

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>

УДК 658.26:666.97.035.5:004.94

Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках

**В. Н. Романюк¹⁾, А. М. Нияковский²⁾, А. Н. Чичко³⁾, Ю. В. Яцкевич³⁾,
Т. Н. Рыжова⁴⁾**

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь),

³⁾Открытое акционерное общество «Пеленг» (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Приведены результаты численных исследований, выполненных на основе разработанной авторами статьи математической модели, посвященных изучению влияния различных факторов на характеристики процесса тепловой обработки композитных изделий в промышленных теплотехнологических установках при наличии внутренних тепловыделений, распределенных по объему отдельных слоев изделия. Предложена формулировка граничных условий для этой модели с учетом многослойной структуры изделий и особенностей организации процесса их тепловой обработки в теплотехнологической установке. Подробное описание математической модели представлено в предыдущих работах. В данном исследовании в качестве характеристик процесса тепловой обработки изучены функции распределения температуры и коэффициента (степени) гидратации в пространственных областях, составляющих изделие. Рассмотрены модельные композитные изделия одинаковой формы и структуры, но разного объема, состоящие из двух слоев материала, в которых протекает экзотермическая реакция гидратации, разделенных слоем пенополистирола. Температурно-временной режим тепловой обработки принимался близким к используемому в промышленных условиях при производстве трехслойных наружных стеновых панелей. Граничные и начальные условия соответствовали режиму тепловой обработки на плоских стендах с водяным подогревом и укрытием изделий сверху. Установлено, что наличие теплоизоляционного слоя в середине изделия, разделяющего слои с внутренним источником тепловыделений, существенным образом изменяет распределение значений температуры и коэффициента гидратации в верхнем и нижнем слоях. Увеличение характерного объема изделия ведет к существенному возрастанию влияния внутренних объемных тепловыделений на процессы нагрева и гидратации, обусловленные протеканием реакции гидратации.

Ключевые слова: теплотехнологическое оборудование, тепловая обработка композитных изделий, численные методы исследований, температурное поле, степень гидратации, теплотехнологии

Для цитирования: Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках / В. Н. Романюк [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>

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

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

Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾, A. N. Chichko³⁾, Yu. V. Yatskevich³⁾, T. N. Ryzhova⁴⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus),

³⁾Joint-Stock Company "Peleng" (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾The Branch of Belarusian National Technical University "Institute of Improvement of Professional Skills and Staff Retraining on New Directions of Engineering, Technology and Economy" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The results of numerical studies carried out on the basis on a mathematical model developed by the authors of this paper devoted to the investigation of the influence of various factors on the characteristics of the process of heat treatment of composite products in industrial heat technology installations in the presence of internal heat emissions distributed over the volume of individual layers of the product are presented. The formulation of boundary conditions for this model is proposed, considering the multilayer structure of products and the peculiar properties of the organization of their heat treatment process in a heat technology installation. A detailed description of the mathematical model was presented in the previous works. In this study, the functions of temperature distribution and the coefficient (degree) of hydration in the spatial regions that make up the product have been studied as characteristics of the heat treatment process. Model composite products of the same shape and structure but of different volume, consisting of two layers of material in which an exothermic hydration reaction takes place separated by a layer of expanded polystyrene were considered. The temperature-time regime of heat treatment was assumed to be close to that used in industrial conditions in the production of three-layer external wall panels. The boundary and initial conditions corresponded to the conditions of heat treatment on flat stands with water heating and sheltering products from above. It has been determined that the presence of a thermal insulation layer in the core of the product separating the layers that have an internal heat source, changes the distribution of temperature values and the hydration coefficient in the upper and lower layers significantly. An increase in the characteristic volume of the product leads to an increase in the influence of internal volumetric heat release on the processes of heating and hydration, while heat release caused by the course of the hydration reaction begins to have a decisive influence on them.

Keywords: thermal technological equipment, heat treatment of concrete products, numerical research methods, temperature field, degree of hydration, heat technologies

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V., Ryzhova T. N. (2022) Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66> (in Russian)

Введение

В ходе ранее проведенных исследований авторами разработана математическая модель с пространственно распределенными параметрами нестационарного процесса ускоренной тепловой обработки (ТО) композитного изделия, имеющего сложную структуру и геометрическую форму. При наличии внутренних объемных тепловыделений она позволяет рассчитать, в зависимости от времени ТО, величину и мощность технологически обусловленного потребления тепловой энергии, распределение значений температуры и коэффициента гидратации в пределах изделия и конструктивных элементов теплотехнологической установки (ТТУ) [1–5].

В данной статье представлено использование этой математической модели на примере ТО композитного трехслойного бетонного изделия в про-

мышленной ТТУ. Бетонное изделие рассматривается как совокупность пространственных областей Ω_j , где значение $j = 1$ соответствует области твердеющего бетона, $j = 2$ – опалубки, $j = 3$ – паровоздушной среды, $j = 4$ – нагревателя, $j = 5$ – теплоизоляционного слоя.

Модель включает: нестационарное уравнение теплопроводности с распределенным источником тепловыделения (1), уравнение для мощности источника тепловыделения (2), дополненное уравнением (3), нестационарное уравнение теплопроводности (4) и систему начальных и граничных условий (5)–(10), отражающих особенности процесса ТО в ТТУ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_b \rho_b} & \left\{ \frac{\partial \left(\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \right. \\ & + \frac{\partial \left(\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \\ & \left. + \frac{\partial \left(\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} + \rho_c P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ – время, с; x, y, z – декартовы координаты, м; $T(x, y, z, \tau)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ , °С; ρ_b – плотность бетона, кг/м³; ρ_c – удельный расход цемента в бетоне, кг/м³; c_b – удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·К); $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) на момент времени τ , Дж/кг; $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau)/Q_{\max}$ – коэффициент (степень) гидратации цемента; Q_{\max} – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг; $\lambda_b(H, T)$ – теплопроводность бетона, зависящая от степени гидратации и температуры, Вт/(м·К); $P_q(Q, T)$ – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг,

$$P_q(Q, T) = \frac{\partial Q(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где Q – суммарная удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента к рассматриваемому моменту времени, Дж/кг; $Q(T, \tau_{\text{прив}})$ – функция тепловыделения цемента, Дж/кг; $\tau_{\text{прив}}(Q, T)$ – приведенное время гидратации цемента, соответствующее возрасту бетона аналогичной прочности, которую он набрал бы при температуре выдержки T без проведения ТО, определяемое на основании известных опубликованных данных.

Распределение тепловыделений и коэффициента гидратации цемента в пространственной области бетона описывается уравнением

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

Расчеты температуры и коэффициента гидратации в пространственной области бетона Ω_1 выполняются по (1)–(3), температуры в пространственных областях Ω_2 – Ω_5 – на основании (4) с подстановкой теплофизических свойств материала (λ_j , c_j , ρ_j), заполняющего соответствующую пространственную область:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Граничные условия разработанной модели, примененные в исследовании, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Граничные условия модели с учетом структуры бетонных изделий и особенностей их тепловой обработки в теплотехнологической установке
Boundary conditions of the model that take into account the structure of concrete products and the peculiar features of their heat treatment in a heat technology installation

Граничное условие	Уравнение для граничного условия
На границе раздела бетон – среда тепловой обработки (Ω_1 – Ω_3)	$-\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} =$ $= \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_1} - T_{env}(\tau) \right) \quad (5)$
На границе раздела опалубка – среда тепловой обработки (Ω_2 – Ω_3)	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} =$ $= \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_2} - T_{env}(\tau) \right) \quad (6)$
На поверхности раздела опалубка – бетон (Ω_1 – Ω_2)	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_2} =$ $= \lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_1} \quad (7)$
На границе раздела нагреватель – столешница (Ω_2 – Ω_4):	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_4} =$ $= \alpha_w \left(T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_4 \cap \Omega_2} - T_w(\tau) \right) \quad (8)$
На границе раздела бетон – пенополистирол (Ω_1 – Ω_5)	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_5} =$ $= \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_1} \quad (9)$

Окончание табл. 1
End of Table 1

Граничное условие	Уравнение для граничного условия
На границе раздела опалубка – пенополистирол (Ω_2 – Ω_5)	$\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_5} = \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_2}$ (10)
Обозначения: ∂i – ∂x , ∂y или ∂z в соответствии с пространственной ориентацией границы; λ_b , λ_{st} , λ_{ps} – коэффициент теплопроводности соответственно бетона, стали, пенополистирола, Вт/(м·К); α , α_w – то же теплоотдачи на соответствующей граничной поверхности, Вт/(м ² ·К); $T_{env}(\tau)$ – температура в области паровоздушной среды, °С; $T_w(\tau)$ – то же нагревателя, °С.	

Цель статьи – изучение влияния геометрического объема трехслойных модельных бетонных изделий с теплоизолирующим слоем на функции распределения температуры $T(x, y, z, \tau)$ и коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ путем проведения численных исследований с помощью разработанной математической модели и выполнения сравнительного анализа полученных результатов.

Результаты численных исследований

В качестве объектов выбраны два модельных бетонных изделия трехслойной структуры, симметричные, кубической формы с геометрическими размерами 0,1×0,1×0,1 м (изделие 1) и 0,35×0,35×0,35 м (изделие 2). Теплоизоляционный слой моделирует пенополистирол – материал, наиболее распространенный при промышленном изготовлении наружных ограждающих строительных конструкций.

Вертикальные разрезы изделий, выполненные секущей плоскостью, параллельной грани куба, изображены на рис. 1, 2. Размеры формирующих слоев изделия 1: верхний слой (бетон) – 0,026×0,1×0,1 м, средний слой (пенополистирол) – 0,051×0,1×0,1 м, нижний слой (бетон) – 0,023×0,1×0,1 м; изделия 2: 0,09×0,35×0,35 м, 0,18×0,35×0,35 м, 0,08×0,35×0,35 м соответственно.

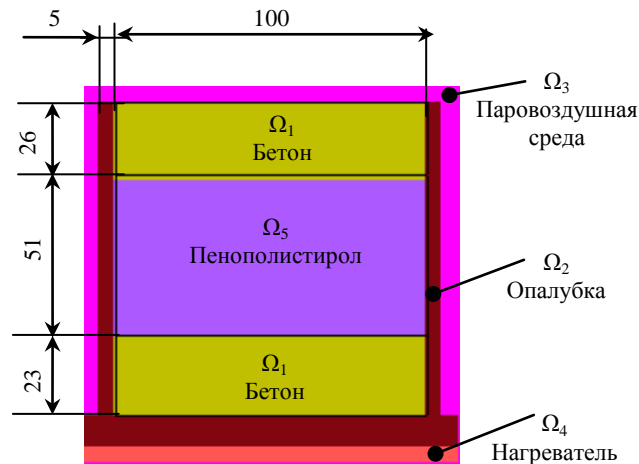


Рис. 1. Пространственные области и их размеры для трехслойного модельного изделия 1 в форме куба с размером ребра 0,1 м

Fig. 1. Spatial areas and their dimensions for a three-layer model product 1 in the form of a cube with an edge size of 0.1 m

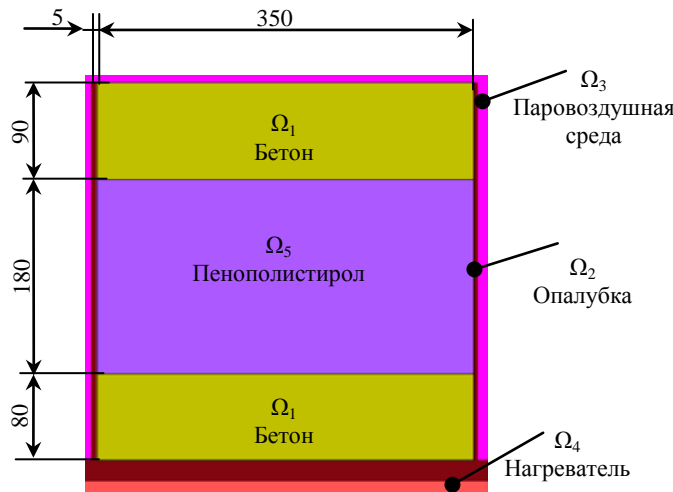


Рис. 2. Пространственные области и их размеры для трехслойного модельного изделия 2 в форме куба с размером ребра 0,35 м

Fig. 2. Spatial areas and their dimensions for a three-layer model product 2 in the form of a cube with an edge size of 0.35 m

Начальные условия модели, использованные в исследовании, учитывали реальный производственный процесс изготовления трехслойных стеновых панелей и представлены совокупностью уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_1} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_1; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_2} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_2; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_3} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_3; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_4} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_4; \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_5} \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_5; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг для } (x, y, z) \in \Omega_1, \end{array} \right. \quad (11)$$

где T_{Ω_1} , T_{Ω_2} , T_{Ω_3} , T_{Ω_4} , T_{Ω_5} – начальные температуры соответственно бетона, опалубки, паровоздушной среды, нагревателей и теплоизоляционного слоя, °С, в момент времени ТО $\tau = 0$, с.

При решении задачи моделирования в качестве режима ТО, имитирующего работу нагревателя и греющей среды, использовали ход температуры, применяемый в производственных условиях на горизонтальном стенде при изготовлении трехслойных наружных стеновых панелей. Температура в пространственной области паровоздушной среды Ω_3 принята одинаковой. Ее значение в любой момент времени $T_{env}(\tau)$ соответствовало линейной интерполяции значений из табл. 2, полученной на основании экспериментальных данных.

Таблица 2

**Температурный режим в пространственной области паровоздушной среды
вблизи верхней грани изделия****Temperature regime in the spatial region of the vapor-air medium
near the top face of the product**

τ , ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T , °С	24	27	29	30	33	36	39	42	42	42	42	42	42	42	42	42

Температура в пространстве нагревателя (Ω_4) также принята одинаковой. Ее величина в любой момент времени $T_w(\tau)$ соответствовала линейной интерполяции значений из табл. 3, полученной на основании экспериментальных данных.

Таблица 3

Температурный режим в пространственной области нагревателя**Temperature regime in the spatial area of the heater**

τ , ч	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T , °С	36	43	48	49	50	51	52	53	53	53	53	53	53	53	53	53

При выполнении расчетов применяли бетон марки С25/30F100w2 по СТБ 1544–2005 с водоцементным соотношением В/Ц = 0,38 и удельным расходом компонентов (цемента, песка, щебня, воды) соответственно: Ц = 398 кг/м³, П = 700 кг/м³, Щ = 1140 кг/м³, В = 150 кг/м³. Плотность влажного бетона, исходя из принципа аддитивности, составила: $\rho_b = \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + \text{В} = 2388$ кг/м³. В качестве вяжущего использовали портландцемент марки М500 (I42,5Н по ГОСТ 31108–2016).

Значение теплоемкости для данного состава бетона 1050 Дж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности бетона λ_b задавали для каждой точки изделия табулированной функцией в зависимости от степени гидратации и температуры по результатам обработки опубликованных экспериментальных данных [6, 7]. Максимальная удельная теплота гидратации использованного цемента (максимальное тепловыделение) $Q_{\max} = 502,4$ кДж/кг. Динамика тепловыделения цемента при различных температурах определена путем аппроксимации экспериментальных данных [6, 8]. Свойства пенополистирола: удельная теплоемкость $c_{ps} = 1340$ Дж/(кг·К), плотность $\rho_{ps} = 15$ кг/м³, теплопроводность $\lambda_{ps} = 0,056$ Вт/(м·К) [9, 10].

Схема размещения выделенных для анализа точек в пределах внутреннего пространства трехслойного изделия 1 с размером ребра 0,1 м представлена на рис. 3.

Фрагмент результатов численного расчета распределения температуры в центральном вертикальном сечении изделия 1 в различные моменты времени ТО представлен на рис. 4. На протяжении периода изотермической выдержки характер распределения температуры по пространству остается практически неизменным. Изделие 1 в течение этапа подъема температуры быстро прогревается: верхний слой – до 51 °С (графики 3, 4), нижний слой – до 53 °С (графики 1, 2).

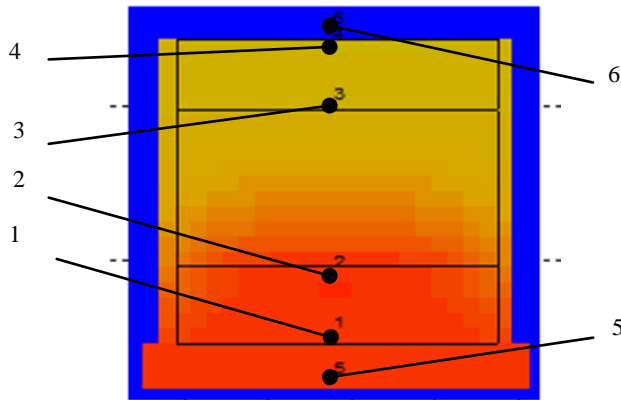


Рис. 3. Схема расположения анализируемых точек изделия 1 в области:
 1 (координаты 0,0475; 0,0025; 0,0475 м), 2 (0,0475; 0,0225; 0,0475 м), 3 (0,0475; 0,0775; 0,0475 м),
 4 (0,0475; 0,0975; 0,0475 м) – бетона (Ω_1); 5 (0,0475; -0,0125; 0,0475 м) – нагревателя (Ω_4);
 6 (0,0475; 0,103; 0,0475 м) – паровоздушной среды (Ω_3)

Fig. 3. The layout of the points selected for analysis in the vertical central plane of the product 1:
 1 (coordinates 0.0475; 0.0025; 0.0475 m), 2 (0.0475; 0.0225; 0.0475 m), 3 (0.0475; 0.0775; 0.0475 m),
 4 (0.0475; 0.0975; 0.0475 m) – of concrete (Ω_1); 5 (0.0475; -0.0125; 0.0475 m) – of a heater (Ω_4);
 6 (0.0475; 0.103; 0.0475 m) – of the vapor-air medium (Ω_3)

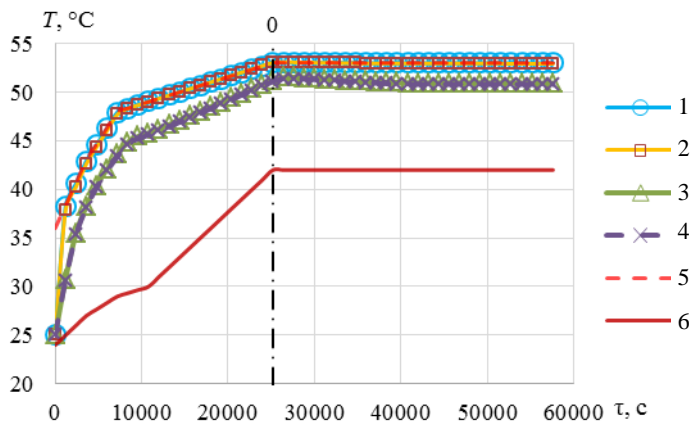


Рис. 4. Графики зависимости температуры от времени тепловой обработки
 для анализируемых точек изделия 1 в области: 1–4 – бетона (Ω_1); 5 – нагревателя (Ω_4);
 6 – паровоздушной среды (Ω_3); 0 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 4. The charts illustrating dependence of the temperature at the selected points of the product 1
 on the time of heat treatment in the area of: 1–4 – concrete (Ω_1); 5 – heater (Ω_4);
 6 – vapor-air medium (Ω_3); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

В дальнейшем температура в указанных слоях меняется несущественно. Значения температуры для точек 1, 2 в нижнем слое изделия очень близки и практически совпадают с температурой столешницы ТТУ (рис. 4, график 5). Значения температуры для точек 3, 4 в верхнем слое изделия также близки, однако они ниже, чем для точки 5, приблизительно на 2 °С из-за охлаждающего влияния паровоздушной среды (график 6).

На рис. 5 приведены фрагменты компьютерной эмуляции результатов численных расчетов в сечениях XY , YZ , XZ изделия 1 в различные моменты времени режима ТО. В верхней правой части экранов размещена шкала, позволяющая установить величину температуры в любой точке пространства бетонного изделия. Хорошо видно, что средний теплоизолирующий слой пенополистирола препятствует прогреву верхнего слоя бетона.

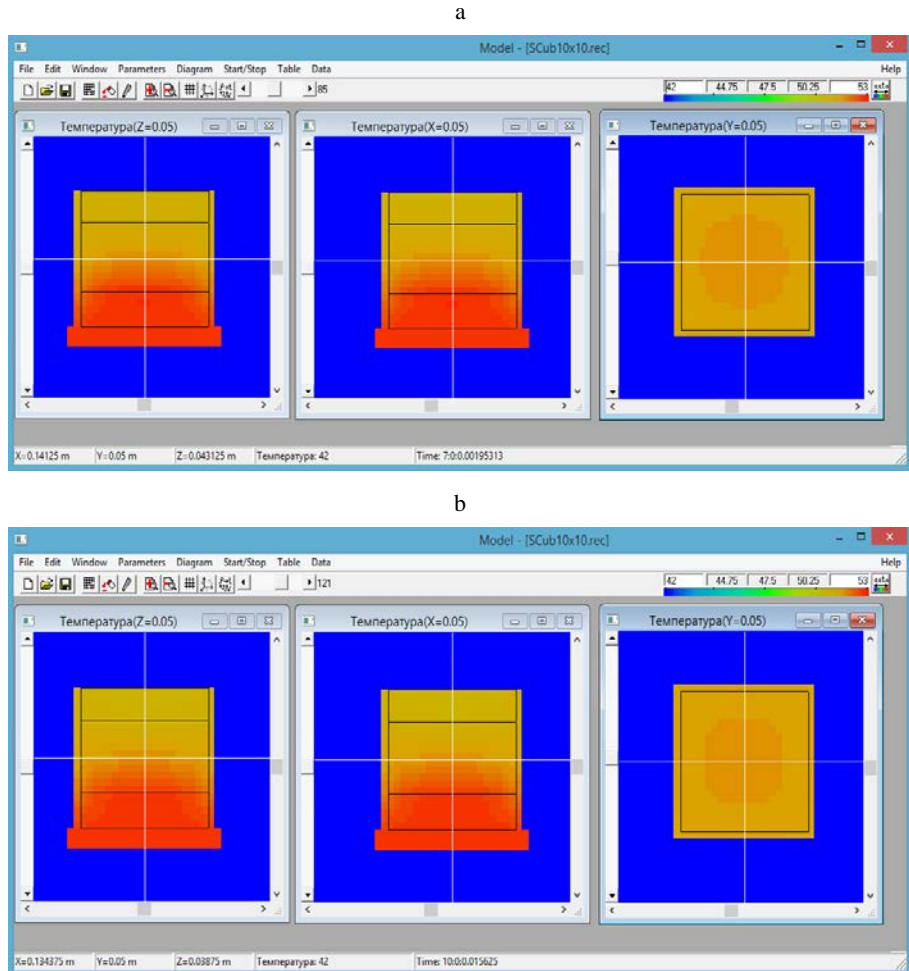


Рис. 5. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения температуры для изделия 1 в проекциях XY , YZ , XZ через:
а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 5. A fragment of computer emulation of the results of numerical simulation of the temperature distribution for product 1 in the projections XY , YZ , XZ after:
а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

Зависимость коэффициента гидратации и температуры от времени тепловой обработки в выделенных точках изделия 1 представлена на рис. 6.

Анализ рис. 6, а также фрагментов компьютерной эмуляции результатов численного моделирования в различные моменты времени ТО (рис. 7)

показывает, что характер распределения значений коэффициента гидратации по объему изделия и во времени отличается неравномерностью. Так, в результате теплоотдачи от бетона к опалубке в нижнем слое бетона краевые зоны имеют степень гидратации на ~0,15 % меньше, чем в его середине, а в верхнем слое изделия, наоборот, на 0,15–0,2 % больше, чем в середине. Коэффициент гидратации верхнего слоя бетона в течение периода изотермической выдержки на 1–2 % меньше, чем степень гидратации нижнего слоя, что является отражением аналогичной зависимости для температуры в этих точках (рис. 4).

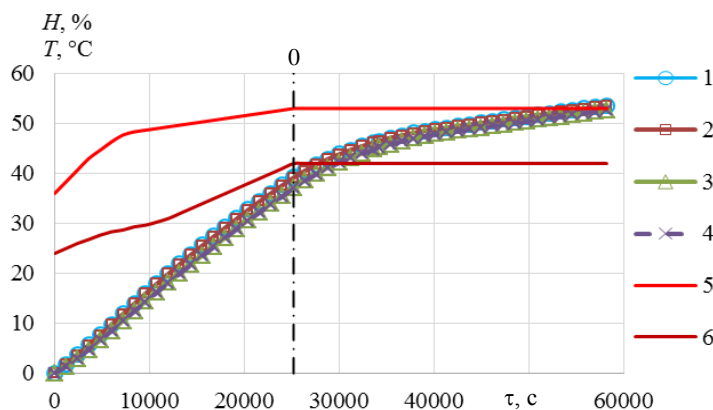


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента гидратации в области бетона (Ω_1) (линии 1–4) и температуры в области: 5 – нагревателя (Ω_4); 6 – паровоздушной среды (Ω_3) от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 1; 0 – момент начала изотермической выдержки

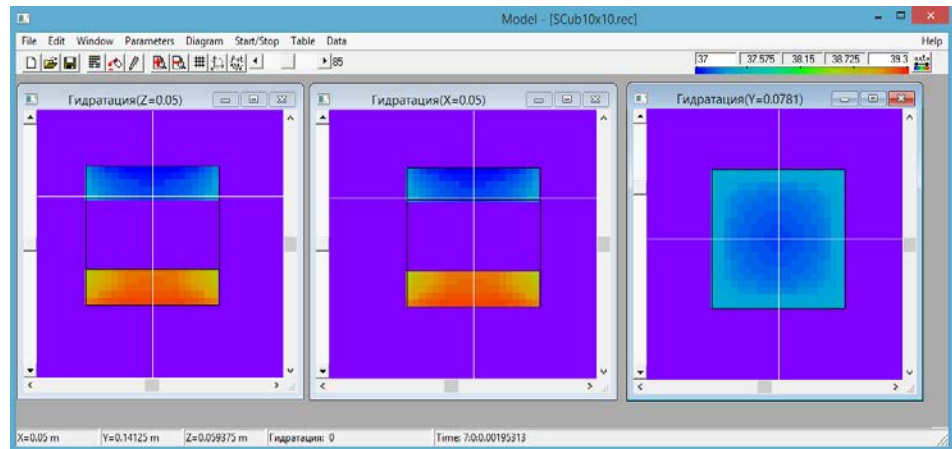
Fig. 6. The charts illustrating dependence of the hydration coefficient in the area of concrete (Ω_1) (lines 1–4) and the temperature on the time of heat treatment at the selected points of the product 1: 5 – in the heater area (Ω_4); 6 – in the area of the vapor-air medium (Ω_3); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

Коэффициент гидратации в интервале времени ТО с 7 до 10 ч изменяется от 39,3 до 47,4 %, что отражено на цифровой шкале в верхнем правом углу рис. 7.

В целом процесс гидратации обоих слоев изделия 1 проходит приблизительно одинаково, и к концу периода изотермической выдержки степень гидратации достигает уровня ~52 % (верхний слой) и ~54 % (нижний слой). В пространственной области пенополистирола (Ω_5) гидратация не происходит (рис. 7).

Значения коэффициента гидратации в слоях распределены практически однородно (рис. 6), и по мере увеличения времени ТО в нижней и верхней частях изделия 1 они различаются не более чем на 1%. Вместе с тем достигнутая степень гидратации в верхнем слое бетона остается меньшей, чем в нижнем, на всем протяжении ТО.

а



б

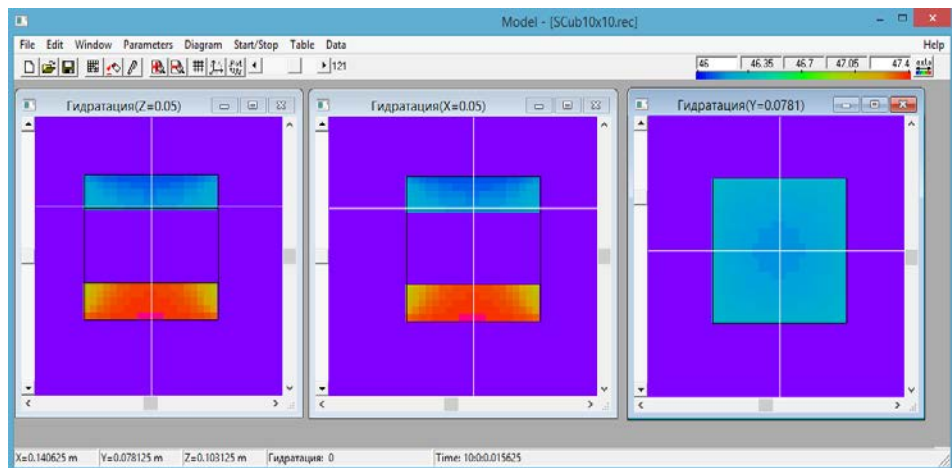


Рис. 7. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения значений коэффициента гидратации для изделия 1 в проекциях XY, YZ, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 7. A fragment of computer emulation of the results of numerical modeling of the distribution of the values of the hydration coefficient for product 1 in the projections XY, YZ, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

В ходе дальнейших исследований выполнены численные расчеты для изделия 2 с размером ребра 0,35 м.

Схема размещения анализируемых точек в пределах внутреннего пространства аналогична представленной для изделия 1 (рис. 3). На рис. 8 приведены зависимости температуры от времени ТО в выделенных точках изделия 2. Компьютерная эмуляция распределения температуры в объеме изделия показана на рис. 9.

Зависимости коэффициента гидратации от времени ТО в выделенных точках изделия 2 приведены на рис. 10. Визуализация результатов компьютерного моделирования процесса гидратации представлена на рис. 11.

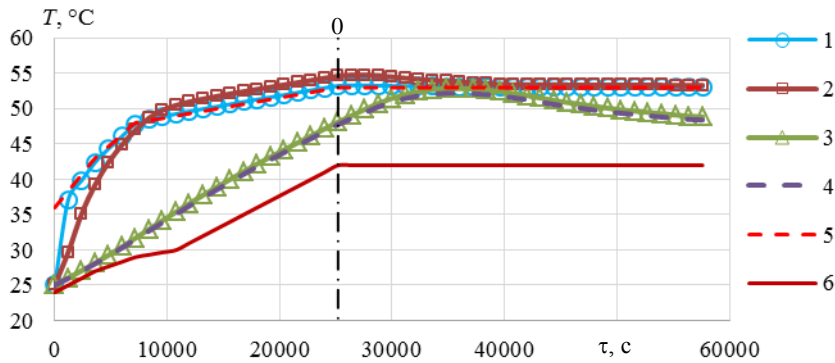
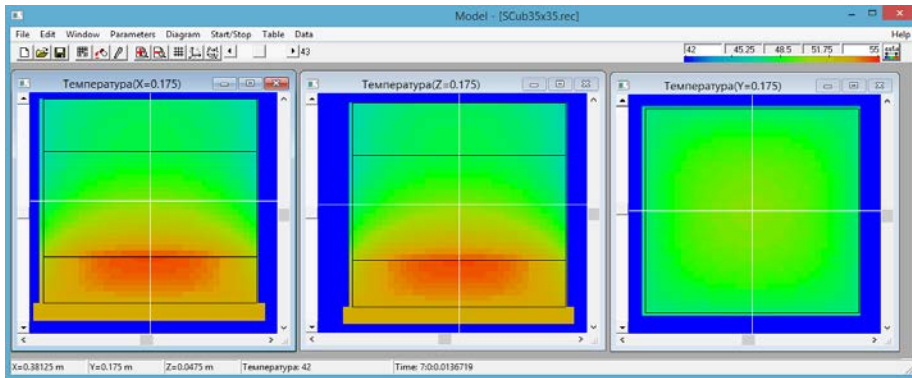


Рис. 8. Графики зависимости температуры от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 2 в области: 1–4 – бетона (Ω_1); 5 – нагревателя (Ω_4); 6 – паровоздушной среды (Ω_3); 0 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 8. The charts expressing dependence of the temperature at the selected points of the product 2 on the time of heat treatment in the area of: 1–4 – concrete (Ω_1); 5 – heater (Ω_4); 6 – vapor-air medium (Ω_3); 0 – moment of the beginning of the isothermal exposure

a



b

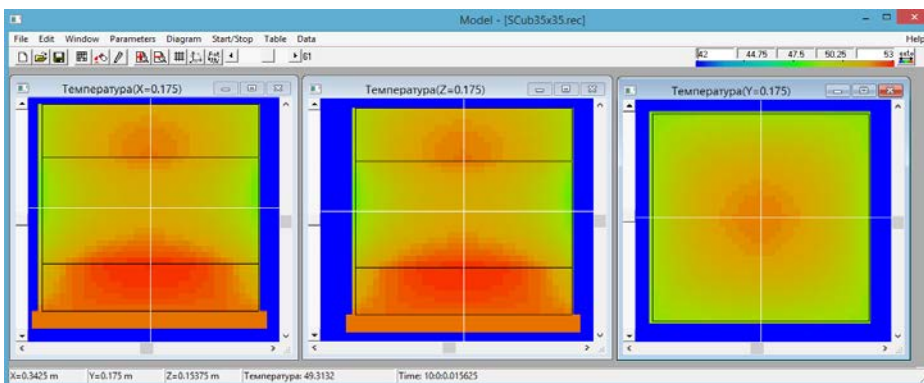


Рис. 9. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения температуры для изделия 2 в проекциях YZ, YX, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 9. A fragment of computer emulation of the results of numerical simulation of the temperature distribution for product 2 in the projections YZ, YX, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

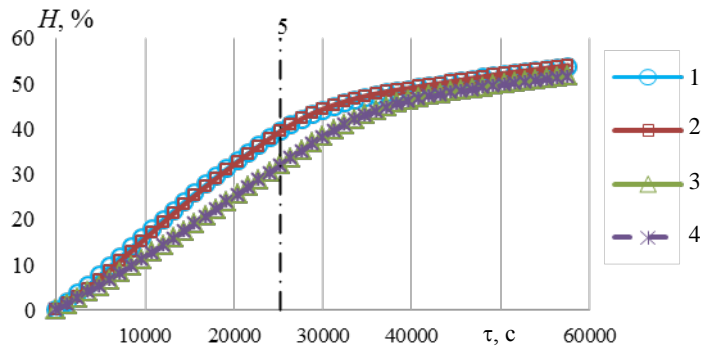


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента гидратации от времени тепловой обработки для анализируемых точек изделия 2: 1–4 – в области бетона (Ω_1); 5 – момент начала изотермической выдержки

Fig. 10. The charts illustrating dependence of the hydration coefficient at the selected points of the product 2 on the time of heat treatment: 1–4 – in the area of concrete (Ω_1); 5 – moment of the beginning of the isothermal exposure

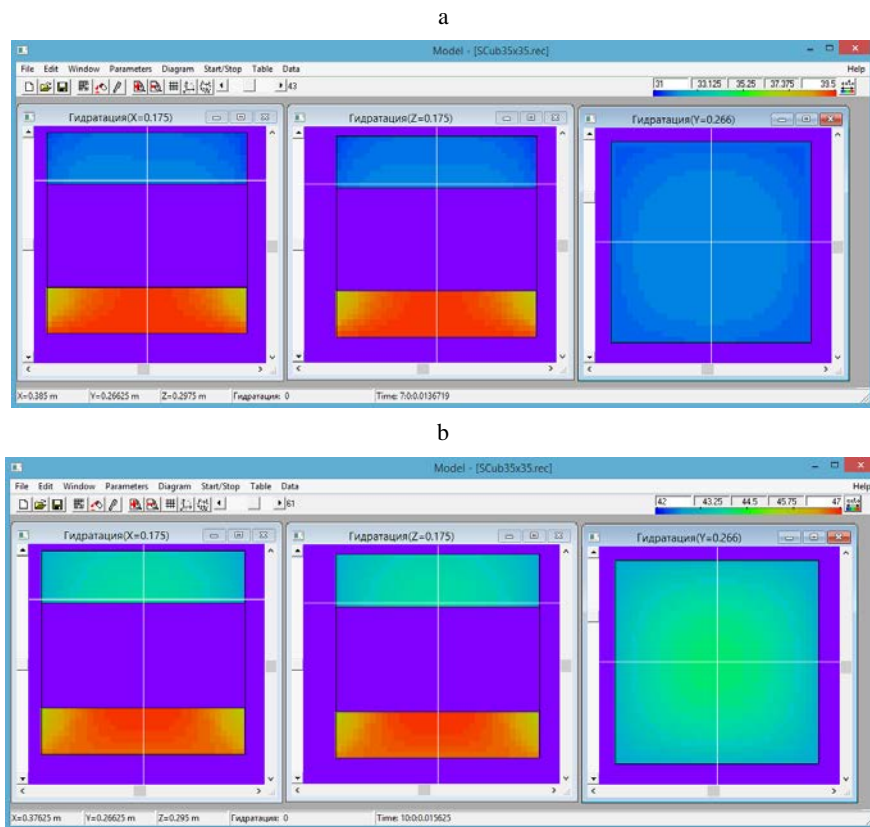


Рис. 11. Фрагмент компьютерной эмуляции результатов численного моделирования распределения значений коэффициента гидратации для изделия 2 в проекциях YZ, YX, XZ через: а – 7 ч тепловой обработки; б – 10 ч

Fig. 11. A fragment of computer emulation of the results of numerical modeling of the distribution of the hydration coefficient values for product 2 in the projections YZ, YX, XZ after: а – 7 h of heat treatment; б – 10 h of heat treatment

Через 2,3 ч с момента начала ТО в нижнем слое изделия 2 вблизи его центральной оси симметрии образуется область точек, где температура выше, чем в области нагревателя. К исходу 7 ч это различие достигает максимального значения (55 °С против 53 °С), а затем постепенно уменьшается (рис. 8). Температура в верхнем слое поднимается до максимума 53 °С к 10 ч, а затем постепенно уменьшается до 49 °С к 16 ч. К этому времени степень гидратации в верхнем слое изделия 2 достигает величины ~52,5 %, а в нижнем ~57,5 %, что больше, чем для изделия 1 меньшего размера (52 и 54 % соответственно). При этом в большем изделии различие в степени гидратации верхнего и нижнего слоев выражено значительнее, чем в изделии меньшего объема.

ВЫВОДЫ

1. На примере трехслойного композитного изделия, состоящего из двух слоев бетона, разделенных слоем утеплителя из пенополистирола, выполнено численное моделирование распределения температуры и коэффициента (степени) гидратации в пределах пространственных областей изделий разного объема в условиях их тепловой обработки на плоском стенде.

2. Краевые зоны в нижнем слое изделия имеют степень гидратации на ~0,15 % меньше, чем в его середине, а в верхнем слое – на 0,15–0,2 % больше, чем в середине.

3. Коэффициент гидратации в верхнем слое изделия в течение периода изотермической выдержки на 1–2 % меньше, чем в нижнем слое.

4. Распределение температуры и значений коэффициента гидратации в трехслойных изделиях разных размеров существенно отличается, причем с увеличением характерного размера изделия до 0,35 м и более на процессы нагрева и гидратации определяющее влияние начинают оказывать тепловыделения, обусловленные протеканием реакции гидратации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
2. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
3. 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>.
4. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-327-324>.
5. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.
6. Ge, Zh. Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete [Electronic Resource] / Zh. Ge // Iowa State University Digital Repository. 2005. Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. Date of access: 14.12.2018.

7. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. № 2. С. 29–34.
 8. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
 9. Строительная теплотехника. Строительные правила Республики Беларусь СП 2.04.01–2020. Введ. 20.01.2021. Минск: Минстройархитектуры, 2020. 72 с.
 10. Плотность, теплопроводность, теплоемкость строительных, теплоизоляционных и других материалов [Электронный ресурс] // Thermalinfo.ru – Теплопроводность, теплоемкость, плотность, вязкость, температуропроводность и другие свойства веществ в таблицах. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriale/teplovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost>. Дата доступа: 12.12.2018.
- Поступила 02.09.2021 Подписана в печать 09.11.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

REFERENCES

1. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
2. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkovich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
3. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
4. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-327-324> (in Russian).
5. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) Unsteady Model of the Hydration Process of a Reinforced Concrete Product at Software-Controlled Heating. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = The Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 63 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505> (in Russian).
6. Ge Zh. (2005) Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete. Iowa State University Digital Repository. Available at: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtid> (Accessed 14 December 2018).
7. Krasulina L. V. (2012) Structural and Thermophysical Properties of Hardening Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 29–34 (in Russian).
8. Mar'yamov N. B. (1970) *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Installations)*. Moscow, Stroizdat Publ. 272 (in Russian).
9. SP 2.04.01–2020. *Construction Heat Engineering. Building Regulations of the Republic of Belarus*: Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. 2020. 72 (in Russian).
10. Density, Thermal Conductivity, Heat Capacity of Construction, Thermal Insulation and Other Materials. *Thermalinfo.ru*. Available at: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriale/teplovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost> (Accessed 12 December 2018) (in Russian).

Received: 2 September 2021 Accepted: 9 November 2021 Published online: 31 January 2022