

УДК 658.26:536.7:666.97.035

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ  
ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
СЛОЖНОЙ 3D-ГЕОМЕТРИИ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ****А.М. НИЯКОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет);**д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНЮК**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Предложены критерии и характеристики для оценки энергоэффективности режимов тепловой обработки бетонных изделий, а также уравнения для расчёта минимально необходимого количества подводимой к изделию теплоты, обеспечивающего достижение заданной прочности в назначенное время. С использованием разработанного математического аппарата на примере выпускаемого промышленностью композитного бетонного изделия сложной геометрии выполнено сравнение различных режимов тепловой обработки в промышленной теплотехнологической установке. Установлены зависимости от времени тепловой обработки между минимально необходимой величиной теплопотребления, распределением температуры и степенью гидратации в объёме изделия для этих режимов. Показано, что разработанный численный метод позволяет решать задачи выбора режимов тепловой обработки бетонных изделий по критерию экономии тепловой энергии, сохраняя при этом качество продукции.*

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

**Введение.** Производимые в последние годы бетонные изделия промышленного изготовления отличаются сложной геометрической формой, композитной структурой и применением разнообразных материалов, имеющих различные свойства. В связи с этим отыскание оптимальных с энергетической точки зрения режимов работы теплотехнологических установок (ТТУ) для тепловой обработки (ТО) бетонных изделий традиционными методами с использованием тестовых образцов-кубиков становится неинформативным. Решение этой задачи путём проведения промышленных испытаний натуральных моделей требует много времени и влечёт значительные материальные затраты. При этом в ходе таких испытаний не удастся установить характер распределения температуры и степени гидратации в пределах внутреннего пространства изделия в течение времени его ТО.

Вопросам проектирования энергосберегающих режимов ТО бетонных изделий в ТТУ посвящено много исследований [1–4], но все они выполнены в основном в рамках строительного материаловедения и науки о бетоне. С позиций промышленной теплоэнергетики данная проблема рассмотрена, в частности, в работах [5; 6] а также в [7; 8]. Однако предложенные указанными авторами методы не могут быть использованы в отношении изделий со сложной 3D-геометрией и неоднородной многокомпонентной структурой, так как они оперируют моделями с сосредоточенными, а не распределёнными параметрами, не учитывают структуру изделий и многообразие возможных в этом случае граничных условий теплообмена. Они также не дают ответа на вопрос о величинах минимально необходимой технологической потребности в тепловой энергии, мощности её подвода к внешним границам изделия в различные периоды ТО, обеспечивающих заданный уровень прочности.

В ранее опубликованных нами работах [9–11] сформулированы и описаны теплофизическая модель с пространственно распределёнными параметрами и алгоритм расчёта, позволяющие осуществлять численные исследования процессов ТО в ТТУ, отличающиеся от известных учётом неравновесности процессов нагрева и гидратации изделия, учетом пространственно распределённого источника тепловыделений и пространственного распределения 3D-компонентов изделия, составляющих его композитную структуру, а также системой начальных и граничных условий, отражающих особенности теплопереноса в оборудовании ускоренной гидратации с программируемым нагревателем.

Цель представляемой работы состоит в проведении сравнительного численного моделирования различных режимов работы теплотехнологического оборудования для проведения ТО бетонных изделий, разработке критериев и математического аппарата, позволяющих производить оценку и выбор энергоэффективных режимов работы ТТУ для ТО композитных бетонных изделий сложной пространственной геометрии при обеспечении заданной прочности бетона в любой точке бетонного тела в течение назначенного времени обработки.

**Объект, предмет, методология и задачи исследования.** В качестве объекта для проведения исследования выбрана наружная трёхслойная стеновая панель серии 90, производимая на Заводе КПД ОАО «Трест № 16, г. Новополоцк» с использованием в качестве теплотехнологической установки обогреваемого стенда горизонтального формования финской компании «Elematic Oy Ab» (рисунк 1, а).

*Предмет исследования* – распределение температур и степени гидратации цемента внутри пространственного объёма обрабатываемого изделия и тепловые потоки на его внешних границах. Исследование основывается на методах численного анализа с использованием нестационарного уравнения теплопроводности и граничных условий в постановке, описанной в ранее опубликованных работах [12–16], учитывающей неоднородность структуры изделия и особенности организации его ТО.

Стенд для горизонтального формования применительно к рассматриваемой проблеме служит теплотехнологической установкой и представляет собой обогреваемую за счёт внешнего подвода теплоты стальную столешницу. В качестве теплоносителя используется горячая вода. После формовки изделие оставляется на столе для проведения ТО вплоть до момента приобретения распалубочной прочности. Поверх него настилается рулонное теплоизолярующее покрытие. Обобщённая условная схема тепловых потоков, иллюстрирующая статьи теплового баланса при ТО бетонных изделий на плоском горизонтальном стенде, представлена на рисунке 1, б.

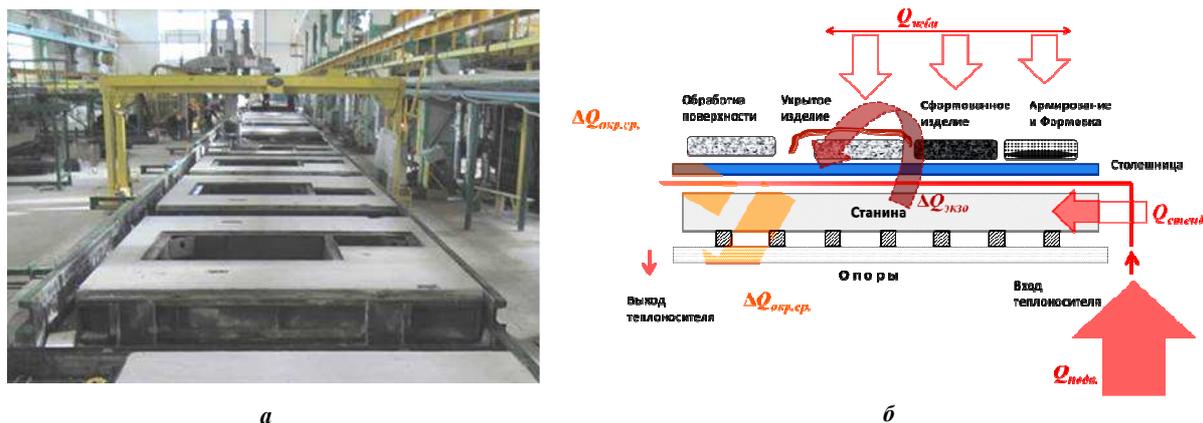


Рисунок 1. – Стенд для горизонтального формования и тепловой обработки плоскостных бетонных изделий «Elematic Oy Ab» (а) и слагаемые теплового баланса (б) на различных стадиях обработки изделия (показаны условно)

*Содержание и результаты исследования.* Согласно схеме, изображённой на рисунке 1, к стенду вместе с теплоносителем поступает теплота  $Q_{\text{подв}}$ , которая с учётом теплоты экзотермически протекающей реакции гидратации бетона  $\Delta Q_{\text{экзо}}$  расходуется на разогрев железобетонного изделия ( $Q_{\text{жбн}}$ ), стенда и опалубки ( $Q_{\text{стенд}}$ ), а также на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду ( $\Delta Q_{\text{окр.ср.}}$ ).

Не вся теплота, подводимая к ТТУ в процессе ТО, полезно усваивается бетонным изделием. Теоретически можно организовать процесс, в котором на ТО конкретного вида бетонного изделия при заданных условиях теплообмена расходуется подводимое извне количество теплоты, равное некоторому технологическому минимуму, обеспечивающему при выбранной продолжительности ТО назначенную прочность бетона. Такому технологическому минимуму соответствует некоторая величина  $Q_{\text{src}}$ , характеризующая интегральные энергозатраты источника теплоты в ТТУ на ТО бетонного изделия за всё время её осуществления. Эта энергетическая характеристика отражает совокупные затраты тепловой энергии на осуществление различных элементов технологического процесса, связанных с нагревом опалубки, бетонного тела, компонентов конструкции изделия, а также энергозатраты, обусловленные рассеянием теплоты в процессе ТО в окружающую среду. Для конкретного бетонного изделия, подвергаемого ТО в ТТУ определённого типа,  $Q_{\text{src}}$  является технологической константой.

С учётом ранее описанной модели и полученного математического аппарата для численного исследования процессов нагрева и гидратации бетонных изделий в теплотехнологических установках [10; 11; 15] она может быть выражена следующим образом:

$$Q_{\text{src}}(t_N) = \sum_{\tau=0, \Delta\tau}^{t_N} \sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_4 \\ (x, y+\Delta y, z) \in \Omega_2}} \alpha_w \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x, y, z, \tau) - T(x, y+\Delta y, z, \tau)), \quad (1)$$

где  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к греющей поверхности устройства ускоренной гидратации, Вт/(°C · м<sup>2</sup>);  $\tau$  – время, принимающее дискретные значения от 0 до  $t_N$  ( $N$  – номер рассматриваемого такта моделирования, соответствующий моменту времени  $t_N = N \cdot \Delta\tau$ ), с;  $\Delta\tau$  – шаг дискретизации по времени, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально), м;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – шаги дискретизации по пространству, м;  $T(x, y, z, \tau)$  – температура внутри изделия в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ , °C;  $\Omega_2$  – пространственная область точек опалубки;  $\Omega_4$  – пространственная область точек нагревателя.

Отношение  $Q_{src}$  к фактической величине потребления теплоты на цели ТО изделия  $Q_{подв}$  можно рассматривать в качестве *характеристики энергоэффективности организации процесса ТО*:

$$K_{т.с.} = \frac{Q_{src}}{Q_{подв}} \leq 1, \quad (2)$$

где  $Q_{src}$  – величина технологически необходимого минимума теплового потребления, Дж;  $Q_{подв}$  – величина фактического потребления теплоты на работу ТТУ в расчёте на одно бетонное изделие, Дж, причём всегда  $Q_{src} < Q_{подв}$ .

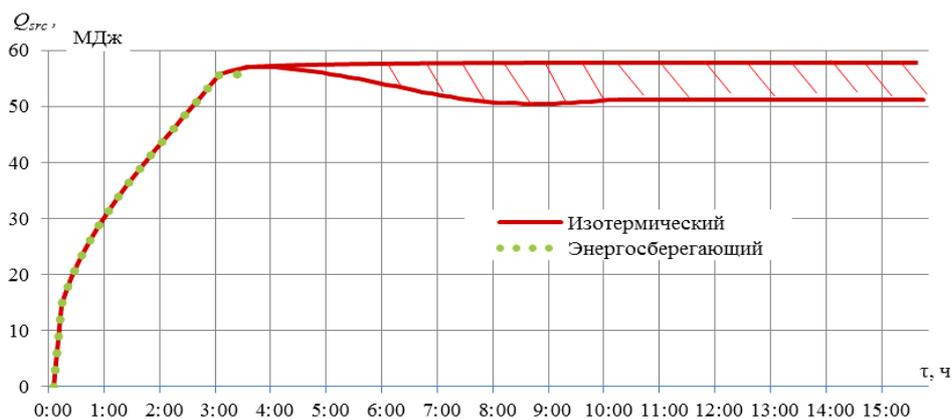
Значения, которые принимает данный коэффициент  $K_{т.с.}$ , лежат в пределах  $0 \dots 1$ , к тому же чем ближе этот показатель к величине  $K_{т.с.} = 1$ , тем выше качество организации процесса ТО в рассматриваемых условиях для данного типа изделия в данной ТТУ с энергетической точки зрения.

Таким образом, задаваясь различными температурно-временными режимами работы ТТУ и вычисляя для каждого из них величину  $Q_{src}$ , можно ранжировать режимы ТО по критерию энергетической эффективности.

С этой целью было выполнено сравнительное моделирование двух режимов ТО рассматриваемого изделия: с изотермической выдержкой (при контролируемом подводе теплоты и постоянной температуре нагревателя) и энергосберегающего, когда ТО изделия осуществляется главным образом за счёт теплоты гидратации, а подвод теплоты извне имеет место только в начальном периоде нагрева на этапе подъёма температуры. Режим с изотермической выдержкой характеризовался следующими параметрами:  $T_{max} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$  (температура в пространственной области нагревателей в период выдержки),  $\tau = \tau_{inc} = 3$  часа (момент времени завершения этапа подъёма температуры, считая от начала ТО),  $\tau = \tau_{iso} = 10$  часов (момент времени завершения изотермической выдержки, считая от начала ТО).

В качестве альтернативного был использован тепловой режим с температурой, до которой осуществляется нагрев изделия, равной  $T_{max} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ , и продолжительностью периода подъёма температуры  $\tau_{inc}$ , составляющей 3 часа. Продолжительность изотермической выдержки при этом принята равной  $\tau_{iso} = \tau_{inc}$ . В интервале времени предварительного нагрева  $0 \leq \tau \leq 3$  часов оба рассматриваемых режима идентичны. В момент времени  $\tau = \tau_{inc}$  нагреватели отключены, тепловая обработка осуществляется за счёт теплоты реакции гидратации.

На основании уравнения (1) с использованием теплофизической модели и математического аппарата, сформулированных в [13–15], выполнены расчёты подведённой извне тепловой энергии от нагревателя ( $Q_{src}$ ) в зависимости от времени ТО. На рисунке 2 показано изменение этой величины по мере течения времени тепловой обработки.



**Рисунок 2.** – Сравнение необходимого технологического минимума теплопотребления при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки изделия

Как видно из рисунка 2, изотермический режим оказывается более энергозатратным (57,1 МДж) по сравнению с рассмотренным энергосберегающим (~55,7 МДж). Следует отметить, что в процессе изотермической выдержки, когда температура бетона начинает превышать температуру в области нагревателей и греющей среды, некоторая часть теплоты (~7 МДж) забирается теплоносителем из области протекания реакции гидратации и рассеивается (кривая  $Q_{src}(\tau)$  на рисунке опускается от 57,1 при  $\tau = 4$  часа до 50,1 МДж при  $\tau = 9$  часов).

Величина технологического минимума теплопотребления  $Q_{src}$  является индивидуальной характеристикой каждого вида и типа бетонного изделия и варианта организации его тепловой обработки. Из её определения следует, что в пределах заданной продолжительности обработки в каждой точке простран-

ва изделия прочность должна достигнуть назначенного значения. Поэтому уравнение (1) необходимо рассматривать совместно с системой уравнений и граничных условий, определяющих распределение температуры и степени гидратации внутри изделия. Для численного расчёта этих распределений также использована методика, разработанная и опубликованная в [13–15].

На рисунках 3–5 показаны графики изменения во времени коэффициента гидратации в изделии в пределах нижнего и верхнего слоев бетона.

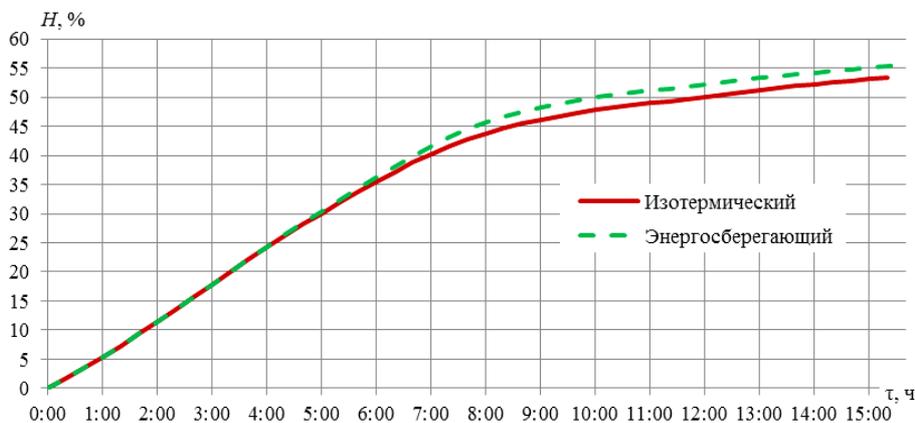


Рисунок 3. – Сравнительный анализ изменения коэффициента гидратации на нижней грани нижнего слоя бетона при тепловой обработке

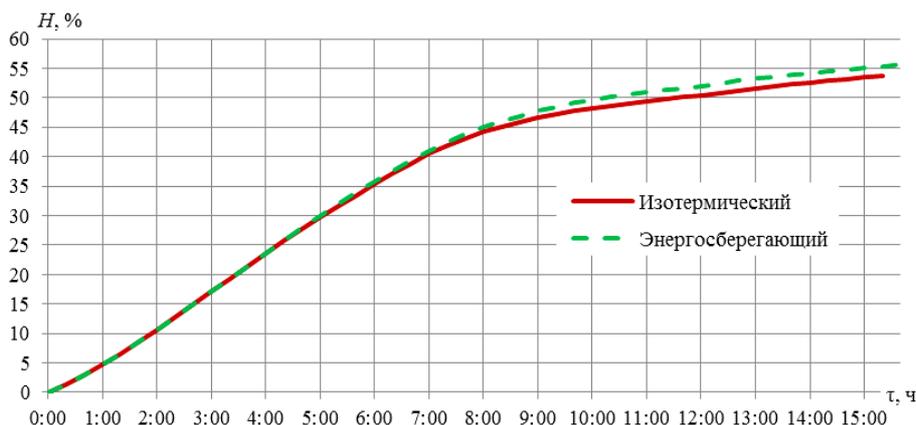


Рисунок 4. – Сравнительный анализ изменения коэффициента гидратации на верхней грани нижнего слоя бетона при тепловой обработке

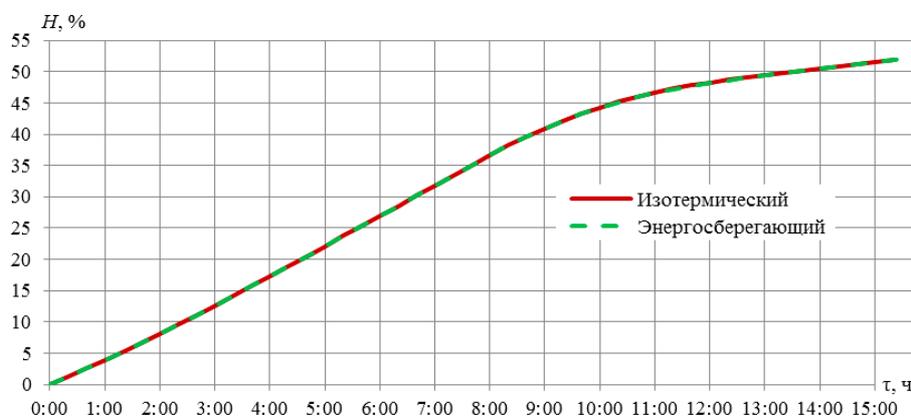


Рисунок 5. – Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации на верхней грани верхнего слоя бетона при тепловой обработке

Из приведённых графиков следует, что степень гидратации бетона в нижнем слое для энергосберегающего режима на момент времени  $\tau = 15$  часов оказывается более 55%. Это на ~2% лучше, чем при

изотермическом режиме. Степень гидратации бетона в верхнем слое для обоих режимов практически совпадает, достигая ~52 % к концу цикла ТО. Таким образом, установлено, что найденная величина технологического минимума теплотребления обеспечивает заданное значение прочности изделия, которое должно быть достигнуто в процессе ТО.

Из анализа данных рисунка 2 следует вывод, что рассмотренный энергосберегающий режим ТО с энергетической точки зрения является более экономным по сравнению с применяемым в условиях реального производства режимом, обеспечивая снижение потребления тепловой энергии на 1,4 МДж в расчёте на одно исследуемое здесь промышленное изделие. Достигается это за счёт более полного усвоения теплоты гидратации.

По проектным данным фирмы «Elematic Oy Ab» (Финляндия) – изготовителя теплотехнологического оборудования, на котором выполнялись промышленные исследования, расчётные затраты тепловой энергии на изготовление одной трёхслойной стеновой панели серии 90 составляют  $Q_{\text{подв.}} = 186$  МДж и включают помимо технологически необходимой для проведения ТО теплоты расходы теплоты на нагрев оборудования после простоя, поддержание его в горячем резерве в период технологических ожиданий (формовка, заглаживание), предварительную выдержку. Большая часть составляющих этих затрат связана с организацией и подготовкой процессов формовки и ТО.

С учётом полученных выше результатов для рассматриваемых типа ТТУ и вида бетонного изделия численное значение характеристики энергоэффективности организации процесса ТО, вычисляемое в соответствии с уравнением (2), составит

$$K_{\text{т.с.}} = \frac{Q_{\text{src}}}{Q_{\text{подв.}}} = \frac{55,7 \text{ МДж}}{186 \text{ МДж}} = 0,2995. \quad (3)$$

Таким образом, на технологические цели, непосредственно связанные с ТО данного вида бетонного изделия в данном ТТУ, полезно расходуется только около 30% ТЭ. Остальные 70% приходятся на затраты, прямо не относящиеся к обеспечению ускоренной гидратации бетона, и должны быть минимизированы организационными мерами, такими как сокращение времени простоя оборудования, этапов формовки и заглаживания изделий, полной загрузкой ТТУ.

#### Выводы

1. Сформулировано понятие технологического минимума потребления тепловой энергии, обеспечивающего при заданной продолжительности ТО назначенную прочность бетона; предложен математический аппарат для вычисления этой энергетической характеристики.

2. Предложен численный критерий для оценки энергоэффективности организации процесса ТО бетонных изделий.

3. Выполнено сравнение двух режимов работы ТТУ в процессе проведения ТО, в результате которого показано, что использование разработанного метода позволяет осуществлять ранжирование режимов работы ТТУ для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий по критерию затрат тепловой энергии.

4. Описанный метод позволяет осуществлять проектирование режимов ТО бетонных изделий, имеющих сложную структуру и геометрию, на стадии их проектирования и постановки в производство при минимальных затратах времени и материальных ресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкин, Л.И. Критерий рационального использования тепловой энергии в производстве бетона и железобетонных изделий / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин // Технология бетонов. – 2014. – № 2. – С. 32–35.
2. Батяновский, Э.И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э.И. Батяновский, Е.И. Иванова, Р.Ф. Осос // Строительная наука и техника : науч.-техн. журн. – Минск, 2006. – № 3(6). – С. 7–17.
3. Бирик, М.С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 55–59.
4. Бирик, М.С. Расчет энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий // Керамика: наука и жизнь. – 2009. – № 3. – С. 17–26.
5. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново : ПресСто, 2010. – 363 с.
6. Аксенчик, К.В. Исследование тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловой обработке / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 63–67.

7. Modelling of heat of hydration for thick concrete constructions – a note / Bennet Kuriakose [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 42, No. 4, October – November. – P. 348–357.
8. Ge, Zh. Predicting temperature and strength development of the field concrete : Retrospective Theses and Dissertations [Electronic resource] / Zhi Ge // Iowa State University. – 2005. – Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. – Date of access: 14.12.2018.
9. Нияковский, А.М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трёхмерного уравнения теплопроводности / А.М. Нияковский // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
10. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования для производства бетонных изделий 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.
11. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 137–145.
12. 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.
13. 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 гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. Информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 50–61.
14. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А.М. Нияковский [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 2019. – № 3 (723). – С. 86–100.
15. Метод расчёта 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.
16. 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.

Поступила 10.09.2019

**ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT TREATMENT  
MODES OF COMPOSITE CONCRETE PRODUCTS OF COMPLEX 3D-GEOMETRY  
IN THERMAL TECHNICAL INSTALLATIONS**

**A. NIYAKOVSKI, V. ROMANIUK**

*The criteria and characteristics for assessing the energy efficiency of the modes of heat treatment of concrete products, as well as equations for calculating the minimum required amount of heat supplied to the product, ensuring the achievement of a given strength at the appointed time, are proposed. With the use of the developed mathematical apparatus on the example of a composite concrete product of complex geometry, which is produced by industry, a comparison of different modes of heat treatment in an industrial heat-technological installation is performed. As a result of the calculations performed for these modes, the relationship between the minimum required value of heat consumption, the temperature distribution and the degree of hydration in the volume of the product depending on the time of heat treatment is established. It is shown that the developed numerical method allows to solve the problem of choosing the modes of heat treatment of concrete products according to the criterion of saving thermal energy while maintaining the quality of products.*

**Keywords:** *mathematical modelling, thermal technical installations, the kinetics of cement hydration, temperature field, transient heat conductivity equation, composite materials, energy-saving modes, energy efficiency.*