

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>

УДК 66.040:519.6:666.97.035

Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках

А. М. Нияковский¹⁾, В. Н. Романюк²⁾, Ю. В. Яцкевич²⁾, А. Н. Чичко²⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республик Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье рассмотрен метод оценки режимов работы теплотехнологических установок, используемых для тепловой обработки бетонных изделий в условиях программно управляемого подвода теплоты вида «нагрев – изотермическая выдержка – охлаждение». Метод основан на численном решении нестационарного уравнения теплопроводности, дополненного уравнениями, описывающими процесс гидратации бетонного изделия, и включает систему начальных и граничных условий для его пространственной структуры. Он позволяет построить табулированные функции температуры и степени гидратации от времени тепловой обработки в любой точке 3D-изделия. Представлен математический аппарат для расчета функциональных зависимостей процесса гидратации бетона в теплотехнологических установках с программно нагреваемой средой. Применительно к симметричному изделию выполнены расчеты процесса гидратации бетона в опалубке. Проведен численный анализ поведения функций, моделирующих режим подвода теплоты в зависимости от времени обработки бетонного изделия, основанный на расчете градиента температур по минимальному сечению изделия. Показано, что максимальная скорость процесса гидратации в твердеющем бетонном изделии достигается при наибольшем времени изотермической выдержки. При этом с увеличением продолжительности нагрева изделия снижается величина максимума скорости гидратации. Развиваемый метод оценки режимов тепловой обработки бетонных изделий позволяет определить параметры, необходимые для расчета количества полезной теплоты, минимально необходимой для тепловой обработки бетонных изделий с пространственно распределенными параметрами. Предлагаемый метод применим для расчета температурных полей и степени гидратации в изделиях со сложной геометрией, помещенных в программно нагреваемую среду теплотехнологических промышленных установок для ускоренной гидратации бетонов, а также позволяет производить проверочные вычисления перед назначением режимов подачи теплоты к обрабатываемым изделиям.

Ключевые слова: теплотехнические установки, твердение бетона, математическое моделирование, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, методы исследований, энергосбережение

Для цитирования: Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь,
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romanuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities

A. M. Niyakovskii¹⁾, V. N. Romaniuk²⁾, Yu. V. Yatskevich²⁾, A. N. Chichko²⁾

¹⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the article the technique of an assessment of modes of operation of the heat engineering equipment used for heat treatment of concrete products in the conditions of program-controlled heat supply according to the pattern of “heating – isothermal influence – cooling” has been developed. The method is based on the numerical solution of a non-stationary heat equation supplemented by equations describing the hydration process of a concrete product; also, it includes a system of initial and boundary conditions for its spatial structure. The method makes it possible to create tabulated functions of temperature and the degree of hydration of the time of heat treatment in any point of a 3D-product. The mathematical tools for calculating the functional dependencies of concrete hydration equipment with software-heated environment are presented. Numerical calculations of the concrete hydration process in the formwork are performed with respect to the symmetrical object. Based on the calculation of the temperature gradient across the minimal cross section of the product, a numerical analysis of the functions modeling heat supply mode depending on the processing time of a concrete product has been fulfilled. It is demonstrated that the maximum speed of the hydration process in a concrete product hardening is achieved at the maximum of time lag of isothermal cure. Additionally, with an increase in the duration of the product heating, the value of the maximum hydration rate decreases. It is concluded that the method of assessing the mode of heat treatment of concrete products being developed makes it possible to determine parameters for the calculation of the minimal useful heat required for the heat treatment of concrete products with spatially distributed parameters. The proposed method is applicable to calculate the temperature fields and the extent of hydration in the products of any geometric shape and volume in a software-controlled heating environment of industrial facilities for the accelerated hydration of concrete, and also affords the possibility of preliminary calibration prior to the assignment of relevant heat supply modes to the products being processed.

Keywords: thermal technological equipment, concrete hardening, mathematical modeling, temperature field, non-stationary equation of heat conductivity, research methods, energy saving

For citation: Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3) 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian)

Введение

Повышение энергетической эффективности режимов работы теплотехнологических установок, используемых для ускоренного твердения бетонных изделий, является важнейшей задачей промышленной теплоэнергетики [1–3]. Чтобы оптимизировать энергетические затраты на технологию ускоренного получения бетонных изделий, необходимо произвести выбор оптимального режима подвода теплоты к изделиям в период их тепловой обработки. Такая задача имеет теоретическое и практическое значение и состоит в определении наилучшего сочетания параметров «температура – время» при тепловой обработке вида «нагрев поверхности бетонного изде-

лия – изотермическая выдержка – охлаждение поверхности бетонного изделия». Особенность решения такой задачи состоит в том, что, кроме тепловых параметров обработки, необходимо учитывать процессы гидратации, существенно влияющие на прочностные качества изделий. С одной стороны, программируя скорость нагрева поверхности изделия, длительность периода изотермической выдержки и продолжительность охлаждения, мы задаем режим эволюции степени гидратации в каждой пространственной точке изделия. С другой стороны, изменяя режим тепловой обработки, можно снизить энергетические затраты на производство бетонных изделий.

Известно, что отыскание наилучших режимов тепловой обработки бетона может осуществляться с помощью теплофизической модели [4, 5], включающей параметры режима тепловой обработки и геометрию бетонного тела, обладающего определенным набором теплофизических характеристик. Проведенный анализ литературных данных показал, что в настоящее время не существует общепринятой теплофизической модели процесса твердения бетонного изделия с произвольной геометрией [6–9], которая могла бы применяться для определения оптимальной потребности в теплоте, затрачиваемой на тепловую обработку в промышленных условиях.

В то же время оптимизация энергетических тепловых режимов с использованием эмпирического метода проб и ошибок требует значительных материальных и временных ресурсов, что в условиях современного производства экономически не оправдано. Содержащиеся в известных работах наборы эмпирических зависимостей включают большое количество получаемых опытным путем констант, что снижает эффективность этого метода, особенно для изделий со сложной трехмерной геометрией [10–14].

Цель исследований авторов – разработка теплофизической модели функционирования теплотехнологического оборудования и ее анализ с помощью метода конечных элементов для выбора оптимальных режимов программно управляемого подвода теплоты при тепловой обработке бетонных изделий в промышленных установках ускоренной гидратации с целью минимизации энергетических затрат. Развиваемый метод отличается от известных [3, 10, 12, 13, 15] особенностями теплофизического описания процесса гидратации и численной реализацией метода конечных элементов применительно к расчету эволюции процесса твердения бетонного изделия.

Для достижения указанной цели в качестве тестового объекта выбрано изделие в форме куба, что позволило за счет симметрии исключить влияние особенностей 3D-геометрии на эволюцию степени гидратации. Отметим, что ограничений для применения описанного ниже математического аппарата к объектам со сложной 3D-геометрией нет.

В расчетах использованы режимы программно управляемого подвода теплоты, представленные в табл. 1. Из табл. 1 видно, что суммарное время тепловой обработки изделия было одинаковым для всех режимов и равнялось 15 ч. Температура изотермической выдержки изделия принята 85 °С.

Таблица 1

**Параметры режимов программно управляемого подвода теплоты,
 использованные в исследовании**

The parameters of software-controlled heat supply modes used in the study

Номер режима	Время, ч		
	нагрева	изотермической выдержки	охлаждения
P_1	0	10	5
P_2	1	9	5
P_3	2	8	5
P_4	3	7	5
P_5	4	6	5
P_6	5	5	5

Состав используемой при математическом моделировании бетонной смеси и теплофизические характеристики бетона отвечали следующим массовым соотношениям: Ц:П:Щ = 1:1,76:2,98; В/Ц = 0,4, где Ц, П, Щ, В – удельные расходы соответственно цемента, песка, щебня, воды в расчете на 1 м³ получаемой бетонной смеси, кг/м³. Использовался портландцемент марки М400-Д20 с удельным расходом Ц = 350 кг/м³.

Плотность бетонной смеси составила: $\rho_b = \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В} = 350 + 616 + 1043 + 140 = 2149 \text{ кг/м}^3$. Удельная теплоемкость бетона в сухом состоянии принята 840 Дж/(кг·К). С учетом этого средняя удельная теплоемкость свежееотформованного бетонного изделия

$$c_b = \frac{840 \cdot (\text{Ц} + \text{П} + \text{Щ}) + 4190\text{В}}{\text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В}} = 1058 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Максимальное тепловыделение (теплота гидратации) заложенного в расчетную модель цемента М400 составляет $Q_{\max} = 418,7 \text{ кДж/кг}$. Зависимость теплоты гидратации от времени и температуры принята в виде экспериментально полученной функции $Q(T, \tau)$, приведенной в [16].

**Математический аппарат
 для расчета процесса твердения бетона**

В качестве основной формулы для расчета изменения температуры и степени гидратации использовалось уравнение теплопроводности, в котором учтено тепловыделение, возникающее при гидратации цемента:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_b \rho_b} \left(\text{Ц} \cdot P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + \right. \\ \left. \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \\
 & \left. + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} \right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где τ – время тепловой обработки бетона; x, y, z – декартовы координаты рассматриваемой точки; $T(x, y, z, \tau)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ , °C; ρ_b – плотность бетона, кг/м³; c_b – удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·K); Π – удельный расход цемента в бетоне, кг/м³; $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) на момент времени τ , Дж/кг; $\lambda(H, T)$ – теплопроводность бетона, зависящая от степени его гидратации и температуры, Дж/(м·K); $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau)/Q_{\max}$ – коэффициент (степень) гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) к моменту времени τ ; Q_{\max} – максимальное тепловыделение вследствие гидратации цемента, Дж/кг; $P_q(Q, T)$ – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг, определяемая по формуле

$$\begin{aligned}
 P_q(Q, T) &= \frac{\partial Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T))}{\partial \tau} \approx \\
 &\approx \frac{Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T) + \Delta\tau) - Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T))}{\Delta\tau}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

Q – удельные тепловыделения вследствие гидратации цемента к заданному моменту времени, Дж/кг; $Q(T, \tau)$ – заданная функция тепловыделения цемента в зависимости от времени и температуры тепловой обработки, Дж/кг; $\tau_{\text{пр}}(Q, T)$ – приведенное время гидратации цемента, являющееся функцией обратной функции тепловыделений $Q(T, \tau)$ при фиксированном значении температуры бетона $T_{\text{fix}} = T(\tau_{\text{пр}}(Q, T)) = 1/Q(T, Q)$, равно продолжительности твердения бетона в естественных температурных условиях, в течение которой достигается такая же степень гидратации, что и при фактической температуре T ускоренной тепловой обработки, с; $\Delta\tau$ – шаг времени моделирования процесса твердения, с.

Распределение тепловыделения в каждой точке внутреннего пространства бетонного изделия принято аналогичным распределению в бетонном теле степени (коэффициента) гидратации

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Степень (коэффициент) гидратации вычислялась как функция тепловыделений в данной точке пространства бетонного изделия

$$Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)). \quad (4)$$

Эволюция температуры в пределах трехмерного пространства стальной опалубки определялась на основании уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{c_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}}} \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где x, y, z – декартовы координаты рассматриваемой точки; $T(x, y, z, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ ; τ – время тепловой обработки, $\lambda_{\text{ст}}, c_{\text{ст}}, \rho_{\text{ст}}$ – теплопроводность (44,5 Вт/(м·К)), удельная теплоемкость (475 Дж/кг) и плотность стали (7850 кг/м³).

Начальные и граничные условия для математической модели поверхности «бетон – среда тепловой обработки» приняты в соответствии с уравнениями:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C, для } (x, y, z) \in \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг, для } (x, y, z) \in \Omega_1; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} -\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} &= \\ &= \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} - T_{\text{cp}}(\tau) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ – область точек пространства бетонного изделия, опалубки и греющей среды; α – коэффициент теплоотдачи, соответствующий конвективному теплообмену в воздушной среде (принимался $\alpha = 20$ Вт/(м²·К)); ∂i – это либо ∂x , либо ∂y , либо ∂z согласно ориентации соответствующей границы в пространстве декартовых координат.

Граничные условия на поверхности «опалубка – среда тепловой обработки» и «опалубка – бетон» определены следующим образом:

$$-\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} = \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} - T_{\text{cp}}(\tau) \right); \quad (8)$$

$$\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} = \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_1}. \quad (9)$$

Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda(H, T)$ в зависимости от степени (коэффициента) гидратации и температуры в каждой точке пространства, а также от водоцементного отношения, влажности и плотности бетона принят на основе данных, приведенных в [17, 18].

При выполнении численных расчетов для сходимости модели, представленной уравнениями (1)–(9), использовали 238328 расчетных сеточных элементов, причем шаг по времени моделирования был принят равным 0,25 с при размере сеточного элемента 0,005 м.

Математически условие изменения температуры тепловой среды было задано табулированной функцией (табл. 2).

Таблица 2

Режимы программно управляемого подвода теплоты, использованные при численном моделировании P_i (i – номер режима, соответствующий табл. 1)

Software-controlled heat supply modes utilized in the numerical simulation P_i (i – mode number corresponding to tab. 1)

τ, c	$T(P_1), ^\circ C$	$T(P_2), ^\circ C$	$T(P_3), ^\circ C$	$T(P_4), ^\circ C$	$T(P_5), ^\circ C$	$T(P_6), ^\circ C$
1	2	3	4	5	6	7
0	20	20	20	20	20	20
1200	85	41,666	30,831	27,224	25,42	24,330
2400	85	63,328	41,670	34,444	30,84	28,661
3600	85	85	52,509	41,658	36,26	32,993
4800	85	85	63,349	48,873	41,68	37,333
6000	85	85	74,189	56,087	47,100	41,673
7200	85	85	85	63,301	52,520	46,012
8400	85	85	85	70,516	57,939	50,352
9600	85	85	85	77,730	63,361	54,691
10800	85	85	85	85	68,780	59,031
12000	85	85	85	85	74,200	63,371
13200	85	85	85	85	79,620	67,695
14400	85	85	85	85	85	72,016
15600	85	85	85	85	85	76,337
16800	85	85	85	85	85	80,658
18000	85	85	85	85	85	85
19200	85	85	85	85	85	85
20400	85	85	85	85	85	85
21600	85	85	85	85	85	85
22800	85	85	85	85	85	85
24000	85	85	85	85	85	85
25200	85	85	85	85	85	85
26400	85	85	85	85	85	85
27600	85	85	85	85	85	85
28800	85	85	85	85	85	85

Окончание табл. 2

τ, c	$T(P_1), ^\circ C$	$T(P_2), ^\circ C$	$T(P_3), ^\circ C$	$T(P_4), ^\circ C$	$T(P_5), ^\circ C$	$T(P_6), ^\circ C$
30000	85	85	85	85	85	85
31200	85	85	85	85	85	85
32400	85	85	85	85	85	85
33600	85	85	85	85	85	85
34800	85	85	85	85	85	85
36000	85	84,999	84,999	84,999	84,999	84,999
37200	80,681	80,678	80,678	80,678	80,678	80,678
38400	76,360	76,357	76,357	76,357	76,357	76,357
39600	72,039	72,035	72,035	72,035	72,035	72,035
40800	67,718	67,714	67,714	67,714	67,714	67,714
42000	63,394	63,390	63,390	63,390	63,390	63,390
43200	59,054	59,050	59,050	59,050	59,050	59,050
44400	54,714	54,711	54,711	54,711	54,711	54,711
45600	50,375	50,371	50,371	50,371	50,371	50,371
46800	46,035	46,032	46,032	46,032	46,032	46,032
48000	41,696	41,692	41,692	41,692	41,692	41,692
49200	37,356	37,352	37,352	37,352	37,352	37,352
50400	33,016	33,013	33,013	33,013	33,013	33,013
51600	28,684	28,680	28,680	28,680	28,680	28,680
52800	24,353	24,350	24,350	24,350	24,350	24,350
54000	20,023	20,019	20,019	20,019	20,019	20,019
55200	20	20	20	20	20	20

Результаты численного расчета

Для характеристики и оценки процесса теплопереноса от греющих элементов устройства ускоренной гидратации к бетонному изделию, подвергаемому тепловой обработке, была введена тепловая функция $\Delta T_{P_i}(\tau) = T_{P_i}(\tau) - TA_{P_i}(\tau)$, где $T_{P_i}(\tau)$ – функция температуры i -го режима подвода теплоты от времени тепловой обработки; $TA_{P_i}(\tau)$ – функция температуры от времени в геометрическом центре кубического изделия для соответствующего режима P_i . По физическому смыслу тепловая функция $\Delta T_{P_i}(\tau)$ характеризует временную динамику разности температур между температурой нагревателя (граница) и центральной точкой бетонного изделия для режима P_i .

Полученные на основе (1)–(9) расчетные зависимости функции $\Delta T(\tau)$ для различных режимов обработки кубического изделия размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м с координатами в центре $A(0,15; 0,15; 0,15)$ в зависимости от времени обработки представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, функция $\Delta T(\tau)$ имеет максимум, который соответствует моменту перехода режима подвода теплоты от периода нагрева к периоду изотермической выдержки.

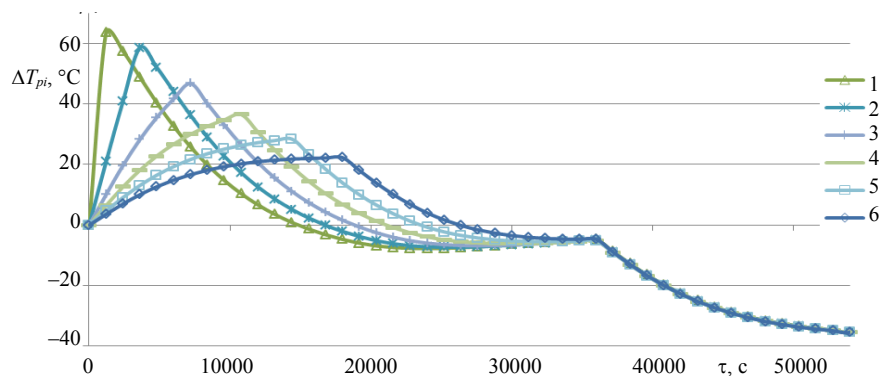


Рис. 1. Зависимость разности температур между температурой нагревателя и температурой в точке с координатами $A(0,15; 0,15; 0,15)$ от времени тепловой обработки кубического изделия размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м:
1 – режим P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – режим P_6

Fig. 1. Dependence of temperature differences between the temperature of the heater and the temperature at the point with coordinates $A(0,15; 0,15; 0,15)$ on the time of heat treatment of a cubic product of the size of $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ m:
1 – mode P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – mode P_6

Отметим, что для режимов, указанных в табл. 2, функция $\Delta T(\tau)$ принимает разный вид, что также следует из рис. 1. Причем из приведенного расчета можно видеть, что чем короче продолжительность изотермической выдержки и соответственно длиннее фазы нагрева, тем больше максимум функции ΔT_{pi} смещен вправо по времени тепловой обработки. Максимальные значения функции $\Delta T_{pi}(\tau)$ наблюдаются для режима № 1, обеспечивающего тепловую обработку при максимальной продолжительности изотермической выдержки и минимальном времени перехода «нагрев – изотермическая выдержка». В частности, согласно рис. 1, для других режимов подвода теплоты по мере сокращения времени изотермической выдержки градиент скорости в сечении изделия уменьшается.

На основании полученных данных можно количественно оценить тепловые эффекты, обусловленные заданным законом подвода теплоты к изделию, подвергаемому тепловой обработке, с учетом экзотермических эффектов процесса гидратации цемента. Зависимости скорости изменения степени (коэффициента) гидратации $\partial H/\partial \tau$ от времени тепловой обработки изделия в форме куба размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м в точке $A(0,15; 0,15; 0,15)$ представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, скорость гидратации имеет максимум. Сравнивая эти данные с данными табл. 2, можно отметить, что этот максимум соответствует моментам перехода режима подвода теплоты от периода нагрева изделия к периоду изотермической выдержки. Причем, как следует из рис. 2, чем меньше времени затрачено на изотермическую выдержку, тем меньше величина максимума функции скорости гидратации. В интервале времени тепловой обработки $\tau = 30000\text{--}40000$ с наблюдается перегиб графика функции скорости изменения степени гидратации, связанный с переходом режима подвода теплоты в процессе тепловой обработки от периода нагрева изделия к периоду его изотермической выдержки.

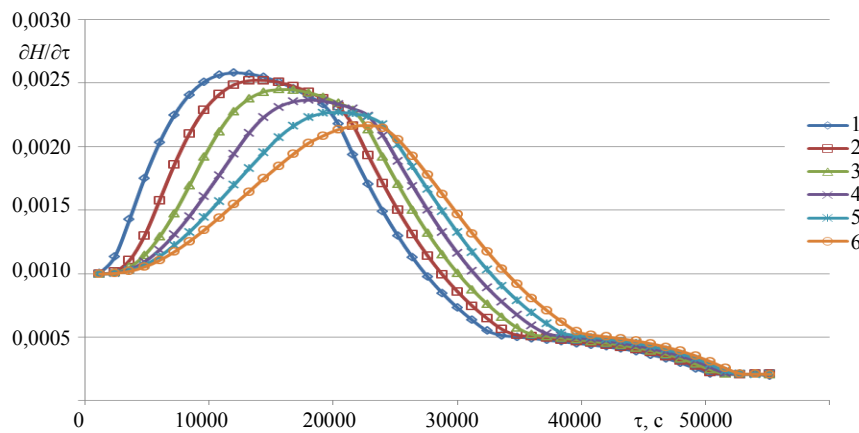


Рис. 2. Зависимость скорости изменения степени гидратации $\partial H/\partial \tau$ от времени тепловой обработки изделия в форме куба размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м в точке $A(0,15; 0,15; 0,15)$: 1 – режим P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – режим P_6

Fig. 2. Dependence of the hydration degree $\partial H/\partial \tau$ rate change on the time of the heat treatment of a cubic product of the size of $0.30 \times 0.30 \times 0.30$ m at point $A(0.15; 0.15; 0.15)$: 1 – mode P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – mode P_6

Зависимость степени гидратации H от времени твердения кубического изделия размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м в точке $A(0,15; 0,15; 0,15)$ показана на рис. 3. Как видно из рис. 3, функция степени гидратации $H(\tau)$, вычисленная по модели (1)–(9), увеличивается по мере течения времени тепловой обработки изделия. Причем, чем больше время изотермической выдержки, тем выше степень гидратации, что отражено на кривой 1 (рис. 3). Это соответствует особенностям протекающих в изделии физико-химических процессов.

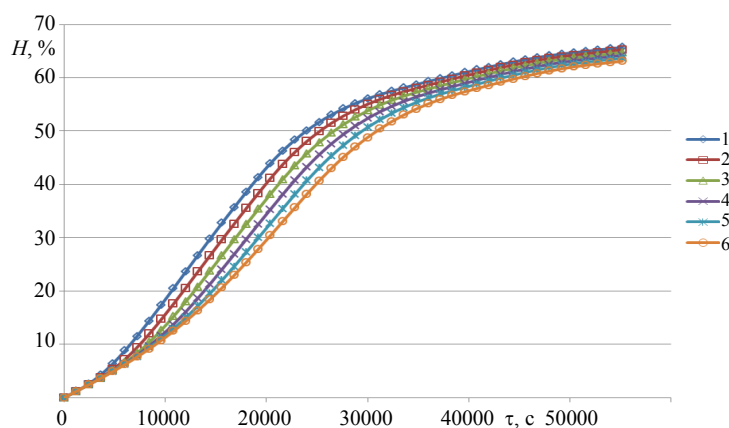


Рис. 3. Зависимость степени гидратации H от времени тепловой обработки изделия в форме куба размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м в точке $A(0,15; 0,15; 0,15)$: 1 – режим P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – режим P_6

Fig. 3. Dependence of the hydration degree (H) on the time of heat treatment of a cubic product of the size of $0.30 \times 0.30 \times 0.30$ m at point $A(0.15; 0.15; 0.15)$: 1 – mode P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – mode P_3 ; 4 – P_4 ; 5 – P_5 ; 6 – mode P_6

Таким образом, задавая на входе модели (1)–(9) режим подвода теплоты к подвергаемому тепловой обработке бетонному изделию, можно количественно определять функции $H(\tau)$, $\partial H/\partial \tau$, $\Delta T(\tau)$ для различных пространственных элементов изделия. Эти функции могут быть использованы для вычисления показателей энергопотребления теплотехнологического оборудования, применяемого на промышленных предприятиях для осуществления ускоренной гидратации бетона.

ВЫВОДЫ

1. На основе разработанной теплофизической модели и заданных режимов подвода теплоты выполнен численный анализ характеристик процесса, зависящих от времени тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологических устройствах ускоренной гидратации бетона. Показано, что максимальная скорость процесса гидратации в твердеющем бетонном изделии достигается при максимальной продолжительности изотермической выдержки и минимальном времени перехода «нагрев – изотермическая выдержка»: чем больше время нагрева изделия, тем меньше наблюдаемый максимум скорости гидратации.

2. Предлагаемый метод оценки позволяет оптимизировать режимы подвода теплоты к бетонному изделию на дискретном множестве заданных режимов при заданной целевой функции полезного объема тепловой энергии, необходимой для производства бетонных изделий с пространственно распределенными параметрами.

3. Метод применим для расчета характеристик процесса гидратации для изделий любой геометрической формы и объемов, помещенных в программно нагреваемую среду теплотехнологических промышленных установок для ускоренной гидратации бетонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу развития энергообеспечения промышленных теплотехнологий и систем теплоснабжения в Беларуси / Б. М. Хрусталева [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 6. С. 31–47.
2. Романюк, В.Н. Основы эффективного энергоиспользования на производственных предприятиях дорожной отрасли / В. Н. Романюк, В.Н. Радкевич, Я.Н. Ковалев. Минск: Технопринт, 2001. 292 с.
3. 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.
4. Федосов, С. В. Применение методов математической физики для моделирования массо- и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гуцин // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 65–67.
5. Modelling of Heat of Hydration for Thick Concrete Constructions – a Note / В. Kuriakose [et al.] // Journal of Structural Engineering. 2015. Vol. 42, No 4. P. 348–357.
6. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 38–41.

7. Ушеров-Маршак, А. В. Информационная технология бетона ускоренного твердения / А. В. Ушеров-Маршак, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. 1994. № 6. С. 2–4.
8. Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength in Field Applications: Research Report [Electronic resource] / J. M. Nixon [et al.] // Highway Research Center and Department of Civil Engineering at Auburn University. 2008. Mode of access: <http://www.eng.auburn.edu/files/centers/hrc/930-590-2.pdf>. Date of access: 14.12.2018.
9. Сороговец, И. Б. Многочисленные решения в задачах управления нагревом твердых тел / И. Б. Сороговец, Э. И. Гончаров, В. Б. Артемьев // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73, № 5. С. 889–893
10. Бабицкий, В. В. Элементы проектирования режима тепловлажностной обработки бетона / В. В. Бабицкий, Н. В. Суходоева // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV Междунар. науч.-метод. сем. Новополоцк, 2008. С. 139–143.
11. Бабицкий, В. В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона / В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк, М. С. Бибик // Ресурсоэкономный матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збір. наук. праць. Вип. 18. Рівне, 2009. С. 3–12.
12. Ушеров-Маршак, А. В. «Термобет-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. 2000. № 4. С. 2–5.
13. Аксенчик, К. В. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер для тепловлажностной обработки железобетонных изделий / К. В. Аксенчик. Иваново, 2014. 20 с.
14. Подгорнов, Н. И. Математическая формулировка задачи определения температуры бетона при термообработке в гелиокамерах типа «горячего ящика» / Н. И. Подгорнов, Д. Д. Коротеев // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2014. № 1. С. 131–135.
15. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. И. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. 2006. № 3. С. 7–17.
16. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
17. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести бетона / С. В. Александровский. М.: НИИЖБ, 2004. 712 с.
18. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. № 2. С. 29–34.

Поступила 21.01.2019 Подписана в печать 26.03.2019 Опубликована онлайн 30.05.2019

REFERENCES

1. Khroustalev B. M., Romaniuk V. N., Sednin V. A., Bobich A. A., Muslina D. B., Bubyg T. V. (2014) To the Subject of Development of Power Supply Process for Industrial Heat Technologies and Heat Supply Systems in Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 31–47 (in Russian).
2. Romanyuk V. N., Radkevich V. N., Kovalyov Ya. N. (2001) *Fundamentals of Efficient Energy Use at the Production Enterprises of the Road Industry*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 292 (in Russian).
3. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) On the Energy Saving Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technique], (4), 55–59 (in Russian).

4. Fedosov S. V., Ibragimov A. M., Gushhin A. V. (2008) Application of Methods of Mathematical Physics for Modeling of Mass and Energy Transfer in Technological Processes of the Construction Industry. *Stroitel'ny'e Materialy = Construction Materials*, (4), 65–67 (in Russian).
5. Kuriakose B., Rao B. N., Dodagoudar G. R., Venkatachalapathy V. (2015) Modelling of Heat of Hydration for Thick Concrete Constructions – a Note. *Journal of Structural Engineering*, 42 (4), 348–357.
6. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Ibragimov A. M., Kozlov V. K., Sokolov A. M. (2011) Modeling of Concrete Strength Gain During Cement Hydration. *Stroitel'ny'e Materialy = Construction Materials*, (11), 38–41 (in Russian).
7. Usharov-Marshak A. V., Sinyakin A. G. (1994) Information Technology of Accelerated Hardening Concrete. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, (6), 2–4 (in Russian).
8. Nixon J. M., Schindler A. K., Barnes R. W., Wade S. A. (2008) Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength in Field Applications: Research Report. *Highway Research Center and Department of Civil Engineering at Auburn University*. Available at: <http://www.eng.auburn.edu/files/centers/hrc/930-590-2.pdf>. (Accessed 14 December 2018).
9. Sorogovets I. B., Goncharov É. I., Artem'ev V. B. (2000) Polynomial Solutions in Problems of Controlling the Heating of Solids. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 73 (5), 889–893. <https://doi.org/10.1007/bf02681575>.
10. Babitskii V. V., Sukhodoeva N. V. (2008) The Elements of Projecting of the Regime of Thermal and Moisture Treatment of Concrete. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov Respubliki Belarus': Sb. Tr. XV Mezhdunar. Nauch.-Metod. Sem. [Prospects of Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel of the Republic of Belarus: Proceedings of XV International Scientific-and-Methodic Seminar]*. Novopolotsk, 139–143 (in Russian).
11. Babitskii V. V., Semenyuk S. D., Bibik M. S. (2009) Forecasting of Characteristics of the Hardened Heavy Concrete. *Resursoekonomii Materiali, Konstruktsii, Budivli ta Sporudi: Zbir. Nauk. Prats' [Resource-Efficient Materials, Constructions, Buildings and Structures. Collected Research Works]*. Rivno, 18, 3–12 (in Ukrainian).
12. Usharov-Marshak A. V., Gil' Yu. B., Sinyakin A. G. (2000) “Thermobet-M” Information Technology of the Monolithic Concrete. *Beton i Zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, (4), 2–5 (in Russian).
13. Aksenchik K. V. (2014) *Improvement of the Thermal Operation of Curing Chambers for Curing of Concrete Products*. Ivanovo. 20 (in Russian).
14. Podgornov N. I., Koroteev D. D. (2014) Mathematical Formulation of the Problem of Determining the Temperature of the Concrete During Heat Treatment in Solar Cells of a “Hot Box” Type. *Vestnik Rossiiskogo Universiteta Druzhy Narodov. Seriya: Inzhenernye Issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Researches*, (1), 131–135 (in Russian).
15. Batyanovskii E. I., Ivanova E. I., Osos R. F. (2006) Efficiency and Problems of Energy-Saving Technologies of Cement Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika [Construction Science and Technique]*, (3), 7–17 (in Russian).
16. Mar'yamov N. B. (1970) *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Facilities)*. Moscow, Stroizdat Publ. 272 (in Russian).
17. Aleksandrovskii S. V. (2004) *Calculation of Concrete and Reinforced Concrete Structures for Changes in Temperature and Humidity, Taking into Account the Creep of Concrete*. Moscow, RICRC. 712 (in Russian).
18. Krasulina L. V. (2012) Structural and Thermophysical Properties of Hardening Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 29–34 (in Russian).