

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 658.26:666.97.035.5:004.94

**НИЯКОВСКИЙ**  
**Александр Мечиславович**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ  
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Минск, 2020

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **РОМАНЮК Владимир Никанорович**,  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **ЖУРАВСКИЙ Геннадий Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»;

**НОВОСЕЛЬЦЕВ Владимир Геннадьевич**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» Брестского государственного технического университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится 22 октября 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, телефон ученого секретаря (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 21 сентября 2020 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



А. А. Бобич

© Нияковский А. М., 2020  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Важное место в строительном комплексе Республики Беларусь занимает производство бетонных изделий и конструкций, удельный вес которых в общем объёме продукции промышленности строительных материалов страны составляет около 15 %. Не менее 40 % вновь построенного в Беларуси жилья возводится с использованием сборного бетона и железобетона, и в последующие годы эта тенденция сохранится.

При производстве бетонных изделий в климатических условиях Республики Беларусь требуется тепловая обработка (ТО), которая реализуется в теплотехнологических установках (ТТУ) для ускоренной гидратации. ТО является самой энергоёмкой стадией технологического процесса производства бетонных изделий. Удельный расход ТЭ на нужды ТО в расчёте на единицу объёма изделий составляет от 186 до 2088 МДж/м<sup>3</sup>, на её осуществление затрачивается до 70 % от общей продолжительности производственного цикла. В силу указанных причин проблема оптимизации схем, параметров и режимов работы теплотехнологического оборудования для осуществления ТО с целью повышения энергоэффективности и экономичности производства является актуальной.

Анализ зарубежных и белорусских литературных источников показал, что отсутствует методологическая база для проведения эксергетического анализа процессов ТО бетонных изделий. Это не позволяет решать вопросы повышения их энергоэффективности с учётом всех имеющих место системных связей. При выполнении расчётов процессов ТО бетонных изделий в промышленных ТТУ преобладают тенденции, связанные с применением упрощённых методов, основывающихся на объектах, имеющих однородную структуру и несложную форму. Однако современное строительное производство все больше оперирует объектами, обладающими сложной пространственной геометрией и неоднородной структурой, разработка и проектирование которых требует использования методов численного моделирования. Несмотря на большой практический интерес к этой проблеме, многие вопросы, касающиеся потребления и преобразования тепловой энергии (ТЭ) в теплотехнологическом оборудовании для ТО бетонных изделий, ещё недостаточно изучены. В связи с чем приобретает особую актуальность разработка соответствующего научно-методического обеспечения для исследования процессов ТО, расчётов энергоэффективных режимов и параметров работы теплотехнологического оборудования для её проведения.

Решению этих актуальных задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение, посвящена настоящая работа.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета (БНТУ). Тема диссертации утверждена приказом от 09.12.2013 № 4970-лс «Об утверждении тем диссертации, научных руководителей, консультантов и индивидуальных планов работы» и соответствует задачам, определённым Директивой Президента Республики Беларусь от 14.06.2007 № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства», а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь, утверждённым Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы», по разделу 1 «Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика: энергобезопасность и энергосбережение; энергоэффективные технологии и техника».

### **Цель и задачи исследования**

**Цель исследования:** разработать научно-методическое обеспечение исследований и расчётов энергоэффективных режимов теплотехнологического оборудования для ТО бетонных изделий в условиях промышленного производства.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить анализ структуры и объёмов потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при промышленной ТО бетонных изделий, проанализировать с позиций энергоэффективности используемые ТТУ для её осуществления, режимы их работы, а также существующие подходы к обеспечению энергоэффективности процессов ТО.

2. С использованием эксергетического метода (ЭМ) термодинамического анализа (ТДА) разработать методику расчёта эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, предложить эксергетические критерии энергоэффективности организации процесса тепловой обработки бетонных изделий и получить количественные результаты их оценки.

3. Разработать математическую модель ТО бетонных изделий в ТТУ, учитывающую нестационарность нагрева и гидратации бетона, размеры, форму и структуру изделий, особенности теплотехнологического оборудования, позволяющую осуществлять численные исследования процессов ТО.

4. Исследовать на основе разработанной математической модели процессы использования ТЭ в ТТУ при ускоренной ТО модельных бетонных изделий различного размера, формы и структуры.

5. Выполнить численные исследования процессов ТО многослойных промышленно изготавливаемых бетонных изделий сложной конфигурации, на основе чего показать возможности разработанного научно-методического обеспечения применительно к условиям действующего производства при выборе тепловых режимов работы ТТУ для ускоренной гидратации, позволяющих снизить энергозатраты на их изготовление.

**Объект исследования:** теплотехнологические установки и тепловые режимы использования ТЭ для осуществления ускоренной ТО изделий из бетона.

**Предмет исследования:** методы исследований и расчётов параметров и режимов работы, энергетическая эффективность ТТУ для осуществления ускоренной ТО бетонных изделий.

#### **Научная новизна**

Разработана методика расчёта эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, учитывающая состав исходных компонентов и продуктов гидратации, активность цемента, достигнутую степень гидратации, позволяющая получать количественные значения эксергии бетонной смеси и бетонного изделия, на базе которых устанавливать термодинамическую эффективность его тепловой обработки в теплотехнологических установках.

Разработана методика расчёта термодинамической эффективности организации процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках, позволяющих осуществлять оптимизацию режимов работы промышленного оборудования для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий по критерию термодинамической энергоэффективности.

Разработана математическая модель нестационарного процесса тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке, позволяющая определять величину технологически необходимого теплового потребления, обеспечивающего достижения заданной прочности изделия в течение заданного периода обработки, отличающаяся от известных учётом: неоднородной структуры изделия; конструктивных особенностей теплотехнологического оборудования; локального значения степени гидратации; зависимости коэффициента теплопроводности бетона от температуры.

Получены новые результаты по оценке термодинамической эффективности тепловой обработки бетонных изделий в условиях действующего производства, на основе которых впервые для рассматриваемой теплотехнологии определен эксергетический КПД, величина которого для исследуемой технологии тепловой обработки бетона составила 44,8–45,9 %.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика расчёта эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, *отличающаяся* учётом гранулометрического состава инертных компонентов, состава и активности цемента, степени гидратации бетона в изделии, *позволяющая* выполнять расчёт величин эксергии исходной бетонной смеси и бетонного изделия в ходе его твердения в теплотехнологических установках.

2. Методика расчёта термодинамической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в теплотехнологических установках и система критериев, *учитывающих* степень гидратации и состав цемента, а также составы бетонной смеси и продуктов гидратации, *позволяющие* осуществлять оптимизацию режимов работы теплотехнологического оборудования для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий по критерию энергоэффективности.

3. Математическая модель ускоренной ТО бетонного изделия, имеющего сложную структуру и геометрическую форму, *позволяющая* рассчитать в зависимости от времени ТО величину технологически обусловленного потребления ГЭ, распределение температуры и коэффициента гидратации в пределах бетонного изделия и конструктивных элементов ТТУ, *отличающаяся* от известных тем, что мощность тепловыделений цемента определяется в каждой точке пространства бетона в зависимости от достигнутой в ней степени гидратации, при этом учитывается переменный характер коэффициента теплопроводности бетона.

4. Результаты численных исследований процесса ТО бетонных изделий разных размеров, формы и структуры, *показывающие* изменение составляющих теплового баланса в пределах ТТУ, а также закономерности распределения в бетонном изделии значений температуры и степени гидратации, *позволяющие* осуществлять выбор энергоэффективных режимов работы теплотехнологического оборудования из дискретного множества возможных вариантов.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Общее направление работы определено соискателем совместно с научным руководителем доктором технических наук, профессором В. Н. Романюком, который принимал участие в написании отдельных статей.

Соискателем лично определены цели и поставлены задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и разработаны: литературный анализ состояния вопроса; методика расчёта эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, методика расчёта термодинамической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в теп-

лотехнологических установках и система критериев, позволяющая осуществлять оптимизацию режимов работы теплотехнологического оборудования для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий по критерию энергоэффективности; математическая модель ускоренной ТО бетонного изделия и описывающий её математический аппарат; проведение промышленного эксперимента и верификации разработанной математической модели; результаты расчёта характеристик и параметров процессов ускоренной ТО в ТТУ для однородных и неоднородных бетонных изделий различных размеров, формы и структуры.

Программная реализация разработанной в диссертации математической модели и компьютерные вычисления осуществлялись соискателем совместно с кандидатом технических наук Ю. В. Яцкевичем и доктором физико-математических наук, профессором А. Н. Чичко, которые также принимали участие в оценке полученных результатов численных исследований и в написании отдельных статей в 2019 году.

В написании отдельных статей, тезисов докладов, разработке патентов в 2012–2018 годах приняли участие следующие соавторы: кандидат технических наук, доцент Э. И. Гончаров, магистрант О. Д. Шавлюго, магистр технических наук, старший преподаватель Е. С. Добросольцева, директор ОАО «Новополоцкжелезобетон» В. В. Рабец, а также участвовавшие в студенческой научно-исследовательской работе студенты А. В. Кулиникин и В. А. Пшеничник.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались на конференциях: 45-й Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов (Витебск, 2012); 47-й Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов (Витебск, 2014 г.); 48-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (Витебск, 2015 г.); 16-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2018), 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (Витебск, 2019 г.), II Международной научной конференции «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (Новополоцк, 2019 г.).

Результаты диссертационной работы используются филиалом Завод Крупнопанельного домостроения (КПД) «ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» при разработке и обосновании режимов ТО изделий, а также в учебном процессе на кафедре «Строительное производство» Полоцкого государственного университета.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные положения диссертации опубликованы в 20 работах, в том числе 12 статьях в рецензируемых изданиях, включённых в перечень ВАК Республики Беларусь, 1 статье в тематических журналах и сборниках и в 5 материалах докладов на конференциях, семинарах, тезисах докладов. Общий объем опубликованных материалов – 9,3 авторских листов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя и приложений. Полный объем диссертации 247 страниц. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, 94 рисунка на 51 странице и 22 таблицы на 13 страницах. Список использованных источников в количестве 188 наименований на 15 страницах, из них 32 на иностранных языках, 20 авторских работ на 3 страницах и 8 приложений на 40 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации.

**В первой главе** приведены сведения о применяемых способах ТО бетонных изделий, оборудовании для её осуществления, выполнен анализ материальных и энергетических потоков, свойственных данной теплотехнологии. Установлено, что при производстве бетонных изделий на цели, непосредственно связанные с технологически обусловленными потребностями ускоренной гидратации, полезно расходуется не более 26–35 % всей подведённой к ТТУ ТЭ [1, 2, 14].

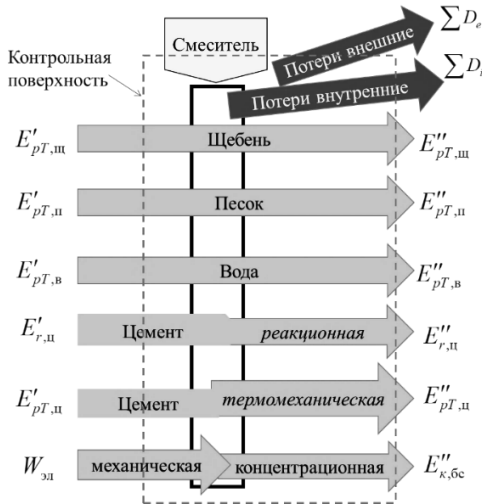
Выполненный анализ литературных источников, существующих методов и моделей исследования процессов ТО показал, что отсутствует общепринятая математическая модель процессов ТО бетонных изделий в ТТУ, на основании которой можно было бы производить их численный анализ с целью разработки и оптимизации энергосберегающих режимов, не разработаны также и комплексные, основанные на термодинамических представлениях, критерии для оценки и выбора энергоэффективных теплотехнологий и режимов работы теплотехнологического оборудования в данной отрасли, что определило основные задачи диссертационного исследования [4, 6, 5, 11, 18].

**Во второй главе** определена структура эксергетических потоков и разработан их баланс применительно к процессам ТО бетонного изделия в ТТУ для ускоренной гидратации, предложена и обоснована методика расчёта составляющих эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, учитывающая гранулометрический состав инертных компонентов, активность цемента,



условия протекания процессов смесеобразования, степень гидратации цемента, выбранный режим ТО [11].

Схема эксергетических превращений при получении бетонной смеси в смесителе представлена на рисунке 1.



индекс (') на входе, индекс (") – на выходе  
Рисунок 1. – Эксергетические превращения  
в процессе приготовления бетонной смеси  
в смесителе

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

$E'_{pT,щ}$ ,  $E'_{pT,п}$ ,  $E'_{pT,в}$ ,  $E'_{pT,ц}$  – термомеханические составляющие эксергии потоков соответственно щебня, песка, воды и цемента, кДж;  $E'_{r,ц}$  – реакционная составляющая эксергии потока цемента, кДж;  $E_{к,бс}$  – концентрационная составляющая эксергии потока бетонной смеси, кДж;  $W_{эл}$  – механическая энергия, подводимая к смесителю, кДж;  $\sum D_e$  и  $\sum D_i$  – соответственно внешние и внутренние потери эксергии, кДж.

Удельная массовая эксергия потока бетонной смеси определяется соотношением:

$$e_{бс} = e_{r,бс} + e_{к,бс} + e_{pT,бс}, \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

где  $e_{r,бс}$ ,  $e_{к,бс}$ ,  $e_{pT,бс}$  – соответственно реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии бетонной смеси, кДж/кг.

Удельная массовая концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси равна:

$$e_{к,бс} = s_{тк} \cdot W_{эл}, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где  $s_{тк}$  – удельная поверхность смеси компонентов бетонного раствора, м<sup>2</sup>/кг, определяемая по известным методикам, исходя из фактического

состава компонентов бетонной смеси;  $W_{ад}$  – удельная работа адгезионного взаимодействия воды и поверхности материалов, Дж/м<sup>2</sup>.

$$W_{ад} = \sigma_{жг} \cdot (1 + \cos \theta), \text{ Дж/м}^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_{жг}$  – поверхностное натяжение воды, Дж/м<sup>2</sup> (или Н/м);  $\theta$  – краевой угол смачивания воды к поверхности материала.

*Термомеханическая составляющая эксергии* потока бетонного раствора, определяется соотношением:

$$e_{pT,бс} = \sum g_j (\bar{c}_{p,j})_{t_0}^{t_{бс}} \cdot ((t_{бс} - t_0) - T_0 \cdot \ln(T_{бс}/T_0)), \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где  $\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{бс}}$  – удельная массовая изобарная теплоёмкость бетонной смеси, средняя в интервале температур от  $t_0$  до  $t_{бс}$ , кДж/(кг·К);  $T_0$ ,  $T_{бс}$  – соответственно температуры окружающей среды и бетонной смеси, К;  $t_0$ ,  $t_{бс}$  – то же самое, °С.

*Реакционная удельная массовая составляющая эксергии* потока многокомпонентной системы, к которой следует отнести бетонную смесь, может быть определена как

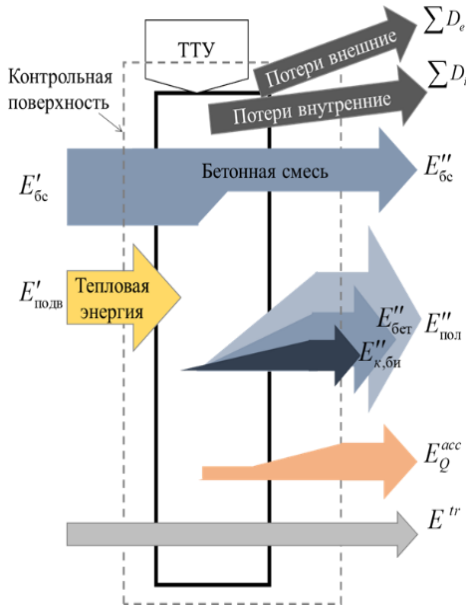
$$e_{r,бс} = \sum g_j \cdot e_{\mu,j}, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

где  $g_j$  – массовые доли компонентов, составляющих бетонную смесь;  $e_{\mu,j}$  – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов бетонной смеси, кДж/кг.

Для определения эксергии цемента  $e_{цсм}$  в работе использованы литературные данные о составе цементных клинкеров разных производителей, на основании которых установлено, что реакционная эксергия цемента,  $e_{цсм}$ , на усреднённый состав клинкера при его содержании в цементе 95 % равна 1716,0 кДж/кг. Химические составляющие эксергии инертных материалов (песка и щебня) в силу их минерального состава могут быть приняты равными нулю. Показано, что удельная массовая эксергия потока исходной бетонной смеси,  $e_{бс}$ , для бетона общестроительного назначения составляет от 228,6 до 1024,1 кДж/кг в зависимости от содержания цемента, его состава и активности [11]. Эксергия всего потока бетонной смеси, используемой для формовки бетонного изделия с массой бетона  $M_{бет}$  (кг), составляет:

$$E'_{бс} = e_{бс} \cdot M_{бет}, \text{ кДж}. \quad (6)$$

Схема эксергетических потоков в ходе ТО бетонного изделия в ТТУ показана на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Эксергетические превращения в процессе тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке**

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:  $E'_{bc}$  и  $E''_{bc}$  – эксергии потока бетонной смеси на входе и выходе ТТУ, кДж;  $E'_{повд} = E_Q^{in}$  – эксергии подведённого теплового потока, кДж;  $E''_{к,би}$  – концентрационная составляющая эксергии бетона в бетонном изделии, кДж;  $E''_{бет}$  – эксергия продуктов гидратации в изделии, кДж;  $E''_{пол} = E''_{бет} + E''_{к,би}$  – полезная эксергия бетона в изделии, кДж;  $E_Q^{acc}$  – эксергия аккумулированного теплового потока, кДж;  $E^{tr}$  – транзитная эксергия, кДж;  $\sum D_e = E_Q^{out}$  и  $\sum D_i$  – соответственно внешние и внутренние потери эксергии, кДж.

Величина  $E''_{bc}$  представляет собой эксергию не завершившего гидратацию потока бетонной смеси, потенциал которой будет использован при дальнейшем твердении изделия за пределами ТТУ. В связи с чем она не учитывается при расчётах эффективности организации процесса ТО в ТТУ.

Эксергия конечных продуктов гидратации  $E''_{бет}$  зависит от их состава и реакционных эксергий. В главе 2 диссертации обоснован вывод, что величина концентрационной составляющей эксергии бетона  $E''_{к,би}$  на несколько порядков меньше реакционной составляющей и ею можно пренебречь.

На основании выполненных теоретических исследований для определения полезной эксергии бетонного изделия после ТО получена следующая зависимость:

$$E''_{\text{рез}} = \frac{H}{100} \cdot \psi \cdot e_{\text{бет}} \cdot M_{\text{бет}} \cdot \gamma \cdot \varphi + E''_{\text{р}}, \text{ кДж}, \quad (7)$$

где  $H$  – коэффициент (степень) гидратации цемента в бетоне на момент завершения ТО в ТТУ, %;  $\sum(e_{\mu,i} \cdot g_{h,i})$  – удельная массовая эксергия продуктов гидратации в бетоне после завершения ТО, кДж/кг;  $e_{\mu,i}$  – удельная массовая реакционная составляющая эксергии отдельных компонентов продуктов гидратации, кДж/кг (принимается по литературным данным);  $g_{h,i}$  – массовые доли компонента в общем количестве продуктов гидратации;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий неполноту протекания реакции гидратации в результате внутренних потерь эксергии, величину которого на основе анализа литературных данных оценивается в 0,8–0,85;  $\gamma$  – массовая доля активной части цементного клинкера в цементе;  $\varphi$  – массовая доля продуктов гидратации в затвердевшем бетоне, равная сумме массовых долей цемента и воды в бетонной смеси.

В результате выполненных исследований разработана система критериев энергетической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в ТТУ [11, 12]. Система включает следующие показатели:

- степень термодинамического совершенства системы ускоренной гидратации:

$$\nu = \frac{E''_{\text{рез}}}{E'_{\text{подв}} + E'_{\text{бс}} + E''_{\text{р}}} = \frac{(H/100) \cdot \psi \cdot e_{\text{бет}} \cdot M_{\text{бет}} \cdot \gamma \cdot \varphi + E''_{\text{р}}}{E'_{\text{подв}} + E'_{\text{бс}} + E''_{\text{р}}}; \quad (8)$$

- термодинамический КПД<sub>е</sub> системы ТО:

$$\eta_e = \frac{(H/100) \cdot \psi \cdot e_{\text{бет}} \cdot M_{\text{бет}} \cdot \gamma \cdot \varphi}{E'_{\text{подв}} + E'_{\text{бс}}}; \quad (9)$$

- термодинамический КПД<sub>е</sub> системы ТО с учетом эксергетического КПД<sub>е</sub> системы производства и отпуска тепловой энергии:

$$\eta_e^{\text{полн}} = \frac{(H/100) \cdot \psi \cdot e_{\text{бет}} \cdot M_{\text{бет}} \cdot \gamma \cdot \varphi}{E'_{\text{подв}} / (\eta_e^{\text{эс}} / 100) + E'_{\text{бс}}}, \quad (10)$$

где  $\eta_e^{\text{эс}}$  – КПД<sub>е</sub> энергосистемы при отпуске энергии потребителям, %;

– характеристика энергоэффективности организации процесса ТО:

$$K_{\text{т.с.}} = \frac{Q_{\text{src}}}{Q_{\text{подв}}} \leq 1, \quad (11)$$

где  $Q_{\text{src}}$  – количество тепловой энергии, переданное в ТТУ непосредственно к бетонному изделию (технологически необходимая потребность), кДж;

$Q_{\text{подв}}$  – количество тепловой энергии, фактически потреблённой тепло-технологической установкой, кДж.

Расчёты, выполненные для некоторой обобщённой системы ТО бетонного изделия, дают результаты: величина  $\eta_e = 0,413$ ,  $\eta_e^{\text{полн}} = 0,390$  (при  $\eta_e^{\text{с}} = 35,2 \%$ ).

Разработанная система эксергетических показателей устанавливает термодинамически обусловленную связь между задачами проектирования составов бетонных смесей, эксергетической эффективностью теплотехнологии производства бетонных изделий и эксергетической эффективностью теплоснабжения этого производства и позволяет производить оценку степени термодинамического совершенства технической системы для проведения ТО с учётом требований энергоэффективности [11, 12].

**В третьей главе** разработана и верифицирована математическая модель с пространственно распределёнными параметрами нестационарного процесса ускоренной ТО бетонного изделия, имеющего сложную структуру и геометрическую форму, позволяющая рассчитать в зависимости от времени ТО величину и мощность технологически обусловленного потребления ТЭ, распределение значений температуры и коэффициента гидратации в пределах бетонного изделия и конструктивных элементов ТТУ [5, 6, 9, 10, 13, 16, 17, 18].

Согласно разработанной модели, бетонное изделие рассматривается как совокупность пространственных областей  $\Omega_j$  (значение  $j = 1$  соответствует области твердеющего бетона, 2 – опалубки, 3 – паровоздушной среды, 4 – нагревателей, 5 – теплоизоляционного слоя).

Модель включает: нестационарное уравнение теплопроводности с распределённым источником тепловыделения (12), уравнение для мощности источника тепловыделения (13), дополненное уравнением (14), нестационарное уравнение теплопроводности (15) и систему начальных и граничных условий, отражающих особенности процесса тепловой обработки в тепло-технологической установке (17)–(22).

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_b \rho_b} \left\{ \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \right. \\ + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \\ + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} + \\ \left. + \rho_c P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right\}, \quad (12)$$

где  $\tau$  – время, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты, м;  $T(x, y, z, \tau)$  – температура бетона в точке, имеющей координаты  $(x, y, z)$ , в момент времени  $\tau$ , °С;  $\rho_b$  – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_c$  – удельный расход цемента в бетоне, кг/м<sup>3</sup>;  $c_b$  – удельная теплоёмкость 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  $\tau$ , Дж/кг;  $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau) / Q_{\max}$  – коэффициент (степень) гидратации цемента, где  $Q_{\max}$  – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг;  $\lambda_b(H, T)$  – теплопроводность бетона, зависящая от степени его гидратации и температуры, Вт/(м·К);  $P_q(Q, T)$  – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента (Вт/кг).

$$P_q(Q, T) = \frac{\partial Q(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))}{\partial \tau}, \quad (13)$$

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;  $\tau_{\text{прив}}(Q, T)$  – приведённое 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.

Распределения тепловыделений и коэффициента гидратации цемента в пространственной области бетона описывается уравнением:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)). \quad (14)$$

Расчет температуры и коэффициента гидратации в пространственной области бетона  $\Omega_1$  выполняется с использованием уравнений (12)–(14), а расчёт температуры в пространственных областях  $\Omega_2$ – $\Omega_5$  – на основании уравнения (15) с подстановкой в них теплофизических свойств материала ( $\lambda_j$ ,  $c_j$ ,  $\rho_j$ ), заполняющего соответствующую пространственную область:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right). \quad (15)$$

Граничные условия разработанной модели, применённые в работе, приведены в таблице 1. Исползованные начальные условия модели представлены следующей совокупностью уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_1}, \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_1 \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_2}, \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_2 \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_3}, \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_3 \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_4}, \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_4 \\ T(x, y, z, 0) = T_{\Omega_5}, \text{ для } (x, y, z) \in \Omega_5 \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж / кг, для } (x, y, z) \in \Omega_1 \end{array} \right. , \quad (16)$$

где  $T_{\Omega_1}$ ,  $T_{\Omega_2}$ ,  $T_{\Omega_3}$ ,  $T_{\Omega_4}$ ,  $T_{\Omega_5}$  – начальные температуры соответственно: бетона, опалубки, паровоздушной среды, нагревателей и теплоизоляционного слоя, °С, в момент времени тепловой обработки  $\tau = 0$ , с.

Разработаны численные схемы расчёта бетонных изделий разной структуры, основывающиеся на методе конечных разностей, составляющих сеточное пространство, включающее все или часть пространственных областей  $\Omega_1$ – $\Omega_5$ , размер сеточного элемента определяется размерами изделия и принят в пределах 0,005 м, шаг моделирования – 0,25–0,5 с [9, 13].

Сравнение расчётных данных с известными опубликованными экспериментальными данными по температурам для объектов аналогичной формы и структуры при сходных условиях также показало хорошее согласование [4]. В условиях ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополюцк» проведена верификация полученной математической модели, показавшая, что экспериментально полученная для тестовых образцов функция прочности на сжатие коррелируют с функцией коэффициента гидратации, вычисленной с использованием разработанного математического аппарата [5, 6].

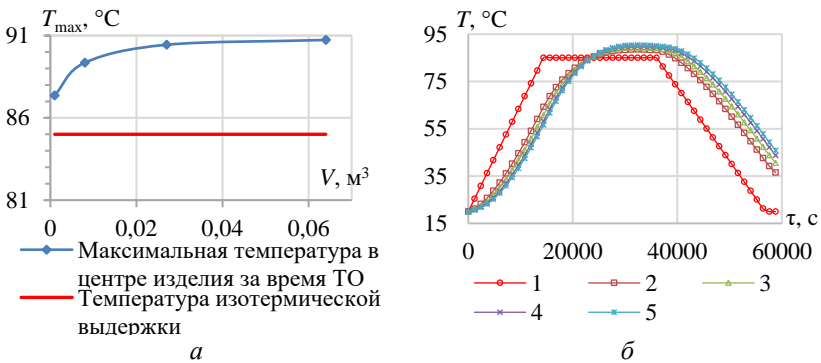
Таблица 1. – Граничные условия модели с учётом структуры бетонных изделий и особенностей организации их тепловой обработки в теплотехнологической установке

Условия	Уравнения для граничных условий
на границе раздела «бетон–среда тепловой обработки» ( $\Omega_1-\Omega_3$ )	$-\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} = \alpha \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_4} - T_{env}(\tau) \right) \quad (17)$
на границе раздела «опалубка–среда тепловой обработки» ( $\Omega_2-\Omega_3$ )	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} = \alpha \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_2} - T_{env}(\tau) \right) \quad (18)$
на поверхности раздела «опалубка–бетон» ( $\Omega_2-\Omega_1$ )	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_2} = \lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_4} \quad (19)$
на границе раздела области «нагреватель – столешница» ( $\Omega_4-\Omega_2$ ):	$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_4} = \alpha_w \left( T(x, y, z, \tau) \Big _{(x, y, z) \in \Omega_4 \cap \Omega_2} - T_w(\tau) \right) \quad (20)$
на границе раздела «бетон – пенополистирол» ( $\Omega_1-\Omega_5$ )	$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_5} = \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_4} \quad (21)$
на границе раздела «опалубка – пенополистирол» ( $\Omega_2-\Omega_5$ )	$\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_5} = \lambda_{ps} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big _{(x, y, z) \in \Omega_5 \cap \Omega_2} \quad (22)$
<p>где <math>\partial i</math> – это <math>\partial x</math> или <math>\partial y</math> или <math>\partial z</math> в соответствии с пространственной ориентацией границы;  <math>\lambda_b, \lambda_{st}, \lambda_{ps}</math> – коэффициенты теплопроводности соответственно бетона, стали, пенополистирола, Вт/(м·К);  <math>\alpha</math> и <math>\alpha_w</math> – коэффициенты теплоотдачи на соответствующей граничной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  <math>T_{env}(\tau)</math> – температура в области среды тепловой обработки, °С;  <math>T_w(\tau)</math> – температура нагревателя, °С.</p>	



В третьей главе также разработана система интегральных энергетических характеристик процесса ТО, позволяющая осуществлять выбор режимов ТО по критерию энергоэффективности, включающая: 1) подведённую тепловую энергию  $Q_{in}$ , поступившую в бетонное изделие в ходе ТО; рассеянную тепловую энергию  $Q_{out}$ , отданную изделием в окружающую среду; теплоту гидратации  $Q_{hydr}$ , выделившуюся в пределах изделия; аккумулированную тепловую энергию  $Q_{acc}$ , накопленную изделием в течение ТО; тепловую энергию, переданную источником  $Q_{src}$ , поступившую от теплоносителя из пространственной области нагревателя в пространственные области изделия за время ТО. Разработан численный метод для их определения, учитывающий структуру изделия, особенности организации процесса ТО в ТТУ и нестационарный характер нагрева и гидратации [8, 12, 13].

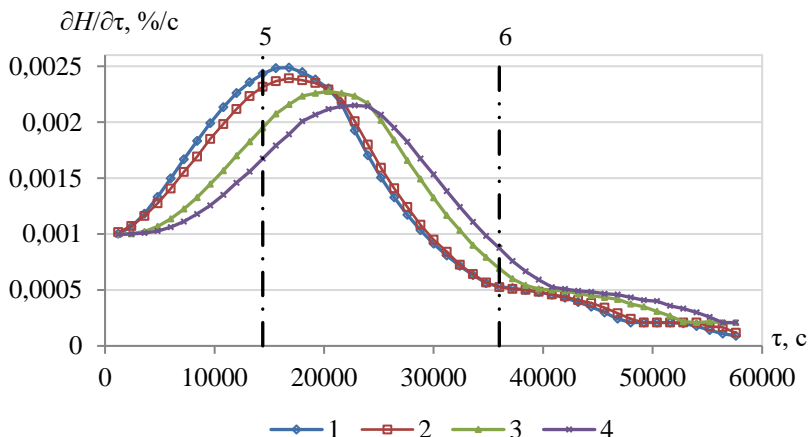
В четвёртой главе с применением разработанной модели выполнены численные исследования процессов ТО в ТТУ модельных изделий разных размеров и структуры. Установлено, что при заданном режиме ТО наблюдается превышение температуры в выделенных точках однородных изделий над температурой изотермической выдержки, обусловленное поступлением теплоты гидратации, увеличивающееся с ростом объёма изделия, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению (рисунок 3, а) [4, 10].



1 – множество точек, характеризующих режим нагревателя; 2 – точка  $A_0$  (центр наружной боковой грани куба; 3 – точка  $A_1$ ; 4 – точка  $A_2$ ; 5 – точка  $A_3$ ; расстояние до точек от  $A_0$  вглубь изделия вдоль нормали к боковой грани:  $A_1$  (0,0375 м от  $A_0$ );  $A_2$  ( $a = 0,075$  м от  $A_0$ );  $A_3$  ( $a = 0,15$  м от  $A_0$  – центр изделия)

Рисунок 3. – Влияние объёма бетонного изделия на максимальную температуру процесса в центре ( $A_3$ ) изделия (а) и зависимость температуры от времени ТО для куба с ребром 0,3 м в выделенных точках пространства (б)

Расчётным методом также показан эффект, заключающийся в сдвиге графика температуры сеточного элемента во времени по сравнению с заданным режимом ТО (рисунок 3, б) [4, 18]. С увеличением объёма изделия максимальная скорость изменения степени гидратации снижается, а время её достижения при заданном режиме ТО возрастает (рисунок 4) [8, 18].



кубы с ребром: 1 – 0,1 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,3 м; 4 – 0,4 м;

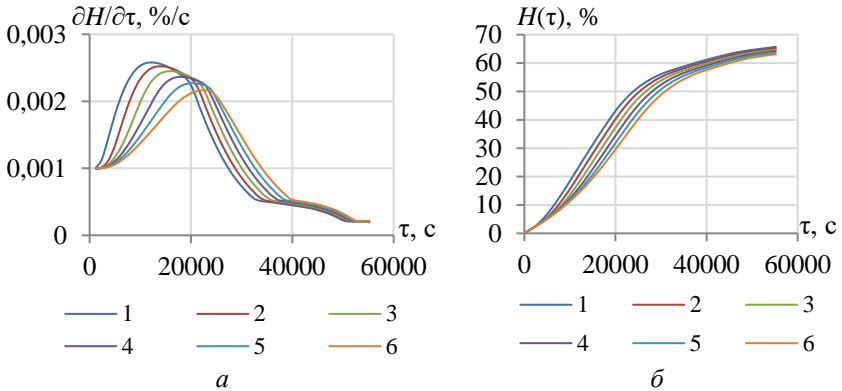
5 – момент начала изотермической выдержки,

6 – момент окончания изотермической выдержки

**Рисунок 4. – Зависимость скорости изменения коэффициента гидратации  $\frac{\partial H}{\partial \tau}$  от времени тепловой обработки в центре изделий разного размера**

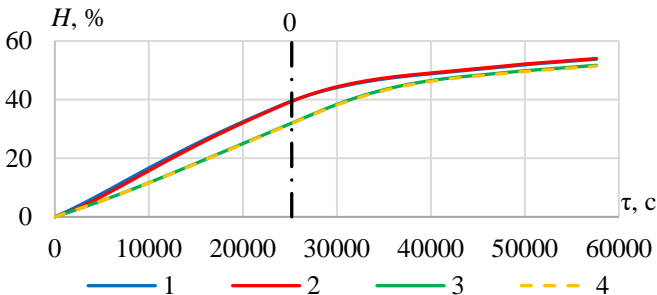
В ходе численного моделирования выполнен анализ влияния скорости подъёма температуры бетонного изделия в процессе ТО в ТТУ на скорость изменения коэффициента гидратации при одинаковой общей продолжительности тепловой обработки (рисунок 5). Установлено, что при равной общей продолжительности ТО в ТТУ максимальная скорость процесса гидратации достигается при минимальном соотношении интервалов времени подъёма температуры и изотермической выдержки.

Для однородного модельного кубического изделия с размером ребра 0,3 м при заданном режиме ТО вида «подъём температуры – изотермическая выдержка – снижение температуры» максимальная скорость гидратации в центре изделия снижается с 0,00249 %/с до 0,002165 %/с (рисунок 5, а). При этом, чем быстрее достигается температура изотермической выдержки, тем выше наблюдаемый в интервале назначенного времени ТО коэффициент гидратации  $H(\tau)$  (рисунок 5, б) [7, 8].



*1, 2, 3, 4, 5, 6* – режимы тепловой обработки равной продолжительности (в порядке увеличения продолжительности этапа подъема температуры)  
**Рисунок 5.** – Зависимость от времени тепловой обработки коэффициента гидратации  $H(\tau)$  (*a*) и скорости его изменения  $\partial H/\partial \tau$  (*b*) в центре однородного изделия в форме куба с размером ребра 0,3 м

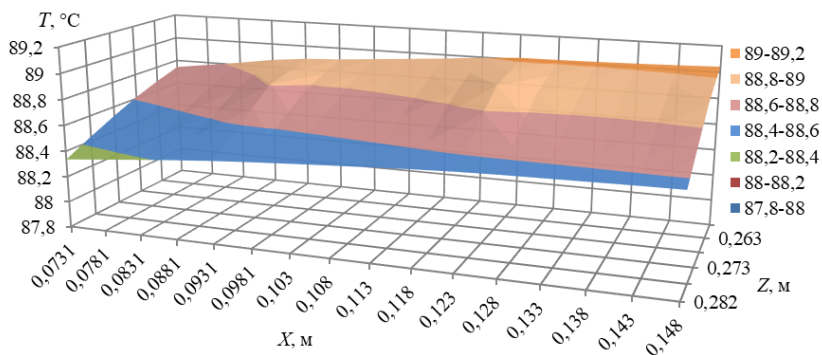
Выполнены численные исследования ТО в ТТУ модельных трёхслойных изделий, включающий два слоя бетона, разделённых слоем пенополистирола, с применением режимов ТО, используемых в условиях промышленного производства. На рисунке 6 приведены графики зависимости от времени ТО коэффициента (степени) гидратации в выделенных точках трёхслойного бетонного изделия в форме куба с размером ребра 0,35 м.



*1, 2* – середина нижней и верхней граней нижнего слоя бетона;  
*3, 4* – середина нижней и верхней граней верхнего слоя бетона;  
*0* – момент начала изотермической выдержки  
**Рисунок 6.** – Зависимость коэффициента (степени) гидратации в выделенных точках трёхслойного изделия в форме куба с размером ребра 0,35 м от времени тепловой обработки

Наличие слоя пенополистирола замедляет процесс твердения верхнего слоя бетона при расположении области нагревателя под изделием. При этом в результате замещения части пространства цемента инертным материалом эффекты сдвига графиков температуры внутри изделия во времени, а также её превышения над температурой области нагревателя ослабевают.

В главе 4 также решена задача моделирования процессов нагрева и гидратации изделия, состоящего из бетона и пространственно распределённой в бетоне стальной арматуры (рисунок 7).



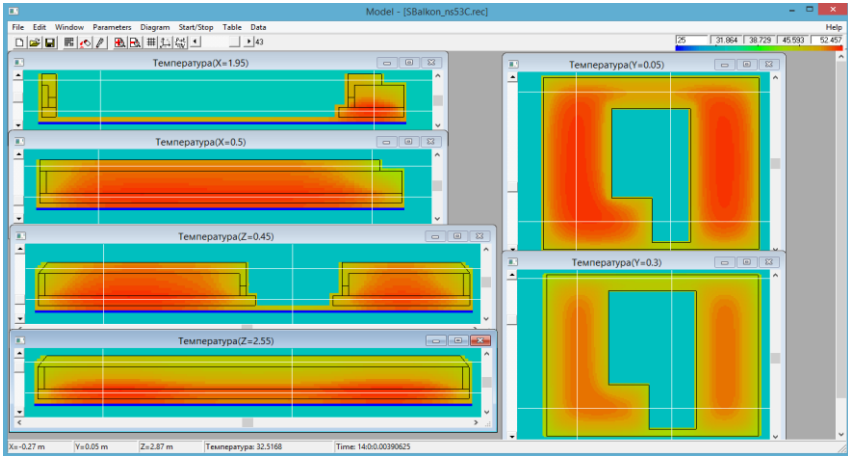
**Рисунок 7. – Фрагмент распределения температуры в среднем сечении модельного кубического изделия с размером ребра 0,3 м на момент времени ТО  $\tau = 10$  часов при армировании 2,8 %**

Показано, что наличие стальной арматуры в бетоне незначительно влияет на процессы нагрева и гидратации. Указанный эффект необходимо учитывать, если количество арматуры в отдельных областях изделия превышает 2,8 % от их локального объёма (на рисунке 7 видны характерные впадины-углубления температурного поля) [10].

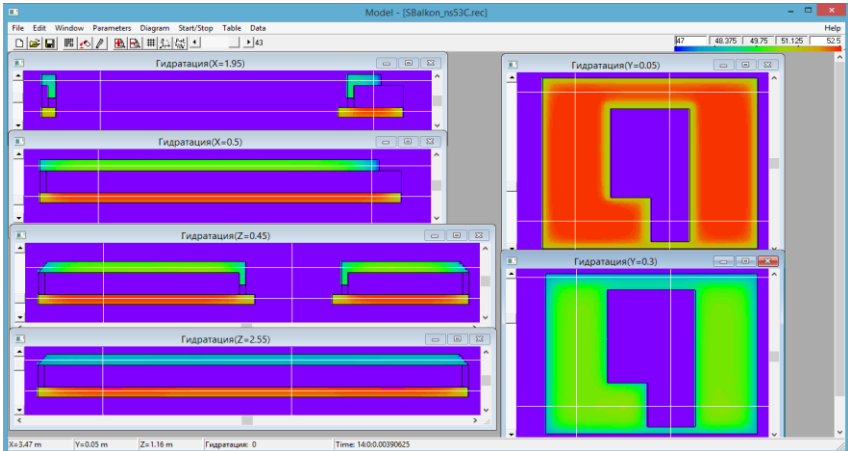
Выполнен сравнительный численный анализ тепловых энергетических характеристик  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ ,  $Q_{hidr}$  и  $Q_{acc}$ . Установлено, что величины указанных тепловых энергетических характеристик для трёхслойного изделия с пенополистиролом будут ниже, чем для однородного бетонного изделия такого же объёма без пенополистирола в сопоставимых теплотехнологических условиях [8, 13].

**В пятой главе** с применением разработанного математического аппарата для условий реального производства выполнено исследование и разработан энергосберегающий режим ТО трёхслойной стеновой панели

серии 90-м, производства ОАО «Трест № 16, г. Новополюцк», изготовление которой осуществляется на стенде горизонтального формования. Фрагмент компьютерного моделирования представлен на рисунке 8.



*a*



*б*

**Рисунок 8. – Фрагмент численного моделирования распределения температуры (а) и коэффициента гидратации (б) в трёх проекциях на момент времени  $T_0 \tau = 14$  часов**

Разработанный энергосберегающий режим ТО с энергетической точки зрения является более предпочтительным по сравнению с применяемым в условиях рассматриваемого производства, обеспечивая экономию потребления ТЭ, непосредственно подводимой в пределах ТТУ к бетонному изделию в процессе ТО, в объёме 8,4 МДж в расчёте на одно изделие или на 14,7 %. При этом достигаемая степень гидратации бетона увеличилась на 1,2 % [12].

На рисунке 9 приведены расчёты критериев, характеризующих состояние энергосбережения при организации ТО бетонных изделий в условиях рассматриваемого производства (существующее положение и после проведённой дискретной оптимизации). Рост эксергетических показателей достигнут за счёт сокращения расхода ТЭ, подводимой в ТТУ к бетонному изделию в процессе ТО, а также в результате увеличения достигнутой степени гидратации.



1 – термодинамический КПД  $\eta_e$ ; 2 – термодинамический КПД  $\eta_e^{\text{полн}}$  с учётом эксергетического КПД энергосистемы;  
3 – характеристика энергоэффективности ТО  $K_{т.с.}$

Рисунок 9. – Сравнение критериев энергоэффективности процесса ТО стеновой панели серии 90-м на стенде горизонтального формования до и после проведения дискретной оптимизации режимов работы ТТУ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика расчёта эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона, *учитывающая* гранулометрический состав инертных компонентов, активность цемента, степень гидратации бетона в изделии и выбранный режим ТО, *позволяющая* выполнять расчёт величин эксергии исходной бетонной смеси и бетонного изделия в ходе его твердения.

*Определено*, что удельная эксергия исходной бетонной смеси составляет от 228,6 до 1024,1 кДж/кг в зависимости от содержания в ней цемента, его состава и активности. *Показано*, что величина удельной эксергии бетонной смеси в основном определяется реакционной составляющей эксергии цемента, а эксергия твердеющего бетона после завершения процесса ТО – достигнутой степенью гидратации [11, 12].

2. *Разработана* методика расчёта термодинамической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в теплотехнологических установках, и система критериев, учитывающих степень гидратации, составы цемента, бетонной смеси, продуктов гидратации, *позволяющая* осуществлять выбор энергоэффективных режимов ТО при ускоренной гидратации в ТТУ. *Показано*, что эксергетический КПД промышленной теплотехнологии ускоренной гидратации в среднем составляет 41,3 %, а с учётом эксергетического КПД энергосистемы – 39 %. Полученные результаты *позволяют* установить термодинамически обусловленную связь между задачей проектирования составов бетонных смесей, эксергетической эффективностью теплотехнологии производства бетонных изделий и эксергетической эффективностью теплоснабжения этого производства [11, 12].

3. *Разработана* и верифицирована математическая модель с пространственно распределёнными параметрами нестационарного процесса ускоренной ТО бетонного изделия, имеющего сложную структуру и геометрическую форму, *позволяющая* рассчитать в зависимости от времени ТО величину и мощность технологически обусловленного потребления ТЭ, распределение значений температуры и коэффициента гидратации в пределах бетонного изделия и конструктивных элементов ТТУ, *отличающаяся* от известных тем, что мощность тепловыделений цемента определяется в каждой точке пространства бетона в зависимости от достигнутой в ней степени гидратации, при этом учитывается переменный характер коэффициента теплопроводности бетона. *Предложен* математический аппарат и разработаны численные схемы, *позволяющие* проводить расчёт и исследование температурных полей и полей коэффициента гидратации и давать количественную оценку составляющих теплового баланса при ТО бетонных изделий в теплотехнологических установках [4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13 16, 17, 18].

4. В результате выполненного с использованием разработанного математического аппарата численного моделирования ТО бетонных изделий разного размера *установлено*, что при заданном режиме ТО вида «подъём температуры – изотермическая выдержка – снижение температуры» в выделенных точках изделий наблюдается превышение температуры над заданной температурой изотермической выдержки, обусловленное поступлением теплоты гидратации, а также наличие эффекта запаздывания в изменении скорости гидратации в этих точках по мере увеличения объёма бетонного

изделия и по мере продвижения от его поверхности к центру. *Показано*, что это превышение температуры в диапазоне времени изотермической выдержки и при её температуре 85 °С изменяется по нелинейному закону от 2,3 °С до 5,73 °С, увеличиваясь по мере роста объёма изделия и асимптотически приближаясь к постоянному значению. *Показано*, что с увеличением объёма бетонного изделия, подвергнутого ТО, с 0,001 м<sup>3</sup> до 0,064 м<sup>3</sup> максимальная скорость изменения коэффициента (степени) гидратации снижается соответственно с 0,00248 %/с до 0,00215 %/с, а время достижения этой максимальной скорости увеличивается с 14 400 с до 22 800 с при заданном режиме ТО [4, 8, 10, 18].

5. *Выполнен* численный анализ влияния скорости подъёма температуры бетонного изделия в процессе ТО на скорость изменения коэффициента (степени) гидратации при заданных режимах подвода ТЭ. *Показано*, что максимальная скорость процесса гидратации в твердеющем бетонном изделии достигается в случае минимального соотношения интервалов времени на осуществление подъёма температуры и изотермической выдержки при равной общей продолжительности ТО. Для однородного кубического изделия с размером ребра 0,3 м при увеличении продолжительности стадии подъёма температуры с 1200 с до 18 000 с максимальная скорость гидратации в центре изделия снижается с 0,00249 %/с до 0,002165 %/с. *Определено*, что функция коэффициента гидратации растёт с течением времени тем скорее, чем быстрее достигается температура изотермической выдержки в процессе ТО. Одновременно при этом достигается бóльшая величина коэффициента гидратации. *Установлено*, что включение в состав бетонного изделия слоя утеплителя существенным образом меняет распределение полей температуры и коэффициента гидратации во времени. В ходе численных исследований *показано*, что разработанная математическая модель, *позволяет* выбирать энергоэффективные режимы подвода ТЭ к бетонному изделию из дискретного множества заданных тепловых режимов ускоренной гидратации [7, 8, 13].

6. *Разработано* научно-методическое обеспечение, *позволяющее* выполнять расчёт энергосберегающих режимов ТО многослойных промышленно изготавливаемых бетонных изделий, *предложены принципы и методика* выбора энергосберегающих режимов, использование которых *позволяет* снизить затраты ТЭ. Выполнены исследования процессов ТО изделий на стенде горизонтального формования в производственных условиях ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк», в ходе которых *предложен* энергосберегающий режим ТО трёхслойной стеновой панели серии 90-м, *обеспечивающий снижение* объёма потребления ТЭ в расчёте на одно изделие на 8,4 МДж или на 14,7 %. При этом предлагаемый режим ТО *обеспечивает* более полное протекание процесса гидратации по



сравнению с режимом, используемым на предприятии. В результате выполненной оптимизации теплового режима работы ТТУ термодинамический КПД рассматриваемой теплотехнологии возрос с 44,8 % до 45,9 %. Показано, что в рассматриваемых условиях около 68,7 % всей расходуемой ТЭ не связано с технологически обусловленным потреблением [7, 13, 11, 12].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанное научно-методическое обеспечение может быть использовано при проектировании энергоэффективных режимов работы ТТУ в условиях действующего производства, обеспечивающих заданные параметры прочности во всём пространстве бетонного изделия. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при исследованиях, расчёте, оптимизация схем, параметров и режимов работы промышленного теплотехнологического оборудования, предназначенного для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий сложной геометрической формы и структуры с целью повышения его энергетической эффективности и обеспечения рациональной эксплуатации, а также при создании автоматизированных систем управления процессами ТО на предприятиях, осуществляющих производство бетонных изделий.

Результаты диссертационной работы используются на предприятии Завод КПД ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк», для которого разработано пособие к проектированию энергоэффективных режимов тепловой обработки композитных бетонных изделий сложной геометрии и предложен режим работы ТТУ, позволяющий снизить затраты энергии при изготовлении наружных трёхслойных стеновых панелей серии 90-м (акт использования). Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе на кафедре «Строительное производство» в Полоцком государственном университете при чтении лекций по дисциплине «Ресурсосберегающие технологии получения строительных материалов» (акт использования).



**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ****Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий  
Республики Беларусь для опубликования результатов  
диссертационных исследований**

1. Нияковский, А. М. Формирование рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий при их модернизации / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 93–98.
2. Нияковский, А. М. Организация процесса охлаждения пропарочных камер после окончания термообработки изделий из железобетона / А. М. Нияковский, Э. И. Гончаров, Е. С. Добросольцева // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки: научно-теоретический журнал. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – № 8. – С. 103–106.
3. Нияковский, А. М. Интенсификация подъёма температуры греющей среды в пропарочных камерах предприятий строительной индустрии / А. М. Нияковский, Э. И. Гончаров, Е. С. Добросольцева // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 101–106.
4. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования для производства бетонных изделий на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 177–191.
5. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 137–145.
6. Нияковский, А. М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трёхмерного уравнения теплопроводности / А. М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
7. Дискретная оптимизация программно-управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, Ю. В. Яцкевич, А. Н. Чичко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 280–292.
8. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Энергетика. Известия высших

учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 307–324.

9. 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.

10. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63. – № 4. – С. 496–505.

11. Нияковский, А. М., Романюк, В. Н. Разработка научно-методических основ энергетического анализа процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16 – С. 70–78.

12. Нияковский, А. М., Романюк, В. Н. Оценка энергетической эффективности режимов тепловой обработки композитных бетонных изделий сложной 3D-геометрии в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16 – С. 53–58.

#### **Статьи в тематических журналах и сборниках**

13. Нияковский, А. М. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А. М. Нияковский, В. Н. Романюк, А. Н. Чичко, Ю. В. Яцкевич // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 3 (723). – С. 86–100.

#### **Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов**

14. Нияковский, А. М. Обеспечение системного подхода к снижению затрат первичной энергии при производстве железобетонных изделий / А.М. Нияковский, А.В. Куликин, В.А. Пшеничнюк // Тезисы докладов 45 Республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой году книги. – Витебск: ВГТУ, 2012. – С. 76–77.

15. Нияковский, А. М. Двухстадийная тепловлажностная обработка тяжёлого бетона / А. М. Нияковский, Э. И. Гончаров, О. Д. Шавлюго // Тезисы докладов 47 республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов. – Витебск: ВГТУ, 2014 г. – С. 172.

16. Нияковский, А. М. Температурные поля в твердеющем бетоне / А. М. Нияковский, Э. И. Гончаров // Тезисы докладов 48 Международной

научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой 50-летию университета. – Витебск: ВГТУ, 2015 г. – С. 103–104.

17. Нияковский, А. М. Оптимальные условия термообработки как фактор формирования рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий / А. М. Нияковский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 93.

18. Нияковский, А. М. Теплофизическая модель для численного анализа характеристик процесса гидратации при тепловой обработке бетонного изделия / А. М. Нияковский // Материалы докладов 52 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. – Витебск: ВГТУ, 2019. – Т. 1. – С. 309–312.

### **Патенты**

19. Пропарочная камера: полез. модель 8920 Респ. Беларусь, МПК В 28В 11/00 / А. М. Нияковский, В. В. Рабец, Э. И. Гончаров, Е. С. Добросольцева: заявитель Полоцкий государственный университет. – № 20120632; заявл. 22.06.2012; опубл. 16.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Дзяр. Патэнтны камітэт. – 2013. – № 1 (90). – С. 166.

20. Коллектор пропарочной камеры: полез. модель 9834 Респ. Беларусь, МПК В 28В 11/24 С04В 40/00 / А. М. Нияковский, В. В. Рабец, Э.И. Гончаров, Е. С. Добросольцева: заявитель Полоцкий государственный университет. – № 20130573, заявл. 08.07.2013; опубл. 03.10.2013// Афіцыйны бюл. / Дзяр. Патэнтны камітэт. – 2013. – № 6 (95). – С. 193.

**РЭЗІЮМЭ****Ніякоўскі Аляксандр Мечыслававіч****Навукова-метадычнае забеспячэнне энергаэфектыўных рэжымаў  
цеплатэхналагічнага абсталявання для цеплавой апрацоўкі  
бетонных вырабаў**

**Ключавыя словы:** цеплатэхналагічныя ўстаноўкі, энергазберагальныя рэжымы, цеплавая апрацоўка, эксергетычны баланс, эксергія матэрыялаў, нестацыянарнае ураўненне цеплаправоднасці, матэматычнае мадэляванне, лікасныя метады даследавання, бетонныя вырабы.

**Мэта працы** – распрацаваць навукова-метадычнае забеспячэнне даследаванняў і разлікаў энергаэфектыўных рэжымаў цеплатэхналагічнага абсталявання для ЦА бетонных вырабаў ва ўмовах прамысловай вытворчасці.

**Метад даследавання.** Матэматычнае і камп'ютэрнае мадэляванне, лікасныя даследаванні на аснове метаду канечных элементаў і фундаментальнага ўраўнення цеплаправоднасці, эксергетычны метады тэрмадынамічнага аналізу.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана метадыка разліку эксергіі бетоннай сумесі і бетоннага вырабу ў дачыненні да ўмоў іх вытворчасці, прапанаваны крытэрыі энергаэфектыўнасці, якія дазваляюць ажыццяўляць аналіз энергаспажывання і энергазабеспячэння працэсаў ЦА бетонных вырабаў у ЦТУ. Распрацавана матэматычная мадэль з прасторава размеркаванымі параметрамі і алгарытм разліку, якія дазваляюць ажыццяўляць даследаванні, разлік і аптымізацыю рэжымаў і параметраў работы цеплатэхналагічнага абсталявання для паскоранай ЦА бетонных вырабаў з улікам іх кампазітнай структуры і геаметрыі. Сфармуляваныя цеплавая энергетычныя характарыстыкі працэсу ЦА цвярдзеючага бетоннага выраба і распрацаваны колькасны метады іх вылічэння, якія дазваляюць ранжыраваць рэжымы ЦА па велічыні цеплавога спажывання. На прыкладзе дзеючай вытворчасці распрацаваны энергазахавальны рэжым ЦА шматслойнага прамыслова вырабляемага бетоннага вырабу складанай формы.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Вынікі працы выкарыстаныя ў ААТ «Будаўніча-мантажны трэст № 16, г. Наваполацк» і ў навучальным працэсе.

**Галіна выкарыстання:** даследаванне і разлік цеплатэхналагічнага абсталявання для прамысловай ЦА бетонных вырабаў, аптымізацыя схем, параметраў і рэжымаў яго работы.

## РЕЗЮМЕ

**Нияковский Александр Мечиславович**

### **Научно-методическое обеспечение энергоэффективных режимов теплотехнологического оборудования для тепловой обработки бетонных изделий**

**Ключевые слова:** теплотехнологические установки, энергосберегающие режимы, тепловая обработка, эксергетический баланс, эксергия материалов, нестационарное уравнение теплопроводности, математическое моделирование, численные методы исследования, бетонные изделия.

**Цель работы** – разработать научно-методическое обеспечение исследований и расчётов энергоэффективных режимов теплотехнологического оборудования для ТО бетонных изделий в условиях промышленного производства.

**Методы исследования.** Математическое и компьютерное моделирование, численные исследования на основе метода конечных элементов и фундаментального уравнения теплопроводности, эксергетический метод термодинамического анализа.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана методика расчёта эксергии бетонной смеси и бетонного изделия применительно к условиям их производства, предложены критерии энергоэффективности, позволяющие производить анализ энергопотребления и энергообеспечения процессов ТО бетонных изделий в ТТУ. Разработана математическая модель с пространственно распределёнными параметрами и алгоритм расчёта, позволяющие осуществлять исследования, расчёт и оптимизацию режимов и параметров работы теплотехнологического оборудования для ускоренной ТО бетонных изделий с учётом их структуры и геометрии. Сформулированы тепловые энергетические характеристики процесса ТО твердеющего бетонного изделия и разработан численный метод их определения, позволяющие ранжировать режимы ТО по величине теплового потребления. На примере действующего производства разработан энергосберегающий режим ТО многослойного промышленно изготавливаемого бетонного изделия сложной формы.

**Рекомендации по использованию.** Результаты работы использованы в ОАО «Строительно-монтажный трест № 16, г. Новополоцк» и в учебном процессе.

**Область применения:** исследование и расчёт теплотехнологического оборудования для промышленной ТО бетонных изделий, оптимизация схем, параметров и режимов его работы.

## SUMMARY

**Niyakouski Aliaksandr Mechislavovich**

### **Scientific and methodological support of energy-efficient modes of heat-technological equipment for heat treatment of concrete products**

**Keywords:** Heat-technological installations (HTI), energy-saving modes, heat treatment (HT), exergy balance, exergy of materials, unsteady equation of thermal conductivity, mathematical modeling, numerical methods of research, concrete products.

**Objective:** To develop scientific and methodological support for research and calculations of energy-efficient modes of heat-technological equipment for the thermal treatment of concrete products in industrial production.

**Research Methods.** Mathematical and computer modeling, numerical studies based on the finite element method and the fundamental equation of thermal conductivity, exergy method of thermodynamic analysis.

**Obtained results and their novelty.** The exergy of the concrete mix and of the hardening concrete product calculation method in relation to the conditions of their production is developed, the criteria of energy efficiency are offered, allowing to perform the analysis of energy consumption and power supply of concrete products manufacturing processes in HTI. A non-stationary mathematical model with spatially distributed parameters and a calculation algorithm have been developed, which allow for the research, calculation and optimization of modes and parameters of heat technology equipment for the hardening acceleration of concrete products, taking into account their composite structure and geometry. The thermal energy characteristics of the hardening concrete product HT process are formulated and a numerical method for their determination is developed, which allows to rank the modes of hardening relative to the value of thermal consumption. Using the example of the existing production, the energy-saving mode of HT of a multilayered industrially made concrete product of a difficult form is developed.

**Recommendations for use.** The results provided herein are used in JSC "Construction and installation trust No. 16, Novopolotsk" and in educational process.

**Application field:** research and calculation of heat technology equipment for industrial HT of concrete products, optimization of patterns, parameters and modes of its operation.

Научное издание

**НИЯКОВСКИЙ**  
**Александр Мечиславович**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ  
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 14.09.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 60. Заказ 550.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.