

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206>

УДК 658.26:666.97.035.5:004.94

Разработка энергоэффективных режимов установок для тепловой обработки бетонных изделий с использованием численных методов расчета

Докт. техн. наук, проф. В. Н. Романиук¹⁾, канд. техн. наук А. М. Нияковский²⁾,
докт. физ.-мат. наук, проф. А. Н. Чичко³⁾, канд. техн. наук Ю. В. Яцкевич³⁾

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

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Производство бетонных и железобетонных изделий в условиях Республики Беларусь и в странах с аналогичными климатическими условиями требует проведения тепловой обработки в теплотехнологических установках с целью достижения продукцией заданной прочности в назначенное время, на что расходуется большое количество тепловой энергии. Назначение режимов работы оборудования в этом случае сопряжено с целым рядом трудностей, когда речь идет о новых изделиях сложной пространственной конфигурации и структуры. Критериями оптимальности таких режимов выступают, как правило, продолжительность и температурные пределы обработки, обеспечивающие требуемую прочность при минимальном потреблении энергии. В условиях серийного производства в случае конструктивно простых объектов назначение режимов тепловой обработки осуществляется опытным путем. Как показывает анализ, полученные таким образом режимы не отвечают названным выше критериям, особенно с позиций энергосбережения. В статье с использованием ранее разработанной авторами математической модели предлагаются зависимости для расчета оптимальных режимов тепловой обработки бетонных изделий, отличающихся сложной пространственной формой и многокомпонентной структурой. Метод основан на трехмерных уравнениях переноса с учетом внутренних источников тепловыделений, обусловленных протекающей реакцией гидратации активных компонентов цементного клинкера, и граничных условий, соответствующих структуре обрабатываемого изделия, а также виду теплотехнологического устройства для ускоренной гидратации. Предложены уравнения для расчета количества подводимой к обрабатываемому изделию тепловой энергии, обеспечивающей заданную прочность в назначенное время. На примере выпускаемого промышленного бетонного изделия и для условий реально применяемого устройства ускоренной гидратации выполнено сравнение двух предельных режимов тепловой обработки: с изотермической выдержкой и без нее. В результате расчетов получены зависимости энергопотребления, температурных полей и степени гидратации в изделии для обоих режимов и разработан соответствующий рассматриваемому случаю энергосберегающий режим тепловой обработки. Показано, что используемый численный метод позволяет решать задачи подобного типа и добиваться экономии тепловой энергии.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплотехнологические установки, кинетика гидратации цемента, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, композитные материалы, энергосберегающие режимы, энергоэффективность

Для цитирования: Разработка энергоэффективных режимов установок для тепловой обработки бетонных изделий с использованием численных методов расчета / В. Н. Романиук [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 195–206. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206>

Development of Energy-Efficient Modes of Installations for Heat Treatment of Concrete Products Using Numerical Calculation Methods

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

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)

Abstract. Production of concrete and reinforced concrete products in the conditions of the Republic of Belarus and in the countries with similar climatic conditions requires heat treatment in heat-technological installations in order to achieve

Адрес для переписки

Романиук 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

the desired strength of the products at the appointed time, which consumes a great amount of thermal energy. In this case, the purpose of equipment operating modes is associated with a number of difficulties when it comes to new products of complex spatial configuration and structure. The optimality criteria of such modes are, as a rule, the duration and temperature limits of processing, providing the required strength with minimal energy consumption. In the conditions of serial production in the case of structurally simple objects, the assignment of heat treatment modes is carried out empirically. As the analysis shows, the modes obtained in this way do not meet the above criteria, especially from the standpoint of energy saving. The paper, using a mathematical model previously developed by the authors, proposes dependencies for calculating the optimal modes of heat treatment of concrete products that are distinguished by a complex spatial shape and multi-component structure. The method is based on three-dimensional transfer equations, taking into account internal sources of heat release due to the ongoing hydration reaction of the active components of the cement clinker, and the boundary conditions corresponding to the structure of the processed product, as well as the type of heat technology device for accelerated hydration. Equations are proposed for calculating the amount of heat energy supplied to the processed product providing a given strength at a specified time. On the example of a manufactured industrial concrete product and for the conditions of an actually used device for accelerated hydration, a comparison has been made between two limiting modes of heat treatment: with isothermal exposure and in its absence. As a result of the performed calculations, the dependences of energy consumption, temperature fields and the degree of hydration in the product for both modes have been obtained and an energy-saving mode of heat treatment corresponding to the case under consideration has been developed. It is shown that the used numerical method allows to solve problems of this type and to achieve thermal energy savings.

Keywords: mathematical modelling, heat-technological installations, cement hydration kinetics, temperature field, non-stationary heat conduction equation, composite materials, energy-saving modes, energy efficiency

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2021) Development of Energy-Efficient Modes of Installations for Heat Treatment of Concrete Products Using Numerical Calculation Methods. *Science and Technique*. 20 (3), 195–206. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-195-206> (in Russian)

Введение

При производстве бетонных и железобетонных изделий в климатических условиях Республики Беларусь требуется тепловая обработка (ТО), которая реализуется в устройствах ускоренной гидратации. ТО является самой энергоемкой стадией технологического процесса производства бетонных изделий. Удельный расход тепловой энергии (ТЭ) на нужды ТО в расчете на единицу объема изделий составляет в зависимости от вида изделия и типа теплотехнологической установки от 314 до 2088 МДж/м³, на ее осуществление затрачивается до 70 % от общей продолжительность производственного цикла [1–5]. В силу указанных причин особую актуальность приобретают проблема снижения энергоемкости ТО, разработка новых и совершенствование существующих методов исследований и расчетов тепло-энергетического и теплотехнологического оборудования для ее осуществления, оптимизация схем, параметров и режимов его работы.

В ранее опубликованных работах [6–13] сформулированы и описаны математическая модель с пространственно распределенными параметрами и алгоритм расчета, отличающиеся от известных учетом неравновесности процессов нагрева изделия и гидратации цемента в нем, учетом пространственно распределенного источника гидратации, учетом простран-

ственного распределения 3D-компонентов изделия (бетон, опалубка, пенополистирол, минеральная вата), учетом системы начальных и граничных условий, отражающих особенности теплопереноса в теплотехнологической установке с программируемым нагревателем и находящимся внутри нее обрабатываемым изделием.

Цель исследований авторов – развитие ранее полученных модели и алгоритма, заключающиеся в формировании исходных данных, адаптации граничных и начальных условий и выполнении расчетов применительно к промышленно изготавливаемым бетонным изделиям сложной пространственной конфигурации и структуры, на основе чего разработать энергосберегающий режим работы теплотехнологического оборудования. В качестве исследуемого объекта рассмотрена наружная трехслойная стеновая панель серии 90-м, выпускаемая ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» (далее – наружная стеновая панель), 3D-геометрия которой построена в среде SolidWorks и импортирована в разработанную систему САЕ для построения клеточной 3D-модели.

На рис. 1 представлено распределение входящих в наружную стеновую панель и использованных при проведении расчетов областей Ω_1 – Ω_6 различных материалов и элементов конструкции, составляющих бетонное изделие.

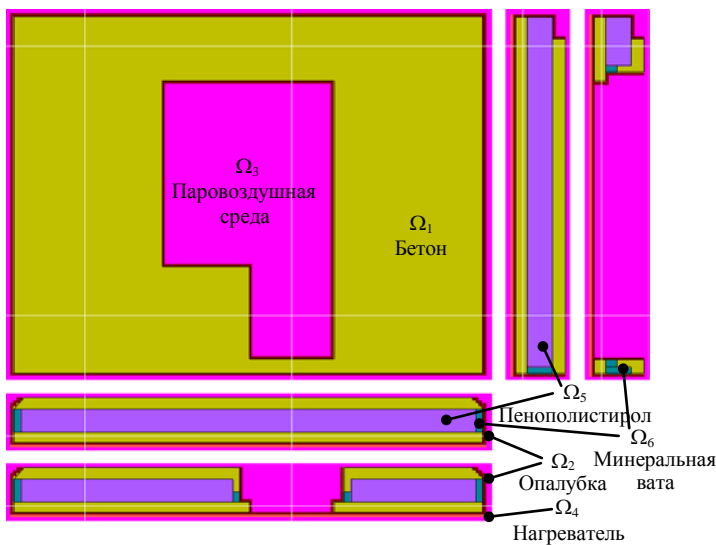


Рис. 1. Области моделируемого пространства для тепловой обработки многослойной наружной стеновой панели

Fig. 1. Areas of simulated space for heat treatment of multi-layer external wall panel

Как видно из рисунка, объект имеет сложную конфигурацию и структуру. В него входят пространственные области бетона (Ω_1), пенополистирола (Ω_5) и минеральной ваты (Ω_6). Тепловая обработка изделия проводилась на обогреваемом стенде горизонтального формования с укрытием поверх специальным рулонным покрывалом, под которым формировалась паровоздушная среда (Ω_3). По внутренней и наружной торцевым поверхностям объект был ограничен стальной опалубкой (Ω_2).

Отключение нагревания (контролируемого поддержания температуры) и переход оборудования в режим, когда тепловая обработка изделия осуществляется целиком за счет теплоты гидратации, моделировались путем присвоения элементам области нагревателя (Ω_4) идентификатора области опалубки (Ω_2) при сохранении значений температуры. То есть в момент времени τ , соответствующий прекращению поддержания постоянства температуры выдержки изделия (но после завершения предварительного нагрева), область Ω_4 превращалась в часть области Ω_2 .

Температура во всем пространстве нагревателя (Ω_4) изменялась в соответствии с режимом термообработки

$$\frac{\partial T_w(\tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (T_{\max} - T_0) / \tau_{inc} & \text{при } 0 \leq \tau < \tau_{inc}; \\ 0 & \text{при } \tau_{inc} \leq \tau < \tau_{iso}, \end{cases} \quad (1)$$

где T_{\max} – максимальная температура в пространственной области нагревателя (заданная

температура изотермической выдержки), °C; T_0 – начальная температура пространственной области нагревателя, °C, принята 36 °C; τ_{inc} – момент времени прекращения этапа подъема температуры, считая от начала процесса ТО, заданный режимом тепловой обработки, с; τ_{iso} – момент окончания изотермической выдержки, считая от начала процесса ТО, заданный режимом тепловой обработки, с.

Начальные и граничные условия и параметры модели

Начальные условия модели (в момент времени $\tau = 0$) задавались соотношениями, описывающими фактические температурные условия производства:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = 25 \text{ }^\circ\text{C} & \text{для} \\ & (x, y, z) \in \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_5 \cup \Omega_6; \\ T(x, y, z, 0) = 24 \text{ }^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_3; \\ T(x, y, z, 0) = T_0 = 36 \text{ }^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_4; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1, \end{cases} \quad (2)$$

где x, y, z – декартовы координаты (ось y направлена вертикально); $T(x, y, z, 0)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) , °C, в момент времени $\tau = 0$; $Q(x, y, z, 0)$ – тепловыделение цемента, Дж/кг, в момент времени $\tau = 0$.

С целью моделирования тепловой обработки граничные условия были приведены к условиям задачи. Так, температура области паровоздушной среды (Ω_3) менялась по следующему закону:

$$T_{env}(\tau + \Delta\tau) = T_{env}(\tau) + \frac{P_{env}(\tau) - P_{cov}(\tau)}{\rho_{air} V_{env} c_{air}} \Delta\tau, \quad (3)$$

где c_{air} , ρ_{air} – удельная теплоемкость и плотность влажного насыщенного воздуха при средней температуре в процессе ТО 40 °C; P_{env} – мощность теплоотдачи опалубки и открытой поверхности бетона в паровоздушную среду; P_{cov} – то же паровоздушной среды на поверхность рулонного покрывала; V_{env} – объем

области Ω_3 ; Δt – шаг изменения времени тепловой обработки, с.

Мощность теплоотдачи паровоздушной среды на поверхность покрывала определялась на основании уравнения

$$P_{cov}(\tau) = \alpha_{cov} (x_{max} - x_{min}) \times (z_{max} - z_{min}) (T_{env}(\tau) - T_{cov}), \quad (4)$$

где α_{cov} – коэффициент теплоотдачи паровоздушной среды к поверхности укрытия, Вт/(м²·К); x_{min} , x_{max} , z_{min} , z_{max} – минимальная и максимальная соответствующие координаты моделируемого пространства (для вычисления площади укрываемой поверхности), м; T_{cov} – температура покрывала, °С.

Мощность теплоотдачи опалубки (Ω_2) и открытой поверхности бетона (Ω_1) в паровоздушную среду (Ω_3) вычислялась следующим образом:

$$P_{env}(\tau) = \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y+\Delta y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{up} \Delta x \Delta z (T(x, y + \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) + \\ + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_2 \\ (x+\Delta x,y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{sd} \Delta y \Delta z (T(x + \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) + \\ + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_2 \\ (x-\Delta x,y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{sd} \Delta y \Delta z (T(x - \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) + \\ + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z+\Delta z) \in \Omega_2}} \alpha_{sd} \Delta x \Delta y (T(x, y, z + \Delta z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) + \\ + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z-\Delta z) \in \Omega_2}} \alpha_{sd} \Delta x \Delta y (T(x, y, z - \Delta z, \tau) - T(x, y, z, \tau)), \quad (5)$$

где α_{up} , α_{sd} – коэффициенты теплоотдачи конвективного теплообмена к паровоздушной среде соответственно от верхней (горизонтальной) и вертикальной (боковой) поверхностей бетонного изделия, Вт/(м²·К); Δx , Δy , Δz – шаг по пространству в направлении соответствующих осей, м.

Параметры моделирования характеризовались следующими значениями: размеры сеточной модели составили $164 \times 22 \times 139 = 501512$ элементов; шаг по пространству 0,02 м; шаг по времени 0,05 с; общее время моделирования варианта тепловой обработки не менее 22 ч.

Моделирование распределения значений температуры и коэффициента гидратации

С использованием модели и уравнений, описанных в [6–13], выполнено сравнительное моделирование двух режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия: с изотермической выдержкой (при контролируемом подводе теплоты и постоянной температуре) и энергосберегающего, когда тепловая обработка изделия осуществляется преимущественно за счет теплоты гидратации (подвод теплоты извне выполняется только в период предварительного нагрева). Режим с изотермической выдержкой характеризовался следующими параметрами: $T_{max} = 53$ °С (температура нагрева и выдержки); $\tau = \tau_{inc} = 3$ ч (момент времени завершения предварительного нагрева); $\tau = \tau_{iso} = 10$ ч (момент времени завершения изотермической выдержки). Указанные моменты времени отсчитывались от принятого за нуль начала ТО. Фрагменты, иллюстрирующие результаты моделирования распределения температур и коэффициента (степени) гидратации в выделенных сечениях для этого режима через 6 ч, прошедших от начала тепловой обработки, представлены на рис. 2.

На рис. 3 показаны изменения во времени соответственно температуры и коэффициента гидратации в различных точках изделия. Из рис. 3 следует, что максимальная температура нижнего слоя бетона достигает в точке 3 значения 56,3 °С на момент времени ~5 ч. Это превышает заданную температуру нагрева на 3,3 °С. Максимальная температура наружной грани верхнего слоя бетона (кривая 5) достигает ~54,7 °С, что только на 1,7 °С выше температуры в пространственной области нагревателя. Разные температурные условия в верхнем и нижнем слоях бетона обуславливают и различную степень гидратации в них. Величины коэффициента гидратации цемента в бетоне H в рассматриваемых точках на момент времени $\tau = 15$ ч составили: 53,5 % – в нижнем; 51,6 % – в верхнем бетонном слое изделия.

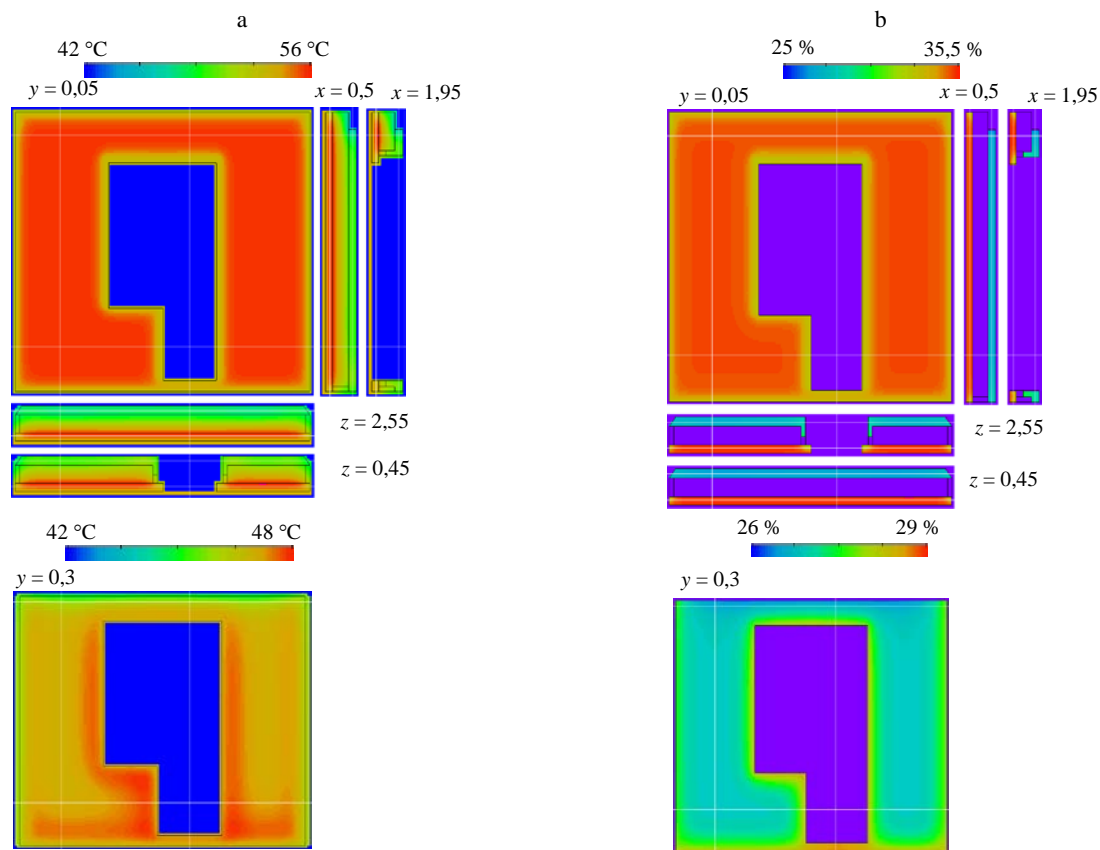


Рис. 2. Распределение температуры (а), степени (коэффициента) гидратации (б) в выделенных сечениях изделия при изотермическом режиме тепловой обработки по истечении 6 ч

Fig. 2. Distribution of temperature (a), degree (coefficient) of hydration (b) in the selected sections of the product in the isothermal heat treatment mode after 6 h

Расчеты распределения температур при заданном режиме с изотермической выдержкой (который чаще всего используется в условиях производства) показали, что температура бетона превышает температуру изотермической выдержки. В итоге часть теплоты реакции гидратации, если температура в пространственной области нагревателя поддерживается постоянной, отводится от изделия в эту область и рассеивается за пределы изделия. В связи с чем для разработки энергосберегающих режимов ТО целесообразно рассмотреть использование в качестве базового режим, исключая активный отвод теплоты от изделия в область нагревателя в период внешнего подвода ТЭ.

В качестве базового для проведения расчетов использован тепловой режим, характеризующийся следующими параметрами: $T_{\max} = 53 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{inc} = 3 \text{ ч}$ при сокращенной продолжительности изотермической выдержки (далее – энергосберегающий режим). От применяемого в производ-

стве режима ТО, близкого к изотермическому (далее – изотермический режим), он отличался значением параметра, связанного со временем изотермической выдержки τ_{iso} : вместо $\tau_{iso} = 10 \text{ ч}$ принято $\tau_{iso} = \tau_{inc} = 3 \text{ ч}$. Энергосберегающий режим представляет собой предельный случай, отличающийся от ранее рассмотренного режима значением параметра, связанного со временем изотермической выдержки τ_{iso} и с общим временем подвода теплоты нагревателями к изделию. В момент времени $\tau = \tau_{inc}$ нагреватели отключены, и ТО изделия осуществляется за счет теплоты реакции гидратации.

Сравнительные результаты моделирования динамики температуры в области нагревателя для режима с изотермической выдержкой (изотермического) и энергосберегающего режимов представлены на рис. 4. Результаты моделирования динамики температур и коэффициента гидратации в выделенных точках изделия (рис. 3а) для указанных режимов приведены на рис. 5–10.

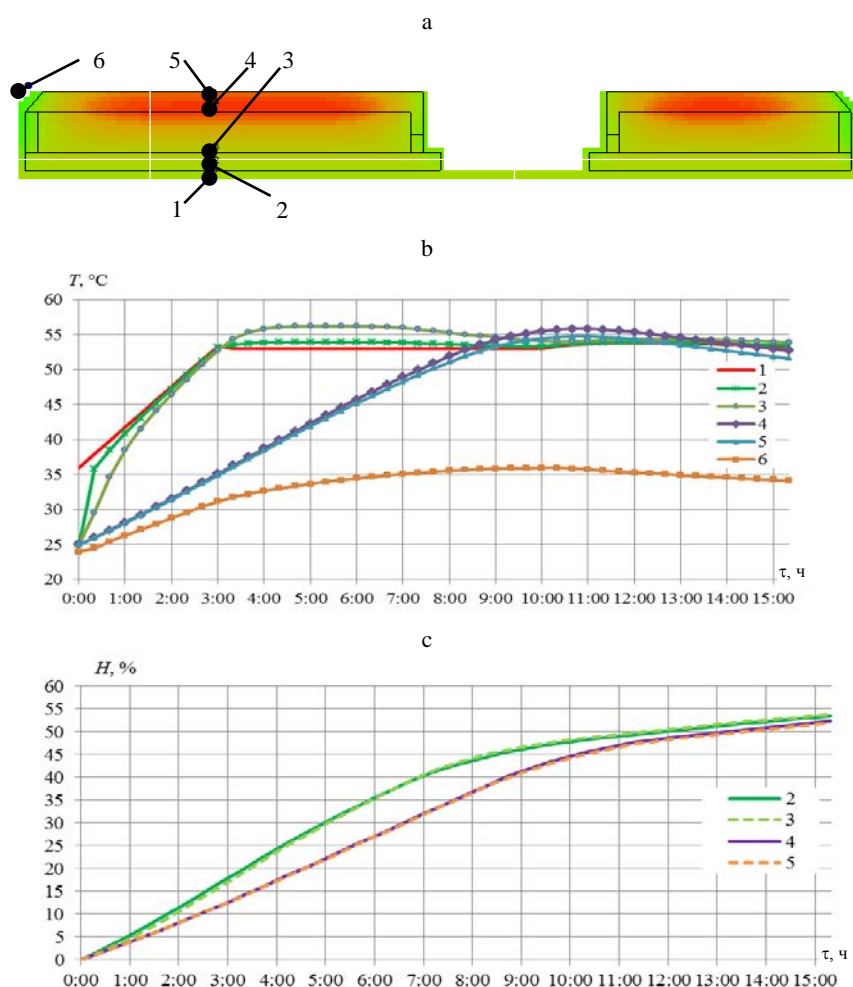


Рис. 3. Сравнение изменений температур (b) и степени (коэффициента) гидратации (c) в выделенных точках (a): изделия (точки 2, 3, 4, 5), нагревателя (точка 1) и среды (точка 6) при изотермическом режиме тепловой обработки

Fig. 3. Comparison of temperature changes (b) and degree (coefficient) of hydration (c) at the selected points (a): products (points 2, 3, 4, 5), heater (point 1) and medium (point 6) in the isothermal heat treatment mode

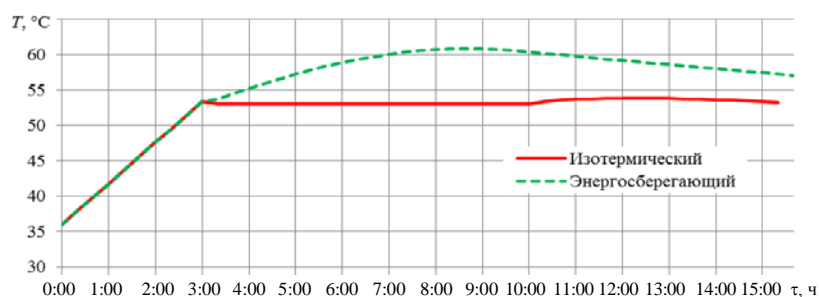


Рис. 4. Сравнительный анализ изменений температур в области нагревателя (точка 1) при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 4. Comparative analysis of temperature changes in the heater area (point 1) in isothermal and energy-saving heat treatment modes

Как видно из рис. 4, в ходе реализации энергосберегающего режима температура в области нагревателя достигает 60,8 °С на момент вре-

мени $\tau \sim 8,0$ ч, что на 7,8 °С превышает соответствующую температуру при изотермическом режиме (53,0 °С). Рис. 5, 6 отражают раз-

личие температур в нижнем слое бетона (точки 2, 3) при двух рассматриваемых режимах тепловой обработки.

Из рис. 5, 6 следует, что температура в нижнем слое бетона для энергосберегающего режима достигает значения около 62,4 °С на мо-

мент времени ~8 ч, что примерно на 6,1 °С превышает максимальную температуру нагрева для изотермического режима (56,3 °С).

Различия температур в верхнем слое бетона (точки 4 и 5) для рассматриваемых режимов тепловой обработки представлены на рис. 7.

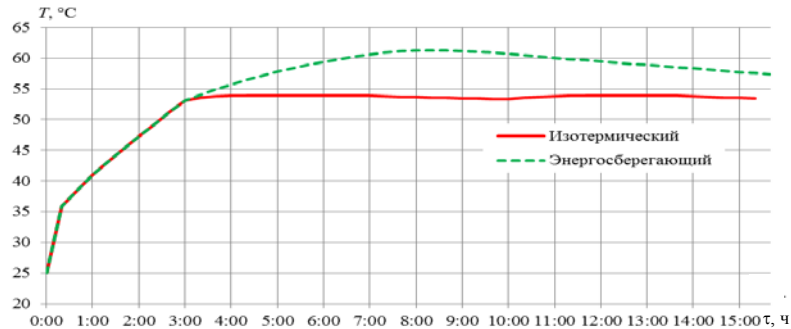


Рис. 5. Сравнительный анализ изменений температур в точке 2 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 5. Comparative analysis of temperature changes at point 2 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

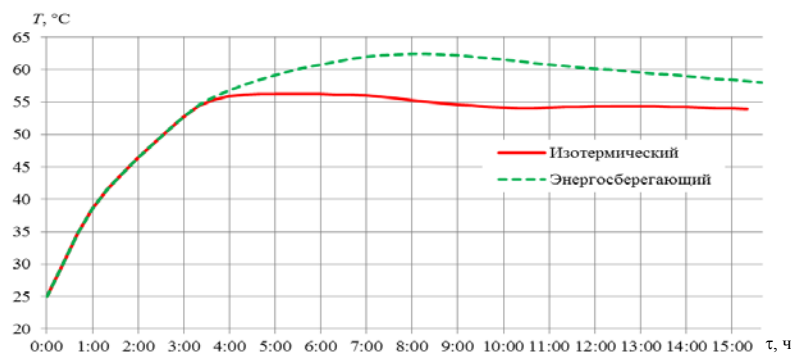


Рис. 6. Сравнительный анализ изменений температур в точке 3 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 6. Comparative analysis of temperature changes at point 3 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

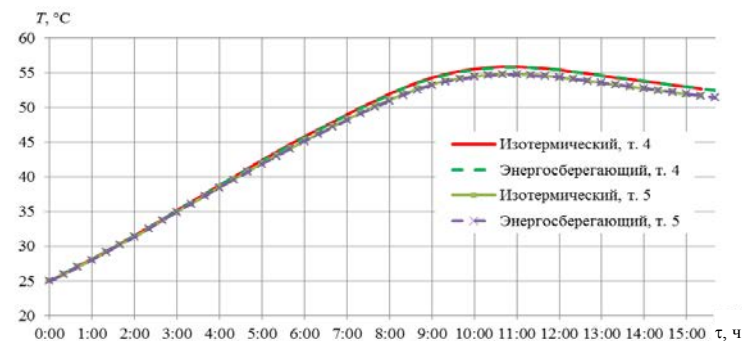


Рис. 7. Сравнительный анализ изменений температур в точках 4, 5 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 7. Comparative analysis of temperature changes at points 4, 5 of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

Из рис. 7 следует, что температуры в верхнем слое бетона (точки 4, 5) для обоих режимов практически совпадают. Температура в точке 4 достигает ~ 56 °С, т. е. на 3 °С выше температуры в пространственной области нагревателя, а в точке 5 составляет $\sim 54,7$ °С. Близкие значения температур в обоих режимах обусловлены потерями теплоты в окружающую среду через слой рулонного покрытия, которым укрыто изделие при проведении ТО.

На рис. 8, 9 видно, что степень гидратации цемента в нижнем слое бетона (точки 2, 3) для энергосберегающего режима на момент времени 15 ч оказывается более 55 %. Это лучше, чем при изотермическом режиме примерно на 2 %.

Степень гидратации цемента в верхнем слое бетона для обоих режимов практически совпа-

дает, достигая ~ 52 % к концу цикла тепловой обработки. Динамика изменения коэффициента гидратации по мере тепловой обработки показана на рис. 10 на примере точки 5 (верхняя поверхность изделия).

Таким образом, выполненный с использованием математической модели [6–13] и с учетом уравнений (1)–(5) численный анализ (рис. 3–10) позволяет сделать вывод, что рассмотренный энергосберегающий режим в сравнении с применяемым в производственных условиях режимом, близким к изотермическому, обеспечивает при осуществлении ТО наружной трехслойной стеновой панели более высокие температуры нагрева слоев бетона и степень гидратации цемента в них (в особенности в нижнем слое бетона).

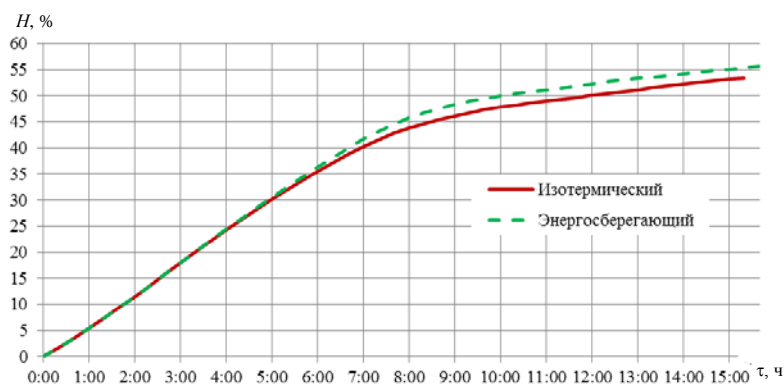


Рис. 8. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 2 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 8. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 2 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

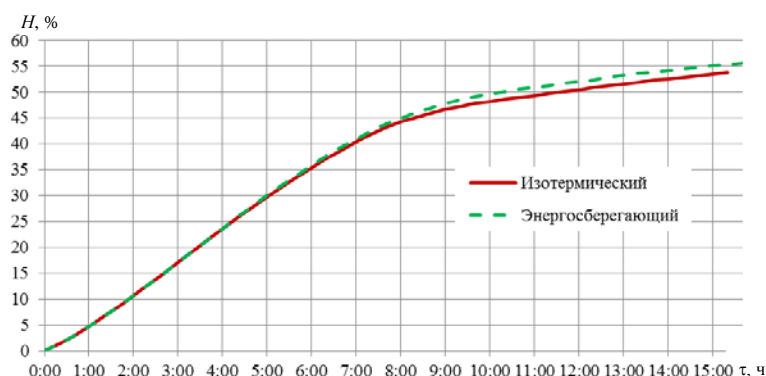


Рис. 9. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 3 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 9. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 3 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

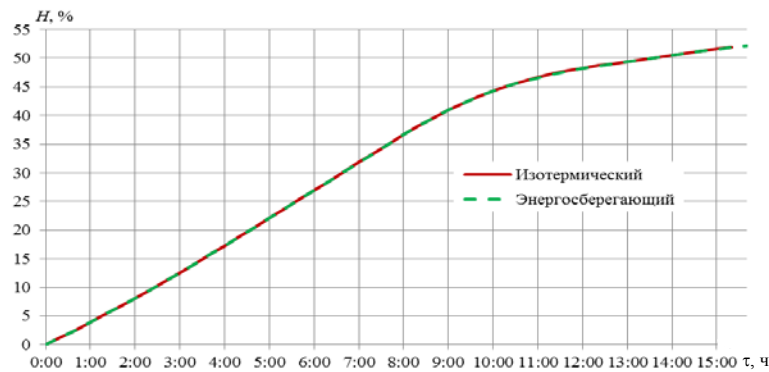


Рис. 10. Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации в точке 5 изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 10. Comparative analysis of changes in the hydration coefficient at point 5 of the product in the isothermal and energy-saving heat treatment modes

Анализ энергоэффективности рассматриваемых режимов тепловой обработки

Для оценки энергоэффективности исследованных выше режимов тепловой обработки бетонных изделий в устройствах ускоренной гидратации введем энергетическую характеристику, отражающую совокупные затраты ТЭ на осуществление различных элементов технологического процесса, связанные с нагревом опалубки, бетонного тела, всех прочих элементов конструкции изделия, включая пенополистирол и минеральную вату, а также энергозатраты, связанные с рассеянием теплоты в процессе тепловой обработки в окружающую среду. Эта характеристика представляет собой количество ТЭ, переданной из прост-

ранственной области нагревателя, и вычисляется по формуле

$$Q_{src}(t_N) = \sum_{\tau=0..t_N} \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y+\Delta y,z) \in \Omega_2}} \alpha_w \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x,y,z,\tau) - T(x,y+\Delta y,z,\tau)), \quad (6)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к греющей поверхности теплотехнологической установки.

На основе указанной выше математической модели с учетом граничных условий для различных режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия в соответствии с уравнением (6) были выполнены расчеты подведенной извне ТЭ нагревателя (Q_{src}) и его мощности ($P_{src} = \partial Q_{src} / \partial \tau$) в зависимости от времени тепловой обработки. На рис. 11, 12 показана эволюция этих величин.

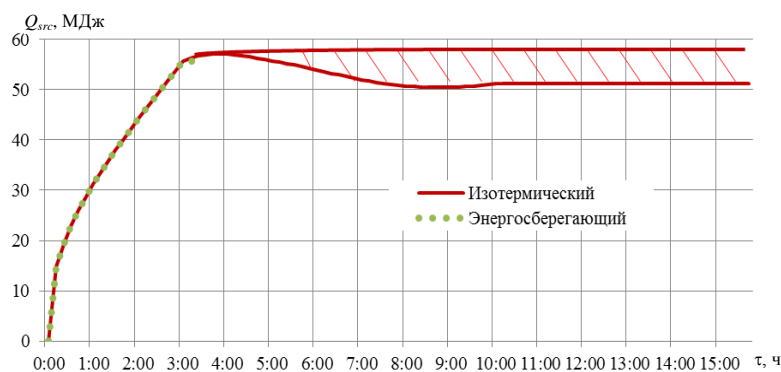


Рис. 11. Сравнение суммарных энергозатрат на тепловую обработку изделия при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки

Fig. 11. Comparison of total energy consumption for heat treatment of the product in isothermal and energy-saving heat treatment modes

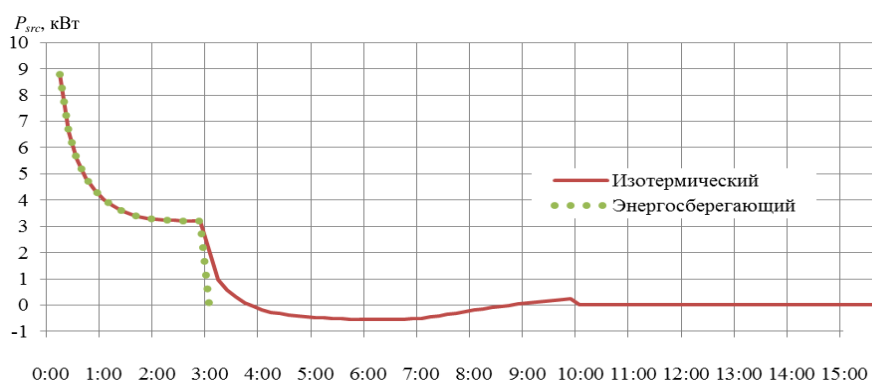


Рис. 12. Сравнение мощности нагревателя при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки изделия

Fig. 12. Comparison of heater power in isothermal and energy-saving modes of product heat treatment

Как видно из рис. 11, изотермический режим оказывается более энергозатратным (~57,1 МДж) по сравнению с энергосберегающим (~55,7 МДж). Кроме того, в процессе изотермической выдержки часть теплоты забирается теплоносителем из области протекания реакции гидратации и рассеивается. Кривая $Q_{src}(\tau)$ опускается от значения 57,1 МДж при $\tau = 4$ ч до 50,1 МДж при $\tau = 9$ ч. Разность между этими значениями (заштрихованная область на рис. 11) представляет собой потери тепловой энергии.

Из рис. 12 следует, что в течение периода времени набора температуры потребная тепловая мощность, подводимая из пространственной области нагревателей в зону ТО бетонного изделия, при обоих режимах тепловой обработки совпадает. Однако в период изотермической выдержки при изотермическом режиме в силу автоматического поддержания температуры мощность нагревателя по истечении 4 ч обработки становится отрицательной, т. е. имеет

место отвод теплоты из бетона в пространственную область нагревателей.

Основные результаты выполненных численных экспериментов представлены в табл. 1. Из анализа данных табл. 1 следует вывод, что энергосберегающий режим ТО с энергетической точки зрения является более предпочтительным по сравнению с применяемым в условиях рассматриваемого производства, обеспечивая экономии технологически необходимого минимума ТЭ в объеме 1,4 МДж в расчете на одно промышленное изделие. Дополнительно на 7,0 МДж снижается потребление ТЭ в результате уменьшения теплоотвода из пространственной области бетонного изделия в пространственную область нагревателя, имеющего место при изотермической выдержке. Таким образом, потребление ТЭ, непосредственно подводимой в пределах теплотехнологической установки к бетонному изделию в процессе ТО, уменьшается в целом на 8,4 МДж, или на 14,7%. При этом степень гидратации цемента в бетоне изделия увеличилась на 1,2%.

Таблица 1

Энергозатраты для изотермического и энергосберегающего тепловых режимов тепловой обработки рассматриваемого изделия

Energy consumption for isothermal and energy-saving thermal modes of heat treatment of product in question

Режим тепловой обработки	Максимальная температура в конце этапа нагрева T_{max} , °C	Время нагрева τ_{inc} , ч, + время изотермической выдержки τ_{iso} , ч	Скорость нагрева, °C/ч	Затраченная тепловая энергия Q_{src} (4 ч), МДж	Выделившаяся теплота гидратации Q_{hydr} (15 ч), МДж	Среднее значение достигнутой степени гидратации, %	Сокращение теплоотвода из зоны расположения изделия, МДж
Изотермический	53	3 + 7	9,3	57,1	115,4	52,8	–
Энергосберегающий	53	3 + 0	9,3	55,7	116,5	54,0	7,0
Энергосберегающий эффект, МДж				1,4			7,0

ВЫВОДЫ

1. На основе разработанной авторами [6–13] математической модели, с учетом 3D-геометрии изделия и пространственного распределения бетона, пенополистирола, минеральной ваты проведено численное исследование процесса тепловой обработки промышленно изготавливаемого в условиях ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» изделия «наружная трехслойная стеновая панель». Показана применимость математической модели для расчета режимов тепловой обработки реальных промышленных объектов сложной структуры и геометрии.

2. Предложена интегральная энергетическая характеристика $Q_{src}(\tau)$, выражающая суммарные затраты тепловой энергии на реализацию технологического процесса тепловой обработки бетонного изделия сложной геометрической формы и структуры в установке ускоренной гидратации, вычисляемая в соответствии с моделью и алгоритмом, описанными в [6–13], с учетом проведенных в настоящей работе исследований. Выполнен расчет указанной характеристики, а также мощности нагревателя для двух рассмотренных режимов тепловой обработки. Показано, что энергосберегающий режим тепловой обработки, по сравнению с используемым на предприятии, обеспечивает экономию тепловой энергии в объеме не менее 2,45 %. Произведенные расчеты коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ и температуры в точках изделия $T(x, y, z, \tau)$ свидетельствуют, что энергосберегающий режим тепловой обработки обеспечивает более полное протекание процесса гидратации по сравнению с изотермическим режимом.

3. Полученные метод и модели могут быть использованы при исследованиях, расчете, оптимизации схем, параметров и режимов работы промышленного теплотехнологического оборудования, предназначенного для проведения ускоренной гидратации цемента в композитных бетонных изделиях сложной геометрической формы с целью повышения его энергетической эффективности и обеспечения рациональной эксплуатации, а также при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при промышленном производстве бетонных изделий в теплотехнологических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
2. Соколовский, Л. В. Снижение расхода тепла при производстве бетона и железобетона [Электронный ресурс] / Л. В. Соколовский // Строительство и недвижимость. 2001. № 18. Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11806.html>. Дата доступа: 08.03.2019.
3. Временные нормы для расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях: СН 513–79. М.: Стройиздат, 1980. 30 с.
4. Аксенчик, К. В. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер для тепловлажностной обработки железобетонных изделий / К. В. Аксенчик. Иваново, 2014. 20 с.
5. Аксенчик, К. В. Оценка энергетической эффективности тепловых установок для тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / К. В. Аксенчик // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. по матер. Междунар. заочной науч.-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВЛГТА», 2014. № 3. Ч. 1. С. 204–211.
6. Нияковский, А. М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 16. С. 72–79.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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>.
10. Нияковский, А. М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А. М. Нияковский, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. Информационные технологии. 2019. № 4. С. 50–61.
11. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А. М. Нияковский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. Т. 723, № 3. С. 86–100.

12. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.
13. 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/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324>.

Поступила 22.07.2019

Подписана в печать 08.02.2021

Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

- Mar'yamov N. B. (1970) *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Installations)*. Moscow, Stroizdat Publ. 272 (in Russian).
- Sokolovskii L. V. (2001) Reduction of Heat Consumption in the Production of Concrete and Reinforced Concrete. *Stroitel'stvo i Nedvizhimost* [Construction and Real Estate], (18). Available at: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/18/sn11806.html> (Accessed 8 March 2019) (in Russian).
- SN [Construction Norms] 513–79. *Provisional Norms for Calculation of Heat Energy Consumption During Heat and Moisture Treatment of Precast Concrete and Reinforced Concrete Products in the Factory*. Moscow, Stroizdat Publ. 1980. 30 (in Russian).
- Aksenchik K. V. (2014) *Improvement in Thermal Operation of Steam-Curing Chambers for Hygro-Thermal Treatment of Reinforced Concrete Products*. Ivanovo. 20 (in Russian).
- Aksenchik K. V. (2014) Assessment of Energy Efficiency of Thermal Installations for Heat and Humidity Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Aktualnye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka. Teoriya i Praktika. Sb. Nauch. Tr. po Mater. Mezhdunar. Zaochnoi Nauch.-Prakt. Konf.* [Topical Directions of Scientific, Research of the XXI Century. Theory and Practice. Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Correspondence Scientific-and-Practical Conference]. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, (3), Part 1, 204–211 (in Russian).
- Niyakovskii A. M. (2018) Development of a Mathematical Model of Concrete Hardening Process Based on Three-Dimensional Equation of Thermal Conductivity. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki* [Herald of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences], (16), 72–79 (in Russian).
- 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).
- Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich 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).
- 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).
- Niyakovskii A. M., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Algorithm and Numerical Scheme for Simulation of Unsteady Processes of Heat-Treatment of Concrete Products. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. C. Fundamental'nye Nauki. Informatsionnye Tekhnologii* [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences. Information Technologies], (4), 50–61 (in Russian).
- Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) Numerical Simulation of the Evolution of Energy Characteristics of Heat Treatment of a Composite Concrete Product. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (3), 86–100 (in Russian).
- Niyakovskii A. M., Romaniuk U. 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 = 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).
- Niyakovskii A. M., Romaniuk U. 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/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324> (in Russian).

Received: 22.07.2019

Accepted: 08.02.2021

Published online: 31.05.2021