

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 692.23:697.137

ЛЕШКЕВИЧ
Владимир Владимирович

**ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОС
В НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ
СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

ПРОТАСЕВИЧ Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

ДАНИЛЕВСКИЙ Леонид Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, первый заместитель директора Государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.»;

НОВОСЕЛЬЦЕВ Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции УО «Брестский государственный технический университет»

Оппонирующая организация

УО «Полоцкий государственный университет»

Защита состоится «11» января 2019 г. в 16 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202; тел. ученого секретаря (+375 17) 265-64-21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « 4 » декабря 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

П. И. Дячек

© Лешкевич В. В., 2018

© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Наружные ограждающие конструкции являются одним из важнейших элементов обеспечения внутреннего микроклимата и энергосбережения в зданиях. Поиск способов повышения их теплозащитных характеристик приводит к использованию новых материалов и сложных конструктивных решений. Часто характеристики теплозащиты материалов и влажностный режим таких конструкций являются мало изученными. Расчет их рекомендуемыми в нормативной документации методами не всегда возможен, либо даёт ошибочные результаты, что приводит к потере конструкциями своих качеств в процессе эксплуатации.

Стремление к снижению сроков строительства часто приводит к запариванию строительной и технологической влаги материалов наружных ограждений. Следствием этого является разрушение материалов конструкций в первые годы эксплуатации.

С увеличением влажности материалов снижаются их теплозащитные характеристики, поэтому контроль и прогнозирование температурно-влажностного состояния материалов наружных стен является одним из важнейших факторов в обеспечении снижения теплопотерь зданиями.

Периодические климатические воздействия с повторяющимися оттепелями и заморозками, характерные для Республики Беларусь, влияют на долговечность ограждающих конструкций. Знание влажностного состояния материалов наружных стен в процессе многолетней эксплуатации позволяет прогнозировать их долговечность и экономическую целесообразность применения той или иной конструкции до начала строительства.

Решение перечисленных вопросов невозможно без совершенствования методов расчета тепловлажностного режима, исследования характеристик влагопереноса строительных материалов, а также наблюдений за влажностным состоянием материалов наружных стен эксплуатируемых зданий. Данному направлению в исследованиях ограждающих конструкций зданий и посвящена настоящая работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема работы соответствует программам «Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика: энергобезопасность и энергосбережение» (пункт 1) и «Промышленные и строительные технологии и

производство: перспективные строительные технологии, конструкции, материалы» (пункт 3) приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22.04.2015.

Результаты работы использовались в процессе исследований в рамках Государственной программы научных исследований на 2016–2018 годы «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии 8.26», подпрограмма «Строительные материалы», задания ГБ 16-145 «Разработка программного обеспечения и алгоритмов проведения технологических процессов производства строительных конструкций на основе текущего контроля теплофизических свойств материалов с выдачей конечных показателей по качеству выпускаемой продукции».

В рамках диссертации выполнена научно-техническая работа «Выполнение теплотехнических исследований образцов ячеистого бетона плотностью 400 и 500 кг/м³ производства ОАО «Забудова» при различных значениях влажности», результаты которой использованы РУП «Институт БелНИИС» в рамках исследований по теме «Провести исследования климатической стойкости и тепловлажностного режима наружных стен из ячеистого бетона и разработать Рекомендации по отделке наружных стен из ячеистого бетона и Рекомендации по расчету и конструированию армированных конструкций из ячеистого бетона автоклавного твердения» (25-ИФН/13), выполненных по заданию Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь.

Цель и задачи исследования

Цель работы – исследование температурно-влажностного состояния и теплофизических свойств материалов наружных стен современных зданий для прогнозирования их эксплуатационных характеристик и долговечности.

Объект исследований – материалы и конструкции наружных стен зданий в условиях эксплуатации. Предметом исследований являются перенос теплоты и влаги в конструкциях наружных стен отапливаемых зданий, а также тепловлажностное состояние материалов наружных стен зданий в процессе эксплуатации.

Задачи исследования:

- провести экспериментальные исследования тепловлажностного состояния наружных стен эксплуатируемых зданий в натуральных условиях и выявить причины превышения фактической влажности строительных материалов над расчётными значениями;
- по результатам натуральных исследований составить физико-математическую модель тепловлагопереноса и разработать компьютер-

ные программы для расчёта полей температуры и влажности наружных ограждающих конструкций зданий;

- выполнить экспериментальные исследования характеристик тепло- и влагопереноса строительных материалов, необходимых для практического применения математической модели и компьютерных программ;

- на основе полученных данных выполнить прогнозирование температурно-влажностного состояния и долговечности наружных стен реальных объектов.

Научная новизна работы:

- получены новые экспериментальные данные по значениям термодиффузионных коэффициентов влагопереноса и теплопроводности автоклавного ячеистого бетона в гидротермической области увлажнения при отрицательной температуре образцов, что позволило выполнить расчёты полей температуры и влажности ограждающих конструкций при сверхсорбционном увлажнении материалов на начальном этапе эксплуатации;

- усовершенствована методика проведения экспериментальных исследований коэффициентов потенциалопроницаемости влагопереноса по способу двухсторонней сушки, отличающаяся проведением сушки образцов над поверхностью концентрированной серной кислоты, что позволило определить искомые параметры в сорбционной зоне увлажнения при низкой влажности материалов;

- разработаны алгоритм и компьютерная программа на основе метода конечных элементов для расчёта совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в наружных ограждениях, отличающиеся применением экспериментального потенциала влагопереноса в области отрицательных температур, что позволило, с использованием полученных экспериментальных данных по коэффициентам переноса, выполнить прогнозирование полей температуры и влажности в сорбционной и сверхсорбционной областях увлажнения в полном цикле эксплуатации ограждающей конструкции и определить сроки выхода материалов на расчётный влажностный режим;

- предложен способ определения долговечности наружных стен, основанный на феноменологическом методе С. В. Александровского, отличающийся применением результатов численного моделирования нестационарных полей температуры и влажности в многолетнем цикле эксплуатации, что позволяет определять долговечность на этапе проектирования не прибегая к длительным натурным исследованиям влажностного режима.

Положения, выносимые на защиту:

– совокупность результатов натурных исследований влажностного состояния наружных стен эксплуатируемых зданий и оценки сроков их выхода на квазистационарный тепловлажностный режим после выполнения дополнительной теплоизоляции;

– результаты экспериментальных исследований теплопроводности ячеистого бетона в гидротермической области увлажнения, равновесной сорбционной влажности ячеистого бетона и полимерно-цементной штукатурки, коэффициента потенциалопроводности влагопереноса ячеистого бетона и полимерно-цементной штукатурки, термоградиентного коэффициента влагопереноса ячеистого бетона, выполненных при положительной и отрицательной температуре образцов, что позволяет применять теорию изотермического потенциала влажности для прогнозирования тепловлажностного состояния современных ограждений в условиях эксплуатации;

– результаты численного решения задачи нестационарного совместного переноса теплоты и влаги в ограждениях и разработанная на его основе компьютерная программа расчёта полей температуры и влажности ограждающих конструкций, отличающиеся от известных использованием экспериментального потенциала влагопереноса в области отрицательных температур и применением метода конечных элементов, что позволяет выполнять расчеты при гидротермическом увлажнении материалов современных строительных узлов, имеющих малоразмерные элементы сложной конфигурации;

– способ определения долговечности на основе полученных путём численного моделирования данных о прогнозируемом тепловлажностном состоянии материалов в условиях эксплуатации, а также результаты расчёта тепловлажностного состояния и сушки наружных стен при многолетнем воздействии переменных условий окружающей среды.

Личный вклад соискателя

Работа выполнена автором в Белорусском национальном техническом университете под руководством кандидата технических наук, доцента А. М. Протасевича.

Натурные исследования влажностного состояния материалов наружных стен зданий проведены совместно с инж. А. Б. Крутилиным (РУП «Институт БелНИИС»), а также сотрудниками Научно-исследовательской и испытательной лаборатории строительной теплофизики и инженерных систем зданий Белорусского национального технического университета: ст. науч. сотр. Д. Д. Якимовичем, науч. сотр. Е. А. Черванёвой и др.

Исследования равновесной сорбционной влажности ячеистого бетона и полимерно-цементной штукатурки при температуре 18 °С, а также теплопроводности ячеистого автоклавного бетона при различной температуре и влажности проведены совместно с инж. А. Б. Крутилиным.

Остальные экспериментальные исследования ячеистого бетона и полимерно-цементной штукатурки, разработка математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ, а также расчёты выполнены автором самостоятельно.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались в рамках:

- Международных научно-технических конференций «Наука – образованию, производству, экономике» (научно-технических конференций профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) № 3–8 (2006–2010 гг.), № 10–15 (2012–2017 гг.);

- IV Международной практической конференции «Окна и фасады – 2011», Минск, 3 марта 2011 г.;

- Научно-практическом семинаре «Практика и проблемы проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых зданий в Республике Беларусь», Минск, 13–14 июля 2011 г.;

- Научно-практической конференции «Здания и сооружения из легких металлических конструкций», Минск, 22 августа 2013 г.;

- 8-й Международной научно-практической конференции «Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения», Минск-Могилёв, 11–13 июня 2014 г.

Опубликование результатов диссертации

По результатам работы опубликовано:

- шесть статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь (4,1 печатного листа);

- четыре статьи в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК при Минобрнауки России (2,7 печатного листа);

- одна статья в научном издании, соответствующем перечню Министерства образования и науки Украины (1,2 печатного листа);

- две статьи в научно-технических изданиях Республики Беларусь;

- 16 публикаций в сборниках материалов и тезисов по результатам научно-технических конференций.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, заключения, списка использованных источников и приложений.

Структурно-логическая схема работы представлена на рисунке 1.

Основная часть работы состоит из 5 глав.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по рассматриваемой теме и определены задачи исследований.

Вторая глава содержит описание результатов натурных исследований влажностного состояния материалов наружных стен зданий в процессе их эксплуатации в климатических условиях Республики Беларусь.

В третьей главе представлены математические уравнения, описывающие совместный перенос теплоты и влаги в наружных ограждениях зданий, вывод основных выражений для их численного решения по методу конечных элементов, а также алгоритмы и описание составленных компьютерных программ.

В главе 4 представлены результаты исследований характеристик тепловлагопереноса ячеистого автоклавного бетона, полимерно-цементной штукатурки и применяемого эталонного тела (фильтровальной бумаги).

В главе 5 показаны примеры практического использования результатов работы при анализе температурного режима узлов сопряжения ограждающих конструкций, прогнозировании тепловлажностного состояния и долговечности наружных стен зданий в процессе эксплуатации.

Объём диссертации составляет 173 страницы, в том числе основная часть 109 страниц. Основная часть содержит 49 рисунков и 1 таблицу. Список использованных источников имеет 203 позиции.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** диссертации представлен обзор литературных источников по исследуемой тематике и их критический анализ. Изучены подходы к описанию влажностного состояния капиллярно-пористых материалов и их применение к области строительной теплофизики (работы П. А. Ребиндера, А. В. Лыкова, В. Г. Гагарина и др.). Рассмотрены методы расчёта тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий: К. Ф. Фокина, В. Н. Богословского, А. В. Лыкова, В. Г. Гагарина, А. Г. Перехоженцева (СССР и Россия); К. Kießl и Н. М. Künzel (Германия); А. N. Karagiozis, J. E. Braun и Z. Zhong (США) и др. Исследованы возможности существующего программного обеспечения для расчёта тепловлажностного режима наружных ограждений.



Рисунок 1. – Структурно-логическая схема работы

В части анализа методов определения характеристик влагопереноса строительных материалов изучены методы К. Ф. Фокина, В. Г. Гагарина, А. В. Лыкова, А. Г. Перехоженцева, Е. И. Тертичника и др. Рассмотрены методы расчета изотерм сорбции строительных материалов. Выполнен обзор результатов натурных исследований тепловлажностного состояния наружных ограждающих конструкций зданий, выполненных Б. Ф. Васильевым, А. П. Васьковским, сотрудниками НИИСФ (г. Москва), Института им. Фраунхофера (Германия) и др.

По результатам анализа сформулированы задачи диссертации и следующие требования к методу прогнозирования тепловлажностного состояния ограждающих конструкций: возможность расчёта двух- и трёхмерных полей температуры и влажности; учёт нестационарного режима эксплуатации ограждений; возможность расчёта крупных узлов сопряжений конструкций; относительная простота определения исходных коэффициентов; возможность расчёта сложных современных конструкций.

Во **второй главе** диссертации представлены результаты выполненных натурных исследований влажностного состояния материалов наружных стен зданий. Установлено, что эксплуатационная влажность теплоизоляционных материалов наружных стен жилых и общественных зданий значительно ниже расчётных массовых отношений влаги для условий эксплуатации Б, приведенных в нормативной документации. Полученные значения эксплуатационной влажности материалов близки к их равновесной сорбционной влажности при относительной влажности воздуха $\varphi = 75 \%$. Это подтверждает корректность подхода к выбору условий эксплуатации материалов, принятого в ТКП 45-2.04-43 и СТБ 1618.

Натурными исследованиями установлены случаи запираания технологической и строительной влаги внутри слоя кладки из ячеистого автоклавного бетона при его оштукатуривании полимерно-цементными составами.

Исследования влажностного состояния наружных стен со штукатурными системами с утеплителями из минеральной ваты и пенополистирола показали существенные различия в характере распределения влаги в первые годы эксплуатации. Уже первые месяцы эксплуатации утеплителя из минеральной ваты характеризуются более высокой влажностью вблизи наружного штукатурного слоя и её снижением по мере приближения к поверхности основной утепляемой конструкции. Начальный период эксплуатации штукатурных систем с теплоизоляцией из пенополистирола характеризуется максимальными значениями влажности утеплителя в слоях, примыкающих к основной утепляемой конструкции.

Исследования показали, что такой начальный период может продолжаться до трех лет и более в зависимости от влажностного состояния исходного ограждения и условий эксплуатации. В течение периода от четырёх до семи лет происходит перераспределение влаги в слое пенополистирола – в слоях материала, прилегающих к основной конструкции, наблюдаются более низкие, чем у прилегающих к наружной штукатурке слоёв, значения влажности.

В связи с тем, что сверхсорбционное увлажнение материалов ограждающих конструкций имеет место в условиях эксплуатации, при прогнозировании развития нестационарных температурно-влажностных полей в данном случае необходимы модели, учитывающие перемещение различных фаз влаги в ограждении. В работе использована модель на основе экспериментального потенциала влажности А. В. Лыкова.

В **третьей главе** диссертации представлено численное решение системы уравнений совместного переноса теплоты и влаги в ограждающих конструкциях с помощью метода конечных элементов.

При постановке задачи расчёта совместного тепло-влажностного переноса в ограждающих конструкциях, учитывая существующие результаты исследований, принято решение пренебречь влиянием фазовых переходов влаги на температурное поле ограждающей конструкции. Рассматриваемая система уравнений принимает вид

$$c_{T_M} \rho_M \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{T_M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{T_M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{T_M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$c_{m_M}(\theta, T) \rho_M \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{m_M}(\theta, T) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{m_M}(\theta, T) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{m_M}(\theta, T) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + W_T \quad (2)$$

с граничными условиями III рода на поверхностях ограждений:

$$\alpha_{T_S} (T(\tau)_{\text{пов}} - T(\tau)_{\text{ср}}) = -\lambda_{T_M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (3)$$

$$\alpha_{\theta_S} (\theta(\tau)_{\text{пов}} - \theta(\tau)_{\text{ср}}) = -\lambda_{m_M}(\theta, T) \frac{\partial \theta}{\partial n} + \lambda_{m_M}(\theta, T) \delta_{\theta_M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4)$$

где c_{T_M} – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C);

ρ_M – плотность материала, кг/м³;

λ_{T_M} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

T – искомая функция температуры, °C;

α_{T_S} – коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м²·°C);

$T(\tau)_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды, °C;

$T(\tau)_{\text{пов}}$ – температура поверхности ограждения, °C;

$c_{mM}(\theta, T)$ – удельная влагоёмкость, (кг/кг)/°M;
 $\lambda_{mM}(\theta, T)$ – коэффициент влагопроводности, кг/(м·с·°M);
 θ – искомая функция потенциала влагопереноса, °M;
 $\alpha_{\theta S}$ – коэффициент влагоотдачи поверхности, кг/(м²·с·°M);
 $\theta(\tau)_{\text{ср}}$ – потенциал влажности окружающей среды, °M;
 $\theta(\tau)_{\text{пов}}$ – потенциал влажности поверхности ограждения, °M;
 $\delta_{\theta M}(\theta, T)$ – термоградиентный коэффициент, °M/°C;
 M, S – индексы, обозначающие соответственно номера материала и поверхности фрагмента конструкции;
 W_T – слагаемое, учитывающее термоградиентный поток влаги:

$$\begin{aligned}
 W_T = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{mM}(\theta, T) \delta_{\theta M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{mM}(\theta, T) \delta_{\theta M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\
 + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{mM}(\theta, T) \delta_{\theta M}(\theta, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (5)
 \end{aligned}$$

Граничные условия IV рода на стыках материалов имеют вид по температуре (T) и тепловому потоку (q):

$$T_1(\tau) = T_2(\tau), \quad q_1(\tau) = q_2(\tau); \quad (6)$$

по потенциалу влагопереноса (θ) и потоку влаги (j_m):

$$\theta_1(\tau) = \theta_2(\tau), \quad j_{m1}(\tau) = j_{m2}(\tau). \quad (7)$$

Начальные условия приняты в виде известных значений искомых функций T и θ в любой точке рассматриваемой области:

$$T(x, y, z, \tau = 0) = T_0(x, y, z); \quad \theta(x, y, z, \tau = 0) = \theta_0(x, y, z). \quad (8)$$

Для численного решения использован метод конечных элементов, основанный на вариационном принципе Лагранжа. На языке Python автором разработаны компьютерные программы для расчета двух- и трёхмерных полей температуры и влажности ограждающих конструкций. Алгоритм программы тепловлажностного расчета представлен на рисунке 2.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию характеристик переноса тепла и влаги в строительных материалах. Представлены результаты исследования коэффициента теплопроводности образцов ячеистого автоклавного бетона в сверхсорбционной области увлажнения при положительной и отрицательной температуре.

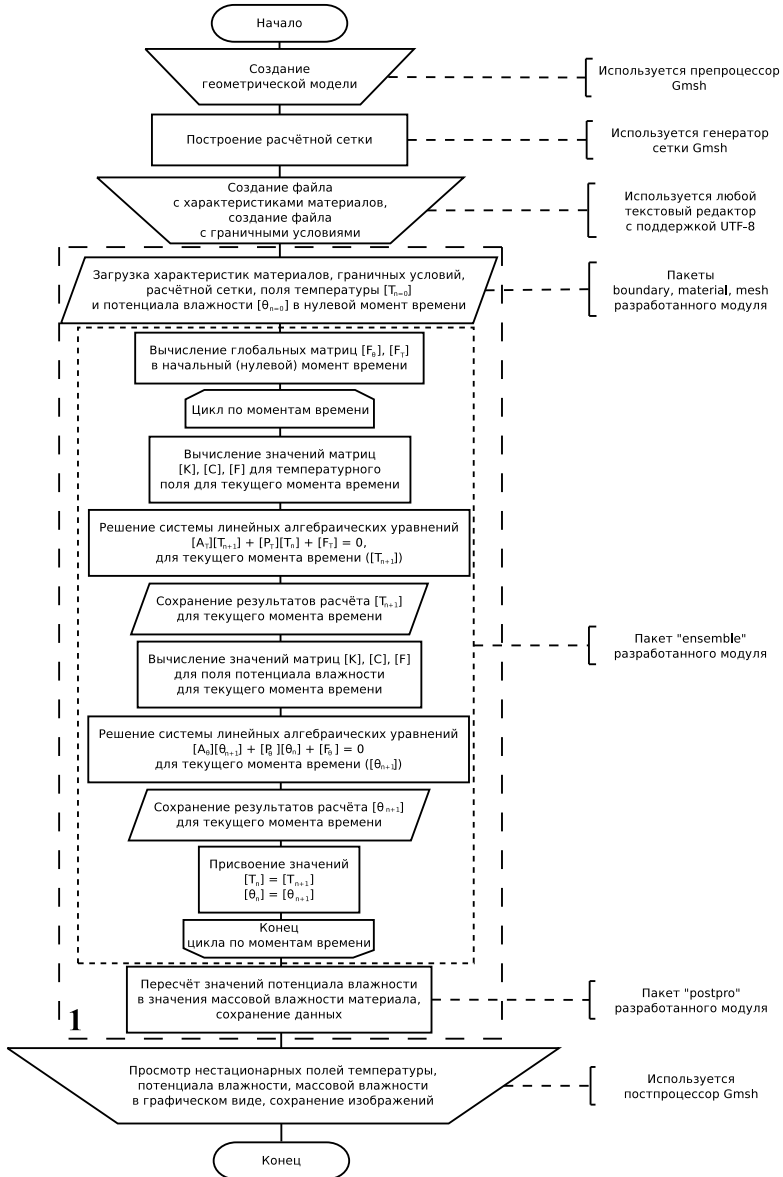
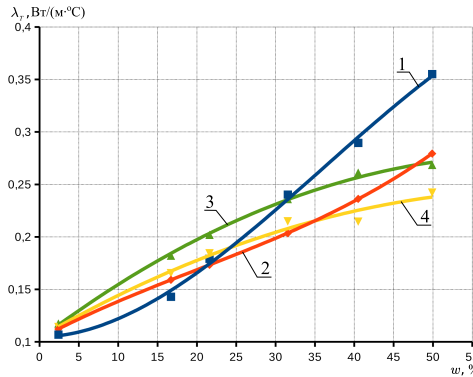


Рисунок 2. – Алгоритм расчёта нестационарных полей температуры и влажности

Работы выполнялись на установке «NETZSCH HFM 436 Lambda», соответствующей требованиям СТБ 1618. Полученные данные для ячеистого автоклавного бетона плотностью 400 кг/м^3 представлены на рисунке 3. Результаты исследования показывают, что коэффициент теплопроводности образцов увеличивается с ростом значения влажности по массе w . До некоторого значения w в диапазоне от 20 до 30 %, зависимость близка к линейной. С ростом влажности зависимость при положительных температурах принимает вид кривой, обращенной выпуклостью вверх, а при отрицательных температурах приобретает вид S-образной кривой.



Данные эксперимента при: ■ — $t = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$; ◆ — $t = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; ▲ — $t = +19,4 \text{ } ^\circ\text{C}$; ▼ — $t = +9,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$1: \lambda_T(w) = -1,687 \cdot 10^{-6} \cdot w^3 + 1,825 \cdot 10^{-4} \cdot w^2 + 7,826 \cdot 10^{-5} \cdot w + 0,1046, \quad R^2 = 0,9974;$$

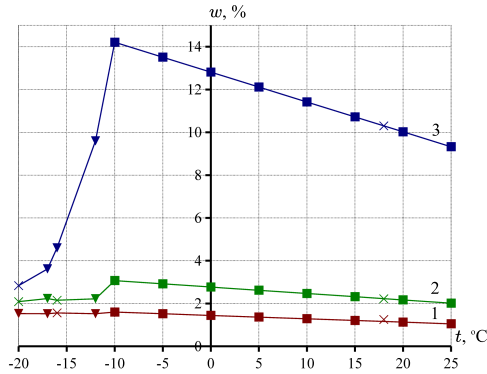
$$2: \lambda_T(w) = 8,974 \cdot 10^{-7} \cdot w^3 - 5,438 \cdot 10^{-5} \cdot w^2 + 4,017 \cdot 10^{-3} \cdot w + 0,1029, \quad R^2 = 0,9999;$$

$$3: \lambda_T(w) = -3,303 \cdot 10^{-5} \cdot w^2 + 4,326 \cdot 10^{-3} \cdot w + 0,1043, \quad R^2 = 0,9978;$$

$$4: \lambda_T(w) = -4,532 \cdot 10^{-5} \cdot w^2 + 5,636 \cdot 10^{-3} \cdot w + 0,1028, \quad R^2 = 0,9816$$

Рисунок 3. – Значения теплопроводности ячеистого автоклавного бетона плотностью 400 кг/м^3 при различной влажности (по массе) и температуре

Для применения экспериментального потенциала влажности в области отрицательных температур необходимы данные по сорбционным характеристикам материалов и эталонного тела при этих условиях. Из проведенного анализа экспериментальных данных следует, что в диапазоне температур от $-10,4$ до $+35 \text{ } ^\circ\text{C}$ изобары сорбции строительных материалов и эталонного тела (фильтровальной бумаги) имеют вид, близкий к прямой линии. Исследования автора и данные других работ показали, что при температуре ниже $t = -10,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ наблюдается снижение равновесной сорбционной влажности. В работе в диапазоне t от $-10,4$ до $+35 \text{ } ^\circ\text{C}$ использованы рассчитанные по изотерме сорбции (при $+18 \text{ } ^\circ\text{C}$) значения равновесной влажности. Равновесная влажность при $t < -10,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ принималась по данным эксперимента и расчётов (рисунок 4).



1 – $\varphi=40\%$; 2 – $\varphi=80\%$; 3 – $\varphi=97\%$

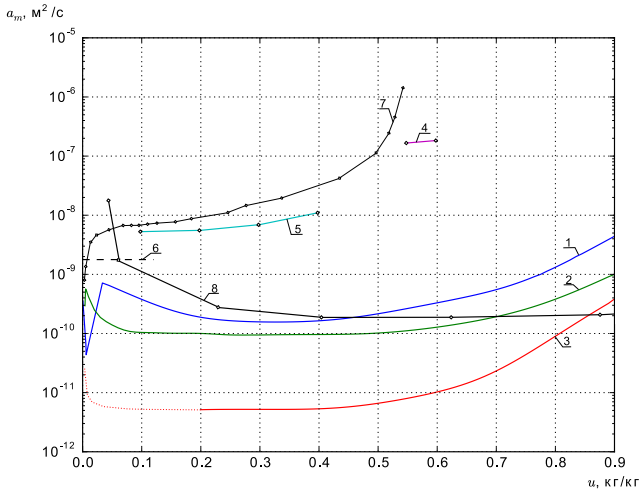
■ – расчёт по методу Л. Б. Цимерманиса; ▼ – расчёт по методу А. Е. Пассе;
× – по данным эксперимента

Рисунок 4. – Изобары сорбции ячеистого автоклавного бетона

Автором экспериментально определены значения коэффициентов потенциалопроводности влагопереноса a_m ячеистого автоклавного бетона и полимерно-цементной штукатурки при различной температуре. Использовался метод двухсторонней сушки, причём сушка образцов производилась в эксикаторах над поверхностью концентрированной серной кислоты, что дало преимущества по сравнению с сушкой в условиях воздушной среды лаборатории.

Так как парциальное давление водяного пара над концентрированной 96 % серной кислотой близко к нулю в широком диапазоне температур, сушка образцов в эксикаторах даёт возможность получать коэффициенты a_m в более широком диапазоне влажности. Кроме того, благодаря высокой разности потенциалов влагопереноса воздуха и исследуемого материала, ускоряется сушка образца, а также устраняется воздействие конвективных токов, присутствующих в помещении. По результатам построены кривые изменения коэффициента a_m от влажности. На рисунке 5 представлены зависимости для образцов ячеистого автоклавного бетона, сопоставленные с данными из других источников.

Из полученных результатов следует, что a_m уменьшается со снижением температуры. В диапазоне влажностей материалов, соответствующих равновесным значениям при φ от 30 до 55 % наблюдается снижение a_m и последующий его рост с уменьшением влажности материала, что связано с образованием (разрушением) плёнок воды на поверхности пор материалов.



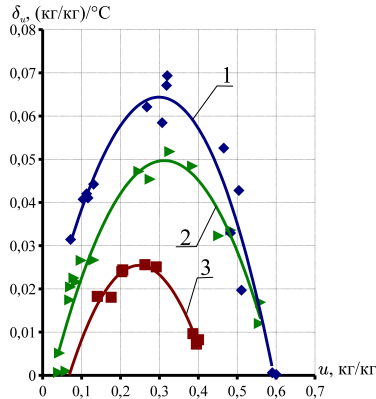
Получены в настоящей работе: 1 – при $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – при $t=6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – при $t=-21\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – по методу А. В. Лыкова при $t=22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из других источников: 5 – данные А. В. Лыкова при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 6 – соответствует значению коэффициента паропроницаемости $\mu=0,23\text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$; 7 – данные А. Н. Стерлягова при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (метод пропитки образца); 8 – данные А. Г. Перехоженцева при комнатной температуре (метод сушки образца)

Рисунок 5. – Зависимости коэффициента a_m ячеистого автоклавного бетона плотностью 400 кг/м^3 от влажности

Анализ показал, что методы, основанные на сушке образца дают значения a_m более низкие, по сравнению с методами, основанными на пропитке. Установлено, что метод А. В. Лыкова, не смотря на снижение влажности образца в процессе опыта, даёт значения a_m близкие к полученным по методам с использованием пропитки.

Термоградиентный коэффициент δ_u определялся по стационарному способу. Постоянный перепад температур на противоположных гранях образцов обеспечивался прибором «NETZSCH HFM 436 Lambda». Исследования выполнялись на образцах ячеистого бетона в виде призм высотой 50 мм. Распределение температуры в образцах определялось расчётом, распределение влажности – весовым методом после их разрезания на слои. Результаты представлены на рисунке 6. Максимальные значения δ_u наблюдаются при влажности от 25 до 35 % по массе.

В пятой главе диссертации представлены примеры использования результатов работы при расчётах долговечности наружных стен, а также их температурного и влажностного режима в стационарном и нестационарном режимах эксплуатации.



по данным эксперимента: ■ – при $t = +24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ◆ – при $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ▲ – при $t = -5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 1: $\delta_u(u) = -0,709 \cdot u^2 + 0,416 \cdot u + 3,726 \cdot 10^{-3}$, $R^2 = 0,9306$;
 2: $\delta_u(u) = -0,599 \cdot u^2 + 0,375 \cdot u - 8,951 \cdot 10^{-3}$, $R^2 = 0,9262$;
 3: $\delta_u(u) = -0,790 \cdot u^2 + 0,391 \cdot u - 0,023$, $R^2 = 0,9586$

Рисунок 6. – Экспериментальные значения δ_u ячеистого бетона плотностью 400 кг/м^3 при различной температуре и влажности образцов

Для углового сопряжения наружных стен из ячеистого бетона, оштукатуренных полимерно-цементным раствором (рисунок 7), выполнен расчёт долговечности по стойкости промерзающего слоя.

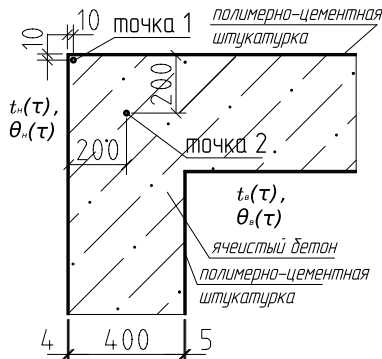
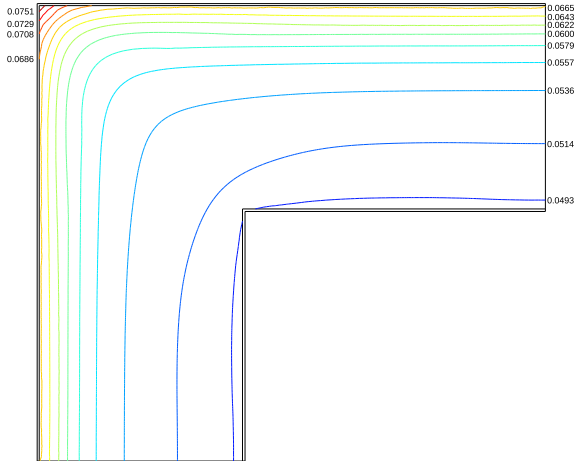


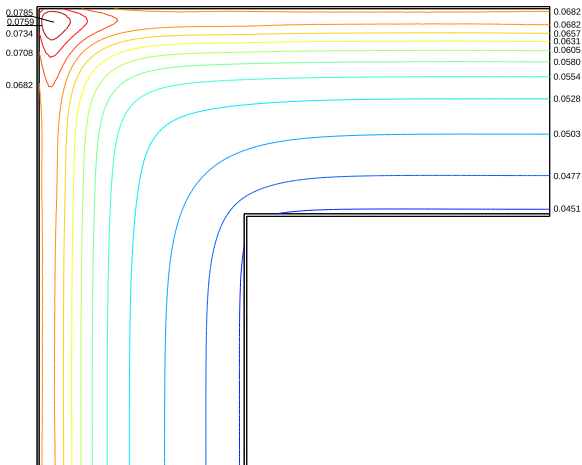
Рисунок 7. – Рассматриваемый фрагмент ограждающей конструкции

Применён метод С. В. Александровского, основанный на анализе влажности наружного промерзающего слоя материала конструкции, полученной в процессе многолетних натуральных наблюдений. В качестве данных наблюдений использованы результаты расчёта нестационарных полей температуры и влажности, полученные с помощью разработанной программы. При задании начальных условий приняты значения влаж-

ности материалов, соответствующие расчетным массовым отношениям влаги в материале при условиях эксплуатации Б по ТКП 45-2.04-43. Результаты расчета влагосодержания для отдельных моментов времени представлены на рисунках 8, 9.



**Рисунок 8. – Расчётные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона.
Момент времени 01.11.2006 21:00:00 (номер шага 991)**



**Рисунок 9. – Расчётные изолинии влагосодержания (кг/кг) ячеистого бетона.
Момент времени 02.04.2007 00:00:00 (номер шага 2198)**

Изменение влагосодержания и температуры в исследуемой точке 1 конструкции, отстоящей от наружных плоскостей угла на 10 мм (см. рисунок 7), сопоставленное со значениями температуры и относительной влажности наружного воздуха для одного года эксплуатации показано на рисунке 10 (данные для точки 2 рисунка 7 представлены в приложениях к диссертации). Полученное время эксплуатации 60 лет превышает минимальную продолжительность эффективной эксплуатации данного типа конструкций, которая составляет 30 лет.

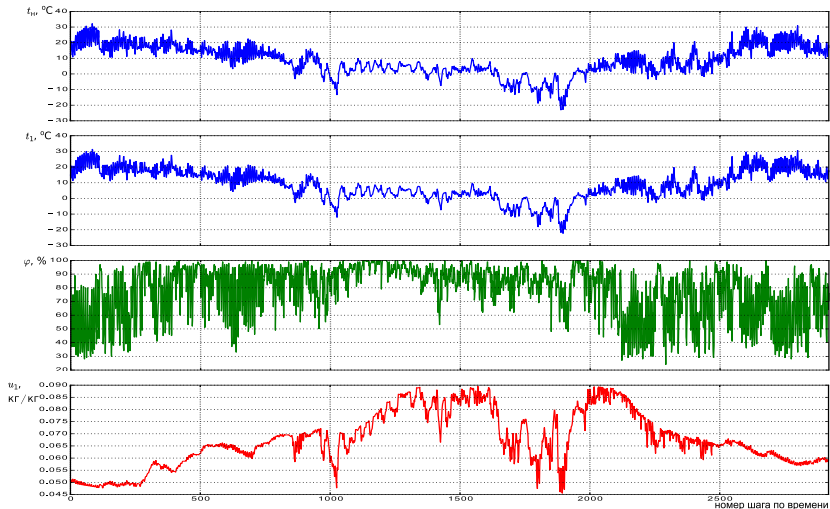
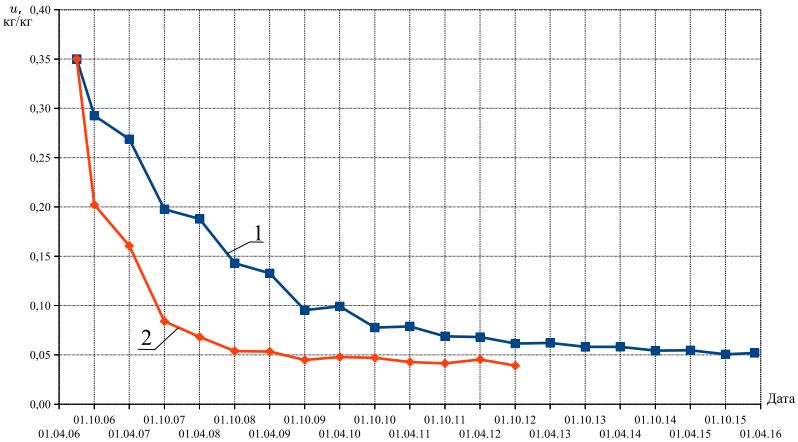


Рисунок 10. – Изменение значений температуры наружного воздуха t_n , относительной влажности наружного воздуха φ , температуры t_1 и влагосодержания u_1 в точке 1 во временном интервале от 01.07.2006 00:00:00 до 01.07.2007 18:00:00

Разработанная программа позволила выполнить расчёты нестационарного тепловлажностного режима (сушки) наружной стены из ячеистого бетона с наружной и внутренней штукатуркой полимерно-цементным раствором и без неё. На рисунке 11 показано изменение эксплуатационной влажности ячеистого бетона по состоянию на 1 октября и 1 апреля за период от 1.07.2006 до 29.02.2016 по результатам расчёта.

Из полученных данных следует, что при начальной влажности ячеистого бетона, равной 35 % по массе, выход материала на расчетные значения влажности по массе наблюдается после 9 лет эксплуатации. Одной из причин этого являются низкие значения коэффициентов потенциалопроводности влагопереноса применяемой штукатурки.



1 – со штукатуркой; 2 – без штукатурки
Рисунок 11. – Изменение эксплуатационной влажности ячеистого бетона по состоянию на 1 октября и 1 апреля за период с 1.07.2006 по 29.02.2016

При отсутствии штукатурных слоёв на поверхностях стены достижение расчётных значений эксплуатационной влажности наблюдается через три года. Данный срок соответствует имеющимся в литературе данным, полученным с помощью натуральных и стендовых исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены сроки выхода стен на квазистационарный тепловлажностный режим эксплуатации после выполнения на них штукатурных систем теплоизоляции. Для систем с использованием минеральной ваты продолжительность такого периода составляет до одного года, для систем с использованием пенополистирола – от 4 до 7 лет. Данные результаты позволяют обоснованно выбирать тип утеплителя с точки зрения обеспечения теплозащитных качеств и долговечности при выполнении тепловой модернизации существующих объектов, а также дают возможность оценки достоверности данных о влажностном состоянии материалов, получаемых расчётным путём [1, 5].

2. Получены новые экспериментальные данные по значениям коэффициентов теплопроводности автоклавного ячеистого бетона различной влажности в гидротермической области увлажнения при отрицательных температурах. Эти результаты позволяют выполнять детальный анализ температурных условий эксплуатации наружных стен, материалы кото-

рых находятся в переувлажнённом состоянии (что характерно для современных конструкций из ячеистого бетона), а также избавляют от необходимости внедрения температурных датчиков внутрь образца при исследовании термоградиентных коэффициентов влагопереноса [7, 8, 10].

Усовершенствована методика определения коэффициентов потенциалопроводности влагопереноса по способу двухсторонней сушки и получены их экспериментальные значения для ячеистого автоклавного бетона и полимерно-цементной штукатурки в области отрицательных и положительных температур. В отличие от существующей методики, сушка образцов проводится над поверхностью концентрированной серной кислоты, что позволяет определить коэффициенты потенциалопроводности влагопереноса при низких значениях влажности образцов [11].

Получены новые экспериментальные данные по значениям термоградиентных коэффициентов переноса влаги в автоклавном ячеистом бетоне при отрицательных температурах, величины которых до настоящего времени вычислялись только теоретически. Полученные данные позволяют выполнять прогнозирование полей температуры и влажности ограждающих конструкций при наличии температурного градиента в области отрицательных температур [11].

3. Численно решена задача совместного нестационарного переноса теплоты и влаги в наружных ограждениях. Полученное решение отличается использованием в области отрицательных температур экспериментального потенциала влагопереноса, который ранее апробирован в расчётах только при положительных температурах. Применение метода конечных элементов позволяет выполнять анализ современных ограждающих конструкций с высокой степенью детализации конструктивных элементов, имеющих малые размеры и сложную конфигурацию. Разработаны компьютерные программы для расчёта стационарных двух- и трёхмерных температурных полей, а также нестационарных двухмерных полей температуры и влажности ограждений в многолетнем цикле эксплуатации [2, 3, 4, 6, 9, 11].

4. Предложен способ определения долговечности наружных стен на основе результатов численного расчёта нестационарных тепловлажностных полей ограждений при воздействии переменных условий окружающей среды, позволяющий выполнить оценку срока эксплуатации на этапе проектирования не прибегая к многолетним натурным исследованиям. С помощью разработанной компьютерной программы и результатов экспериментальных исследований выполнено прогнозирование тепловлажностного состояния наружной стены из ячеистого бетона (с наружной и внутренней штукатуркой полимерно-цементными составами

и без неё) в процессе многолетней эксплуатации и установлены сроки выхода слоя ячеистого бетона на расчётный влажностный режим [11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные компьютерные программы использовались автором для решения практических задач анализа температурного и влажностного режима проектируемых и существующих ограждающих конструкций зданий при выполнении работ в Научно-исследовательской и испытательной лаборатории строительной теплофизики и инженерных систем зданий БНТУ (х/д № 5497/11с, 994/15с, 3315/16б). В рамках научно-технического сотрудничества с организациями созданное программное обеспечение внедрено в процесс проектирования при разработке вариантов улучшения теплотехнических характеристик наружных стен существующего охлаждаемого склада промышленного холодильника и легких стеновых панелей с повышенным уровнем теплозащиты для многоквартирного жилого дома. Акты и справки о внедрении представлены в Приложении Д к диссертации.

В связи с тем, что метод конечных элементов широко распространён в существующем программном обеспечении по расчёту прочностных параметров строительных конструкций, применяемая математическая модель и численное решение могут быть использованы для расширения возможностей этих программных комплексов в части выполнения расчётов нестационарных полей температуры и влажности. В дальнейшем это упростит внедрение модели в систему перспективного направления Building Information Modeling (BIM).

Результаты исследований теплопроводности образцов ячеистого автоклавного бетона в зависимости от влажности и температуры использованы РУП «Институт БелНИИС» при разработке рекомендаций по отделке наружных стен из ячеистого бетона Р 5.02.135.2014 (справка представлена в Приложении Д к диссертации).

Полученные характеристики теплопередачи строительных материалов могут быть использованы в проектной практике и исследованиях новых видов отделок стен из ячеистого бетона, не препятствующих удалению из него технологической влаги в первые годы эксплуатации.

Математическая модель и экспериментальные методы исследований, а также разработанные компьютерные программы и предложенный способ расчёта долговечности применимы для прогнозирования полей температуры и влажности в многолетнем цикле эксплуатации и долговечности наружных стен из других материалов.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в изданиях, включенных в перечни научных изданий Республики Беларусь, Российской Федерации и Украины для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Влияние защитного слоя в лёгких системах наружной теплоизоляции на влажностный режим стен зданий / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич, Д. Д. Якимович // Жилищное строительство. — 2006. — № 8. — С. 5–9.

2. Тепловая защита и тепловлажностное состояние ограждающих конструкций зданий промышленных холодильников / А. М. Протасевич, С. В. Сомова, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич // Строительная наука и техника. — 2011. — № 6(39). — С. 42–45.

3. Особенности тепловлажностного режима ограждающих конструкций промышленного холодильника / А. М. Протасевич, С. В. Сомова, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. — 2011. — № 7. — С. 216–221.

4. Протасевич, А. М. Расчет теплотехнических характеристик многослойных наружных ограждающих конструкций зданий / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС»; редкол.: М. Ф. Марковский, О. Н. Лешкевич, Н. П. Блещик [и др.]. — Минск, 2013. — № 5. — С. 199–211.

5. Протасевич, А. М. Влажностный режим наружных стен зданий в условиях Республики Беларусь / А. М. Протасевич, В. В. Лешкевич, А. Б. Крутилин // Жилищное строительство. — 2013. — № 9. — С. 37–40.

6. Протасевич, А. М. Расчет температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов / А. М. Протасевич, В. В. Лешкевич // Энергоэффективность. — 2013. — № 10. — С. 16–20.

7. Крутилин, А. Б. Некоторые результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей / А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич, Ю. А. Рыхлёнок // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС»; редкол.: О. Н. Лешкевич, Н. П. Блещик, П. В. Алявдин [и др.]. — Минск, 2014. — № 6. — С. 164–175.

8. Крутилин, А. Б. Теплофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий / А. Б. Крутилин, Ю. А. Рыхлёнок, В. В. Лешкевич // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — № 2. — С. 46–55.

9. Лешкевич, В. В. Расчет температурного поля и приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий с помощью метода конечных элементов / В. В. Лешкевич // Системный анализ и прикладная информатика. — 2015. — № 3. — С. 26–30.

10. Крутилин, А. Б. Некоторые результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий / А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич, Ю. А. Рыхлёнок // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. — Київ: Інформаційно-видавничий центр Товариство “Знання” України, 2015. — № 54. — С. 89–98.

11. Лешкевич, В. В. Тепловоголаперенос в ограждениях из ячеистого бетона со штукатурными слоями полимерно-цементными составами / В. В. Лешкевич, А. Б. Крутилин, А. М. Протасевич // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС»; редкол.: О. Н. Лешкевич, В. Н. Деркач, П. В. Алявдин [и др.]. — Минск, 2017. — № 9. — С. 325–342.

Статьи в научно-технических журналах

12. Протасевич, А. М. Влияние процессов переноса влаги на эксплуатационные качества наружной дополнительной теплоизоляции стен зданий / А. М. Протасевич, В. В. Лешкевич // Мастерская. Современное строительство. — 2007. — № 7(40). — С. 58–61.

13. Протасевич, А. М. Качество - залог долгой эксплуатации: теплоизоляционные материалы и ограждающие конструкции для быстровозводимых сооружений / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич // Мастерская. Современное строительство. — 2013. — № 5. — С. 132–133.

Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов

14. Теплотехнические характеристики стен зданий после выполнения дополнительной наружной теплоизоляции / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич, Д. Д. Якимович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 апр. 2006 г.: в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2006. — С. 117–119.

15. Протасевич, А. М. Влажностный режим стен панельных зданий после выполнения дополнительной наружной теплоизоляции /

А. М. Протасевич, В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 апр. 2007 г.: в 2 т. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Т. 1. – Минск, 2007. – С. 91–93.

16. Лешкевич, В. В. Разработка методики исследований тепловлажностных характеристик материалов, используемых для выполнения наружной теплоизоляции стен зданий / В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 апр. 2008 г.: в 3 т. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Т. 2. – Минск, 2008. – С. 26.

17. Лешкевич, В. В. Нестационарный температурный режим систем наружной теплоизоляции стен зданий / В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–15 апр. 2009 г.: в 3 т. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Т. 2. – Минск, 2009. – С. 40.

18. Лешкевич, В. В. Оценка долговечности легких штукатурных систем, используемых при теплоизоляции зданий / В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 апр. 2010 г.: в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Т. 1. – Минск, 2010. – С. 120.

19. Лешкевич, В. В. Некоторые аспекты долговечности штукатурных систем теплоизоляции / В. В. Лешкевич, А. М. Протасевич // IV международная практическая конференция «Окна и фасады 2011»: сб. тез., Минск, 3 марта 2011 г. / Отраслевые форумы – Минск, 2011. – С. 30–32.

20. Лешкевич, В. В. Особенности тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий с эффективным использованием энергии / В. В. Лешкевич, А. М. Протасевич // Научно- практический семинар «Практика и проблемы проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективных жилых зданий в Республике Беларусь»: инф. материалы, Минск, 13-14 июля 2011 г. / Институт НИПТИС им. Атаева С.С. – Минск, 2011. – С. 67–71.

21. Лешкевич, В. В. Особенности программной реализации и расчета полей температуры и влажности ограждающих конструкций / В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 апр. 2012 г.: в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Т. 1. – Минск, 2012. – С. 140.

22. Лешкевич, В. В. Особенности тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий с эффективным использованием теплоты / В. В. Лешкевич, Е. С. Калиниченко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 апр. 2012 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2012. — С. 141.

23. Лешкевич, В. В. Способы учета источников и стоков при расчете тепловлажностного режима ограждающих конструкций методом конечных элементов / В. В. Лешкевич, Е. А. Крушевский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 апр. 2013 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2013. — С. 139.

24. Протасевич, А. М. Теплотехнические характеристики легких стеновых панелей из пенополиуретана / А. М. Протасевич, Е. С. Калиниченко, В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 апр. 2013 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2013. — С. 140.

25. Лешкевич, В. В. Некоторые результаты определения коэффициентов теплопроводности массопереноса строительных материалов / В. В. Лешкевич, Е. А. Черванёва // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–17 апр. 2014 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2014. — С. 159.

26. Крутилин, А. Б. Некоторые результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и учёт их влияния на тепловлажностный режим наружных стен зданий / А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич, Ю. А. Рыхлёнок // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 8-й междунар. науч.-практ. конф., Минск-Могилев, 11-13 июня 2014 г. / редкол.: Н. П. Сажнев (отв. ред.) [и др.]. — Минск: Стринко, 2014. — С. 66–71.

27. Крутилин, А. Б. Метод определения коэффициента термовлагопроводности для прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций / А. Б. Крутилин, В. В. Лешкевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 апр. 2015 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.:

Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2015. — С. 179.

28. Лешкевич, В. В. К вопросу о проектировании слоистых конструкций наружных стен зданий с применением штучных материалов / В. В. Лешкевич, Е. А. Черванёва, Д. Д. Якимович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 апр. 2016 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2016. — С. 173.

29. Лешкевич, В. В. Определение равновесной сорбционной влажности строительных материалов при различных температурах / В. В. Лешкевич, А. Б. Крутилин, Е. А. Черванёва, Д. Д. Якимович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–12 апр. 2017 г.: в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б. М. Хрусталёв, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. — Т. 1. — Минск, 2017. — С. 183.

РЭЗІЮМЭ

Ляшкевіч Уладзімір Уладзіміравіч

Цеплавільгацэперанос у вонкавых агароджваючых канструкцыях сучасных будынкаў

Ключавыя словы: цеплавільготнасны рэжым вонкавых сцен, вільготнасць будаўнічых матэрыялаў, патэнцыял вільгацэпераносу, нестацыянарны рэжым пераносу цеплаты і вільгаці.

Мэта работы: даследаванне тэмпературна-вільготнаснага стану і цеплафізічных уласцівасцяў матэрыялаў вонкавых сцен сучасных будынкаў для прагназавання іх эксплуатацыйных характарыстык і даўгавечнасці.

Метады даследвання: адбор проб матэрыялаў вонкавых сцен будынкаў, вызначэнне вільготнасці вагавым метадам, эксперыментальныя метады даследвання сарбцыйнай вільготнасці і характарыстык вільгацэперносу будаўнічых матэрыялаў, вызначэнне цеплаправоднасці пры стацыянарным цеплавым рэжыме, метады канечных элементаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Лікава вырашана задача нестацыянарнага сумеснага пераносу цеплаты і вільгаці ў вонкавых сценах будынкаў. У вобласці дадатных і адмоўных тэмператур выкарыстаны эксперыментальны патэнцыял вільготнасці А. В. Лыкава. Распрацавана камп'ютарная праграма для разліку нестацыянарных палёў тэмпературы і вільготнасці матэрыялаў вонкавых агароджваючых канструкцый будынкаў. Атрыманы эксперыментальныя значэння каэфіцыентаў цеплаправоднасці аўтаклаўнага ячэйстага бетону пры рознай вільготнасці матэрыялу ў гідратэрмічнай вобласці ўвільгатнення пры дадатнай і адмоўнай тэмпературы. Вызначаны эксперыментальныя значэнні тэрмаградыентных каэфіцыентаў пераносу вільгаці ў аўтаклаўным ячэйстым бетоне пры адмоўнай тэмпературы. Выкананы разлікі нестацыянарных палёў тэмпературы і вільготнасці матэрыялаў вонкавых сцен.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі могуць быць выкарыстаныя пры праектаванні вонкавых агароджваючых канструкцый будынкаў, а таксама пры даследваннях іх цеплахоўных характарыстык і даўгавечнасці.

Галіна выкарыстання: будаўніцтва.

РЕЗЮМЕ

Лешкевич Владимир Владимирович

Тепловолагодперенос в наружных ограждающих конструкциях современных зданий

Ключевые слова: тепловлажностный режим наружных стен, влажность строительных материалов, потенциал влагопереноса, нестационарный режим переноса теплоты и влаги.

Цель работы: исследование температурно-влажностного состояния и теплофизических свойств материалов наружных стен современных зданий для прогнозирования их эксплуатационных характеристик и долговечности.

Методы исследования: отбор проб материалов наружных стен зданий, определение влажности весовым методом, экспериментальные методы исследования сорбционной влажности и характеристик влагопереноса строительных материалов, определение теплопроводности при стационарном тепловом режиме, метод конечных элементов.

Полученные результаты и их новизна. Численно решена задача нестационарного совместного переноса теплоты и влаги в наружных стенах зданий. В области положительных и отрицательных температур применён экспериментальный потенциал влажности А. В. Лыкова. Разработана компьютерная программа для расчёта нестационарных полей температуры и влажности материалов наружных ограждающих конструкций зданий. Получены экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности автоклавного ячеистого бетона при различной влажности материала в гидротермической области увлажнения при положительной и отрицательной температуре. Определены экспериментальные значения термоградиентных коэффициентов переноса влаги в автоклавном ячеистом бетоне при отрицательной температуре. Выполнены расчёты нестационарных полей температуры и влажности материалов наружных стен.

Рекомендации по использованию. Результаты могут быть использованы при проектировании наружных ограждающих конструкций зданий, а также при исследованиях их теплозащитных характеристик и долговечности.

Область применения: строительство.

SUMMARY

Liashkevich Uladzimir Uladzimiravich

Heat and moisture transfer in the external enclosing structures of modern buildings

Keywords: heat and moisture regime of external walls, moisture content of building materials, potential of moisture transfer, non-stationary mode of heat and moisture transfer.

Objective: the research of the temperature-humidity state and thermophysical properties of materials of external walls of modern buildings for predicting their operational characteristics and durability.

study of the temperature-humidity state and thermophysical properties of the materials of the exterior walls of modern buildings to predict their performance and durability

Research Methods: sampling of materials of external walls of buildings, moisture content determination by gravimetric method, experimental methods of studying the sorption moisture content and characteristics of moisture transfer of building materials, determination of thermal conductivity under steady-state thermal conditions, finite element method.

Obtained results and their novelty. The problem of non-stationary joint transfer of heat and moisture in the external walls of buildings is numerically solved. In the region of positive and negative temperatures the experimental moisture potential of A.V. Lykov was used. A computer program for the calculation of non-stationary fields of temperature and humidity of materials of external enclosing structures of buildings has been developed. The experimental values of the thermal conductivity coefficients of autoclaved cellular concrete of various moisture under hydrothermal humidification at positive and negative temperatures are obtained. The values of the thermogradient moisture transfer coefficients in autoclaved cellular concrete at a negative temperature have been experimentally determined. The nonstationary fields of temperature and humidity of external wall materials are calculated.

Recommendations for use. The results can be used in the design of external enclosing structures of buildings, as well as in research of their thermal protection characteristics and durability.

Application field: construction.

Научное издание

ЛЕШКЕВИЧ
Владимир Владимирович

**ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОС В НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение