

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАСООБМІНУ, ТЕПЛО- Й
МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ІНТЕНСИВНОМУ ЗНЕВОДНЕННІ
ТА ТВЕРДІННІ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ ТІЛ
(НА ПРИКЛАДІ БЕТОНУ ДЛЯ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ)**

**STUDY OF MASS TRANSFER, HEAT AND MASS TRANSFER
PROCESSES DURING INTENSIVE DEHYDRATION AND
HARDENING OF CAPILLARY-POROUS BODIES (ON THE EXAMPLE
OF CONCRETE FOR ROAD PAVEMENT)**

Човнюк Ю.В., к.т.н., доц. (Національний авіаційний університет, м. Київ), Кравчук В.Т., к.т.н., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Приймаченко О.В., к.т.н., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Чередніченко П.П., доц. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Шудра Н.С., ст. викл. (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)

Chovnyuk Y.V., Ph.D., Associate Professor (National Aviation University, Kyiv), Kravchuk V.T., Ph.D., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Priymachenko O.V., Ph.D., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Cherednichenko P.P., Associate Professor (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv), Shudra N.S., Senior Lecturer (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)

Бетон є капілярно-пористим тілом (як при інтенсивному зневодненні, так і у процесі твердіння). Для аналізу тепло- та масообмінних процесів використана система диференціальних рівнянь тепломасоперееносу, отримана академіком О.В. Ликовим. У роботі досліджений вплив інтенсивного зневоднення бетону на процеси вологообміну й вологопереносу. У якості критерію переносу вологи у процесі термообробки застосовується масообмінний критерій Кирпичова. Результати дослідження процесів тепло- й масоперееносу при твердінні бетону порівнюються з даними, отриманими при моделюванні вказаних процесів за обраних граничних умов. Експериментальний та чисельний аналіз даних, їх співставлення з результатами аналітичного розв'язку математичної моделі показують можливість застосування останнього підходу для опису процесів тепло- й масоперееносу при твердінні бетону.

Concrete is a capillary-porous body (both during intensive dehydration and during curing). To analyze heat and mass transfer processes, the well-known system of differential equations of heat and mass transfer obtained by academician A.V. Lykov is usually used. This system takes into account all types of energy and matter transfer, including those arising from the interaction of heat and mass flows. In particular, in the process of steam-heat treatment due to increase in moisture content of concrete specimens, excessive lumps grow, which do not relax due to moisture transport. With the increase in moisture content (especially surface layers) and internal excess lumps, a volume-stress state in the material occurs, where tensile tangential stresses exist, which leads to the deformation of the material structure that is formed.

In this paper, the influence of intensive dehydration of concrete on the processes of moisture exchange and moisture transfer is investigated. Kirpichev's mass transfer criterion is applied as a criterion of moisture transfer in the process of heat treatment, which characterizes the intensity of external mass transfer compared to the external intensity of substance transfer. The main regularities of mass exchange and mass transfer in the processes of intensive dehydration of concrete are established.

The processes of heat and mass transfer are related to each other, so the purpose of this research is mathematical modelling of the processes of heat and moisture treatment of concrete in the generalized formulation of the problem. A concrete product in the form of a vertical plate of unlimited dimensions of finite thickness is considered as an object of research.

The results of investigation of heat and mass transfer processes during concrete hardening are compared with the data obtained by modelling of these processes under selected boundary conditions. The analysis of experimental data and their comparison with the results of numerical solution of the mathematical model show the possibility of its application to describe the processes of heat and mass transfer during concrete hardening.

Ключові слова: масообмін; тепломасоперенос; інтенсивне зневоднення; твердіння; капілярно-пористі тіла; бетонні вироби.

Keywords: Mass transfer; heat and mass transfer; intensive dehydration; curing; capillary-porous bodies; concrete products.

Постановка проблеми. Бетон, який затвердів, є капілярно-пористим тілом. Тому для аналізу тепломасообмінних процесів можна застосовувати систему диференціальних рівнянь тепломасопереносу, отриману академіком О.В. Ликовим. Система враховує усі види переносу енергії й речовини, у тому числі й ті, що виникають за рахунок взаємодії потоків тепла й маси.

У процесі паротеплової обробки внаслідок збільшення вологовмісту бетонних зразків, зростають надлишкові тиски, що не релаксують переміщенням вологи. Зі збільшенням вологовмісту (особливо поверхневих прошарків) й внутрішніх надлишкових тисків виникає об'ємно-пружний стан у матеріалі за наявності у останньому розтягуючих

дотичних напружень, що призводить до деформативності структури матеріалу, яка формується.

Важливо встановити, як саме інтенсивне зневоднення бетону впливає на процеси вологообміну й вологопереносу.

Дослідження процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону, проведені вченими, фахівцями-технологами, показують, що для можливості вивчення одночасно протікаючих й взаємодіючих складних процесів тепло- й масопереносу, як правило, слід здійснювати цілу низку спрощень і припущень, котрі призводять до значних похибок у результатах досліджень.

Отже, виникає нагальна потреба у обґрунтованому математичному моделюванні процесів тепловологісної обробки бетону при найбільш узагальненій постановці задачі.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Явища переносу у капілярно-пористих тілах, закономірності їх сушки, а також процеси термічної обробки вологих матеріалів проведені у роботах [1-4].

Узагальнення досвіду й результати досліджень, пов'язаних з впливом різноманітних факторів на ефективність тепловологісної обробки бетонних виробів подані у роботах [5-8].

У роботі [9] наведені рівняння процесів теплопровідності й вологопровідності бетону із урахуванням екзотермії й гідратації. Щоб розв'язати ці рівняння аналітичним методом із урахуванням граничних умов, автор [9] максимально спрощує значення, котрі враховують екзотермію, провівши їх лінеаризацію. Втрати тепла, котрі відбуваються при випаровуванні вологи з поверхні бетонного виробу й мають велике значення при вивченні процесів тепло- й масопереносу, не враховуються. У роботах [10, 11] показано, що процеси тепло- й масопереносу пов'язані між собою, тому метою досліджень авторів [12] було математичне моделювання процесів тепловологісної обробки бетону при більш узагальненій постановці задачі. Вони розглядали бетонний виріб у вигляді вертикальної пластини необмежених розмірів скінченої товщини.

У даному дослідженні враховані результати робіт, отриманих авторами [1-12].

Мета дослідження полягає у обґрунтуванні математичної моделі процесів масообміну тепло- й масопереносу при інтенсивному зневодненні бетону та при його твердінні.

Основна частина. 1. Моделювання масообміну й масопереносу у процесі інтенсивного зневоднення бетону. Інтенсивне зневоднення бетону впливає на процеси вологообміну й вологопереносу. У якості критерію переносу вологи у процесі термообробки прийнятий масообмінний критерій Кирпичова, котрий характеризує собою інтенсивність зовнішнього масообміну у порівнянні з внутрішньою інтенсивністю переносу речовини [1]:

$$K_{im} = \frac{j(\tau) \cdot R}{a_m \cdot \rho_0 \cdot u_0}, \quad (1)$$

де: $j(\tau)$ – зміна потоку маси від часу τ ; a_m – коефіцієнт потенціалопровідності; ρ_0 – початкова щільність речовини; R – універсальна газова постійна; u_0 – початкова швидкість руху речовини.

Відомо, що критерій K_{im} змінюється від 0 до 2 у випадку параболічного розподілу вологовмісту у матеріалі.

При розв'язуванні задачі визначення критерію K_{im} необхідно дослідити зміни потоку маси j_m й коефіцієнту потенціалопровідності a_m . Дослідження проводились за умов звичайного пропарювання й комбінованої тепловологісної обробки (ТВО), у котрій на стадії ізотермічного прогрівання насичений водяний пар замінювали сухим гарячим повітрям з температурою ізотермічної витримки [4]. Кількість води, яка випаровується у кінці прогрівання складала $q_m = (0,82; 1,85; 1,92) \text{ кг/м}^2$ для розчину, бетону й цементного каменю, відповідно, при звичайному пропарюванні, й $(2,80; 3,78; 4,22) \text{ кг/м}^2$ при комбінованій ТВО (рис. 1).

Тривалість постійної швидкості випаровування залежить від початкового вологовмісту матеріалу, граничних умов та кінетики процесу гідратації.

Скінченний період характеризується падінням інтенсивності випаровування, котре настає при певній вологості матеріалу. При цьому масообмін із зовнішнім середовищем, лімітований процесами внутрішнього масопереносу, й відбувається поглиблення зони випаровування й зневоднення бетону від периферії до центру.

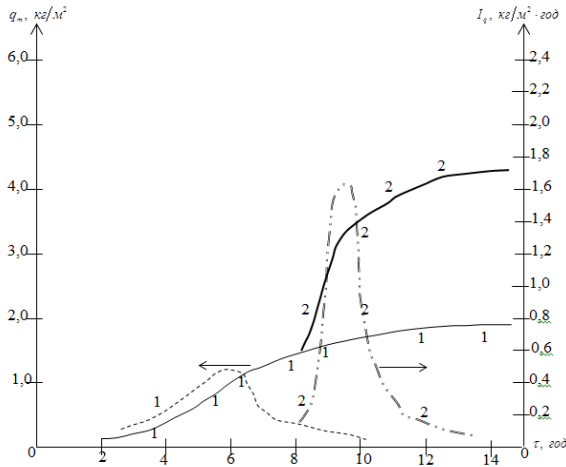


Рис. 1. Зміна випаровування вологи (q_m) та інтенсивності (I_q) її випаровування за звичайного пропарювання (1) й комбінованої ТВО (2): бетон, В/Т=0,097.

Для аналізу процесу термообробки у зв'язку з уточненням режимів комбінованої ТВО були проведені [4] розрахунки критерію Кирпичова K_{im} . На рис. 2 видно, що при звичайному пропарюванні крива $K_{im} = f(\tau)$ після 8-10 годин починає спадати. Після початку сушки критерій Кирпичова різко зростає за рахунок збільшення інтенсивності випаровування вологи з матеріалу. Після 13 годин сушку можна закінчувати, оскільки інтенсивність випаровування різко знижується й відповідно відбувається зменшення K_{im} .

З робіт О.В.Ликова [1,3] відомо, що чим менше K_{im} , тим меншим є опір внутрішньому переносу речовини.

Як впливає з рис. 2, на стадії ізотермічного прогрівання, коли структура матеріалу вже набула міцності, достатньої для опору напруженням, величина K_{im} значно збільшується при комбінованій ТВО. Міграція вологи вже ускладнена внаслідок утворення більш щільної структури зі збільшенням об'єму мікрокапілярів й замкненою пористістю, що зменшує небезпеку деформацій та порушень структури.

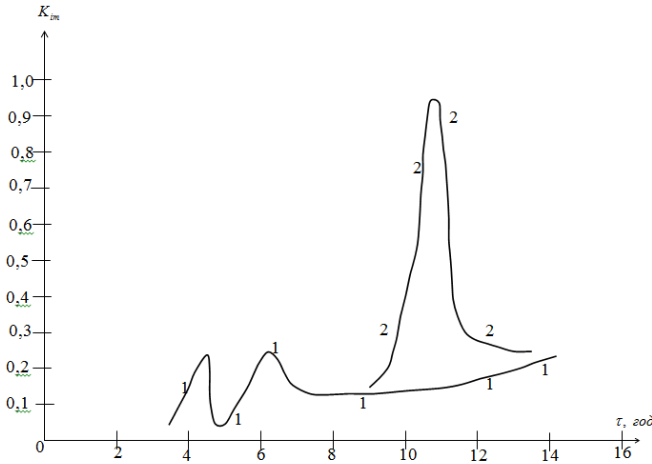


Рис. 2. Зміна критерію Кирпичова K_{im} у процесі звичайного пропарювання (1) й комбінованої ТВО (2): бетон, В/Т=0,097.

2. Моделювання процесів тепло- й масопереносу при твердінні бетону. Математична модель процесу тепло- й масопереносу подана системою диференціальних рівнянь у частинних похідних другого порядку і має вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial t} = a_T(t, \vartheta, u) \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(x,t)}{\partial x^2} + f(t, \vartheta, u); \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a_g(t, \vartheta, u) \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - g(t, \vartheta, u), \end{cases} \quad (2)$$

де: $\vartheta = \vartheta(x,t)$ – температура у градусах ($^{\circ}\text{C}$) точки з координатою x у момент часу t ; $u = u(x,t)$ – поточний вологовміст бетону (у $\text{кг}/\text{кг}$);
 $a_T = a_T(t, \vartheta, u)$ – коефіцієнт температуропровідності,
 $a_T = 4 \cdot 10^{-3} \cdot [0,5 + (80 - \vartheta)/120]$, $\text{м}^2/\text{год}$; $a_g = a_g(t, \vartheta, u)$ – коефіцієнт дифузії води;
 $a_g = a_g(u) = 4 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-2} \cdot (u - 0,02)^2$, $\text{м}^2/\text{год}$;
 $f(t, \vartheta, u)$ – функція екзотермії бетону,
 $f(t, \vartheta, u) = [70 + 20 \cdot (\exp(0,02t) - 1) \cdot \vartheta]^{-1}$, $\text{град}/\text{год}$; $g(t, \vartheta, u)$ – функція, що описує внутрішнє стікання води, тобто кількість води, що

використовується для хімічного зв'язування води при гідратації, $g(t, \varnothing, u) = 25 \cdot 10^{-5} \cdot \varnothing / [70 + 20 \cdot \{ \exp(0,02t) - 1 \}]$, кг/кг · год. Чисельні значення параметрів a_T, a_g, f, g , обрані із урахуванням роботи [9]. Початкові умови подані у вигляді:

$$\begin{cases} \varnothing(0, x)|_{t=0} = \varnothing_0(x) \quad (0 \leq x \leq R); \quad \varnothing_0(x) = 20^\circ \text{C}, \\ u(0, x) = u_0(x), \quad u_0(x) = (0,04 \dots 0,09), \end{cases} \quad (3)$$

де $\varnothing_0(x)$ – початкова температура, $u_0(x)$ – початковий вологовміст, R товщина виробу, м, $R = 0,1$ м.

Граничні умови виражаються у залежності від характеру контакту бетону з формооснащенням. Так, для поверхні бетону, що розміщена безпосередньо у площині нагрівання ($x = R$), маємо:

$$\begin{cases} \varnothing(t, x)|_{x=R} = T_R(t), \\ \left. \frac{\partial \varnothing(t, x)}{\partial x} \right|_{x=0} = H_0(\varnothing) \cdot [\varnothing(t, 0) - T_0(t)] + j \cdot \left. \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} \right|_{x=0}. \end{cases}$$

$$T_R(t) = \begin{cases} (20 + 22,5 \cdot t), & 0 \leq t \leq 2; \\ 85, & 2 \leq t \leq 14; \\ (85 - 45 \cdot (t - 14)), & 14 \leq t \leq 15. \end{cases} \quad (4)$$

Тут $T_0(t)$, $T_R(t)$ – температура поверхонь бетонного виробу відповідно при $x = 0$ й $x = R$; $H_0(\varnothing)$ – відносний коефіцієнт теплопередачі,

$$H_0(\varnothing) = [4 + (\varnothing - 20)^2 / 360] \text{ м}^{-1} \quad [9];$$

$H_0(\varnothing) = \alpha_{HT}(\varnothing) / \lambda$; $\alpha_{HT}(\varnothing)$ – коефіцієнт теплопередачі (у $\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{год}$); λ – коефіцієнт теплопровідності (у

$\text{Ккал} / (\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{год})$); $\varnothing(t, 0)$ – температура на поверхні стінки з

координатою x у момент часу t ; $j = \gamma \cdot a_b \cdot r / \lambda$; γ – щільність бетону

($\gamma \approx 2400 \text{ кг} / \text{м}^3$); r – питома теплота випаровування вологи включно з

теплотою змочування ($r \approx 539 \text{ Ккал} / \text{кг}$).

Для поверхні бетону, яка прилягає до металооснащення, граничні умови подані у виді:

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = P_0(u) \cdot [u(t,x)]_{x=0} - B_0(t);$$

$$\left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=R} = -P_R(u) \cdot [u(t,x)]_{x=R} - B_R(t),$$
(5)

де $B_0(t), B_R(t)$ – врівноважений вологовміст (у кг/кг), відповідно при $x = 0$ й $x = R$; $P_0(u) = P_R(u) = P = \alpha_{HB}(u)$: a_b – відносний коефіцієнт вологопередачі; $\alpha_{HB}(u)$ – коефіцієнт вологопередачі, $\alpha_{HB}(u) = 10^{-4} + 0,5 \cdot (u - 0,02)^2, \text{ м}^2/\text{год}$ [9].

При моделюванні було прийнято, що температура бетону змінюється від 20 до 80 °C. Для розв'язування системи рівнянь (2) використовується апроксимація з наявною схемою дискретизації, що забезпечує отримання стійкої різницевої схеми [12]. Розв'язок системи (2) здійснювався методом прогонки, а оскільки система зв'язана, тоді прогонка є матричною [12, 13]. У процесі моделювання прийнято, що крок по часу $\tau = 0,01 \text{ год}$, а крок по координаті $h = R/N = 0,01 \text{ м}$, де N – число вузлів мінус одиниця, $N = 10$. Крім того, приймається, що:

$\varnothing(nh, m\tau) = \varnothing_n^m$ й $u(nh, m\tau) = u_n^m$. Із урахуванням викладеного вище скінчено-різницева схема системи рівнянь записується у вигляді:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\varnothing_n^{m+1} - \varnothing_n^m}{\tau} &= a_T(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \cdot \left\{ \varnothing_{n+1}^{m+1} - 2 \cdot \varnothing_n^{m+1} + \varnothing_{n-1}^{m+1} \right\} + \\ &+ f(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m); \\ \frac{u_n^{m+1} - u_n^m}{\tau} &= a_b(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \cdot \left\{ \frac{u_{n+1}^{m+1} - 2 \cdot u_n^{m+1} + u_{n-1}^{m+1}}{n^2} \right\} - \\ &- g(m\tau, \varnothing_n^m, u_n^m) \quad (n = 1, 2, \dots, N-1; m = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Початкові умови записуються наступним чином:

$$\varnothing_n^0 = \varnothing_0(nh), \quad u_n^0 = u_0(nh). \quad (7)$$

Дискретизовані граничні умови для обох випадків виражаються у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varnothing_N^{m+1} = T_N^{m+1}; \\ \frac{\varnothing_I^{m+1} - \varnothing_0^{m+1}}{h} = H(\varnothing_0^m) \cdot [\varnothing_0^{m+1} - T_0((m+1) \cdot \tau)] + \\ + j \cdot \frac{\{u_I^{m+1} - u_0^{m+1}\}}{h}, \\ \frac{u_I^{m+1} - u_0^{m+1}}{h} = P(u_0^m) \cdot [u_0^{m+1} - B_0], \\ \frac{u_N^{m+1} - u_{N-1}^{m+1}}{h} = P(u_n^m) \cdot [u_{N+1}^m - B_R] \end{array} \right. \quad (8)$$

Система скінчено-різницевих рівнянь зв'язана шляхом використання коефіцієнтів рівнянь та граничної умови, що виражається складовою $j \cdot (u_I^{m+1} - u_0^{m+1})/h$. У результаті розв'язку системи диференціальних рівнянь були визначені: інтенсивність випаровування $u_{\text{вун.}}$ ($\kappa\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$), що представлена у виді:

$$u_{\text{вун.}}(m\tau) = \gamma \cdot \left[a_b(u_0^m) \cdot \frac{(u_1^m - u_0^m)}{h} - a_b(u_N^m) \cdot \frac{(u_N^m - u_{N-1}^m)}{h} \right], \quad (9)$$

й зміна у часі інтенсивності гідратації $I_{\text{гнм.}}(t)$ ($\text{у } \%/ \text{год}$), котра має вид:

$$I_{\text{гнм.}}(t) = \frac{1}{(N+1)} \cdot \sum_{k=0}^N g(t, \varnothing(t, kh), u(t, kh)), \quad (10)$$

а зміна степені гідратації, що виражає кількість вологи, яка витрачена на гідrataцію від початку процесу до певного (поточного) моменту часу (у відсотках від початкового вологовмісту) може бути представлена у вигляді:

$$Hu(t) = \frac{1}{u_0} \cdot \int_0^t I_{\text{гнм.}}(t') dt', \quad (11)$$

де: u_0 – початковий вологовміст бетону ($\kappa\text{г}/\kappa\text{г}$), а також зміна у часі тепловологісної обробки критерію Ребіндера [6, 10], який представляє відношення кількості тепла, що витрачається на нагрівання виробу

$Q_{нагр.}(t)$, до кількості тепла, яке витрачається на випаровування $Q_{вип.}(t) = r \cdot u_{вип.}(t)$ у певний момент часу, тобто:

$$R_b(t) = Q_{нагр.}(t) / Q_{вип.}(t), \quad (12)$$

де:

$$Q_{нагр.}(t) = \gamma \cdot c \cdot \left[a_T(\varnothing_N^m) \cdot \frac{(\varnothing_N^m - \varnothing_{N-1}^m)}{h} - a_T(\varnothing_0^m) \cdot \frac{(\varnothing_1^m - \varnothing_0^m)}{h} \right], \quad (13)$$

c – питома теплоємність, $Kкал/(кг \cdot град.)$, ($c \approx 0,25 Kкал/(кг \cdot град.)$).

Аналіз результатів досліджень показує, що при наближенні до поверхні нагрівання температура бетону зростає, причому зі збільшенням часу термообробки температура у кожному прошарку бетону збільшується. Крім того, через три години після початку термообробки градієнт температури по товщині плити біля поверхні підігріву досягає максимального значення, що у 2,5 рази перевищує значення при усталеному процесі (через п'ять годин).

Дослідження показують, що у центрі плити ($x=0,05м$) вологовміст має максимальне значення, причому з наближенням до бічних поверхонь він зменшується. Протягом п'яти годин від початку термообробки зміна вологовмісту на обох бічних поверхнях виробу досягає у середньому 3%. Крім того, зміна вологовмісту на граничних поверхнях відбувається більш інтенсивно. Максимальне значення градієнту вологовмісту по товщині плити досягається на бічних поверхнях. За час термообробки зміна градієнту вологовмісту є незначною й зменшується лише по товщині бетонного виробу, причому у центрі виробу змін немає. Необхідно також зазначити, що вологовміст у процесі термообробки зменшується, причому його значення у центрі й на обох поверхнях бетонного виробу є різним. Значення вологовмісту на бічних поверхнях у середньому на 2% менше, ніж у центрі виробу. На рисунку 3 подані зміни інтенсивності випаровування (1), інтенсивності гідратації (2) й степені гідратації бетону (3) у процесі тепловологісної обробки. Аналіз результатів досліджень показує, що у процесі термообробки інтенсивність випаровування зменшується. Протягом чотирьох годин від початку тепловологісної обробки інтенсивність гідратації зростає, потім до дев'яти годин практично не змінюється й у подальшому зменшується. Степінь гідратації до однієї години від початку термообробки лінійно зростає й у подальшому збільшується до чотирнадцяти годин, а потім степінь гідратації зменшується. На рисунку 4 подана зміна у часі критерію Ребіндера.

Дослідження показали, що протягом двох годин від початку тепловологісної обробки критерій Ребіндера зростає, що свідчить про великі витрати тепла на нагрівання виробу, причому більші, ніж на випаровування. У подальшому тепло витрачається у основному на випаровування вологи з бетонного виробу, який стає твердим.

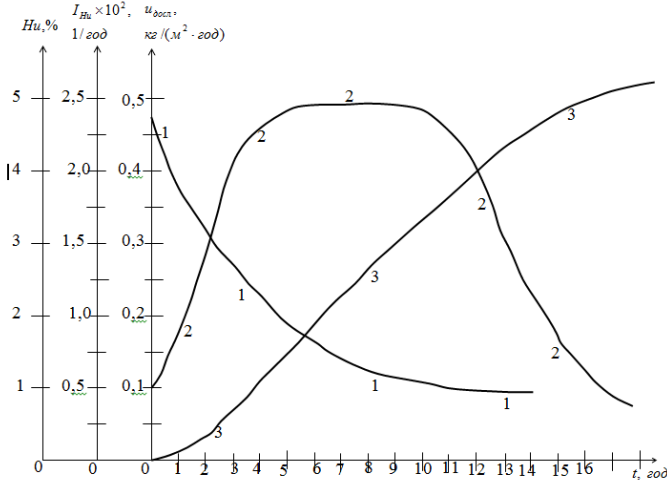


Рис. 3. Зміни інтенсивності випаровування (1), інтенсивності гідратації (2) й степені гідратації бетону (3) у процесі термовологісної обробки.

Експериментальні дослідження кінетики твердіння бетону проводились із використанням ультразвукових приладів для контролю процесу структуроутворення [15] й термодатчиків – для вивчення зміни температури досліджуваного середовища.

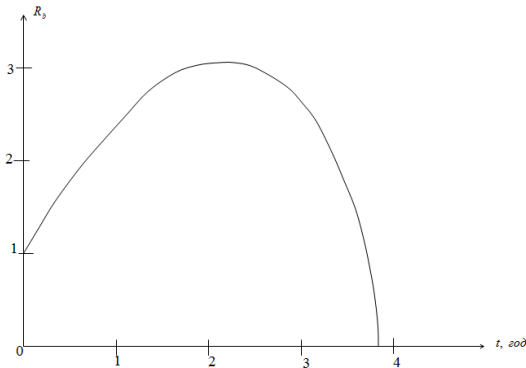


Рис. 4. Зміна у часі критерію Ребіндера

Наступні експерименти проводились на оптимальних режимах термообробки для прийнятих складів бетонної суміші, отриманих у результаті застосування методу планування експерименту. Результати виконаних досліджень співставлені з даними, отриманими при моделюванні процесу твердіння бетону за обраних граничних умов.

Висновки. 1. Обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі процесів масообміну, тепло- й масопереносу при інтенсивному зневодненні та твердінні капілярно-пористих тіл, як моделей бетонних виробів. При цьому використані критерії Кирпичова та Ребіндера. 2. Аналіз обробки експериментальних даних та їх співставлення з результатами чисельних/аналітичних рішень математичних моделей показують можливість їх застосування у подальшому для опису процесів тепло- і масопереносу, масообміну у бетонних виробках, які створюються за стандартами існуючих технологій виготовлення.

REFERENCES

1. Lykov A.V. Yavleniya perenosa v kapilyarno-poristyykh telakh. M.: Gostehizdat, 1954. 296 s. {in Russian}.
2. Romanovskij S.G. Processy termicheskoy obrabotki vlaznykh materialov. M.: Energiya, 1976. 328 s. {in Russian}.
3. Lykov A.V. Teoriya sushki. M.: Energiya, 1968. 471 s. {in Russian}.
4. Klyuevskij B.V., Shtakelberg D.I. Massoobmen i massoperenos v processe intensivnogo obezvozhvaniya betona. Tehnologicheskaya mehanika betona. Ryga: RPY, 1983. S. 133-136. {in Russian}.
5. Zasedatelev I.B., Petrov-Denisov V.G. Teplo- i massoperenos v betone specialnykh promyshlennykh sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1973. 167 s. {in Russian}.
6. Volosyan L.Ya. Teplo- i massooben pri termoobrabotke betonnykh i zhelezobetonnykh izdelij. Minsk: Nauka i tehnika, 1973. 255 s. {in Russian}.
7. Raschet s pomoshyu EVM temperaturnykh i vlazhnostnykh polej deformaci i napryazhenij, vznikayushih pri teplovlazhnostnoj obrabotke na stadii ostyvaniya betonnykh izdelij. – V kn.: Teplo- i massoperenos pri novykh sposobah teplovogo vozdejstviya na tverdeyushij beton / K.E. Goryainov, A.N. Schastnyj, A.V. Nehoroshev i dr. K.: Budivelnik, 1973. S. 131-134. {in Ukrainian}.
8. Malunina L.A. Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona. M.: Strojizdat, 1977. 159 s. {in Russian}.
9. Aleksandrovskij S.V. Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij na temperaturnie i vlazhnostnie vozdejstviya (s uctom polzuchesti). M.: Strojizdat, 1966. 443 s. {in Russian}.
10. Lykov A.V. O sistemah diferencialnykh uravnenij teplomassopernosa v kapilyarno-poristyykh telakh. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. 1974. T.26,№1. C. 369-376. {in Russian}.
11. Dmitrovich A.D. Teplo i massoperenos pri tverdenii betona v parovoj srede. M.: Strojizdat, 1967. 243 s. {in Russian}.

12. Grishko I.M., Lishanskij B.A., Vedenskij V.N. Issdedovanie processov teplo- i massoperenosa pri tverdenii betona. Tehnologicheskaya mehanika betona. Riga: RPI, 1984. S.53-61. {in Russian}.
13. Samarskij A.A. Teoriya raznosnyh shem. M.: Nauka, 1977. 656 s. {in Russian}.
14. Godunov S.K., Ryabenskij V.S. Raznosnye shemy. M.: Nauka, 1977. 439 s. {in Russian}.
15. Dzenis V.V., Lapsa V.H. Ulrazvukovoj kontrol tverdeyushego betona. L.: Strojizdat, 1971. 112 s. {in Russian}.

Список літератури.

1. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
2. Романовский С.Г. Процессы термической обработки влажных материалов. М.: Энергия, 1976. 328 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
4. Ключевский Б.В., Штакельберг Д.И. Массообмен и массоперенос в процессе интенсивного обезвоживания бетона. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1983. С. 133-136.
5. Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. М.: Стройиздат, 1973. 167 с.
6. Волосян Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий. Минск: Наука и техника, 1973. 255 с.
7. Расчет с помощью ЭВМ температурных и влажностных полей деформации напряжений, возникающих при тепло-влажностной обработке на стадии остывания бетонных изделий. – В кн.: Тепло- и массоперенос при новых способах теплового воздействия на твердеющий бетон / К.Е. Горайнов, А.Н. Счастный, А.В. Нехорошев и др. К.: Будівельник, 1973. С. 131-134.
8. Малунина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1977. 159 с.
9. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учётом ползучести). М.: Стройиздат, 1966. 443 с.
10. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений тепло-массопереноса в капиллярно-пористых телах. Инженерно-физический журнал. 1974. Т.26, №1. С. 369-376.
11. Дмитриевич А.Д. Тепло- и массоперенос при твердении бетона в паровой среде. М.: Стройиздат, 1967. 243 с.
12. Гришко И.М., Лишанский Б.А., Веденский В.Н. Исследование процессов тепло- и массопереноса при твердении бетона. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1984. С.53-61.
13. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
14. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 439 с.
15. Дзенис В.В., Лапса В.Х. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона. Л.: Стройиздат, 1971. 112 с.