

На правах рукописи



АКСЕНЧИК КОНСТАНТИН ВАСИЛЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ
ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2014

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика и теплотехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Череповецкий государственный университет» (ЧГУ)

Научный руководитель:

ШЕСТАКОВ Николай Иванович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

ФЕДОСОВ Сергей Викторович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», профессор кафедры «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы»

КОЛИБАБА Ольга Борисовна,

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент кафедры «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет», г. Вологда

Защита состоится « 19 » декабря 2014 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Aksenich_KV_02-10-2014.pdf

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.064.01,

доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Тепловлажностная обработка (ТВО) является одним из распространенных методов ускоренного твердения бетона, наряду с использованием химических добавок и быстротвердеющих цементов. Тепловые способы основаны на увеличении скорости реакций взаимодействия вяжущих веществ с водой при повышении температуры.

В производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций ТВО является наиболее энергоемкой и длительной стадией и преимущественно осуществляется в пропарочных камерах в паровой или паровоздушной среде. По оценкам специалистов ТВО составляет 70-80 % времени в общем цикле производства и на нее ежегодно расходуется более 12 млн. т у.т., при этом наблюдается перерасход энергоресурсов по сравнению с нормами в 2-3 раза.

Наиболее высокий удельный расход тепловой энергии и недостаточно полное ее использование характерно для ямных пропарочных камер, что обусловлено несовершенством конструкций данных тепловых установок, применением в большинстве случаев неэффективных режимов обработки, отсутствием систем учета и регулирования расхода теплоносителей.

В настоящее время режимы обработки назначаются по указаниям и рекомендациям с обязательной экспериментальной поверкой и уточнением параметров режимов или экспериментально-расчетными способами, которые характеризуются неэффективным использованием тепловой энергии в поверочных экспериментах, значительными расходами и трудозатратами на их проведение. Экспериментальная поверка проводится, как правило, на модельных образцах, отличающихся от железобетонных изделий кинетикой тепло- и массообменных процессов. На практике назначенные режимы часто не обеспечивают проектного энергопотребления и качества изделий, поэтому приходится проводить корректировку режимов в производственных условиях, увеличивать производственные площади для дозревания бетона, что ведет к повышению себестоимости продукции.

Однако наиболее перспективными с точки зрения экономии энергетических ресурсов, сокращения расходов и трудоемкости являются расчетно-экспериментальные методы назначения режимов. В приложении к автоклавной обработке ячеистых бетонов такой метод предложен Е.И. Шмитько и А.А. Фединым. Методика расчета предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки разработана С.В. Федосовым, В.И. Бобылевым, А.М. Ибрагимовым и А.М. Соколовым. Для назначения энергосберегающих термосных режимов ТВО бетонных и железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах с учетом минимальной стоимости М.С. Бибином и В.В. Бабицким разработаны методика и компьютерная программа. Первые два метода не применимы к ТВО в пропарочных камерах, ввиду различия механизмов процессов тепло- и массообмена. Третья методика построена на составлении теплового баланса пропарочной камеры без учета динамики процессов тепло- и массообмена.

В связи с этим совершенствование тепловой работы пропарочных камер на основе расчетно-экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена является актуальной задачей.

Цель работы: совершенствование режимов ТВО железобетонных изделий в производственных условиях на основе исследования динамики процессов тепло- и массообмена в ямных пропарочных камерах.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Изучение современного состояния теории и практики ТВО в аспекте проблемы моделирования и расчета процессов тепло- и массообмена в бетонных и железобетонных изделиях, обрабатываемых в промышленных условиях, и назначения режимов их обработки.

2. Разработка математической модели процессов тепло- и массообмена в пропарочной камере, дающей возможность расчета одновременно распределения температуры и влагосодержания в изделии в течение ТВО, и проверка адекватности модели реальным производственным условиям.

3. Экспериментальное исследование режимов ТВО в ямной пропарочной камере и разработка рекомендаций по совершенствованию режимов.

4. Расчетное исследование с целью изучения влияния параметров процесса ТВО на перепады температуры и влагосодержания по сечению изделия и разработка методики инженерного расчета температуры, влагосодержания и их средних по сечению изделия значений в процессе его ТВО в пропарочной камере.

5. Разработка усовершенствованной методики расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий в пропарочной камере и рекомендаций по ее применению.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием при математическом моделировании фундаментальных уравнений теории тепло- и массообмена, согласованием результатов расчета с известными и полученными автором в данной работе экспериментальными данными.

Научная новизна:

- разработана математическая модель процессов тепло- и массообмена в пропарочной камере, отличающаяся учетом внутренних объемных источника теплоты и стока влаги за счет реакций гидратации цемента, несимметричных граничных условий конвективного тепло- и массообмена 3-го рода (для массообмена – смешанных 3-го и 2-го рода) с переменными коэффициентами теплопроводности бетона, тепло- и влагоотдачи, которая позволяет рассчитывать одновременно распределение температуры и влагосодержания в изделии в течение ТВО;

- получены новые экспериментальные данные по распределению температуры в образце, подвергнутом ТВО в условиях промышленного производства, и динамики среднего влагосодержания в образцах в течение ТВО в лабораторных условиях, подтвердившие адекватность предлагаемых моделей;

- установлено, что характерным моментом времени, в который возникают максимальные перепады температуры и влагосодержания, для массивных изделий является момент окончания соответствующего периода ТВО, в изделиях малой толщины – половина длительности периода ТВО;

- получены аналитические зависимости для расчета средней по сечению температуры при ее несимметричном параболическом распределении и среднего по сечению влагосодержания при его непараболическом распределении;

- разработана методика инженерного расчета, позволяющая определить ди-

намику температуры, влагосодержания и их средних значений по сечению сплошного плоского бетонного и железобетонного изделия, что дает возможность прогнозирования в изделии перепадов температуры и влагосодержания, важных при назначении режимов ТВО.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанная усовершенствованная методика расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий может использоваться при проектировании режимов ТВО в ямных и вертикальных пропарочных камерах. Применение предлагаемой методики в инженерных расчетах дает экономию энергоресурсов и сокращает трудозатраты на постановку поверочных экспериментов.

2. Применение разработанного программно-алгоритмического обеспечения для моделирования процесса ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий и назначения режимов их ТВО (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617851 от 05 августа 2014 г.) позволяет автоматизировать труд специалистов-проектировщиков.

3. Предложены номограммы для определения безразмерных температуры и влагосодержания в железобетонном изделии в периоды подогрева и термосной выдержки ТВО по определяющим критериям.

4. Даны рекомендации по совершенствованию режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах. Основные результаты диссертационной работы внедрены на ОАО "Завод железобетонных изделий и конструкций" г. Череповца.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Соответствие диссертации формуле специальности: «в рамках специальности ведется поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции...».

Соответствие диссертации области исследования специальности: согласно п. 3 паспорта специальности: «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых ... установок с целью ... экономии энергетических ресурсов».

Личное участие автора. Основные результаты получены лично автором под руководством д.т.н., профессора Шестакова Н.И. В работах, выполненных совместно с научным руководителем, д. т. н., профессором Н.И. Шестаковым и к. т. н., доцентом М.Ю. Белозор, автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследования и подготовки публикации, соавторы принимали участие в общей постановке задач исследования и обсуждении результатов.

На защиту выносятся:

– математическая модель процессов тепло- и массообмена в пропарочной камере и алгоритм ее реализации, позволяющие определить температуру, влагосодержание в зависимости от параметров процесса ТВО;

– результаты экспериментального определения распределения температуры в образце, подвергаемом ТВО в условиях промышленного производства; результаты экспериментального определения динамики среднего влагосодержания в образцах в течение ТВО в лабораторных условиях;

– результаты расчетных исследований динамики температуры, влагосодер-

жания и их перепадов в изделиях в процессе ТВО по режимам с изотермической и термосной выдержкой в зависимости от скорости подъема и снижения температуры среды в камере, температурного режима в разные периоды обработки, толщины изделия;

– методика инженерного расчета температуры, влагосодержания и их средних по сечению изделия значений;

– усовершенствованная методика расчета режимов ТВО в пропарочной камере сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий;

– рекомендации по совершенствованию режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IX Международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (Пенза, 2008); XI Всероссийской научно-технической конференции «Современные промышленные технологии» (Нижний Новгород, 2008); второй Всероссийской научно-технической конференции «Экспертиза и оценка риска техногенных систем – 2010» (Череповец, 2010); Всероссийской научной конференции «Молодые исследователи – регионам» (Вологда, 2011); Четвертой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011» (Москва, 2011); 7-й Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2012); «VI Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых по отраслям наук» (Вологда, 2012); I Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (Новосибирск, 2012).

Публикации.

Основное содержание диссертации изложено в 19 работах, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, 6 приложений и содержит 168 страниц машинописного текста, 47 рисунков, 29 таблиц, список литературы, состоящий из 179 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены способы и установки для ТВО бетонных и железобетонных изделий, факторы, влияющие на выбор параметров тепловых режимов, теоретические основы ТВО: тепло- и массообменные процессы, теплофизические и массообменные свойства бетонов, закономерности, описывающие

тепловыделение при твердении цемента и динамику прочности бетона. Проведен анализ известных методологических подходов к назначению режимов ТВО и решений краевых задач тепло- и массопереноса.

Анализ работ В.В. Бабицкого, М.С. Бибика, К.Э. Горяйнова, А.Д. Дмитриевича, Л.А. Малининой, Н.Б. Марьямова, Б.А. Новикова, В.В. Перегудова, А.В. Саталкина, А.А. Федина, С.В. Федосова, Е.И. Шмитько и др. позволяет сделать вывод, что существующие способы назначения режимов ТВО в пропарочных камерах характеризуются значительными энергорасходами и трудозатратами на постановку экспериментов, а расчетно-экспериментальные способы учитывают только конструктивные факторы, влияющие на процесс. Анализ показал необходимость разработки усовершенствованной расчетно-экспериментальной методики назначения режимов ТВО в пропарочной камере с учетом влияния процессов тепло- и массообмена.

При описании процессов тепло- и массообмена исследуемое изделие с достаточной точностью можно рассматривать как неограниченную пластину (рис. 1).

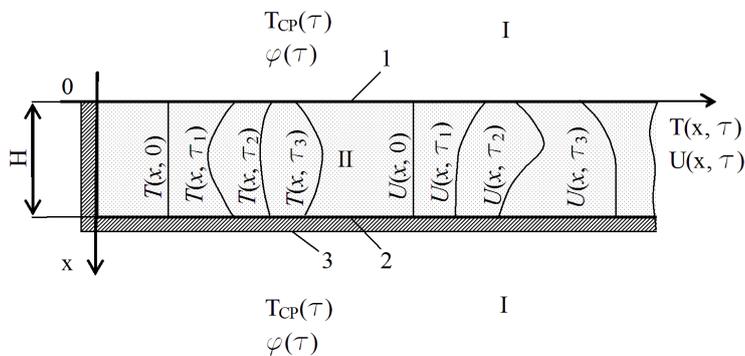


Рисунок 1 - Расчетная схема бетонного изделия:
 I - паровая или паровоздушная среда; II - бетонное изделие; 1 - открытая поверхность, 2 - закрытая поверхность; 3 - форма; $T(x, \tau)$, $U(x, \tau)$ - температура и влагосодержание по сечению изделия в момент времени τ ; $T_{cp}(\tau)$, $\varphi(\tau)$ - температура и относительная влажность паровоздушной среды в момент времени τ ;
 H - толщина изделия

Анализ имеющихся в литературе решений краевых задач тепло- и массопереноса для неограниченной пластины, на которых должен базироваться расчет перепадов температуры и влагосодержания по сечению изделия, показал, что получение точных аналитических решений с учетом внутренних источника теплоты и стока влаги, несимметричных граничных условий конвективного тепло- и массообмена 3-го рода с переменными коэффициентами переноса, в настоящее время является трудноразрешимой задачей.

С постоянными коэффициентами переноса такие решения получены, но характеризуются сложностью используемого математического аппарата и привязкой к условиям конкретной задачи, поэтому применение таких решений в инженерных расчетах ограничено. В то же время численно-аналитические решения указанных краевых задач могут быть получены с применением "зонального" метода, разработанного С.П. Рудобаштой и метода "микропроцессов", разработанного С.В. Федосовым, и усовершенствованного В.А. Зайцевым. Комбинирование данных методов позволяет свести нелинейную задачу к задаче с постоянными коэффициентами переноса.

Установлено, что применительно к исследованию процесса ТВО с целью разработки методики расчета тепловых режимов обработки сплошных плоских изделий из бетона или железобетона, постановка краевой задачи тепло- и массопереноса в неограниченной пластине с учетом внутренних источника теплоты и

стока влаги за счет реакций гидратации цемента, несимметричных граничных условий конвективного тепло- и массообмена 3-го рода с переменными коэффициентами переноса, и решение такой задачи не проводилось. На основании анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе установлено, что определяющими при рассмотрении тепловых режимов обработки будут свойства системы процесса ТВО в пропарочной камере. На основе системного анализа построена структурная схема данной системы (рис. 2) и структурные схемы подсистем (процессов теплообмена, процессов массообмена, процессов твердения цемента). Для каждой выделенной подсистемы составлено математическое описание процессов.

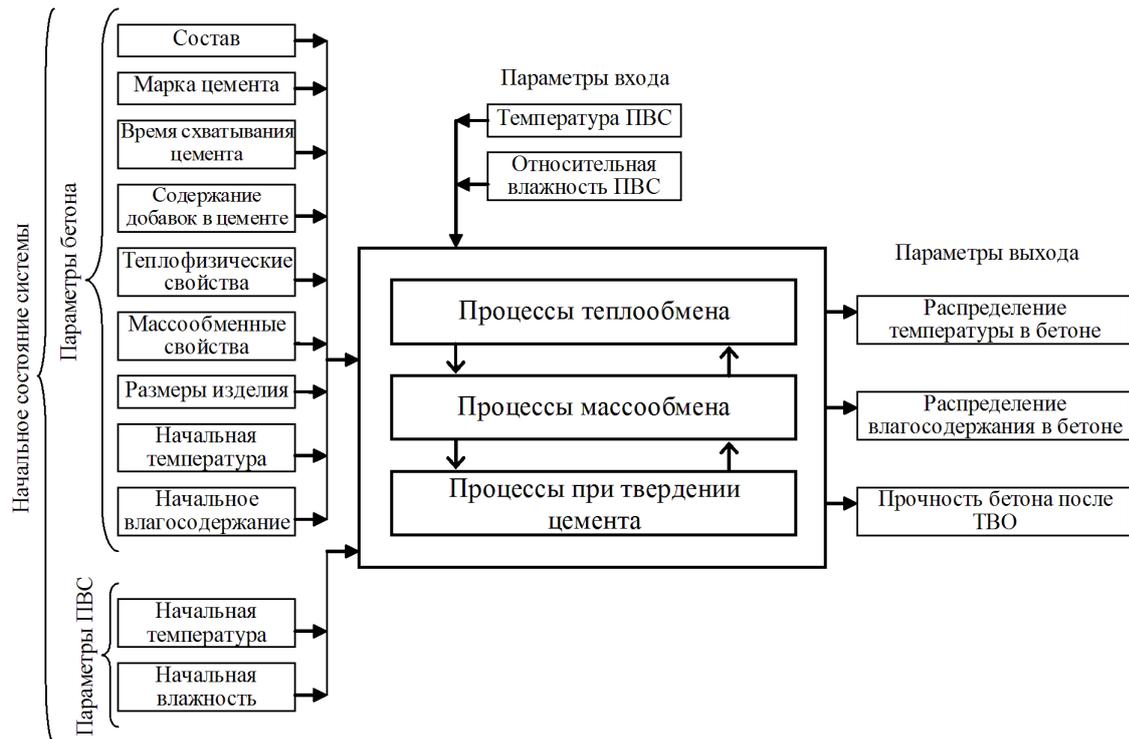


Рисунок 2 - Структурная схема системы процесса ТВО в пропарочной камере

Математическое описание процессов внутреннего теплообмена в изделии (рис. 1) представлено дифференциальным уравнением теплопроводности в одномерной постановке:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a(\bar{T}, \bar{U}) \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{C}{c\rho} \cdot \frac{\partial Q(x, \tau)}{\partial \tau}, \tau \geq 0, 0 \leq x \leq H, \quad (1)$$

начальным и граничными условиями:

$$T(x, 0) = T_0 = const, \quad (2)$$

$$-\lambda(\bar{T}, \bar{U}) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(\tau) \Big|_{x=0} [T(x, \tau) \Big|_{x=0} - T_{CP}(\tau)], \quad (3)$$

$$-\lambda(\bar{T}, \bar{U}) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=H} = \alpha(\tau) \Big|_{x=H} [T(x, \tau) \Big|_{x=H} - T_{CP}(\tau)], \quad (4)$$

где T - температура, К; x - координата, м; τ - время, с; a - коэффициент температуропроводности, м²/с; $\bar{T}(\tau)$, $T_{CP}(\tau)$ - средняя по сечению изделия температура и

температура паровоздушной среды в момент времени τ , соответственно, К; \bar{U} - среднее по сечению изделия влагосодержание бетона, кг/кг; Π - удельный расход цемента в бетоне, кг/м³; c - удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·К); ρ - плотность бетона, кг/м³; $Q(x, \tau)$ - тепловыделение цемента в момент времени τ , Дж/кг; T_0 - начальная температура бетона, К; H - толщина изделия, м; λ - коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·К); $\alpha(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи в момент времени τ , Вт/(м²·К).

Математическое описание процессов внутреннего массообмена в изделии (рис. 1) представлено дифференциальным уравнением диффузии в одномерной постановке:

$$\frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 U(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{K\Pi}{\rho} \cdot \frac{\partial Q(x, \tau)}{\partial \tau}, \tau \geq 0, 0 \leq x \leq H, \quad (5)$$

начальным и граничными условиями:

$$U(x, 0) = U_0 = B / (\Pi + \Sigma) = const, \quad (6)$$

$$a_m \rho \left. \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha'(\tau) \varphi(\tau) \left[\rho_{в.н}(T_{CP}(\tau)) - \rho_{в.н}(T(x, \tau)|_{x=0}) \right], \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=H} = 0, \quad (8)$$

где U - влагосодержание, кг/кг; a_m - коэффициент диффузии влаги в бетоне, м²/с; K - коэффициент пропорциональности, (кг/кг)/(Дж/кг); U_0 - начальное влагосодержание бетона, кг/кг; Π , Σ , B - удельные расходы мелкого заполнителя, крупного заполнителя и воды в бетоне, соответственно, кг/м³; $\alpha'(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи в зависимости от времени, м/с; $\varphi(\tau)$ - относительная влажность паровоздушной среды в момент времени τ , доли ед.; $\rho_{в.н}$ - плотность водяного пара, кг/м³.

На значение влагосодержания бетона как капиллярно-пористого тела введено ограничение

$$U_{\min} = U_p \leq U \leq U_{\max}. \quad (9)$$

В качестве минимального влагосодержания U_{\min} использована равновесная влажность бетона U_p . Максимальное влагосодержание U_{\max} определялось экспериментально по стандартной методике.

В рамках анализа различных видов уравнений для описания тепловыделения при твердении цемента в течение цикла ТВО и прочности бетона при сжатии предпочтение отдано достаточно простым имитационным моделям А.В. Ушерова-Маршака, которые наиболее близки к физике описываемых процессов:

$$\begin{aligned} Q(\tau) &= Q_{28} \left[1 - \exp(-k_Q \tau^{n_Q}) \right], \\ R(\tau) &= R_{28} \left[1 - \exp(-k_R \tau^{n_R}) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где $Q(\tau)$, Q_{28} - тепловыделение при гидратации цемента в момент времени τ и в возрасте 28 суток; k_Q , k_R , n_Q , n_R - эмпирические коэффициенты, зависящие от

температуры; $R(\tau)$, R_{28} - прочность бетона при сжатии в момент времени τ и в возрасте 28 суток, МПа.

Зависимости коэффициентов k_Q и n_Q от температуры получены методом наименьших квадратов по литературным данным о кинетике тепловыделения портландцемента различных марок.

Коэффициенты k_R и n_R определены по литературным данным при температуре 18 °С. Вместо времени τ в формуле (10) предложено использовать суммарное приведенное время твердения, зависящее от температуры твердения бетона.

Алгоритм численного решения математического описания процессов тепло- и массообмена реализован в виде программы в системе Mathcad. Для решения применялся метод конечных разностей (прогонка).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований режимов ТВО в ямной пропарочной камере, работающей на ОАО «Завод железобетонных изделий и конструкций» г. Череповца.

Данная пропарочная камера используется для ТВО фундаментных блоков и плит перекрытий в паровоздушной среде. Размеры камеры: 14,5×5,0×3,0 м, высота наземная части – 1,8 м. Использован термосный режим пропаривания, принятый на предприятии: 3 + 5 + 8 = 16 ч, где 3 ч – предварительная выдержка, 5 ч – подъем температуры, 8 ч – термосное охлаждение, при скорости нагрева и охлаждения 14 и 6,5 °С/ч, соответственно.

Исследование температурных полей выполнено на образце-блоке с размерами 59×39×26 см, который подвергался ТВО в промышленной ямной пропарочной камере, в следующей последовательности: приготовление бетонной смеси; укладка бетонной смеси в форму; отбор бетонной смеси для определения прочности по контрольным образцам и укладка смеси в лабораторные формы; уплотнение бетонной смеси; установка форм в пропарочной камере; монтаж термопар в бетоне; замер температуры в характерных точках внутри и на поверхности образца в течение ТВО; распалубка образцов; определение массы, размеров, плотности и прочности при сжатии контрольных образцов после обработки.

В промышленном эксперименте для измерения температуры в изделии использовались хромель-копелевые термопары типа ТХК и многоканальный измеритель температуры типа МИТ-12 ТП.

Получены экспериментальные данные по динамике температуры в характерных точках образца в процессе его ТВО (рис. 3).

Выявлены нарушения технологического режима:

- скорость нагрева бетона на поверхности изделия неравномерная и в начале периода подогрева превышает нормативное значение (20 °С/ч) в 1,4 раза, что вызывает большие перепады температуры по сечению изделия;
- поверхностные слои образца в конце периода подогрева нагреваются до 100 °С, что создает опасность вскипания воды, резкого увеличения ее объема в порах бетона и, как следствие, разрыхления поверхностных слоев.

В результате бетон не набирает требуемой прочности: прочность образцов после ТВО меньше проектной на 13 %, а прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут меньше проектной на 4 %.

Для обеспечения проектных значений относительной прочности бетона при сжатии (70 %), скорости нагрева бетона на поверхности и максимальной температуры в изделии предложено сокращение длительности периода подогрева с 5 ч до 4 ч, при одновременном восстановлении линейного характера нагрева, начальной температуры бетона и температуры предварительной выдержки до проектных значений (25 °С и 30 °С соответственно), что позволит при практически такой же, как в базовом режиме скорости подъема температуры среды в камере (13,7 °С/ч), снизить максимальную скорость нагрева бетона на поверхности до 16,1 °С/ч, т.е. в 1,15 раза по сравнению со значением этого показателя в используемом режиме. Тем самым снижается риск развития разрушений в поверхностных слоях изделия.

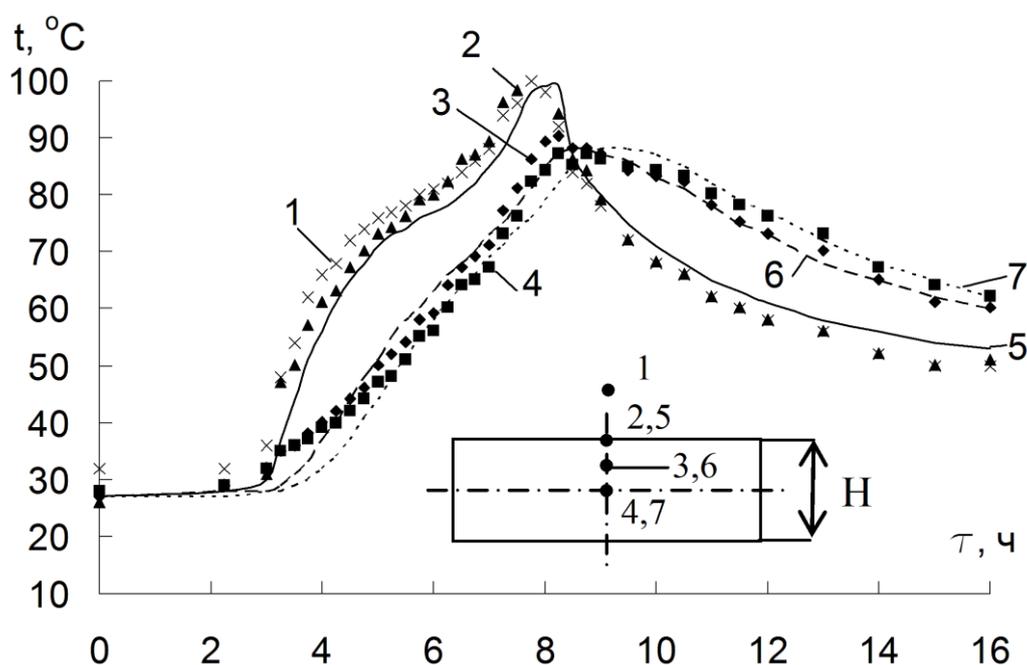


Рисунок 3 - Динамика температуры среды (1) и температуры в характерных точках образца (2-7): 2-4 - эксперимент; 5-7 - расчет

Для сохранения длительности цикла обработки, равной 16 ч, предлагается увеличить длительность термосной выдержки с 8 до 9 ч.

Для снижения максимальной температуры в изделии необходимо снизить температуру термосного разогрева до 85 °С, тогда максимальная температура бетона в изделии будет 80,3 °С.

Для обеспечения скорости снижения температуры среды в камере, равной 3,9 °С/ч, рекомендуется провести мероприятия по улучшению тепловой изоляции агрегата.

После ТВО изделия необходимо выдержать в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями или принять меры по укрытию поверхностей влагонепроницаемыми материалами с целью уменьшения усадки, приводящей к образованию трещин в изделиях.

На основе экспериментальных данных по температурным полям выполнена адаптация модели теплообмена, целью которой было получение для коэффициента теплопроводности значения эмпирического коэффициента адаптации k_λ , подстановка которого в математическое описание процессов теплообмена, позволяет рассчитать температурное поле в образце с минимальной погрешностью относительно экспериментальных данных.

Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных по разработанной модели (рис. 3), при их расхождении, не превышающем $\pm 10\%$, позволяет считать модель адекватной физике процесса.

Исследование полей влагосодержаний в твердых пористых телах вызывает трудности методического характера, поэтому в работе использован весовой метод, позволяющий изучить динамику среднего влагосодержания. Результаты исследований представлены на рис. 4. На основе рассчитанных по модели значений влагосодержания $U(x, \tau)$ определено среднее по сечению образца влагосодержание $\bar{U}(\tau)$ по уравнению:

$$\bar{U}(\tau) = \frac{1}{H} \int_0^H U(x, \tau) dx.$$

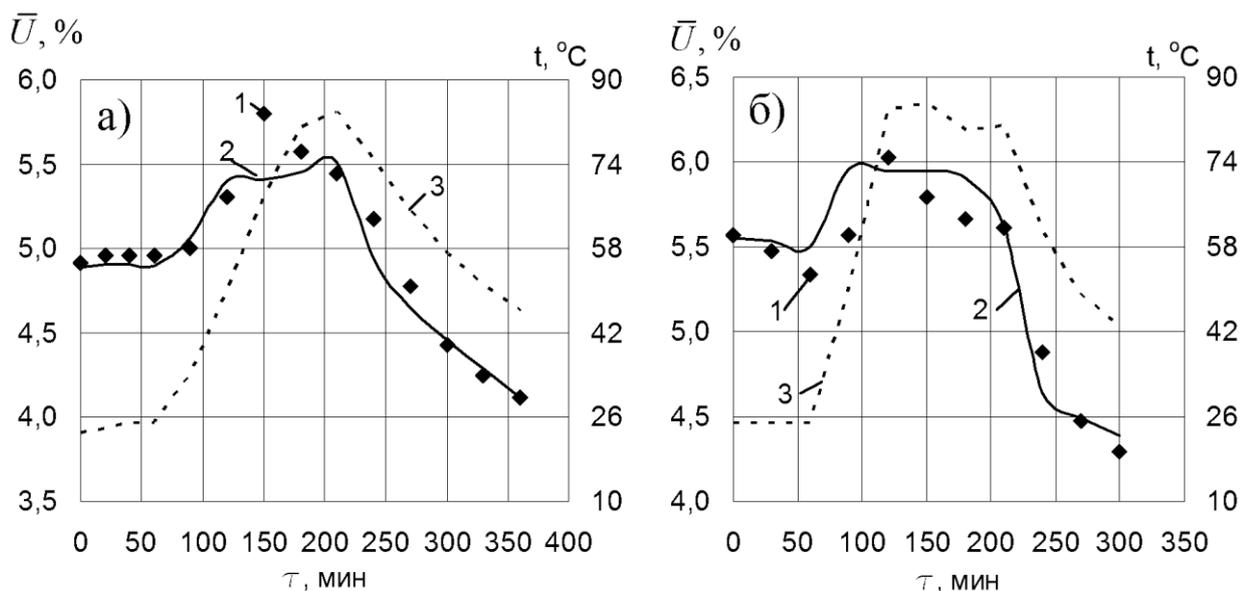


Рисунок 4 - Динамика среднего влагосодержания \bar{U} образца (1 - эксперимент; 2 - расчет) и температуры среды t (3) в процессе ТВО по режиму: а - без выдержки; б - с изотермической выдержкой

Сравнение экспериментальных и расчетных данных (рис. 4) показало, что расхождение между ними не превышает $\pm 7\%$, что находится в пределах погрешности средств измерения (10 %).

В четвертой главе даны результаты расчетных исследований зависимости перепадов температуры и влагосодержания от параметров режима, соотношения начального и максимального влагосодержаний, марки цемента, толщины изделия. Установлено влияние этих факторов на перепады температуры и влагосодержания по сечению изделия. Примеры расчета температурного поля в изделии при одинаковой длительности ТВО, равной 16 ч, но разных режимах обработки: с

изотермической и термосной выдержкой, – приведены на рис. 5, а поля влагосо-
 держания – на рис. 6.

Перепад температуры между открытой поверхностью и центром изделия че-
 рез 9 ч после начала обработки в режиме с изотермической выдержкой (рис. 5, а)
 больше в 4,3 раза, чем в режиме с термосной выдержкой (рис. 5, б), а непосред-
 ственно перед выгрузкой изделий из пропарочной камеры – в 2 раза.

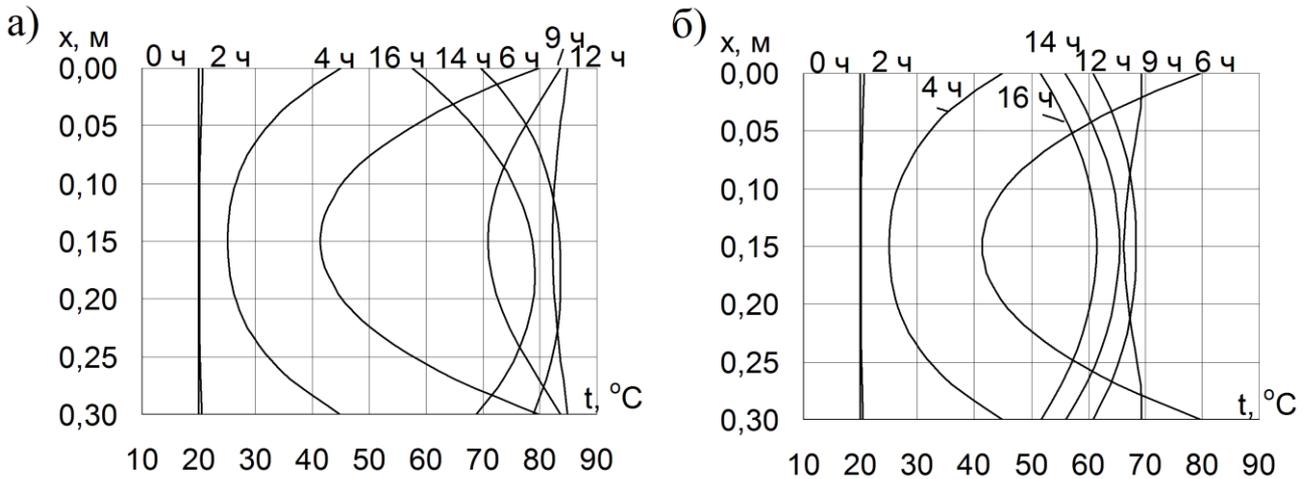


Рисунок 5 - Динамика температуры в процессе ТВО в разные моменты
 времени от начала цикла обработки по режиму:
 а - изотермическому 2+4+6+4 (ч); б - термосному 2+4+10 (ч)

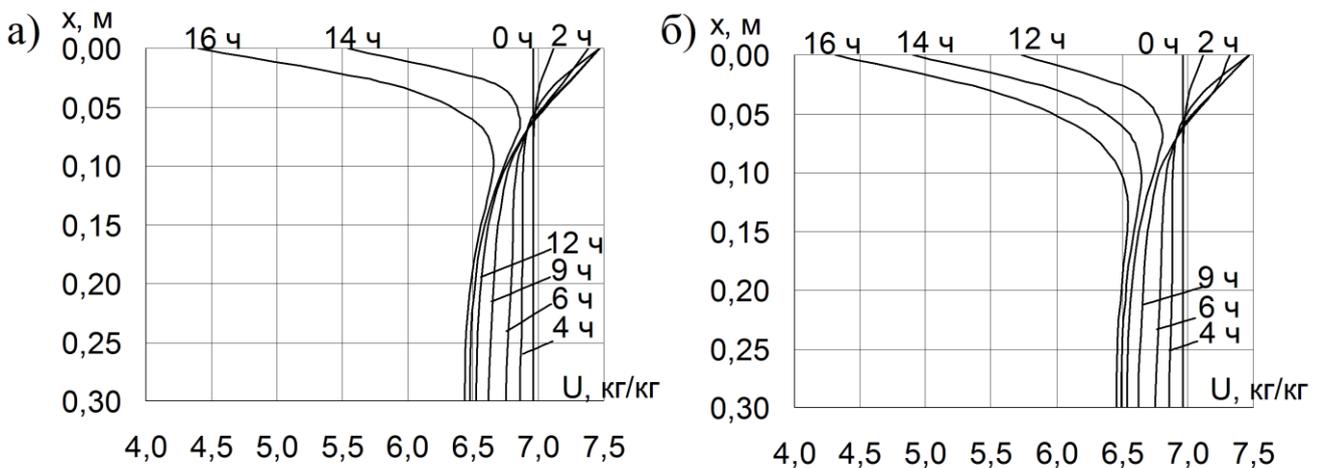


Рисунок 6 - Динамика влагосодержания в процессе ТВО в разные моменты
 времени от начала цикла обработки по режиму:
 а - изотермическому 2+4+6+4 (ч); б - термосному 2+4+10 (ч)

Неравномерное распределение температуры приводит к неравномерному ро-
 сту прочности по сечению изделия, то есть внутренние слои изделия набирают
 меньшую прочность, чем поверхностные.

Перепад температуры между закрытой поверхностью и средой при распа-
 лубке в случае режима с изотермической выдержкой и последующим интен-
 сивным охлаждением в 1,2 раза превышает нормативный (40 °С). При термосной вы-
 держке этот перепад находится в пределах нормативного значения.

Для режимов с изотермической выдержкой только в период охлаждения
 (рис. 5, а) наблюдается явное несимметричное параболическое распределение

температур по сечению изделия, в периоды предварительной выдержки, подогрева и изотермической или термосной выдержки распределение температуры практически симметричное. Это можно объяснить тем, что значения коэффициентов теплоотдачи для открытой и закрытой поверхности изделия примерно равны друг другу. Таким образом, в данном случае термосный режим более предпочтителен, чем режим с изотермической выдержкой.

Для анализа полей влагосодержания изделие условно разделено на 2 зоны: верхнюю (от открытой поверхности до центральной плоскости изделия) и нижнюю (от центральной плоскости до закрытой поверхности). Перепад влагосодержания в нижней зоне изделия незначителен (рис. 6). Отклонение от параболического характера распределения влагосодержания, наблюдаемого в период подогрева, происходит в периоды изотермической и термосной выдержки и, при большой толщине изделия, – в период охлаждения.

Неравномерное распределение влагосодержания вызывает направленное движение влаги к открытой поверхности, что повышает пористость верхних слоев изделия. Непосредственно перед выгрузкой изделий из пропарочной камеры распределение влагосодержания для режимов с изотермической выдержкой и термосным охлаждением практически одинаковое.

На основе анализа полей температуры и влагосодержания получены зависимости для расчета средней по сечению температуры при ее несимметричном параболическом распределении и среднего по сечению влагосодержания при его непараболическом распределении:

$$\bar{t} = \frac{2}{3}t_{Ц} + \frac{1}{6}t_s + \frac{1}{6}t_{s'}, \quad (11)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{6}U_s + \frac{5}{6}U_{Ц}, \quad (12)$$

где $t_{Ц}$, t_s , $t_{s'}$ - температура в центре, на открытой и закрытой поверхности изделия, соответственно, °С; U_s , $U_{Ц}$ - влагосодержание на открытой поверхности и в центре изделия, соответственно, кг/кг.

Указанные зависимости могут быть использованы для расчета удельного расхода теплоты на нагрев бетона, количества поглощаемой и испаряющейся в процессе влаги. Зависимость (12) позволяет оценить влагосодержание, которое установится в изделии после его ТВО при выдерживании в условиях, исключающих испарение влаги из изделия (укрытие поверхности влагонепроницаемыми материалами).

Разработана методика инженерного расчета температуры, влагосодержания и их средних по сечению изделия значений при его ТВО, которая основывается на математической модели процессов тепло- и массообмена, включающих уравнения (1)-(9). Для упрощения расчетов по методике для термосных режимов обработки составлены номограммы, на которых даны зависимости безразмерных температуры и влагосодержания в периоды подогрева и термосной выдержки от отношения U_0/U_{\max} и определяющих критериев Предводителя Pd , Фурье теплового Fo и массообменного Fo_m . Для расчета средних температуры и влагосодержания в методике используются зависимости (11) и (12), а при симметричном

распределении температуры по сечению изделия – известная формула:

$$\bar{t} = \frac{2}{3}t_{ц} + \frac{1}{3}t_{с}.$$

Определены сечения изделия (табл. 1), между которыми возникают максимальные перепады температуры и влагосодержания. При расчетах по методике в этих сечениях определяются температура и влагосодержание, а далее рассчитывается перепад.

Таблица 1 - Характерные сечения изделия, в которых рассчитываются температура и влагосодержание при оценке их перепадов

Период ТВО	Температура			Влагосодержание		
	открытой поверхности	центра	закрытой поверхности	открытой поверхности	центра	закрытой поверхности
Подогрев	+	+	-	+	+	+
Изотермическая выдержка	+	+	-	+	+	+
Охлаждение	+	+	+	+	+	-
Термосная выдержка	+	+	-	+	+	-

Примечание. "+" необходим расчет, "-" расчет не требуется

Выполнены расчетные исследования динамики перепадов температуры и влагосодержания между открытой поверхностью и центром изделия и установлено, что максимальные перепады в массивных изделиях (толщиной 0,2 м и более) возникают ближе к окончанию соответствующего периода ТВО, в изделиях малой толщины – ближе к середине периода.

В пятой главе представлена усовершенствованная методика расчета режимов ТВО изделий, основанная на определении в характерные моменты времени ТВО в характерных сечениях изделия температуры и влагосодержания и их перепадов между сечениями. Методика отличается от известных тем, что кроме влияния температуры учитывается еще и влияние влагосодержания.

На основании проведенного в данной работе исследования сформулированы рекомендации по совершенствованию режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах.

1) Для назначения параметров режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделиях в пропарочных камерах следует руководствоваться не только данными экспериментальной поверки параметров, но и расчетами по разработанной математической модели процессов тепло- и массообмена. Это позволит снизить энергозатраты на постановку и проведение экспериментов и сократить длительность процедуры назначения параметров режимов ТВО.

2) Для каждого вида заполнителя бетона следует проводить лабораторные эксперименты по определению значений коэффициентов модели.

3) Для изделий, у которых прогнозируется усадка бетона в поверхностных слоях, следует предусмотреть увлажнение поверхностей, выдержку до заданного срока в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями, укрытие поверхностей влагонепроницаемыми материалами или переход к более без-

опасным термосным или комбинированным режимам обработки, где перепады влагосодержания менее значительны.

4) Для снижения перепадов влагосодержания по сечению изделий рекомендуется использовать цементы низких марок при одинаковом удельном расходе, или снижать расход цемента заданной марки, но при условии обеспечения требуемой прочности. Также рекомендуется снижение отношения U_0/U_{\max} до 0,9, т.е. сокращение расхода воды в бетонной смеси на 10 %, снижение температуры изотермической выдержки или применение термосных режимов со сниженной температурой термосного разогрева.

5) Начальная температура бетонной смеси по-разному влияет на перепады температуры и влагосодержания. Повышение начальной температуры бетонной смеси уменьшает перепад температуры, но увеличивает перепад влагосодержания. Таким образом, необходимо проводить процедуру оптимизации этого параметра.

6) Методика рекомендована для расчета изотермических и термосных режимов ТВО сплошных плоских изделий из тяжелых и легких конструктивных бетонов на основе портландцементов марок М200 – М600 с активными минеральными добавками и без них, формируемых в стальных формах с открытым верхом (плит перекрытий, дорожных плит, стеновых панелей, стеновых блоков, лестничных площадок, бортовых камней и др.) и обрабатываемых в ямных и вертикальных пропарочных камерах.

Оценка экономической эффективности предлагаемых в диссертации энергосберегающих технологических разработок, реализуемых на ОАО «Завод железобетонных изделий и конструкций» г. Череповца (табл. 2), показала, что проект можно считать экономически выгодным.

Таблица 2 – Техничко-экономические показатели производства и интегральные критерии экономической эффективности капитальных вложений

Показатель (критерий)	Значение
Годовая производительность, м ³ /год	622,2
Чистые денежные потоки в расчетный период, тыс. руб/год	49,82
Норма дисконта, доли ед.	0,15
Срок службы проекта, лет	7
Капиталовложения, тыс. руб	93,6
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб	113,69
Индекс доходности инвестиций	2,2
Внутренняя норма прибыли, доли ед.	0,50
Дисконтированный срок окупаемости, лет	2,4
Средний за срок службы проекта годовой экономический эффект, тыс. руб / год	32,04

За счет корректировки параметров технологического режима достигается сокращение удельного расхода тепловой энергии на ТВО с 0,657 ГДж/м³ пропариваемого бетона до 0,517 ГДж/м³, т.е. на 27 %, что эквивалентно снижению себестоимости плит на 32,20 руб/м³, т.е. на 0,7 %. Установлено, что при использовании предлагаемой методики в подготовке производства новой продукции происходит снижение затрат времени на подготовку производства в 1,5 раза, затрат электроэнергии на проведение экспериментов – в 2,36 раза, и увеличение годового экономического эффекта – на 3,8 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных источников показал, что известные методики назначения режимов ТВО базируются на экспериментальном подборе и проверке параметров в лабораторных и промышленных условиях, что характеризуется значительными энергорасходами и трудозатратами. В то же время альтернативу экспериментальным методикам составляют расчетные, основанные на математических моделях процессов тепло- и массообмена. Такие методики нашли применение в технологиях отдельных строительных материалов и изделий (дисперсных, листовых, рулонных), но еще недостаточно широко применяются на практике для расчета параметров режимов ТВО бетонных и железобетонных изделий.

2. Разработана математическая модель процессов тепло- и массообмена в пропарочной камере, отличающаяся учетом внутренних объемных источника теплоты и стока влаги за счет реакций гидратации цемента, несимметричных граничных условий конвективного тепло- и массообмена 3-го рода (для массообмена – смешанными 3-го и 2-го рода) с переменными коэффициентами теплопроводности бетона, тепло- и влагоотдачи. Модель позволяет рассчитать одновременно распределение температуры и влагосодержания в изделии в течение ТВО и дает возможность изучить влияние параметров процесса (длительности обработки, скорости нагрева и охлаждения, толщины изделия, температуры среды) на температуру и влагосодержание, а также их перепады между сечениями изделия.

3. На основе математической модели разработана методика инженерного расчета и программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющие определить динамику температуры, влагосодержания и их средних значений по сечению сплошного плоского бетонного и железобетонного изделия, что дает возможность прогнозирования в изделии перепадов температуры и влагосодержания, важных при назначении режимов ТВО.

4. Экспериментально выявлено, что режим ТВО бетонных блоков, применяемый на ОАО "Завод железобетонных изделий и конструкций" (г. Череповец), не обеспечивает требуемой прочности изделий вследствие нарушений режима нагрева, выражающихся в превышении допустимой температуры и скорости нагрева, развитии больших перепадов температуры по сечению образца. Даны рекомендации по совершенствованию режима ТВО, которые позволят снизить максимальную скорость нагрева бетона на поверхности в 1,15 раза, максимальную температуру бетона в изделии до 80,3 °С. Рекомендовано провести мероприятия по улучшению тепловой изоляции агрегата, а после ТВО – изделия выдерживать в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями или принимать меры по укрытию поверхностей влагонепроницаемыми материалами.

5. Получено экспериментальное подтверждение правильности математической модели тепло- и массообмена. Общность математического описания дает возможность применить разработанную математическую модель, методику инженерного расчета и программно-алгоритмическое обеспечение для моделирования, расчета процессов тепло- и массообмена и назначения режимов ТВО других видов бетона, при условии определения для них коэффициентов переноса, а также других видов изделий, форма которых отлична от неограниченной пластины, при соответствующей доработке моделей, методики и алгоритмов их реализации.

6. Расчетными исследованиями динамики перепадов температуры и влагосо-

держания между открытой поверхностью и центром изделия установлено, что характерным моментом времени, в который возникают максимальные перепады температуры и влагосодержания, для массивных изделий является момент окончания соответствующего периода ТВО, в изделиях малой толщины – половина длительности периода ТВО. Определены сечения изделия, между которыми возникают максимальные перепады температуры и влагосодержания, в этих сечениях должны быть рассчитаны температура и влагосодержание. Получены аналитические зависимости для расчета средних по сечению изделия температуры и влагосодержания.

7. Установлено, что перепады температуры и влагосодержания между открытой поверхностью и центром изделия в периоды подъема температуры среды и охлаждения (термосной выдержки) определяются, в основном, скоростью подъема (снижения) температуры среды в камере, толщиной изделия, длительностью периода и начальной температурой бетона, а перепады влагосодержания, кроме того, определяются температурой изотермической выдержки, соотношением начального и максимального влагосодержания (для бетонов со сниженным расходом воды) и маркой цемента. В период изотермической выдержки влияние всех исследованных факторов на перепады влагосодержания сохраняется, а на перепады температуры – незначительное.

8. Разработана усовершенствованная расчетно-экспериментальная методика расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделиях, которая может использоваться при проектировании режимов ТВО в ямных и вертикальных пропарочных камерах. Определены области практического применения методики. Даны рекомендации по назначению режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах.

9. Проведен экономический анализ предлагаемых энергосберегающих разработок, реализуемых на ОАО "Завод железобетонных изделий и конструкций" (г. Череповец). Установлено, что за счет корректировки параметров действующего технологического режима достигается сокращение удельного расхода тепловой энергии на ТВО в 1,27 раза, что эквивалентно снижению себестоимости плит на 0,7 %. Чистый дисконтированный доход составляет 113,69 тыс. руб при сроке окупаемости 2,4 года. За счет использования предлагаемой методики при подготовке производства новой продукции достигается снижение затрат времени на подготовку производства в 1,5 раза, затрат электроэнергии на проведение экспериментов – в 2,36 раза, и увеличение годового экономического эффекта – на 3,8 %.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК Минобрнауки России

1. **Аксенчик, К.В.** Исследование тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловой обработке / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 4. – С. 63-67.
2. **Аксенчик, К.В.** Моделирование термо- и влагонапряженного состояния бетонов при их тепловлажностной обработке в пропарочных камерах / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – № 7. – С. 27-31.

3. **Аксенчик, К.В.** Исследование динамики влагосодержания бетона в процессе тепловлажностной обработки / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков, М.Ю. Белозор // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 3. – Т. 1. – С. 5-8.
4. Шестаков, Н.И. Методика расчета термо- и влагонапряженного состояния бетонных плит, подвергаемых тепловлажностной обработке / Н.И. Шестаков, **К.В. Аксенчик** // Строительные материалы. – 2012. – № 11. – С. 77–80.

Публикации в других изданиях

5. **Аксенчик, К.В.** Математическое моделирование как основной способ устранения недостатков тепловой обработки бетона / К.В. Аксенчик // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «Современные промышленные технологии». – Н. Новгород: ННИМЦ “Диалог”, 2008. – С. 32.
6. **Аксенчик, К.В.** Математическая модель тепло- и массообмена в бетонах на шлаковом щебне при несимметричных граничных условиях / К.В. Аксенчик // Информационно-вычислительные технологии и их приложения. IX Международная научно-техническая конференция: сборник статей. – Пенза: РИО ПГСХА. – 2008. – С. 7-10.
7. **Аксенчик, К.В.** Математическая модель внутреннего тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловлажностной обработке / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Вестник Череповецкого государственного университета. Экономические и технические науки. – 2008. – №4. – С. 141-144.
8. **Аксенчик, К.В.** Оценка энергетической эффективности тепловых установок для ускоренного твердения бетонов на шлаковых заполнителях / К.В. Аксенчик // Материалы XI Межвузовской заочной научно-практической конференции молодых ученых. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – С. 100-103.
9. **Аксенчик, К.В.** Моделирование энергосберегающих режимов тепловой обработки / К.В. Аксенчик // Аспирантские тетради – 2010: Сборник научных статей. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – С. 132-137.
10. **Аксенчик, К.В.** Моделирование энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонов / К.В. Аксенчик // Материалы второй Всероссийской научно-технической конференции «Экспертиза и оценка риска техногенных систем-2010». – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – С. 5-7.
11. **Аксенчик, К.В.** Моделирование режимов тепловлажностной обработки бетонов на шлаковом щебне / К.В. Аксенчик // Труды Четвертой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011». – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2011. – С. 176-184.
12. **Аксенчик, К.В.** Моделирование и расчет энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетонов / К.В. Аксенчик // Молодые исследователи – регионам: материалы Всероссийской научной конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – Т.1. – С. 242-244.
13. **Аксенчик, К.В.** Математическое моделирование термонапряжений в твердеющих бетонных плитах / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Ученые записки Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 78-80.
14. **Аксенчик, К.В.** Анализ температурных полей и термонапряжений в бетонных плитах при тепловлажностной обработке / К.В. Аксенчик // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы седьмой международной научно-технической конференции. – Вологда: ВГТУ. – 2012. – С. 38-41.

15. **Аксенчик, К.В.** Математические модели процессов тепло- и массообмена и напряженного состояния при тепловлажностной обработке бетона / К.В. Аксенчик // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: Сборник материалов I Международной научно-практической конференции.* – Новосибирск: Издательство НГТУ. – 2012. – С. 120-126.
16. **Аксенчик, К.В.** Комплексная методика назначения режимов тепловлажностной обработки бетона / К.В. Аксенчик // *Материалы VI ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых по отраслям наук.* – Т. 1. Технические науки. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – С. 248-255.
17. **Аксенчик, К.В.** Энергосбережение при назначении режимов тепловлажностной обработки бетона / К.В. Аксенчик // *Инновационное развитие территорий: Материалы 1-й Международной (заочной) конференции (26 – 28 февраля 2013 г.).* – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 31-33.
18. **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: Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции.* – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВЛГТА», 2014. – № 3. – Ч. 1. – С. 204–211.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617851 «Программа для моделирования и расчета процесса тепловлажностной обработки сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий и назначения режимов их тепловлажностной обработки». Правообладатель: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». Авторы: **Аксенчик К.В.**, Шестаков Н.И. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05 августа 2014 г.

АКСЕНЧИК Константин Васильевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 15.10.2014 Формат 60×84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,00.

Тираж 100 экз. Заказ № 745

ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5.

Отпечатано в издательстве ЧГУ