

САХАРОВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО
СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИХ ПРОМЕРЗАНИЯ
И ОТТАИВАНИЯ**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» на кафедре гидравлики, теплотехники и инженерных сетей

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
ЕЛИН Николай Николаевич
- Официальные оппоненты:** **Римшин Владимир Иванович**
Член-корр. РААСН, доктор технических наук, профессор
Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт
ВНИИжелезобетон АО ВНИИжелезобетон
Заместитель Генерального директора по научной работе
Котлов Виталий Геннадьевич
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технический университет», г. Йошкар-Ола,
Директор института строительства и архитектуры.
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», г. Самара

Защита состоится 28 апреля 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20. Тел.: (4932) 32-85-40; e-mail: inf@ivgpu.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20. (www.ivgpu.com).

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчуковская

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Промерзание стен и покрытий в суровых условиях эксплуатации происходит весьма часто, особенно в зданиях из тонкостенных многослойных конструкций, получивших большое распространение. Проблема прогнозирования их промерзания, а также разработка мероприятий, препятствующих этому процессу, является актуальной задачей строительной индустрии, поскольку промерзание резко снижает термическое сопротивление ограждающих конструкций и приводит к деградации физико-механических свойств материалов, из которых они изготовлены. Кроме того, одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность стеновых ограждающих конструкций, выполненных, как правило, из бетона или кирпича (керамического или силикатного), является цикличность периодов замораживания и оттаивания. При периодическом замораживании и оттаивании в порах элементов конструкций происходит увеличение объема воды при фазовом переходе ее из жидкости в лед, вследствие которого возникают предпосылки для зарождения внутренних напряжений в материале, приводящих к потере прочности конструкций и их последующему разрушению.

Причиной промерзания могут быть ошибки в определении толщины стен и покрытий или их утеплителя. Поэтому достоверное расчетное прогнозирование замерзания и оттаивания влаги в ограждающих конструкциях является важной составной частью их проектирования. Применение для этой цели классических методов аналитической теории теплопроводности далеко не всегда может удовлетворить потребности проектировщиков, особенно при решении задач связанных с фазовыми переходами в материале. Для того чтобы достоверно прогнозировать процессы промерзания строительных изделий в ограждающих конструкциях, нужны именно такие модели, которые учитывали бы все реальные условия протекания процесса и одновременно допускали бы их трансформацию в относительно простой и понятный инженерный метод расчета, сопровождающийся средствами компьютерной поддержки.

Таким образом, построение математических моделей и базирующихся на них компьютерных методов инженерного расчета, позволяющих прогнозировать реальное протекание процессов промерзания стеновых конструкций при переменных условиях окружающей среды, является, на наш взгляд, **актуальной научной и практической задачей**. Ее решение позволит выбирать при проектировании параметры многослойных стеновых конструкций, обеспечивающие надежность их работы, и разрабатывать энергосберегающие мероприятия.

Степень разработанности темы. Представленная работа является логическим продолжением научного направления, связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями по приложению теории цепей Маркова к моделированию процессов переноса, развиваемого под общим руководством профессоров Н.Н. Елина, С.В. Федосова и В.Е. Мизонова. К настоящему времени в рамках данного направления разработан комплекс ячеечных математических моделей механических и тепло-массообменных процессов и эффективных алгоритмов их компьютерной реализации. Однако исследований по моделированию и расчету процессов теплопереноса в составных областях сложной конфигурации с учетом фазовых переходов типа замерзание/оттаивание не проводилось.

Цели и задачи: повышение информативности, точности и достоверности расчетов промерзания и оттаивания многослойных стеновых конструкций в условиях переменного теплового состояния окружающей среды для повышения стойкости и надежно-

сти сложных стеновых конструкций и разработки энергосберегающих мероприятий. Исходя из указанной цели, основными **задачами** диссертационной работы являются:

1. разработка одномерной нелинейной ячеечной модели теплопроводности в среде с переменными свойствами с учетом фазовых переходов типа замерзание/оттаивание;
2. обобщение модели на случай двумерной составной области сложной конфигурации;
3. разработка средств компьютерной поддержки моделирования и их применение к расчету и анализу теплового состояния и промерзания элементов ограждающих конструкций зданий и сооружений;
4. экспериментальная верификация разработанной модели;
5. применение разработанных средств моделирования и расчета в практике проектирования строительных изделий и конструкций для суровых условий эксплуатации.

Соответствие паспорту специальности. Материалы диссертации соответствуют научной специальности 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия» по области исследования, которая включает в себя «...4. Разработку методов прогнозирования и оценки стойкости строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации; 5. Разработку методов повышения стойкости строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации; 10. Исследование совместной работы строительных материалов с разными свойствами в слоистых и сложных строительных конструкциях».

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Разработана нелинейная ячеечная модель теплопередачи через многослойную плоскую стенку при нестационарных тепловых параметрах окружающей среды, учитывающая промерзание стенки при отрицательных температурах и позволяющая прогнозировать глубину и продвижение фронта промерзания.
2. Разработанная модель обобщена на случай двухмерной теплопередачи, что позволяет прогнозировать конфигурацию и продвижение фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей сложной конфигурации.
3. Численные эксперименты с моделями позволили выявить влияние теплофизических свойств стенки и параметров окружающих сред на глубину и конфигурацию фронта промерзания и вызванные промерзанием дополнительные тепловые потери в зданиях.
4. Выполнена экспериментальная проверка модели, подтвердившая приемлемую для проектирования точность расчетных прогнозов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в том, что выполнено обобщение ячеечной модели теплопроводности на случай фазовых переходов типа замерзание/оттаивание в составных областях сложной конфигурации, состоящих из разнородных материалов. Модель позволяет рассчитывать нестационарные процессы замерзания/оттаивания и продвижение фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей и вызванные промерзанием дополнительные тепловые потери в зданиях.

Практическая ценность результатов работы состоит в следующем.

1. На основе разработанных математических моделей предложен компьютерный инженерный метод расчета промерзания строительных изделий и конструкций при переменных параметрах окружающих сред.
2. Разработанный компьютерный инженерный метод расчета позволяет описывать циклы промерзания-оттаивания, что является основой для прогнозирования стой-

кости и надежности сложных стеновых конструкций и разработки энергосберегающих мероприятий.

3. Компьютерный метод расчета термического сопротивления ограждающих конструкций с их частичным промерзанием может быть использован при энергетических обследованиях и энергетическом аудите зданий.
4. Разработанные методы расчета и их программно-алгоритмическое обеспечение используются в ООО «Бармингов» для сокращения теплопотерь зданий.

Методология и методы диссертационного исследования.

Математическое моделирование теплопроводности при наличии фазовых переходов типа замерзание/оттаивание выполнено с использованием математического аппарата теории цепей Маркова для представления моделируемой среды совокупностью ячеек идеального перемешивания. Исследование влияния внешних и внутренних условий протекания процесса на его кинетику и установившееся состояние проведено путем вычислительных экспериментов в среде MATLAB. Экспериментальная верификация модели выполнена на специально разработанной лабораторной установке с морозильной камерой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нелинейная ячеечная модель теплопередачи через многослойную плоскую стенку при нестационарных тепловых параметрах окружающей среды, учитывающая промерзание стенки при отрицательных температурах и позволяющая прогнозировать глубину и продвижение фронта промерзания.
2. Обобщение разработанной модели на случай двумерной теплопередачи, что позволяет прогнозировать конфигурацию и продвижение фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей сложной конфигурации.
3. Результаты численных экспериментов с моделями, позволившие выявить влияние теплофизических свойств стенки и параметров окружающих сред на глубину и конфигурацию фронта промерзания и вызванные промерзанием дополнительные тепловые потери в зданиях.
4. Результаты экспериментальной проверки модели на стендовой установке.
5. Компьютерный инженерный метод расчета конфигурации и глубины фронта промерзания в многослойных стеновых конструкциях.

Степень достоверности полученных результатов.

Достоверность полученных результатов определяется использованием при математическом моделировании апробированных балансовых соотношений и корректностью математических выкладок, а также удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных результатов по продвижению фронта промерзания.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение на Международной НТК «Состояние и перспективы развития электротехнологии – XVII Бенардосовские чтения». Иваново, 2013; XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-24», Нижний Новгород, 2013; XIX и XX Международных научно-технических конференциях «Информационная среда вуза», Иваново, 2012, 2013, а также на научно-технических семинарах кафедры прикладной математики ИГЭУ, 2012, 2014.

Личный вклад автора.

Автором, совместно с научным руководителем поставлены цели и задачи, выбраны объекты и методы исследований, разработана программа теоретических и экспериментальных изысканий, построена нелинейная ячеечная модель теплопроводности с

учетом фазовых переходов и компьютерная программа ее реализации, выполнена экспериментальная верификация модели и осуществлено ее промышленное внедрение. В совместных работах, выполненных в соавторстве с д.т.н., проф. Н.Н. Елиным, акад. РААСН д.т.н., проф. С.В. Федосовым, д.т.н., проф. Мизоновым В.Е. и к.т.н., доц. Лезновой Н.Р. автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе, 4 в изданиях, предусмотренных Перечнем ВАК, и 1 зарегистрированная программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка использованных источников (129 наименований) и приложения.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе на основе литературных источников проанализировано современное состояние технических, технологических и научных аспектов проблемы промерзания и оттаивания строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации, кратко освещены методы расчета процессов промерзания влаги в ограждающих конструкциях. Дана общая характеристика теплового и влажностного состояния промерзающих ограждающих конструкций и определяющих его параметров.

Задачи моделирования и расчета промерзания влаги в пористых строительных изделиях являются одними из наиболее сложных задач строительной теплофизики, без решения которых невозможно достоверное прогнозирование и оценка стойкости строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации при нестационарной отрицательной температуре окружающей среды. С внедрением в практику современного строительства многослойных наружных ограждений из пористых строительных материалов с повышенными теплоизоляционными характеристиками, на эксплуатационные свойства ограждений существенное влияние стали оказывать влагосодержание и режим эксплуатации ограждающих конструкций. Экспериментальные и теоретические исследования тепловлажностного режима ограждающих конструкций развивались в работах В.Н. Богословского, В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокина, А. С. Эпштейна, О. Е. Власова, Р. Е. Брилинга, А.У. Франчука, В.И. Лукьянова, Ю.Д. Ясина, В. Г. Гагарина, В.М. Бондаренко, В.С. Федорова, В.И. Римшина, С.В. Федосова и других авторов.

Фундаментальной теоретической основой описания сопряженного тепломассопереноса с фазовыми переходами являются дифференциальные уравнения А.В. Лыкова. Однако основанные на них известные аналитические решения имеют ограниченную область применения. В настоящее время наиболее актуальны задачи расчета переходных процессов нелинейного тепловлажностного переноса в многослойных ограждающих конструкциях с учетом переменных во времени параметров окружающей среды и фазовых переходов, решение которых возможно только численными методами, среди которых особое место занимают ячеечные модели и связанный с ними математический аппарат теории цепей Маркова. Научные основы этого подхода применительно к широкому кругу задач строительной теплофизики разработаны в трудах С.В. Федосова, Н.Н. Елина, В.Е. Мизонова, Р.М. Алояна, В.Ю. Волынского и их соавто-

ров. Именно этот подход и был выбран в качестве основы моделирования и расчета процессов промерзания и оттаивания.

В заключение главы сформулированы детализированные задачи работы.

Во второй главе разработана базовая ячеечная математическая модель промерзания плоской стенки в рамках одномерной постановки задачи. Процедура построения ячеечной модели показана на рисунке 1.

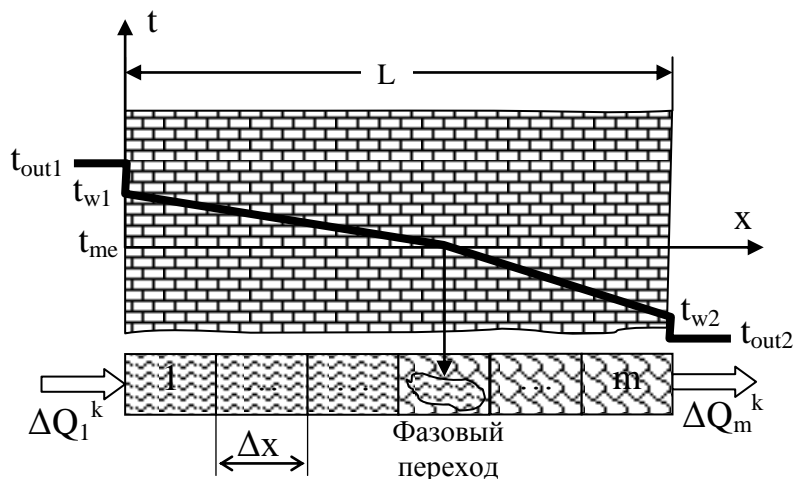


Рис.1. Расчетная схема процесса и его ячеечная модель

Всю толщину L стенки, в которой происходит одномерный процесс теплопроводности, разбивают на m ячеек длиной $\Delta x=L/m$ и площадью поперечного сечения S . Все теплофизические свойства и параметры процесса считаются равномерно распределенными по каждой ячейке и могут быть представлены векторами-столбцами размером $m \times 1$. Состояние процесса рассматривается через малые промежутки времени Δt и фиксируется в дискретные моменты времени $\tau_k=(k-1)\Delta t$, где k – номер временного перехода. Преобразование вектора теплоты в течение перехода описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}_Q(\mathbf{Q}^k + \Delta\mathbf{Q}_e^k \pm \Delta\mathbf{Q}_{me}^k), \quad (1)$$

где \mathbf{Q}^{k+1} и \mathbf{Q}^k – последующее и текущее распределение теплоты по ячейкам, $\Delta\mathbf{Q}_e^k$ – вектор теплоты, передаваемой крайним ячейкам цепи от окружающей среды путем теплоотдачи, $\Delta\mathbf{Q}_{me}^k$ – вектор теплоты фазового перехода, имеющий ненулевое значение в той ячейке, где этот переход происходит, \mathbf{P}_Q – матрица теплопроводности для теплоизолированной по краям цепи. Дополнительно процесс характеризуется вектором содержания замерзшей влаги в ячейках \mathbf{M}_i^k . Минимальное значение его элементов равно нулю (в ячейках присутствует влага только в капельном состоянии), максимальное – M_{imax} (масса полностью замерзшей в ячейке влаги).

При отсутствии фазовых переходов вектор температуры \mathbf{t} связан с вектором теплоты \mathbf{Q} формулой

$$\mathbf{t}^k = \mathbf{Q}^k ./ \mathbf{c} ./ \mathbf{\rho} ./ S ./ \Delta x, \quad (2)$$

где \mathbf{c} и $\mathbf{\rho}$ – векторы теплоемкостей и плотностей, а оператор $./$ означает поэлементное деление векторов.

Процедура расчета сводится к следующему. На каждом временном переходе

векторы источников ΔQ_e^k и ΔQ_{me}^k «закачивают» определенное количество теплоты в соответствующие ячейки цепи, а затем эта теплота перераспределяется по ячейкам путем теплопроводности в соответствии с матрицей теплопроводности P_Q . Элементы вектора внешнего теплообмена ΔQ_e^k отличны от нуля только для крайних ячеек цепи, контактирующих с окружающей средой, и рассчитываются по обычным соотношениям теплоотдачи следующим образом:

$$\Delta Q_{e1}^k = \alpha_1 (t_{out1}(k) - t_1^k) S \Delta \tau, \quad (3)$$

$$\Delta Q_{em}^k = \alpha_2 (t_{out2}(k) - t_m^k) S \Delta \tau, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи, а температуры окружающей среды с обоих краев стенки считаются в общем случае зависящими от времени через номер временного перехода k .

Специфической особенностью моделируемого процесса является выделение или поглощение теплоты ΔQ_{ph}^k при протекании фазового перехода, а также поведение температуры ячейки в его процессе. Здесь используется та же процедура, что и для элементарной ячейки, но последовательно для всех ячеек цепи. После каждого временного перехода температура во всех ячейках сравнивается с температурой фазового перехода t_{me} (температурой замерзания). Если происходит охлаждение j -й ячейки, то есть $t_j^{k+1} < t_j^k$, и оказывается, что $t_j^{k+1} < t_{me}$ и $M_{ij}^k < M_{imax}$ (замерзла не вся влага), то принимается, что $t_j^{k+1} = t_{me}$, а теплота $\Delta Q_{mej} = c_j \rho_j (t_j^{k+1} - t_j^k) S \Delta x$ на формирование твердой фазы (льда), масса которой в конце перехода составит

$$M_{ij}^{k+1} = M_{ij}^k + \Delta Q_{mej} / r, \quad (5)$$

где r – удельная теплота замерзания влаги. Если окажется, что после очередного перехода $M_{ij}^{k+1} > M_{imax}$ (замерзла вся влага), M_{ij}^{k+1} приравнивается к M_{imax} и фазовый переход в этой ячейке заканчивается, а дальнейшая эволюция теплоты и температуры в ней контролируется только матрицей теплопроводности. При нагреве ячейки, содержащей полностью или частично твердую фазу, идет противоположный процесс таяния льда, контролируемый в модели зависимостями, описанными выше. В телах со сложной пористой структурой определение температуры замерзания является сложной экспериментально решаемой задачей. Поскольку этот вопрос не является предметом настоящей работы, в дальнейших расчетах она принимается равной 0°C .

При изменении фазового состояния влаги в ячейках ее теплофизические свойства меняются, а теплопроводность уже относится к составной стенке. Это должно быть учтено в переходной матрице. Если плотность и теплоемкость являются атрибутами самой ячейки и вычисляются в соответствии с ее тепловым состоянием, то коэффициент теплопроводности является атрибутом пары ячеек. Если переходу теплоты путем теплопроводности из ячейки j в ячейку $j+1$ приписан коэффициент теплопроводности λ_j , то обратному переходу из ячейки $j+1$ в ячейку j должен быть приписан такой же коэффициент.

Реализация этого правила видна из фрагмента матрицы теплопроводности

$$\mathbf{P}_Q = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & 1 - \left(\frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} + \frac{\lambda_{j-1}}{c_j \rho_1} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \right) & \frac{\lambda_j}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & \frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & 1 - \left(\frac{\lambda_{j+1}}{c_{j+1} \rho_{j+1}} + \frac{\lambda_j}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \right) \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \frac{\lambda_{j+1}}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \quad (6)$$

Выражение (6) замыкает определение всех величин, входящих в рекуррентное равенство (1), по которому рассчитывается эволюция распределения теплоты, температуры и содержания влаги в различных фазовых состояниях при различных условиях. Необходимо отметить, что величины $\Delta \tau$ и Δx должны выбираться таким образом, чтобы на главной диагонали матрицы \mathbf{P}_Q не появилось отрицательных элементов; иначе будет нарушено условие устойчивости вычислительной процедуры. Расчеты выполняются на базе универсального вычислительного алгоритма, особенно удобного для реализации в среде MATLAB.

На рисунках 2-4 показаны примеры расчетов, демонстрирующих работоспособность и возможности модели. Расчеты выполнены для плоской стенки толщиной $L=0,5\text{ м}$, плотностью $\rho=1900\text{ кг/м}^3$ с теплоемкостью $c=837\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, с начальным влажностью $0,1\text{ кг/кг}$. Коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны принят равным $\alpha_1=5\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, с внешней $-\alpha_2=10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$. На рисунке 2 показано изменение основных параметров этого процесса по всей глубине стенки вплоть до установившегося состояния.

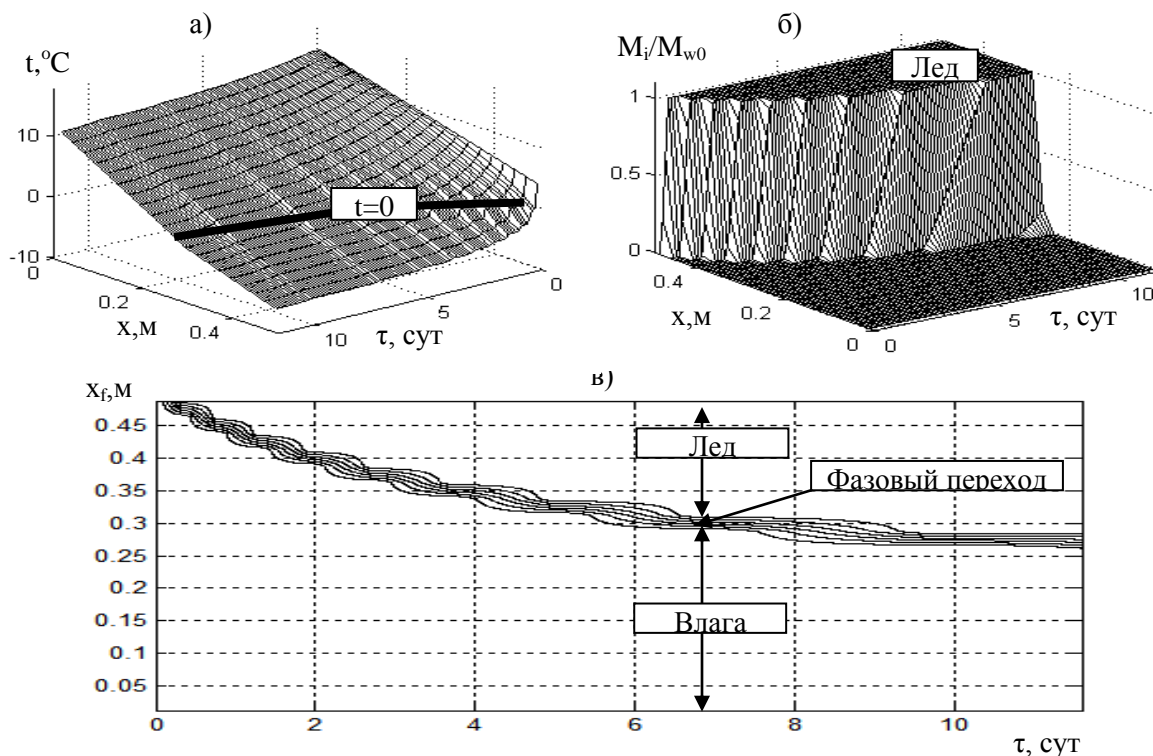


Рис.2. Эволюция распределения температуры (а) и формирования льда (б,в) при скачкообразном снижении наружной температуры от 0 до -10°C

На графике изменения распределения температуры (рис.2а) нанесена линия, соответствующая нулевой температуре, то есть температуре замерзания влаги. Асимптотически устанавливается распределение температуры, соответствующее стационарному процессу в двухслойной стенке с разными коэффициентами теплопроводности. На рисунке 2б на наглядном контурном графике показана граница продвижения фронта промерзания. Выше семейства линий находится только лед, ниже – только капельная влага, а само семейство отражает фазовый переход в ячейках, в которых одновременно присутствуют лед и влага в разных пропорциях.

При эксплуатации ограждающих конструкций важную роль играют циклы промерзания и оттаивания, когда температура окружающей среды периодически переходит температуру фазового перехода. Модель позволяет эффективно отслеживать изменение теплофизического и фазового состояния стенки при меняющейся внешней температуре. Пример моделирования такого процесса показан на рисунке 3, где внешняя температура сначала скачком убывает от 0°C до -10°C , а затем, спустя некоторое время, скачком возвращается к 0°C . При обратном повышении температуры происходит относительно быстрый прогрев внешней зоны стенки до температуры фазового перехода и во внутренних ячейках цепи начинается таяние льда (рис.3а). Оно блокирует повышение температуры в более близких к внешнему краю стенки ячейках до тех пор, пока все ячейки окажутся свободными ото льда. Далее идет прогрев стенки уже без фазовых переходов путем обычной теплопроводности. Продвижение фронта промерзания наглядно видно на рис.3б. Фронт промерзания сначала распространяется вглубь стенки, достигая установившегося положения, а затем после повышения внешней температуры отступает к внешнему краю стенки, полностью исчезая через 11,5 суток с начала моделируемого цикла. Естественно, что в модели может быть использован любой график изменения внешней и внутренней температуры, задаваемой в равенствах (3), (4) функциями $t_{\text{out}2}(k)$ и $t_{\text{out}1}(k)$.

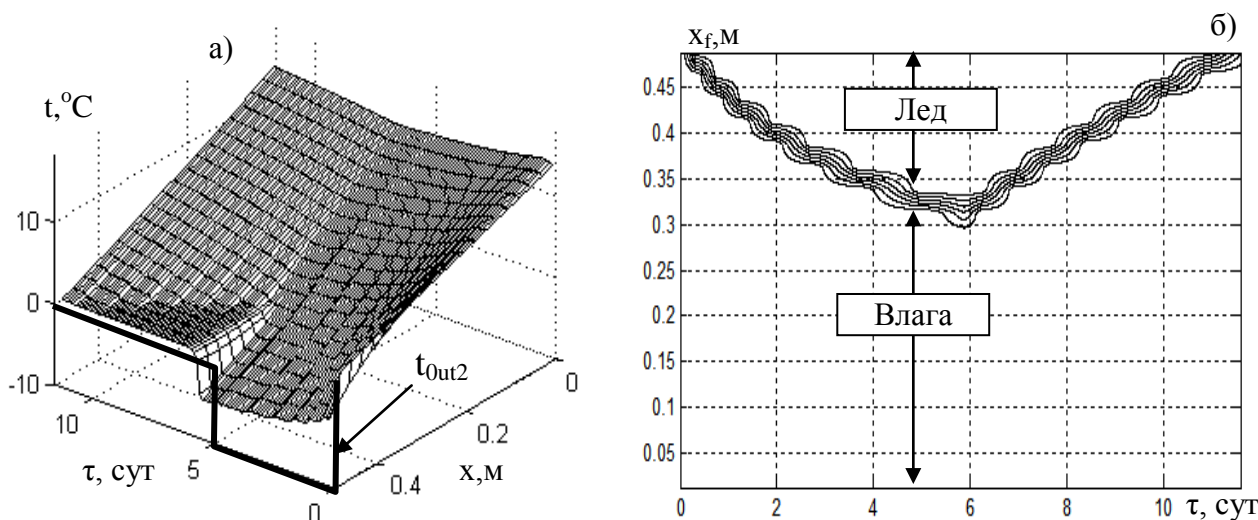


Рис.3. Эволюция распределения температуры (а) и продвижение фронта промерзания (б) при ступенчатом графике изменения наружной температуры

Один из примеров показан на рисунке 4, где наружная температура сначала линейно снижается от 0°C до -20°C , а затем линейно возрастает от -20°C до $+20^{\circ}\text{C}$. Особенностью этого процесса является то, что на стадии увеличения температуры прогрев замерзшей зоны происходит как с внутренней, так и с внешней стороны,

вследствие чего происходит двухстороннее оттаивание замерзшей зоны, которое заканчивается через 10 суток не на наружной поверхности, а в 10см вглубь от нее.

Таким образом, разработанная ячеечная модель позволяет на основе простого и универсального вычислительного алгоритма рассчитывать процессы замерзания и оттаивания капельной влаги в ограждающих конструкциях зданий и прогнозировать продвижение фронта замерзания при изменении температуры окружающей среды по произвольному заданному закону.

Она позволяет определять конструктивные и режимные условия, при которых фронт промерзания не проникает дальше установленного предела или вообще отсутствует.

Модель обобщена на случай многослойной стенки, состоящей из строительных материалов с разными свойствами. Для этого достаточно представить теплофизические свойства слоев стенки двумя наборами векторов λ , ρ и c размером $1 \times m$, каждый из которых относится к свойствам

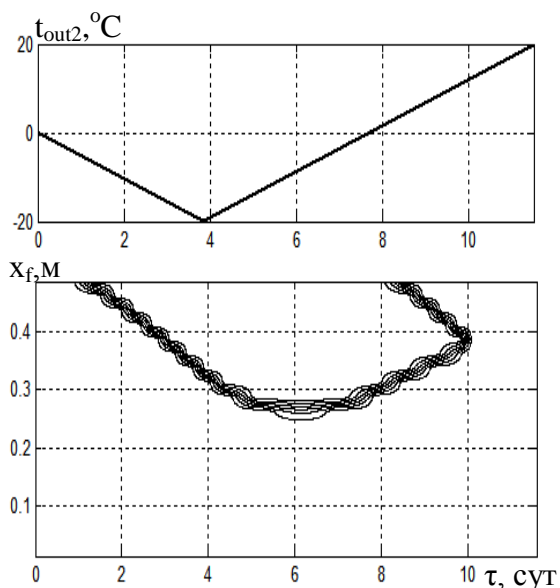


Рис.4. Продвижение фронта промерзания при кусочно-линейном графике наружной температуры

при капельной и замерзшей влаге. Эволюция теплофизического состояния цепи по-прежнему описывается рекуррентным матричным равенством (1) с проверкой на каждом переходе на наличие фазового перехода. Пример моделирования процесса при кусочно-линейном графике наружной температуры показан на рисунке 5.

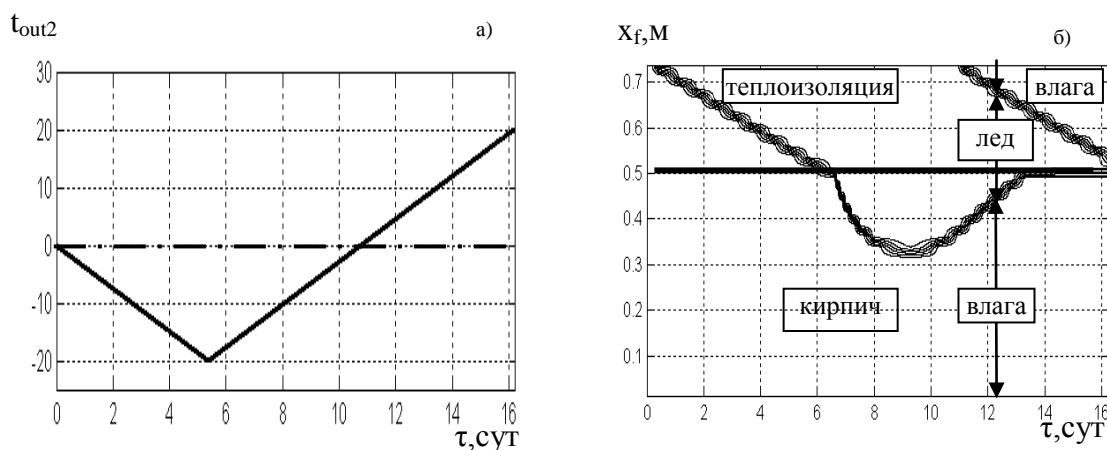


Рис.5. Продвижение фронта промерзания при кусочно-линейном графике наружной температуры

В третьей главе разработанная базовая ячеечная математическая модель промерзания плоской стенки обобщается на двумерные задачи, первая из которых относится к промерзанию в угловых стыках ограждающих конструкций. Расчетная схема углового стыка показана на рисунке 6. Здесь расчетным элементом является прямоугольная сетка ячеек размером $n_1 \times n_2$, в которой переходы теплоты в выделенные тем-

ным тоном ячейки запрещены в силу симметрии. Если пронумеровать ячейки последовательно по столбцам и построить в соответствии с этим векторы состояния, то все описанные выше вычислительные процедуры останутся точно такими же за исключением матрицы P_Q , которая станет пятидиагональной, поскольку из любой внутренней

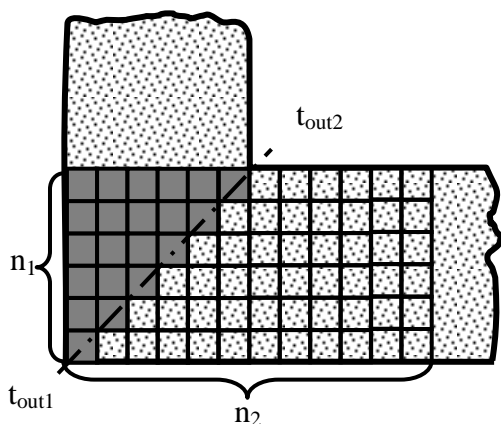


Рис.6. Двухмерная сетка ячеек для моделирования процесса в зоне углового стыка

ячейки возможны пять переходов: четыре в соседние ячейки и в саму себя (доля остающейся в ячейке теплоты в течение временного перехода). В диссертации приведены и обоснованы расчетные формулы для долей этих переходов. Для окончательного построения матрицы предлагается ввести вектор формы рабочей части сетки ячеек F , в котором $F(f)=0$, если f принадлежит к номеру темных ячеек при их сквозной нумерации, и $F(f)=1$, если f принадлежит к номеру светлых (рабочих) ячеек. После этого считается, что $P_{Qi,f}=0$, если $F(f)=0$, $f=1, \dots, n_1 n_2$, что запрещает переходы в ячейки, не принадлежащие к моделируемой не прямоугольной зоне. Эволюция теплового состояния описывается равенством (1),

но большей размерности его составляющих, чем в одномерном случае. Проверка всех рабочих ячеек на наличие или отсутствие фазовых переходов и описание самих фазовых переходов осуществляется по описанной выше схеме.

На рисунках 7,8 показаны примеры результатов моделирования промерзания в угловых зонах. Рисунок 7 иллюстрирует установившееся распределение температуры без фазовых переходов за счет чистой двухмерной теплопроводности с краевыми условиями третьего рода. Из графика видно, что температура в острие угла на несколько градусов ниже, чем на удаленной поверхности стенки, а ее увеличение вдоль биссектрисы угла происходит медленнее, чем вдоль нормали к удаленной поверхности.

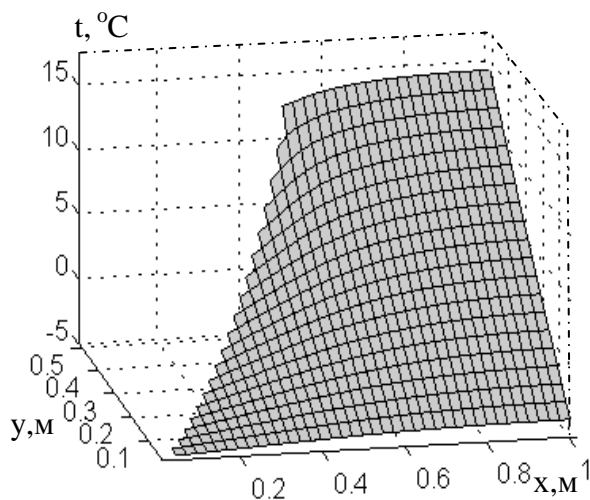


Рис.7. Пример распределения температуры в зоне углового стыка

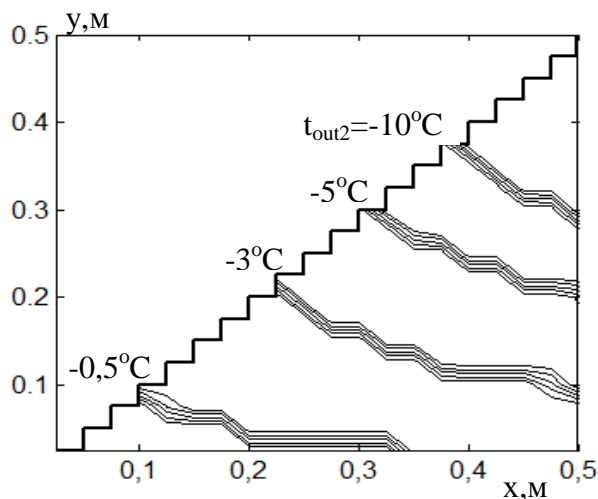


Рис.8. Установившаяся конфигурация фронта промерзания при различных температурах окружающей среды

На рисунке 8 показано установившееся положение фронта промерзания при

различных температурах окружающей среды с холодной стороны стенки. При температуре $-0,5^{\circ}\text{C}$ промерзает только острие угла, а в удаленных участках стенки промерзания нет. При температуре -3°C промерзают уже и стенка и угол, но глубина промерзания угла по нормали к стенке примерно в 2 раза больше. При дальнейшем снижении температуры обе глубины увеличиваются.

Построение таких графиков с помощью разработанной модели не представляет трудностей и может служить важным информационным материалом для проектировщиков.

Следующей задачей моделирования было описание и расчет процесса промерзания в окрестности закладных деталей. Расчетная схема процесса и матрица формы объекта моделирования показаны на рисунке 9.

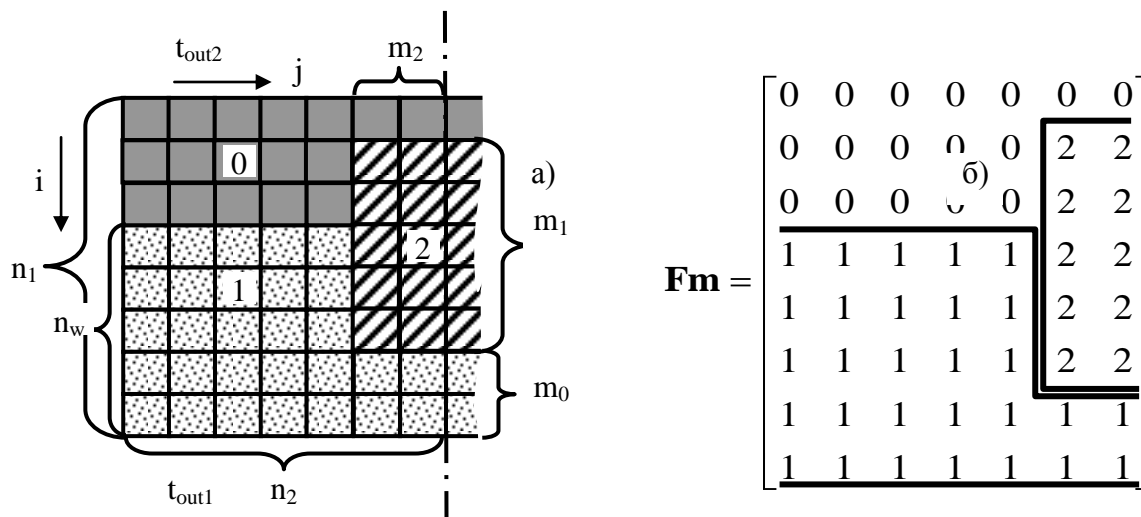
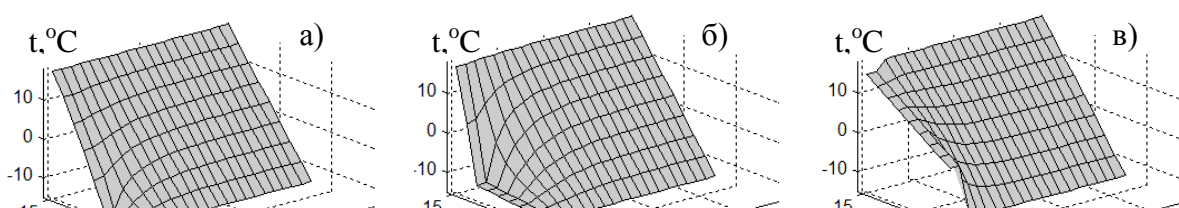


Рис.9. Расчетная схема ячеечного представления элемента стенки с закладной деталью: 0 – внешняя окружающая среда; 1 – основной материал стенки; 2 – закладная деталь (а) и ее матрица формы (б)

Исследуемая область разбита на прямоугольную сетку квадратных ячеек со стороной Δx , в которой выделены ячейки, принадлежащие внешней окружающей среде (0), стенке (1) и закладной детали (2), что отражено в матрице формы Fm , из которой видно, что с ее помощью легко может быть описана любая конфигурация составляющих внутри выделенного элемента. Переходы в ячейки из области 0 запрещены. Областям 1 и 2 приписаны свои теплофизические свойства: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность, причем свойства области 1 характеризуются двумя наборами этих свойств – для материала стенки с содержащейся в ней капельной влагой и с замерзшей влагой, причем граница между этими зонами заранее неизвестна. Поэтому на каждом временном переходе все ячейки области 1 проверяются на наличие или отсутствие в них льда и в соответствии с этим им приписываются свои теплофизические свойства. Теплоотдача по внешним границам областей 0 и 1 рассчитывается по соотношениям (3) и (4), записываемым для всех периферийных ячеек. Расчет эволюции теплового состояния рассчитывается по рекуррентному выражению (1) со своими векторами состояния и источников и своей переходной матрицей, составляемой на каждом переходе с помощью матрицы формы.

В диссертации приведены результаты моделирования процесса с закладными деталями разной конфигурации и расположения в стенке. Примеры расчетов показаны на рисунках 10-12.



На рисунке 10 показаны поле температуры и конфигурация зоны промерзания в кирпичной стенке при различном расположении стальной закладной детали. При отсутствии закладной детали стенка промерзает на глубину в 4 внешних ячейки (около 22 см). Это видно в левых частях всех графиков промерзания, удаленных от закладной детали. При погружении детали на 1/3 длины (рис.9а) в ее окрестности зона промерзания углубляется и расширяется, охватывая нижний торец детали. При таком расположении деталь имеет относительно большую поверхность охлаждения низкотемпературной окружающей средой и за счет высокой теплопроводности «распространяет холод» внутрь стенки. При дальнейшем погружении детали в стенку (рис.9б) ситуация сохраняется, но меняется количественно: под нижним торцом детали промерзает уже один ряд ячеек вместо двух. Она меняется принципиально, когда деталь погружена в стенку полностью (рис.9в). Здесь она соприкасается одинаковыми торцовыми поверхностями с холодной и теплой окружающей средой, но поскольку температура теплой стороны выше, то теплота хорошо распространяется к наружной части стенки, прогревая примыкающую к ней зону, в результате чего зона промерзания немного сокращается. Приведенные на тех же рисунках установившиеся поля температуры полностью подтверждают картину зон промерзания. Из графиков также видно, что в рассмотренном примере тепловой эффект от наличия закладной детали проявляется в ячейках 10...20; на больших удалениях от закладной детали ее влияние отсутствует.

Тепловой эффект от наличия закладной детали проявляется в снижении термического сопротивления ограждающей конструкции в ее окрестности, что проявляется в увеличении плотности теплового потока через стенку. Эта плотность для j-ой ячейки рассчитывается по формуле

$$q(j)=\alpha_2(t_{out2} - t(n_1,j)). \quad (7)$$

Распределение плотности теплового потока между ячейками 10...20 для случаев расположения закладной детали, соответствующих рисункам 10, а,б,в, показано на

рисунке 11. По мере заглубления в стенку закладной детали величина теплового потока достаточно резко возрастает, но ширина зоны его возрастания сужается.

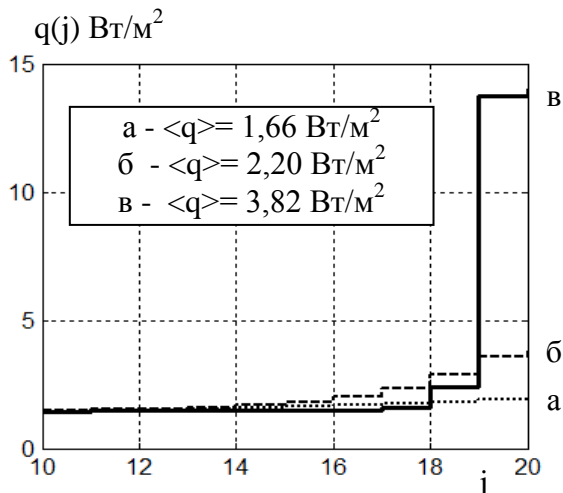


Рис.11. Распределение плотности теплового потока в окрестности закладной детали при различной глубине ее погружения в стенку и его средние значения

Интегральной характеристикой теплового влияния детали может служить среднее значение теплового потока, рассчитываемое в данном случае по формуле

$$\langle q \rangle = \frac{\sum_{j=1}^{20} q(j)}{11} \quad (8)$$

Эти средние значения приведены в поле графика на рис.10. Из них видно, что, например, полностью заглубленная в стенку деталь увеличивает локальный средний тепловой поток почти в 4 раза.

В качестве последнего примера, демонстрирующего возможности модели, на рисунке 12 показано установившееся тепловое состояние стенки с закладной деталью более сложной формы, которое рассчитано только путем изменения матрицы формы.

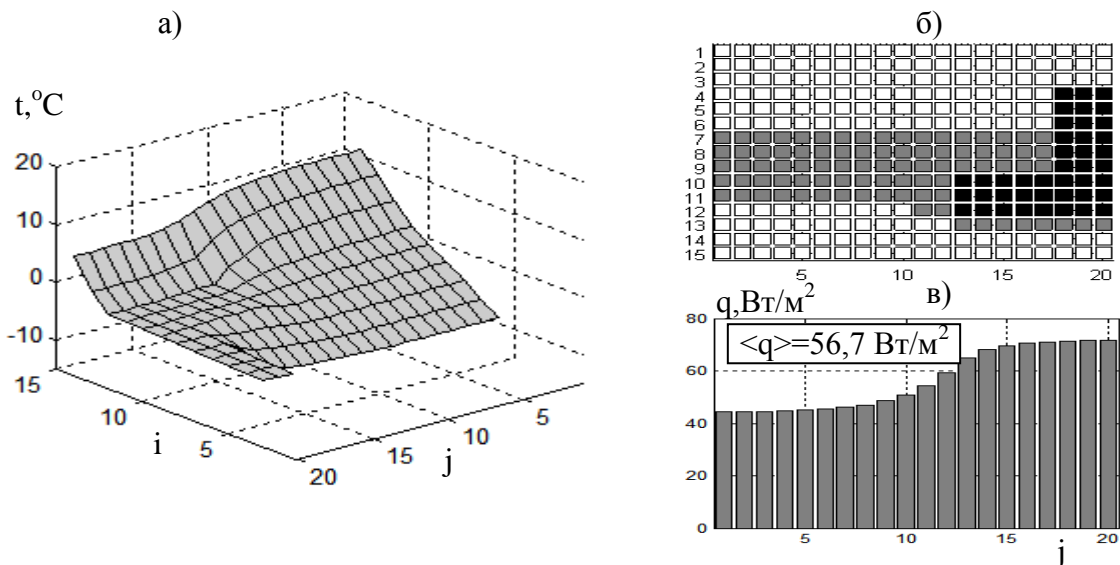
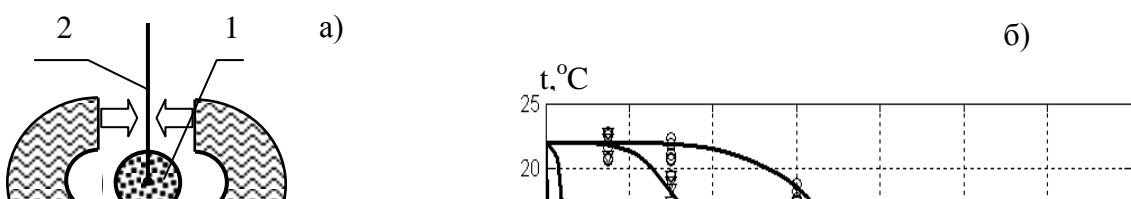


Рис.12. Установившееся распределение температуры (а), конфигурация фронта промерзания (б) и плотность теплового потока через стенку (в) в окрестности закладной детали со сложной формой сечения

В четвертой главе приведены результаты экспериментальной проверки модели и вопросы практического использования результатов работы.

Для экспериментальной проверки одномерной модели была создана лабораторная установка, схематично показанная на рисунке 13а.



Пористый губчатый образец плотностью $0,1\text{г/см}^3$, длиной 150мм и диаметром 15мм, снабженный 4-мя термопарами, полностью насыщался водой, закрывался теплоизоляцией и помещался между расположенными на основании массивными фиксаторами в морозильную камеру с температурой -18°C (основание и фиксаторы постоянно находились в камере и имели такую же температуру). После этого в моменты времени 7,5; 15; 30; 60мин регистрировалась температура в 4-х сечениях образца 15, 25, 55, 75мм от левого торца. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показано на рисунке 13б, откуда видно, что на начальной стадии процесса (до 15...20 мин) опытные точки с учетом разброса плотно группируются около расчетных кривых, а далее реальное охлаждение происходит все быстрее, чем расчетное. Это может быть объяснено не идеальностью теплоизоляции боковой поверхности стержня, через которую происходит охлаждение, результаты которого все более заметны с течением времени. Тем не менее, расхождение средних по пяти опытам экспериментальных и расчетных температур не превышает 12%. После часа пребывания в камере вынутый образец оказывается полностью промерзшим. Таким образом, можно считать расчетные прогнозы обладающими приемлемой точностью для инженерных оценок промерзания строительных конструкций.

Практическое применение результатов исследования выполнено по следующим направлениям:

1. Компьютерная программа «Моделирование кинетики промерзания стен зданий в окрестности закладных деталей» (Свид. о госуdarств. регистр. программы для ЭВМ 2014618663) принята к использованию в ООО «Бармингов» для разработки энергосберегающих мероприятий.

2. Выполнение рекомендованных мероприятий по дополнительной теплоизоляции закладных элементов и стыков, разработанных с помощью данной компьютерной

программы, позволило сократить теплопотери одного здания на 5,7%, а другого - на 8,4%.

В заключении приведены основные результаты выполненного исследования и направления его дальнейшей разработки.

Основные результаты диссертации

1. Разработана нелинейная ячеечная модель теплопередачи через многослойную плоскую стенку при нестационарных тепловых параметрах окружающей среды, учитывающая промерзание стенки при отрицательных температурах и позволяющая прогнозировать глубину и продвижение фронта промерзания.
2. Предложена модель процесса в многослойной стенке при совместной работе строительных материалов с разными свойствами в слоистых строительных конструкциях.
3. Разработанная модель обобщена на случай двухмерной теплопередачи, что позволяет прогнозировать конфигурацию и продвижение фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей сложной конфигурации.
4. Численные эксперименты с моделями позволили выявить влияние теплофизических свойств стенки и параметров окружающих сред на глубину и конфигурацию фронта промерзания и вызванные промерзанием дополнительные тепловые потери в зданиях. Например, при появлении зоны промерзания вокруг закладных деталей при низких температурах, происходит увеличение тепловых потерь здания, обусловленное наличием этих закладных деталей, с 3,8 до 6,9%.
5. Выполнена экспериментальная проверка модели, подтвердившая приемлемую для проектирования точность расчетных прогнозов.
6. На основе разработанных математических моделей предложен компьютерный инженерный метод расчета промерзания строительных изделий и конструкций при переменных параметрах окружающих сред, позволяющий описывать циклы промерзания-оттаивания. Данный метод может быть использован при энергетических обследованиях и энергетическом аудите зданий и является основой для прогнозирования стойкости и надежности сложных стеновых конструкций и разработки энергосберегающих мероприятий.
7. Результаты численных экспериментов показали, что в начале промерзания ограждающей конструкции происходит замедление увеличения теплопотерь здания на 4...6% по сравнению с рассчитанными по нормативным методикам, а затем влияние увеличения теплопроводности материалов начинает доминировать над влиянием фазового перехода «вода – лёд», и теплопотери превышают рассчитанные по нормативным методикам на 8...10%.
8. Разработанные методы расчета и их программно-алгоритмическое обеспечение используются в ООО «Бармингов» при проведении энергетических обследований и энергетического аудита зданий. Выполнение разработанных с их помощью рекомендаций позволило сократить тепловые потери двух зданий на 5,7 и 8,4%.

Перспективой дальнейшей разработки тематики является переход от решенной тепловой задачи к разработке модели термонапряженного состояния материалов в зоне промерзания с целью прогнозирования стойкости строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих

печатных работах автора

В изданиях из перечня ВАК

1. Mizonov, V., Yelin, N., Sakharov, A. Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item. *Applied Thermal Engineering*, 79(2015)pp.149-152.
2. **Сахаров А.А.** Ячеечная модель замерзания влаги в плоской теплопроводящей стенке/А.А. Сахаров, С.В. Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // *Строительство и реконструкция*. №6 (44) 2012 (ноябрь-декабрь). С.96-101
3. **Федосов С.В.** Математическая модель теплопроводности и промерзания ограждающих конструкций в окрестности закладных деталей. / С.В. Федосов, А.А. Сахаров, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // *Вестник гражданских инженеров*. 2013, №1(36). С.32-36
4. **Федосов С.В.** Ячеечная модель замерзания и оттаивания влаги в ограждающих конструкциях / С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, А.А. Сахаров // *Строительные материалы*.- 2013, №3. С.70-74

В прочих изданиях

5. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2014618663. Моделирование кинетики промерзания стен зданий в окрестности закладных деталей / Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Елин Н.Н., Сахаров А.А.; правооблад. ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 27.08.14
6. **Сахаров А.А.** Моделирование фазовых переходов «жидкость-твёрдое» в плоской теплопроводящей стенке/ А.А. Сахаров, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // Информационная среда вуза: Материалы XIX Международной научно-технической конференции, Иваново, ИГАСУ, 2012. С. 743-744
7. **Сахаров А.А.** Моделирование двухмерной теплопроводности в составной стенке с фазовыми переходами/ А.А. Сахаров, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, Н.Р. Лезнова//Сб. материалов 17-й МНТК «Состояние и перспективы развития электротехнологий – 17-е Бенардосовские чтения», т.2, Иваново, 2013.
8. **Сахаров А.А.** Моделирование тепловых процессов в ограждающих конструкциях зданий при их промерзании / А.А. Сахаров, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин //Труды XXVI Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26», Т.7, Н.-Новгород, 2013. С.33-34
9. **Сахаров А.А.** Компьютерная программа для моделирования процессов промерзания ограждающих конструкций зданий / А.А. Сахаров, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов// Информационная среда вуза: Материалы XX Международной научно-технической конференции, Иваново, ИвГПУ, 2013 – с. 239-242
10. **Сахаров А.А.** Результаты компьютерного моделирования процессов промерзания ограждающих конструкций зданий / А.А. Сахаров, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов // Информационная среда вуза: Материалы XX Международной научно-технической конференции, Иваново, ИвГПУ, 2013 – с. 243-246

Научно-информационное издание

Сахаров Алексей Анатольевич

Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и изделия

Разработка методов прогнозирования теплового состояния строительных изделий и конструкций при эксплуатации в условиях их промерзания и оттаивания

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 2015. Формат 60 X 84 ¹/₁₆.

Печать Усл. печ. л. Тираж 100 экз.

Государственное образовательное учреждение высшего образования

«Ивановский государственный политехнический университет»

153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20