМ ВОЗДУХОМ

Рассмотрены конструктивные особенности камеры (которая проектируется), предназначенной для тепловой обработки бетонных тротуарных плиток нагретым в коллекторе солнечной энергии воздухом. Проанализированы особенности процессов теплообмена, происходящих в этой камере. Разработаны соответствующие тепловые балансы, необходимые для поиска оптимальных конструктивных решений и прогнозирования изменения температуры твердеющих бетонных изделий в зависимости от климатических условий.

Ключевые слова: *бетонные изделия, тепловая обработка, нагретый воздух, солнечная энергия.*

*T.S. Kugaevska, PhD, Associate Professor
V.V. Shulgin, PhD, Associate Professor
M.A. Yurchenko, master student*

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

HEAT BALANCES OF CAMERA FOR HEAT TREATMENT OF CONCRETE PRODUCTS WITH HEATED AIR

This article considers structural features camera designed for heat treatment of concrete paving slabs. Camera uses air heated by solar energy inside collector. Features of heat transfer processes inside camera are analyzed. Relevant thermal balances necessary to find optimal design solutions are developed. Balances are designed to predict changes of hardening concrete products temperature depending on climatic conditions.

Keywords: *concrete products, heat treatment, heated air, solar energy.*

Вступ. Тепловологісна та тепла обробка бетонних і залізобетонних виробів потребує значних енерговитрат. Одним із шляхів енергозаощадження в цьому процесі є застосування сонячної енергії.

Інтенсивність надходження сонячної енергії до установки, призначеної для теплової обробки бетонних виробів, не є сталою. Тому при проектуванні такої установки необхідно враховувати співвідношення між кількістю сонячної енергії, що надходить до неї, та енергією, необхідною для здійснення вказаного процесу. Також потрібно передбачити засоби для здійснення теплової обробки бетонних виробів у період відсутності надходження сонячної енергії до установки.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. У джерелі [1] показано різні способи застосування сонячної енергії для виробництва бетонних та залізобетонних виробів.

У статті [2] розглянуто тепло- і масообмінні процеси, які відбуваються в залізобетонних конструкціях при геліотермообробці з проміжним теплоносієм, та їх вплив на фізико-механічні властивості цих конструкцій. У вказаному способі теплової обробки залізобетонних виробів передбачено використання у холодний період року електроенергії для нагрівання води в геліосистемі. У статтях [3, 4] відображено спосіб прискорення тверднення пінобетону, в якому здійснюється геліопрогрівання виробів у поєднанні з електронагріванням.

У джерелах [5, 6] відображено особливості геліотермообробки залізобетонних виробів із використанням засобів, що сприяють інтенсифікації надходження сонячної енергії до цих виробів.

У статті [7] проаналізовано доцільність використання сонячної енергії при виробництві полістиролбетонних виробів.

Дослідження способів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням сонячної енергії є актуальним завданням сьогодення.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У джерелі [8] відображено спосіб теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів із використанням нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря, за необхідності рекомендовано застосовувати додаткове джерело теплоти – повітронагрівач. Одним із завдань, які потрібно розв'язати при впровадженні у виробництво цього способу прискорення тверднення бетонних виробів, є вибір оптимальної конструкції відповідної установки.

Постановка завдання. Мета роботи – розроблення теплових балансів камери, призначеної для теплової обробки бетонних тротуарних плиток нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям. Аналіз цих балансів є складовою частиною методики вибору оптимальних конструктивних рішень установки та прогнозування зміни температури тверднучих бетонних виробів залежно від кліматичних умов.

Основний матеріал і результати. Розглядається теплообмін у камері (що проектується), призначеній для теплової обробки бетонних тротуарних плиток нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям.

Тепле повітря, що рухається в камері, не повинно стикатися з відкритою поверхнею виробів, щоб не відбувалося випаровування вологи, необхідної для гідратації цементу. Проаналізовано два варіанти гідроізоляції виробів.

Перший варіант: блок виробів накрито гідроізоляційним матеріалом (рис. 1). Основною перевагою цього способу є простота конструкції, а основним недоліком – менша, ніж у другому варіанті, площа контакту системи, що нагрівається, з теплоносієм.

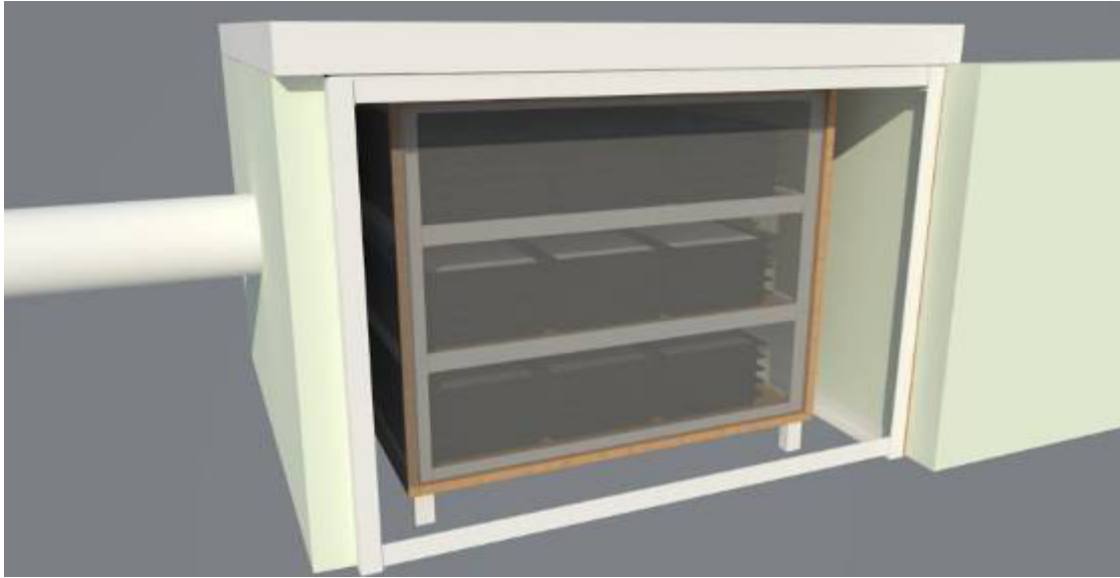


Рис. 1. Перший варіант конструкції камери для теплової обробки нагрітим повітрям бетонних тротуарних плиток

Другий варіант: спеціальним обладнанням або гідроізоляційним матеріалом закрито виробу, які розташовано на кожній полиці (рис. 2). Основною перевагою другого варіанта є більша, ніж у першому варіанті, площа контакту виробів із теплоносієм. Основними недоліками другого варіанта гідроізоляції виробів є ускладнена конструкція відповідного устаткування та збільшення витрат енергії на його нагрівання.



Рис. 2. Другий варіант конструкції камери для теплової обробки нагрітим повітрям бетонних тротуарних плиток

Розглянемо теплообмін у камері, котру зображено на рис. 1. Термін теплової обробки бетонних виробів розділяється на певні проміжки часу. Для кожного проміжку часу складаються теплові баланси камери.

Тепловий баланс камери, в якій тверднуть бетонні вироби, для певного проміжку часу має вигляд

$$Q_1' + Q_2' = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}, \quad (1)$$

де Q_1' – надходження теплоти з нагрітим повітрям, Дж;

Q_2' – надходження теплоти внаслідок гідратації цементу, Дж;

Q_1 – втрати теплоти з повітрям, що видаляється з камери, Дж;

Q_2 – витрати теплоти на нагрівання бетону, який твердне, Дж;

Q_3 – витрати теплоти на нагрівання форм, Дж;

Q_4 – витрати теплоти на нагрівання обладнання камери, Дж; якщо обладнання виконано з різного матеріалу, то цей чинник ураховується в обчисленнях;

Q_5 – витрати теплоти на нагрівання гідроізоляційного матеріалу, Дж;

Q_6 – витрати теплоти на нагрівання стін камери, Дж;

Q_7 – витрати теплоти на нагрівання кришки камери, Дж;

Q_8 – втрати теплоти в навколишнє середовище стінами Q_{8C} та кришкою камери Q_{8K} , Дж (за умови наявності таких втрат теплоти у вибраний момент часу);

Q_9 – витрати теплоти на нагрівання підлоги камери, Дж;

Q_{10} – витрати теплоти на прогрівання ґрунту, який знаходиться під підлогою камери, Дж (за умови наявності таких витрат теплоти у вибраний момент часу).

Бажано, щоб теплотехнічні властивості конструкцій, що огороджують камеру, забезпечили виконання умов: $Q_8 = 0$ і $Q_{10} = 0$.

Надходження теплоти внаслідок гідратації цементу Q_2' визначаються за експериментальними даними.

Надходження теплоти до камери з нагрітим повітрям упродовж вибраного проміжку часу, Дж, дорівнюють

$$Q_1' = c_{ПП} \cdot \rho_{ПП} \cdot L_{П} \cdot t_{ПП} \cdot \Delta Z; \quad (2)$$

втрати теплоти з повітрям, що видаляється з камери впродовж вибраного проміжку часу, Дж, дорівнюють

$$Q_1 = c_{ПК} \cdot \rho_{ПК} \cdot L_{П} \cdot t_{ПК} \cdot \Delta Z, \quad (3)$$

де $c_{ПП}$ – питома масова теплоємність повітря, Дж/(кг·°C), при початковій для вибраного проміжку часу температурі нагрітого в колекторі сонячної енергії повітря $t_{ПП}$;

$\rho_{ПП}$ – густина повітря при температурі $t_{ПП}$, кг/м³;

$L_{П}$ – витрата повітря, м³/с; ΔZ – проміжок часу, с;

$c_{ПК}$ – питома масова теплоємність повітря, Дж/(кг·°C), при температурі повітря на виході з камери наприкінці вибраного проміжку часу $t_{ПК}$; у досліджуваному інтервалі температур $c_{ПП} = c_{ПК}$;

$\rho_{ПК}$ – густина повітря, кг/м³, при температурі $t_{ПК}$.

Тепловий баланс гідроізольованої системи (рис. 1) для певного проміжку часу має вигляд

$$\alpha_{Г} \cdot (t_{П} - t_{Г}) \cdot F_{Г} \cdot \Delta Z + Q_2' = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{9Г} + Q_{10Г} + Q_{Р}, \quad (4)$$

де $\alpha_{Г}$ – коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого повітря до зовнішніх поверхонь гідроізоляційної конструкції, що обмежує систему, Вт/(м²·°C); коефіцієнт $\alpha_{Г}$ обчислюється за формулами, наведеними, зокрема, в джерелі [9];

$F_{Г}$ – площа гідроізоляційної конструкції, м²; $t_{П}$ – середня за вибраний проміжок часу температура повітря, °C;

$t_{Г}$ – середня за вибраний проміжок часу температура поверхонь гідроізоляційної конструкції, °C;

$Q_{9Г}$ – витрати теплоти на нагрівання тієї частини підлоги камери, яка розташована в межах гідроізольованої системи, Дж;

$Q_{10Г}$ – витрати теплоти на прогрівання відповідної частини ґрунту, Дж (за умови наявності таких втрат теплоти у вибраний момент часу);

Q_P – кількість теплоти, Дж, що передається за вибраний проміжок часу внаслідок наявності енергії результуючого випромінювання між зовнішніми поверхнями гідроізоляційної конструкції та відповідними внутрішніми поверхнями конструкцій, що огорожують камеру, Дж.

Зміну температури гідроізолюваної системи запропоновано визначати так:

– обчислюється зміна температури системи з урахуванням тільки надходження теплоти від повітря;

– ураховується додаткова зміна температури системи внаслідок виділення теплоти цементом при взаємодії з водою;

– виконується корегування отриманих результатів з урахуванням того, що складові рівняння (4) взаємозалежні.

У довідниковій літературі (зокрема, в джерелі [10]) наведено такі залежності для визначення кількості теплоти, Дж, яку сприймає матеріал від повітря за певний проміжок часу

$$Q = c \cdot G \cdot (t_{nc} - t_{mn}) \cdot \beta, \quad (5)$$

де c – питома масова теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°C);

G – маса матеріалу, кг;

t_{nc} – температура навколишнього середовища, °C;

t_{mn} – початкова температура матеріалу, °C;

β – коефіцієнт, котрий ураховує, яку частку теплоти сприймає матеріал за вибраний проміжок часу (відносно кількості теплоти, необхідної для нагрівання матеріалу до температури навколишнього середовища); коефіцієнт β визначається за довідниковими даними за допомогою критерію Фур'є, який дорівнює

$$F_0 = \Delta Z / c \cdot G \cdot R, \quad (6)$$

де ΔZ – проміжок часу, с; R – повний опір передачі теплоти від навколишнього середовища до поверхні теплообміну, °C/Вт.

Значення R обчислюється за формулою

$$R = G / (\rho \cdot \lambda \cdot F^2) + 1 / (\alpha \cdot F), \quad (7)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·°C);

α – коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища до поверхні теплообміну, Вт/(м²·°C);

F – площа поверхні теплообміну, м².

Формули (5) – (7) корегуються з урахуванням того, що в гідроізолюваній системі знаходяться матеріали, які мають різні значення величин c , ρ , λ .

Кількість теплоти, що передається за певний проміжок часу від нагрітого повітря до внутрішніх поверхонь конструкцій, котрі огорожують камеру, дорівнює

$$\alpha_{OK} \cdot (t_{П} - t_{OK}) \cdot F_K \cdot \Delta Z + Q_P = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_{9K} + Q_{10K}, \quad (8)$$

де α_{OK} – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до внутрішніх поверхонь конструкцій, які огорожують камеру (за винятком тієї частини підлоги камери, що знаходиться в межах гідроізолюваної системи), Вт/(м²·°C); коефіцієнт α_G обчислюється за формулами, наведеними, зокрема, в джерелі [9];

t_{OK} – середня за вибраний проміжок часу температура внутрішніх поверхонь конструкцій, °C;

F_K – площа внутрішніх поверхонь конструкцій, м²;

Q_{9K} – витрати теплоти на нагрівання тієї частини підлоги камери, яка розташована за межами гідроізолюваної системи, Дж;

$Q_{\text{лок}}$ – витрати теплоти на прогрівання відповідної частини ґрунту, Дж (за умови наявності таких втрат теплоти у вибраній момент часу).

Теплові баланси камери, складені для певних проміжків часу, обчислюються методом ітерацій (послідовних наближень).

Висновки. Розроблено теплові баланси камери для теплової обробки бетонних тротуарних плиток нагрітим у колекторі сонячної енергії повітрям.

Надалі необхідно:

– виконати сумісний аналіз теплових балансів різних варіантів конструкцій камер і теплових балансів колектора сонячної енергії; цей аналіз дозволить вибрати оптимальну конструкцію установки та здійснювати прогнозування зміни температури тверднучих бетонних виробів залежно від кліматичних умов;

– розробити конструкцію установки з додатковим джерелом теплоти – повітрянагрівачем.

Література

1. Подгорнов Н.И. Термообработка бетона с использованием солнечной энергии / Н.И. Подгорнов. – М.: Издательство «АСВ», 2010. – 328 с.
2. Аруова Л.Б. Использование солнечной энергии для гелиотермообработки бетона в Республике Казахстан [Электронный ресурс] / Л.Б. Аруова, Н.Т. Даужанов. – Режим доступа: http://zimbeton.ru/article/2012_10_3.pdf.
3. Даужанов Н.Т. Технология гелиотермообработки изделий из пенобетона на полигонах [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru>.
4. Даужанов Н.Т. Малоэнергоёмкая технология термообработки изделий из пенобетона на полигонах с помощью солнечной энергии [Электронный ресурс] / Н.Т. Даужанов, Б.А. Крылов. – Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru>.
5. Щукина Т.В. Гелиотермообработка с использованием средств повышения энергооблучённости строительных изделий [Электронный ресурс] / Т.В. Щукина, Е.Ю. Семенова. – Режим доступа: <http://www.rusnauka.com>.
6. Пат. № 2444682. Российская Федерация. МПК F24J2/02, F26B3/28. Солнечный тепловой коллектор / Л.В. Кузнецова, И.И. Полосин, Т.В. Щукина; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет ГОУВПО ВГАСУ; заяв. 09.07.2010; опубл. 10.03.2012.
7. Кареке Г.Т. Использование солнечной энергии при производстве полистирол-бетонных изделий [Электронный ресурс] / Г.Т. Кареке, М.З. Абдикаримова. – Режим доступа: <http://www.rusnauka.com>.
8. Пат. № 83714. Україна. МПК (2013.01) F24H 3/00. Спосіб використання сонячної енергії для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів / Т.С. Кугаєвська, В.В. Шультгін, О.В. Свінін; заявник і власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; заяв. 01.04. 2013; опубл. 25.09.2013, бюл. № 18.
9. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
10. Волков О.Д. Проектирование вентиляции промышленного здания: учеб. пособие / О.Д. Волков. – Харьков: Вища школа, 1989. – 240 с.

© Т.С. Кугаєвська, В.В. Шультгін, М.О. Юрченко
Надійшла до редакції 28.04.2015