

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Н.Н. Елин

Иваново 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ВЛАГИ В МАТЕРИАЛЕ	10
1.1. Общая характеристика теплового и влажностного состояния промерзающих ограждающих конструкций и определяющих его параметров.....	10
1.2. История развития моделирования и расчета процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях.....	13
1.3. Теплообменные и массообменные характеристики теплопереноса..	20
1.4. Аналитические решения для промерзания влажной конструкции.....	31
1.5. Ячеечные модели и их использование в описании процессов Переноса.....	33
1.6. Постановка задачи исследования.....	40
Глава 2. ПРОМЕРЗАНИЕ И ОТТАИВАНИЕ ВЛАГИ В ПЛОСКОЙ СТЕНКЕ (ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ)	41
2.1. Описание процесса в элементарной ячейке.....	41
2.2. Ячеечная модель процесса в плоской стенке.....	47
2.3. Расчетное исследование процесса в плоской стенке.....	52
2.4. Процессы промерзания и оттаивания в многослойных строительных изделиях.....	58
2.5. Выводы по главе 2.....	60
Глава 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ДВУХМЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ С УЧЕТОМ ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ ВЛАГИ	61
3.1. Общий подход к построению двухмерных ячейчатых моделей.....	61
3.2. Моделирование процесса в стыке стеновых панелей.....	68
3.3. Процессы промерзания в окрестности закладных деталей.....	73
3.4. Выводы по главе 3.....	85
Глава 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	86
4.1 Описание экспериментальной установки и результатов экспериментов...	86
4.2 Основные зависимости для расчета процессов теплопередачи через ограждающую конструкцию.....	90
4.3. Описание интерфейса и порядка работы с компьютерным инженерным методом расчета.....	95
4.4. Описание моделируемого объекта.....	101
4.5. Описание и анализ результатов моделирования тепловлажностного состояния ограждающих конструкций моделируемого объекта.....	104
4.6. Результаты практического применения компьютерной программы ТВСОК.....	112
4.7. Выводы по главе 4.....	113

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ.....	115
6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	117
7. ПРИЛОЖЕНИЯ.....	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Промерзание стен и покрытий в су-
ровых условиях эксплуатации происходит весьма часто, особенно в зданиях из
тонкостенных многослойных конструкций, получивших большое распростра-
нение. Проблема прогнозирования их промерзания, а также разработка меро-
приятий, препятствующих этому процессу, является актуальной задачей строи-
тельной индустрии, поскольку промерзание резко снижает термическое сопро-
тивление ограждающих конструкций и приводит к деградации физико-
механических свойств материалов, из которых они изготовлены. Кроме того,
одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность стеновых ограж-
дающих конструкций, выполненных, как правило, из бетона или кирпича (ке-
рамического или силикатного), является цикличность периодов замораживания
и оттаивания. При периодическом замораживании и оттаивании в порах эле-
ментов конструкций происходит увеличение объема воды при фазовом перехо-
де ее из жидкости в лед, вследствие которого возникают предпосылки для за-
рождения внутренних напряжений в материале, приводящих к потере прочно-
сти 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 клас-
сических методов аналитической теории теплопроводности далеко не всегда
может удовлетворить потребности проектировщиков, особенно при решении
задач связанных с фазовыми переходами в материале. Для того чтобы досто-
верно прогнозировать процессы промерзания строительных изделий в ограж-
дающих 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 расче-
та, 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 теплообменных 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 надежности 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 двумерной 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 стойкости 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 устано-

вившееся 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 двухмерной 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 окружающей среды 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 Между-

народной 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 ИГ-ЭУ, 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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ВЛАГИ В МАТЕРИАЛЕ

Объектом исследования настоящей работы является тепловой режим многослойных ограждающих конструкций зданий при низких температурах окружающей среды, при которых возможно их частичное промерзание.

Материалы, из которых изготавливаются ограждающие конструкции зданий, обычно бывают влажными, поэтому процессы теплообмена в них связаны с изменением фазового состояния влаги. При фазовых превращениях типа «жидкость–твёрдое» расходуется теплота плавления или выделяется теплота льдообразования. Теплофизические характеристики материалов при этом могут сильно изменяться.

Решение задачи о теплопередаче с учетом фазовых превращений влаги имеет большое практическое значение, но оно связано с большими математическими трудностями.

1.1. Общая характеристика теплового и влажностного состояния промерзающих ограждающих конструкций и определяющих его параметров

Промерзание стен и покрытий происходит весьма часто, особенно в зданиях из тонкостенных многослойных конструкций, получивших большое распространение. Это вызывается либо неправильным их конструированием и, как следствие, образованием тепловых мостиков, либо увлажнением конструкций и повышением в результате этого их теплопроводности. Причиной промерзания могут стать также ошибки в определении толщины стен и покрытий или их утеплителя [23, 26, 109, 110].

Промерзание характеризуется образованием конденсата водяного пара на внутренней поверхности стены. Конденсат оседает в виде капель, когда темпе-

ратура этой поверхности становится ниже точки росы, т. е. температуры образования конденсата пара, соответствующей данной относительной влажности воздуха. Промерзанию стен способствует увлажнение материала стены атмосферной влагой, приводящее к снижению теплоизоляционных свойств стены [23].

Чаще всего из-за усиленного обдувания промерзают углы зданий, угловые и рядовые стыки панелей, особенно при поврежденных водостоках, а также стены и покрытия вдоль карнизов, перемычки. Промерзание покрытий, происходящее чаще всего вдоль карнизов вследствие недостаточной толщины утеплителя, приводит к подтаиванию снега и образованию наледей вдоль карнизов.

Промерзание через стыки сборных элементов происходит преимущественно в трехслойных бетонных стенах. Промерзание через горизонтальные и вертикальные стыки может быть обусловлено:

- отсутствием утепления стыков;
- применением неподходящего утеплителя;
- разрывами непрерывности утеплителя или другими дефектами его устройства;
- отсутствием слоя утеплителя в частях элементов, непосредственно прилегающих к стыкам;
- увлажнением кромок стеновых элементов и герметизирующего материала в швах вследствие интенсивного проникания дождевой воды через стыки.

Первые решения трехслойных стен, относящиеся к 1958-1959 г.г., систематически изменялись и совершенствовались. В первых зданиях были запроектированы стыки с заполнением из вспененных материалов и цементного раствора, что, однако, не обеспечивало их герметичности. Кроме того, толщина отделочного слоя оказалась недостаточной, а способ его соединения с внутренним слоем не обеспечивал его свободного деформирования при колебаниях температуры наружного воздуха. Из-за отсутствия опыта эксплуатации эти факторы не были учтены при проектировании и изготовлении конструкций.

Наконец, недостаточной оказалась теплоизоляция стен, и в соединениях панелей, а также в перемычках возникали дополнительные мостики холода.

При эксплуатации этих зданий были отмечены дефекты, приведенные выше, а также обнаружилось протекание атмосферной влаги в местах крепления заполнения проемов вследствие недоброкачественной герметизации и неправильной конструкции металлического наружного покрытия подоконников. Указанные дефекты были следствием недостаточных в то время сведений о действительных условиях работы наружных стен и, в частности, о деформациях, вызываемых колебаниями температуры.

Промерзание ограждающих конструкций зданий приводит к отрицательным последствиям, главные из которых следующие:

1. Уменьшение термического сопротивления, обусловленное тем, что теплопроводность льда примерно в 3,5 раза больше теплопроводности воды;
2. Уменьшение воздухо- и паропроницаемости;
3. Снижение долговечности вследствие большого количества циклов «промерзание-оттаивание».

Приведенное фактическое сопротивление теплопередаче стеновых панелей, по данным АКХ имени К. Д. Памфилова, достигает только 80%, а в отдельных случаях лишь 60% от нормы. Например, в условиях Москвы оно составляет $0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$, а иногда $0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$ вместо установленного $1,12 \text{ м}^2 \cdot \text{°К/Вт}$.

Способы борьбы с вышеперечисленными отрицательными последствиями применяются разные.

В местах, где возникает усиленное промерзание и продувание, необходимо отбить штукатурку откосов у оконных и дверных проемов, тщательно проконопатить паклей, смоченной в гипсовом растворе, зазоры между оконными (дверными) коробками и поверхностью стен с последующим восстановлением штукатурки. Если усиленное продувание и промерзание наблюдается в местах прохождения осадочных швов, то необходимо тщательно проконопатить осадочный шов промасленным жгутом и восстановить отделочный слой.

Нижние части углов стен в арочных сквозных проездах зданий защищают от повреждения путем заделки уголков или обшивки углов зданий листовым железом на высоту 1,5...2 м от поверхности отмостки.

Более эффективным, но и более дорогим способом является применение систем утепления фасадов. Как правило, применяется наружное утепление, например - наружная скрепленная теплоизоляция стен Ceresit.

1.2. История развития моделирования и расчета процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях.

Важная роль в современной науке отводится изучению процессов переноса тепла и вещества. При этом характерной особенностью данных процессов является их взаимосвязь. Лидирующее положение в развитии учения о тепло- и массопереносе занимают российские исследователи.

Теория переноса тепла и вещества, поглощенного капиллярно-пористыми коллоидными телами, сначала создавалась и разрабатывалась как часть агрофизики применительно к почвам и грунтам. Исключительно большая роль принадлежит здесь известному русскому ученому В. В. Докучаеву [17] и его ученикам – А. А. Измаильскому и П. С. Коссовичу [38]. Им удалось заложить основы теории связывания поглощаемой влаги с веществом скелета коллоидного пористого тела. Академиком С.С. Кутателадзе [48] и профессором А. А. Гухманом [31] была разработана теория теплового подобия, на базе которой созданы методы моделирования тепловых процессов.

Характерной особенностью современной теплофизики является ее неразрывная связь с техникой, с технологическими процессами производства. Большое практическое значение процессы теплообмена имеют в технологических процессах химической и легкой промышленности, реактивной и ракетной технике, промышленной и атомной энергетике, а также производстве строительных материалов, изделий и конструкций. Трудом советских теплофизиков А.В. Лыкова [54, 55] и других создана новая отрасль теплотехники – сушильная техника, которая быстро развивается во всех отраслях промышленности.

Зарождение строительной теплофизики как науки следует отнести к 20-м годам двадцатого века. Уместно будет перечислить имена ученых, которые внесли весомый вклад в развитие нового направления в строительной науке. Книга профессора В.Д. Мачинского [63], вышедшая в 1925 г., была первой работой в данной области. Ему же принадлежит ряд других работ, вышедших позднее [64]. Большое влияние на развитие строительной теплофизики оказали также работы профессора О. Е. Власова [18-21], особенно его труд по теплоустойчивости ограждающих конструкций и исследования влажностного режима. Кроме них, у истоков строительной теплофизики как науки стояли инженеры-строители и строители-теплотехники К.Ф. Фокин [96-100], А.С. Эпштейн [116], Р.Е. Брилинг [15, 16], А.М. Шкловер [114, 115], Ф.В. Ушков [89], А.У. Франчук [104-108], В.М. Ильинский [39-41] и другие ученые. А. М. Шкловер разработал метод расчета затухания температурных колебаний в ограждении и колебаний температуры воздуха в здании, Р. Е. Брилинг занимался вопросами воздухопроницания ограждений, а также миграции влаги в строительных материалах.

Строительную теплофизику стали разделять на две тесно взаимосвязанные части: создание микроклимата в помещении за счет систем кондиционирования и разработка эффективных ограждающих конструкций.

С внедрением в практику современного строительства наружных ограждений из пористых строительных материалов с повышенными теплоизоляционными характеристиками, значительное влияние на эксплуатационные свойства ограждений стал оказывать их влажностный режим. Объясняется это тем, что концентрация влаги в порах этих материалов может достигать показателей, которые оказывают существенное влияние на теплозащитные свойства и долговечность зданий. Целесообразно будет более подробно привести в данной работе историю развития методов расчета ограждающих конструкций с учетом их влажностного состояния.

Одними из первых работ, в которых обращено внимание на диффузию водяного пара в ограждающей конструкции за счет разности давлений на внут-

ренной и внешней поверхности ограждения являются работы В.Д. Мачинского [64]. Первый же метод расчета влажностного режима предложил К.Ф. Фокин в работе [98], взяв за основу стационарный влажностный режим. Метод позволяет определить зону конденсации водяных паров в толще ограждения при увлажнении их парообразной и жидкой влагой. В последующих работах [96, 99, 100] К.Ф. Фокин совершенствовал этот метод, который в дальнейшем получил широкое распространение и послужил основой для множества модификаций [40, 114], используемых и в настоящее время, в том числе в СНиП «Строительная теплотехника» [80]. Основным недостатком методов расчета, основанных на рассмотрении стационарного режима, является их несоответствие реальному физическому процессу, так как данный режим на практике невозможен. Поэтому эти методы служат лишь для ориентировочной оценки влажностного состояния ограждающих конструкций.

Разработкой методов расчета нестационарного влажностного режима впервые занялся А.С. Эпштейн, который в работе [116] для решения дифференциального уравнения второго порядка, описывающего перенос влаги, использовал метод конечно-разностной аппроксимации по явной схеме. В свою очередь К.Ф. Фокин [199] предложил более совершенный метод, который назвал методом «последовательного увлажнения». В дальнейшем, основываясь на исследованиях влагопереносных свойств строительных материалов, проведенных О.Е. Власовым [18, 21] и Р.Е. Брилингом [15, 16], К.Ф. Фокин [100] уточнил метод «последовательного увлажнения» за счет учета перемещения жидкой фазы влаги, а В.Г. Гагарин [23, 27] еще более усовершенствовал его. Данный метод приводится в «Руководстве по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий» [76].

В 1951 году в работе А.У. Франчука [106] был предложен универсальный метод расчета совместно происходящих процессов тепло- и влагопереноса с учетом влияния на них множества факторов. Он сам [107, 108] и его ученики позднее [52] занимались совершенствованием данного метода, основными недостатками которого являются формализация параметров влагопереноса, обу-

словленная экспериментальным их получением, отсутствие данных по некоторым характеристикам влагопереноса, изменяющимся в ходе процесса в зависимости от температуры и увлажнения материала.

Методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций, основанные на разработках корифеев строительной теплофизики А.В. Лыкова [53, 56] и В.Н. Богословского [5-9], выделяют в отдельную группу. Эти ученые и их последователи в 50-х годах значительно продвинули строительную теплофизику, их работы позволили создать математические модели процессов, протекающих в ограждениях при различных режимах эксплуатации зданий. Принципиальной, отличающей их от других, идеей является введение нового понятия – «потенциал влажности», сходного по смыслу с потенциалом теплосодержания (температурой). Величину потенциала влажности можно измерять по любому из факторов, от которых он в общем случае зависит: гравитационного и осмотического поля, степени влажности и вида материала, температуры внешней среды и поля температур внутри материала, давления, химического потенциала и т.д., но при условии, что другие факторы остаются стабильными в процессе измерения. Потенциал влажности А.В. Лыкова является изотермическим потенциалом и определяется экспериментально, в результате его применения уравнение тепломассопереноса разбивается на два, одно из которых описывает влагоперенос за счет действия градиента изотермического потенциала, второе за счет действия градиента температур. *Более детально это понятие будет рассмотрено позднее.* За счет введения экспериментального потенциала влажности упрощаются условия сопряжения влажностного состояния на стыке слоев многослойного ограждения и различного рода фронтов, расположенных в ограждении, а также сокращается количество коэффициентов влагопереноса, которые необходимо определить экспериментально для решения конкретной задачи. Это значительно упрощает моделирование многослойных конструкций. В.Н. Богословский предложил понятие неизотермического потенциала влажности, градиент которого одновременно учитывает влагопроводность и термовлагопроводность, что позволяет получить единственное диффе-

ренциальные уравнение тепломассопереноса, аналогичное классическому уравнению Фурье для нестационарной теплопроводности. Простота уравнения осложняется необходимостью экспериментального определения коэффициентов влагопроводности, которые в этом случае зависят и от влагосодержания и от температуры.

Основным недостатком методики теплотехнического расчета ограждающей конструкции по [81], которая остается практически неизменной вот уже на протяжении более двадцати лет, является то, что она предусматривает стационарность процессов тепло- и массопереноса, а это лишь приблизительно оценивает состояние ограждения, так как реально протекающий процесс носит нестационарный характер.

Система дифференциальных уравнений переноса вместе с начальными и граничными условиями является математической моделью реального процесса. Решение этой системы позволяет получить полную картину распределения тепла и влаги в теле с течением времени и дать анализ кинетики и динамики процесса. С этой точки зрения аналитическое решение, как самое точное, не может сравниться с эмпирическими методами. Остановимся подробнее на основных аналитических методах решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса. Первоначально для решения уравнений теплопроводности использовались лишь классические методы: метод разделения переменных, метод источников, методы, основанные на применении функций Грина, Дирака и другие. Более детально эти методы описаны в работе А.Н. Тихонова и А.А. Самарского [88].

Но классические методы не всегда эффективны для решения практических задач. Поэтому в 50-х годах, под влиянием запросов техники для изучения явлений переноса тепла и влаги стали широко применяться операционные методы [34, 117].

Так как для практически важных случаев коэффициенты внутреннего и внешнего переноса теплоты и влаги существенно не меняются в течение временных рамок процесса, что позволяет говорить о их постоянстве в определен-

ном промежутке времени и вынести их за знаки математических операторов, то нелинейная краевая задача тепломассопереноса становится линейной. Для решения линейных краевых задач тепломассопереноса используют следующие известные методы: интегральных преобразований в конечных и бесконечных пределах: методы Лапласа, Лапласа-Карсона, Фурье, Ханкеля; классические: метод разделения переменных (метод Фурье), метод функций источников (функций Грина).

Для решения нелинейных задач в свою очередь применяют вариационные и численные методы. На практике часто используются такие инженерные методы решения задач нестационарной теплопередачи как методы конечных разностей, методы экспериментальных аналогий и др. Описание наиболее распространенных методов можно найти в работах [3, 47, 49, 111].

Решить задачу тепломассопереноса в случае твердого тела позволяют следующие методы:

- проекционные: метод коллокаций, метод Бубнова-Галеркина, метод моментов, метод интегрального теплового баланса;
- линеаризации: метод последовательных приближений, методы алгебраических или интегральных подстановок, метод возмущений или метод малого параметра;
 - вариационные: Канторовича, Ритца, Лейбензона, Био;
 - сведение краевой задачи к уравнениям и задачам других типов, например, метод сведения краевой задачи в частных производных к задаче, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Для определенных типов задач нужно подбирать наиболее эффективный метод, например, метод разделения переменных с успехом применяется для описания процессов нестационарного переноса в телах с неравномерными начальными распределениями температур и линейными граничными условиями. Но следует помнить о недостатках используемых методов. Так, метод разделения переменных позволяет получить достаточно точное решение лишь при больших значениях Fo , если же $Fo < 0,1$, то точность решения снижается, по-

сколькx ухудшается сходимость ряда. В случае, когда тело имеет переменные теплофизические свойства, для решения краевых задач теплопроводности обычно используют вариационные и численные методы, однако с уменьшением числа Фурье точность решения также уменьшается.

В связи с бурным развитием вычислительной техники все большее применение получают численные методы, основанные на решении дифференциальных уравнений в частных производных с помощью ЭВМ. При рассмотрении систем дифференциальных уравнений с весьма общими краевыми условиями точные методы решения наталкиваются на большие трудности, которые становятся непреодолимыми при решении нелинейных задач. В этих случаях приходится обращаться к численным методам решения. Наиболее распространенным методом приближенного решения уравнений тепло- и массопереноса является метод конечных разностей (метод сеток).

Использование компьютерной техники часто позволяет свести нелинейную задачу к линейной. Если использовать зональный метод расчета, предложенный С.П. Рудобаштой [75], разделив весь процесс на n элементарных микропроцессов, в пределах каждого из которых все теплофизические параметры фаз могут считаться постоянными, то нелинейную задачу теплопереноса можно свести в совокупности n линейных задач. В этом случае может быть использован комбинированный подход, заключающийся в том, что в начале каждого микропроцесса получают аналитическое решение, а затем весь процесс поэтапно просчитывается на ЭВМ. Комбинированный подход часто более эффективен, чем непосредственное численное решение нелинейной задачи. Необходимо отметить, что метод дает хорошие результаты в случае, если численное решение осуществляется в совокупности с методом интегрального преобразования Лапласа. Это обусловлено тем, что в области больших чисел Фурье достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь нескольких первых членов ряда. С уменьшением числа Фурье (a , следовательно, и времени процесса) число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, резко возрастает, но современные компьютеры в

состоянии достаточно быстро справиться и с этой проблемой. Кроме того, преобразование Лапласа часто дает возможность получить решение в двух формах: при $Fo > 0,1$ и $Fo \ll 0,1$, в этом и заключается преимущество использования этого преобразования.

Получение единого аналитического решения задачи взаимосвязанного теплопереноса для многослойной конструкции практически невозможно. Поэтому в данной работе решены отдельные краевые задачи для каждого слоя ограждения и предложен метод их сопряжения в общую задачу для слоистой среды. Подспорьем в реализации предложенного метода служили «Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов» Ф.У. Фанчука [104] и таблицы Л.М. Никитиной [72, 73].

1.3. Теплообменные и массообменные характеристики теплопереноса.

Коэффициент теплопроводности.

Основной закон теплопроводности может быть сформулирован так: плотность теплового потока прямо пропорциональна напряженности температурного поля, или плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры, то есть

$$q = \lambda_q E = -\lambda_q \text{grad}T = -\lambda_q \nabla T = -\lambda_q 1_n \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (1.1)$$

где λ_q – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности, являющийся физической характеристикой тела в отношении его способности к теплопроводности и измеряется в $Вт/м \cdot К$.

Передача тепла в капиллярно-пористых телах, к которым относятся практически все строительные материалы, в основном происходит путем молекулярной теплопроводности через скелет тела и внутрипородное связанное вещество (водяной пар, воздух, вода, лёд). Различия в коэффициенте λ_q разнообразных неоднородных материалов объясняется эффектом пористости. Существует много работ, посвященных исследованию зависимости коэффициента тепло-

проводности от пористости тела. Обзор работ по теплофизическим характеристикам дан в работе А.Ф. Чудновского [112]. Химико-минералогическая природа твердого скелета капиллярно-пористого тела почти не влияет на коэффициент теплопроводности, а решающее влияние на него оказывает форма связи влаги со скелетом тела. Для коллоидных капиллярно-пористых тел с наличием осмотической формы связи влаги кривая $\lambda_q=f(u)$ имеет максимум, что объясняется влиянием массопереноса на коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Коэффициент теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов изменяется в пределах от 0,0233 до 2,8 Вт/м·К, с повышением температуры он увеличивается примерно по линейному закону. Материалы с низким значением λ_q ($\lambda_q \leq 0,23$ Вт/м·К) относятся к теплоизоляционным [57]. В интервале температур от 30 до 75°C коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов изменяется незначительно. При увеличении температуры свыше 75°C происходит заметное увеличение λ за счет лучистого теплообмена в порах тела. Для теплоизоляционных материалов получено соотношение для коэффициента теплопроводности, учитывающее его изменение от температуры и влагосодержания [70]: $\lambda_q = \lambda_0 + At \cdot u \cdot e^{-bu}$, где λ_0 – коэффициент теплопроводности абсолютно сухого тела при 0°C, A и b – постоянные, определяемые из опыта, u – влагосодержание тела[53].

Коэффициент температуропроводности a_q [м²/с] характеризует интенсивность изменения температурного поля в теле, то есть является его теплофизической характеристикой.

$$a_q = \frac{\lambda_q}{c_q \cdot \rho_0}, \quad (1.2)$$

где c_q – теплоемкость тела.

Для капиллярно-пористых тел коэффициент температуропроводности или диффузии тепла с увеличением влагосодержания увеличивается, а затем уменьшается, так что кривая $a_q(u)$ имеет максимум. Этот максимум соответ-

ствуется переходу от одной формы связи влаги к другой. Исследованиями М.Ф. Казанского и его учеников было установлено существование ряда особых точек на кривых $\lambda_q(u)$ и $a_q(u)$, отражающих состояние капиллярной влаги в пористом теле. В частности, на основе анализа $\lambda_q(u)$ и $a_q(u)$ можно установить границы адсорбционной влаги, капиллярной влаги стыкового и канатного состояний, а также максимальное гигроскопическое влагосодержание. Таким образом, исследование по зависимости переносных коэффициентов (λ_q, a_q) влажных капиллярно-пористых тел от влагосодержания дает возможность установить формы связи влаги с влажными телами, что является новым методом физико-химического анализа влажных материалов.

Коэффициент массопроводности.

По аналогии с другими явлениями переноса можно предположить, что плотность потока вещества, то есть масса вещества, переносимая в единицу времени через единицу изопотенциальной поверхности, прямо пропорциональна градиенту потенциала.

$$q_m = -\lambda_m \nabla \Theta = -\frac{\lambda_m}{c_m} \nabla u, \quad (1.3)$$

где $q_m = \frac{dM}{d\tau \Delta S}$ – плотность потока вещества в кг/м²·с, $\nabla \Theta$ – градиент потенциала вещества в ед.пот/м, ∇u – градиент влагосодержания, c_m – удельная массоемкость, λ_m – коэффициент пропорциональности, аналогичный коэффициенту теплопроводности в законе Фурье и называемый коэффициентом массопроводности в кг/м·с·ед.пот [59]. Или

$$q_m = -\frac{\lambda_m}{c_m \cdot \gamma_0} \cdot \gamma_0 \nabla u = -a_m \gamma_0 \nabla u, \quad (1.4)$$

то есть получаем известный закон влагопроводности, где a_m – коэффициент потенциалопроводности.

Коэффициент массопроводности $\lambda_m = a_m \gamma_0 c_m$ определяет способность влажного материала к переносу массы вещества под действием движущих сил и является функцией удельного массосодержания и температуры.

Коэффициент потенциалопроводности.

Основной коэффициент массопереноса — коэффициент потенциалопроводности a_m определяют из экспериментальных исследований для каждого конкретного материала. Он был впервые введен в работах Я.Н. Миниовича, И.И. Палеева и А.А. Шумилина в 1931-1932 годах. Коэффициент потенциалопроводности

$$a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \cdot \gamma_0}, \quad (1.5)$$

входящий в закон влагопроводности (1.6), еще называют коэффициентом влагопроводности, но так как он равен отношению коэффициента влагопереноса к объемной массоемкости, поэтому коэффициент a_m удобнее называть коэффициентом потенциалопроводности, сохраняя название коэффициента влагопроводности (массопроводности) за коэффициентом λ_m . Благодаря этому будет наблюдаться полная аналогия между переносом вещества и тепла [59].

Коэффициент a_m [м²/с] является сложной функцией u и t , отличающейся для различных материалов. Непрерывное увеличение a_m с ростом влагосодержания типичных капиллярно-пористых тел характерно для переноса пара. Если массоперенос происходит в виде жидкости, то a_m может возрастать или оставаться постоянным с повышением влагосодержания в зависимости от вида дифференциальной кривой распределения пор по радиусам. Для капиллярно-пористых и капиллярно-пористых коллоидных тел обычно с повышением влажности a_m увеличивается (для одних материалов резко, для других — плавно). При больших влажностях он может:

- продолжать увеличиваться;
- стать постоянным, как например, для типичных капиллярно-пористых тел, в том числе и для большинства строительных материалов;

- уменьшаться (для древесины с увеличением влажности до 30% $a_m \rho_0$ увеличивается, а потом, при изменении влажности от 30% до 105%, уменьшается, и, наконец, опять резко растёт при влажности выше 110%) [59].

Характер изменения a_m при различных влагосодержаниях определяется формой связи влаги с телом и видом влагопереноса (перенос пара или жидкости).

С увеличением температуры коэффициент a_m увеличивается.

Коэффициенты a_m и a_q характеризуют свойства тела в отношении интенсивности развития полей потенциалов теплопереноса (температуры) и массопереноса. Поэтому они могут быть названы коэффициентами потенциалопроводности теплопереноса (температуропроводности) a_q и массопереноса a_m , что подтверждает полную аналогию между переносом массы связанного вещества (влаги) и тепла.

Коэффициент теплообмена.

При аналитических исследованиях теплопередачи в твердых телах, обтекаемых потоками жидкости и газа, на границе между телом и жидкостью, как правило, рассматриваются граничные условия третьего рода. Они представляют собой условия пропорциональности теплового потока у стенки $q(x, \tau)$ разности температуры стенки и некоторой характерной температуры набегающего потока ($T_n - T_\infty$), причем вводится коэффициент пропорциональности $\alpha_q(x, \tau)$, называемый коэффициентом теплообмена или теплоотдачи, Вт/м²·К.

$$q(x, \tau) = \alpha_q(x, \tau) (T_n - T_\infty), \quad (1.6)$$

где x – координата вдоль поверхности стенки, τ – время.

Это соотношение называют законом Ньютона. Коэффициент теплообмена определяют как теоретически (из решения уравнений пограничного слоя), так и экспериментально [42, 48, 58].

Соотношение (1.3.6), строго говоря, справедливо лишь при постоянной температуре $t_n(\tau)$. Однако в большинстве случаев $t_n(\tau)$ изменяется вдоль по-

верхности тела, поэтому в случае конвективного теплообмена это соотношение можно принять в качестве граничного условия как расчетную схему первого приближения [58].

По закону сохранения энергии количество тепла, отдаваемого (или принимаемого) единицей площади поверхности тела должно быть равно тому количеству тепла, которое подводится (или отводится внутрь) к поверхности тела в единицу времени единицей площади поверхности путем теплопроводности. Тогда условие третьего рода запишется так:

$$\lambda_q \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n + \alpha_q [t_n(\tau) - t_c(\tau)] = 0, \quad (1.7)$$

где n – нормаль к поверхности тела.

Коэффициент теплообмена зависит от скорости окружающей среды, ее температуры, от состояния поверхности (он изменяется вдоль поверхности тела). В качестве приближения можно принять коэффициент теплообмена постоянным, не зависящим от температуры, и одинаковым для всей поверхности тела [53].

Коэффициент массообмена.

Коэффициент массообмена также используется при задании граничного условия третьего рода в задачах массообмена поверхности тела с окружающей средой (влажным воздухом). Он, как известно, численно равен интенсивности массообмена при разности концентраций влаги между поверхностью материала и окружающей средой, равной единице [54].

Аналогично конвективному теплообмену можно написать выражение закона конвективного массообмена, являющегося известным законом испарения Дальтона:

$$q_m = \alpha_m (p_n - p_c) = \alpha_\Theta (\Theta_n - \Theta_c), \quad (1.8)$$

где p_n – потенциал диффузионного массопереноса пара на поверхности тела, p_c – потенциал переноса пара в окружающей среде α_Θ – коэффициент массообмена, отнесенный к разнице потенциалов Θ [53, 73].

Так как потенциал массообмена является безразмерной величиной, то коэффициент массообмена α_m имеет размерность плотности потока массы вещества $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{М}$.

Коэффициент массообмена зависит от влажности на поверхности тела u_n , основное влияние на него оказывают температура и скорость движения воздуха.

Удельная теплоемкость.

Теплоемкость – это свойство материалов поглощать тепло при повышении температуры. Показателем теплоемкости является удельная теплоемкость материала c_q , равная количеству тепла, которое необходимо сообщить 1 кг данного материала, чтобы повысить температуру всей его массы на 1° . Удельная теплоемкость имеет размерность $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$.

Для строительных материалов удельная теплоемкость изменяется в пределах от 0,75 (для минеральной ваты) до 2,51 $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ (для дерева). Наибольшей удельной теплоемкостью обладает вода ($c_q=4,19$).

Удельная теплоемкость материала зависит от его влажности. С повышением влажности материала возрастает и его теплоемкость, что объясняется присутствием воды, имеющей теплоемкость, значительно превышающую теплоемкость строительных материалов. Зависимость удельной теплоемкости материала от его влажности выражается формулой:

$$c_q = \frac{c_{q0} + 0,01u_g}{1 + 0,01u_g}, \quad (1.9)$$

где c_q , c_{q0} – удельные теплоемкости тела при влажности u_g и в сухом состоянии соответственно, u_g – удельное влагосодержание материала в % [96].

Удельная массоемкость.

Связь влагосодержания тела с потенциалом массопереноса отражает удельная массоемкость, которая является основным термодинамическим параметром.

Выше указывалось, что при введении экспериментального потенциала переноса вещества удельная изотермическая (то есть измеренная при постоянной температуре) массоемкость эталонного тела принималась равной одной сотой максимального сорбционного массосодержания (максимальной гигроскопической влажности):

$$(c_{mэ})_T = \frac{1}{100} \cdot u_{cm}. \quad (1.10)$$

Удельная изотермическая массоемкость исследуемого тела, равная частной производной удельного массосодержания по потенциалу вещества при постоянной температуре, определяется из экспериментальной кривой $u = f(\Theta)$ как тангенс угла φ наклона касательной в данной точке кривой:

$$c_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \Theta} \right)_T = tg\varphi. \quad (1.11)$$

Из анализа кривых, приведенных Лыковым в работе [59], видно, что в большинстве случаев c_m с повышением потенциала увеличивается. Например, для кварцевого песка при повышении потенциала от 100 до 700°М удельная массоемкость возрастает примерно в 40 раз. c_m измеряется в кг/кг-ед.пот.

Удельная изотермическая массоемкость для химического потенциала.

Под удельной изотермической массоемкостью тела понимается такое количество влаги (кг), которое необходимо для увеличения химического потенциала 1 кг абсолютно сухого материала на 1 Дж/моль [73].

Истинная удельная изотермическая массоемкость c'_m (моль/Дж) вычисляется также путем графического дифференцирования кривых «удельное влаго-содержание – химический потенциал массопереноса» при постоянной температуре.

Никитиной были построены и проанализированы в [73] графические зависимости c'_m от удельного влагосодержания для различных материалов при постоянной температуре. Анализируя их, она делает вывод, что в первом приближении значение c'_m при $u = \text{Const}$ не зависит от температуры. Из этих же зави-

симостей видно, что истинная удельная изотермическая массоемкость при постоянной температуре с увеличением удельного влагосодержания возрастает.

С ростом объемного веса материала при $u = \text{Const}$ и прочих равных условиях величина c'_m уменьшается. Увеличение c'_m с уменьшением объемного веса при $u = \text{Const}$ скорее всего объясняется увеличением его пористости.

Температурный и термоградиентный коэффициенты потенциала переноса массы вещества.

При изотермических условиях потенциал массопереноса является однозначной функцией влагосодержания. Тогда градиент потенциала $\nabla\Theta$ можно выразить через градиент влагосодержания ∇u и закон изотермической массопроводности запишется формулой (1.4).

При неизотермических условиях соотношение (1.3) основного закона массопроводности остается в силе, однако надо учесть дополнительные виды массопереноса (теплообмен всегда сопровождается массообменом), возникающие при наличии температурного градиента внутри тела, и особенности определения потенциала по экспериментальной шкале.

В этом случае к соотношению (1.3) надо добавить член $\lambda_m \delta_s \nabla t$, где коэффициент δ_s называется коэффициентом Соре влажного капиллярно-пористого тела. Однако, как показывают расчеты, коэффициент Соре для влажных тел является величиной малой, и этот вид переноса влаги в большинстве случаев можно не учитывать. Помимо эффекта Соре, наличие температурного градиента вызывает во влажных телах диффузионный перенос пара под действием градиента его парциального давления. Диффузионный перенос пара, вызванный разностью температур, учитывается дополнительно в виде соотношения [53]:

$$q'_{\text{диф}} = -k_D \nabla T.$$

Кроме того, движение жидкости в пористом теле по направлению потока тепла может быть вызвано наличием заземленного воздуха. При повышении температуры давление заземленного воздуха увеличивается, и пузырьки воздуха расширяются. В результате этого жидкость «проталкивается» по направ-

лению потока тепла. В этом случае поток жидкости равен $k_3 \nabla t$, где коэффициент k_3 зависит от физических свойств жидкости, структуры пористого тела и разности влагосодержаний $(u - u_{\max})$, которая входит сомножителем в выражение k_3 . Следовательно, с увеличением влагосодержания величина k_3 уменьшается и при достижении максимального влагосодержания намокания ($u = u_{\max}$) становится равной нулю. В этом состоянии защемленный воздух отсутствует, все поры заполнены жидкостью.

Итак, окончательно, учитывая все виды неизотермического массопереноса при постоянном давлении, получим

$$q_m = -\lambda_m \nabla \Theta - \lambda_m \delta_s \nabla t - k_D \nabla t - k_3 \nabla t = -\lambda_m (\nabla \Theta + \delta_\Theta \nabla t) \quad (1.12)$$

где δ_Θ – термоградиентный коэффициент, отнесенный к разности потенциалов массопереноса $\delta_\Theta = \delta_s + (k_D + k_3)/\lambda_m$ [53].

Таким образом, массоперенос описывается действием двух термодинамических движущих сил $\nabla \Theta$ и ∇t . Во влажном состоянии тела потенциал массопереноса $\nabla \Theta$ зависит от влагосодержания и температуры, поэтому $\nabla \Theta$ может быть выражен через ∇u и ∇t :

$$\nabla \Theta = \left(\frac{\partial \Theta}{\partial u} \right)_T \nabla u + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial T} \right)_u \nabla T, \quad (1.13)$$

где $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial T} \right)_u$ – частная производная потенциала массопереноса по температуре при постоянном влагосодержании тела равная температурному коэффициенту потенциала массопереноса.

Используя выражение (1.12) формулу (1.13) можно переписать в виде:

$$q_m = -a_m \gamma_0 \nabla u - a_m \gamma_0 \delta \nabla t, \quad (1.14)$$

где δ – термоградиентный коэффициент, отнесенный к разности влагосодержаний:

$$\delta = c_m \left[\left(\frac{\partial \Theta}{\partial T} \right)_u + \delta_\Theta \right]. \quad (1.15)$$

Термоградиентный коэффициент δ характеризует относительный термический массоперенос пара и жидкости и определяется как отношение градиентов удельного влагосодержания и температуры в стационарном состоянии при отсутствии массообмена. Он характеризует перепад удельного влагосодержания в теле при перепаде температуры в один градус.

Первый член в уравнении (1.14) учитывает перенос жидкости, вызванной градиентом влажности (изотермическая массопроводность или влагопроводность), а второй член – градиентом температуры (термическая массопроводность или термовлагопроводность). Явления термовлагопроводности во влажных капиллярно-пористых телах впервые было обнаружено и экспериментально доказано Лыковым в 1934 году в опытах с керамическими массами, что описано им в работе [48].

Характер изменения термоградиентного коэффициента от удельного влагосодержания для капиллярно-пористых тел зависит от их структуры и вида переноса вещества [55]. Для большинства материалов δ при повышении влагосодержания растет, достигает максимума, а затем уменьшается. При некотором малом значении влагосодержания коэффициент δ становится равным нулю, и при дальнейшем уменьшении влагосодержания становится отрицательным (с физической точки зрения это выглядит как перенос влаги от холодных мест тела к нагретым). С повышением температуры термоградиентный коэффициент увеличивается. Для теплоизоляционных материалов δ практически не зависит от изменения температуры.

При небольшой величине температурного коэффициента, но достаточно высокой истинной удельной изотермической массоемкости материала, величина термоградиентного коэффициента может быть значительной. Температурный коэффициент характеризует изменение химического потенциала с изменением потенциала тепла.

Теплота фазового перехода.

Переход из одной фазы состояния в другую сопровождается поглощением или выделением тепла. Количество тепла, поглощаемого (или выделяемого)

при равновесном изотермическом переходе единицы массы вещества из одной фазы в другую называется удельной теплотой фазового перехода r , кДж/кг.

Между теплотой испарения жидкости r_{21} , теплотой испарения твердого вещества (теплота сублимации) r_{31} и теплотой плавления r_{32} существует следующее соотношение $r_{32} = r_{31} - r_{21}$, где индекс 1 относится к парообразному состоянию вещества, 2 – к жидкости, 3 – к твердому телу.

1.4. Аналитические решения для промерзания влажной конструкции.

Если влажная конструкция находится в талом состоянии, то при понижении температуры наружного воздуха ниже температуры замерзания влаги в материале в результате теплообмена на наружной поверхности и теплопроводности в конструкции образуется промерзший слой, толщина которого δ изменяется во времени. Величина δ является обычно искомой величиной. Изменяющаяся граница мерзлого слоя является фронтом промерзания с постоянной температурой замерзания влаги t_{ϕ} . На этом фронте происходит замерзание влаги с выделением теплоты льдообразования r . На внутренней поверхности конструкции заданы условия теплообмена с воздухом.

Особенность математической формулировки данной задачи по сравнению с традиционной (при отсутствии промерзания) состоит в том, что, во-первых, для мерзлой (м) и талой (т) зон записывают отдельные уравнения теплопроводности, считая их как бы отдельными слоями с переменной во времени границей. Во-вторых, на подвижной границе стыка этих слоев задают особое условие. Это условие является уравнением баланса тепла на фронте промерзания: количество тепла, подводимое к границе из талой зоны, плюс тепло льдообразования, выделяемое при перемещении границы промерзания, равно теплу, отводимому от этой границы в мерзлую зону. Обозначая долю замерзающей влаги i , влажность материала u , кг/кг, и его плотность в сухом состоянии ρ_0 , кг/м³, постановку этой задачи можно записать следующим образом:

уравнение для мерзлой зоны при $0 < x < \delta$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \quad (1.16)$$

уравнение для талой зоны при $\delta < x < l$

$$\frac{\partial t_r}{\partial \tau} = a_r \cdot \frac{\partial^2 t_r}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

условие на фронте промерзания при $x = \delta$

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial t_r}{\partial x} \Big|_{x=\delta} + r \cdot i \cdot u \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau} = -\lambda_m \cdot \frac{\partial t_m}{\partial x} \Big|_{x=\delta} \quad (1.18)$$

Условия теплообмена на поверхностях конструкции

$$\alpha_в \cdot (t_в - t_r|_{x=l}) = -\lambda_m \cdot \frac{\partial t_r}{\partial x} \Big|_{x=l} \quad (1.19)$$

$$\alpha_н \cdot (t_m|_{x=0} - t_н) = -\lambda_m \cdot \frac{\partial t_m}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (1.20)$$

Известны несколько решений данной задачи [57]. Наиболее удобен метод, изложенный в [11]. Рассматривая случай, когда ограждающая конструкция первоначально находилась в талом состоянии, и имело постоянную начальную температуру, равную температуре фазового перехода

$$t_m(x, \tau = 0) = t_\phi = const \quad (1.21)$$

На наружной поверхности температура мгновенно понизилась до постоянной отрицательной величины

$$t(x=0, \tau) = t_н = const \quad (1.22)$$

Предполагая, что температура в мерзлой зоне изменяется по линейному закону, получено решение, позволяющее рассчитать положение границы промерзания

$$\delta(\tau) = \sqrt{\frac{-2 \cdot \lambda_m \cdot t_н \cdot \tau}{r \cdot i \cdot u \cdot \rho_0}} \quad (1.23)$$

и время промерзания до заданной глубины

$$\tau(\delta) = \frac{r \cdot i \cdot u \cdot \rho_0 \cdot \delta^2}{-2 \cdot \lambda_m \cdot t_н} \quad (1.24)$$

Знак минус в формулах (1.23), (1.24) учитывает отрицательное значение температуры $t_н$.

При кратковременных изменениях t_n допущение о линейном характере изменения температуры не может быть использовано и решение данной задачи аналитическими методами весьма затруднительно.

1.5. Ячеечные модели и их использование в описании процессов переноса

С развитием средств компьютерной поддержки инженерных расчетов все больший интерес направлен на применение численных методов [28, 32, 45 – 47 и др.]: конечных разностей, статистических и др. На практике широкое применение получил метод конечных разностей. В связи с тем, что сейчас имеются высокопроизводительные ЭВМ, проблем со временем выполнения расчетов нет, но остается сложным и трудоемким процесс изучения сходимости и устойчивости получаемых решений, а также актуален вопрос универсальности полученных решений. Кроме того, процедура составления разностных уравнений зачастую оторвана от балансов тепла и массы, на основе которых были выведены исходные дифференциальные уравнения, что зачастую ведет к ошибкам в их построении.

Появление эффективных средств компьютерной поддержки операций с матрицами вызвал новую волну интереса к математическим моделям, так или иначе связанных с теорией цепей Маркова.

Новый интерес к этому подходу в значительной степени инициирован монографией А. Тамира [129] и многочисленными работами В.Е. Мизонова и А. Бертье с соавторами [37, 68, 90-95, 101-103, 119, 120, 122, 123]. Следует, однако, отметить, что развиваемые длительное время ячейные модели различных процессов использовали по существу ту же самую идеологию.

Наиболее простой вид имеет одномерная модель процесса марковской цепью. Независимо от вида конкретного процесса характеризующее его аддитивное свойство считается случайной величиной, которая может принимать дискретные значения x_i , $i=1,2,\dots,n$. Пусть в некотором состоянии k известны вероятности, с которыми принимаются эти значения случайной величины S_{ik} ,

причем по смыслу определения вероятности $\sum S_{ik}=1$. Эта совокупность вероятностей может быть представлена вектором столбцом S_k , который называется вектором состояния. При большом числе частиц эти вероятности также могут интерпретироваться как доли частиц, пребывающих в этих состояниях. Если происходят изменения состояний по времени, то эволюция этого процесса рассматривается через дискретные промежутки времени в моменты $t_k=k\Delta t$, где Δt – время перехода, а $k=0,1,\dots$ - номер перехода. Таким образом, все переменные процесса становятся целочисленными: состояние определяется своим номером, а его эволюция – номером перехода. Продолжительность перехода Δt выбирается настолько малой, чтобы в его течение был возможен переход только между соседними состояниями, но не далее. Связь между последовательными состояниями определяется матрицей переходных вероятностей

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & P_{32} & P_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{n-1,n-1} & P_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{n,n-1} & P_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1.25)$$

где P_{ij} – вероятность перейти за время Δt из состояния j в состояние i (P_{ii} – вероятность остаться в состоянии i). Переходы в каждом столбце образуют полную группу событий и суммы вероятностей по столбцам равны единицам.

Эволюция процесса определяется матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P} * \mathbf{S}^k. \quad (1.26)$$

Различные варианты построения матрицы \mathbf{P} детально описаны в работах [37, 68, 90]. Принимаемые состояния часто отождествляются с ячейками с соответствующим номером, поэтому эти модели также называются ячеечными.

Математический аппарат ячеечных моделей универсален, а их применение к описанию конкретных процессов состоит в выборе параметров состояния и раскрытии смысла переходных вероятностей. Эффективность этих моделей продемонстрирована в работах [37, 68, 90], где рассмотрены одномерные и многомерные, линейные и нелинейные модели с источниками и без.

В настоящей работе объектом математического моделирования задачи теплопереноса для одномерных и двухмерных изделий, которые могут успешно использовать разработанный подход. Рассмотрим описанное в этих работах моделирование теплопроводности ячеечными схемами, базирующееся на расчетной схеме, показанной на рис.1.1.

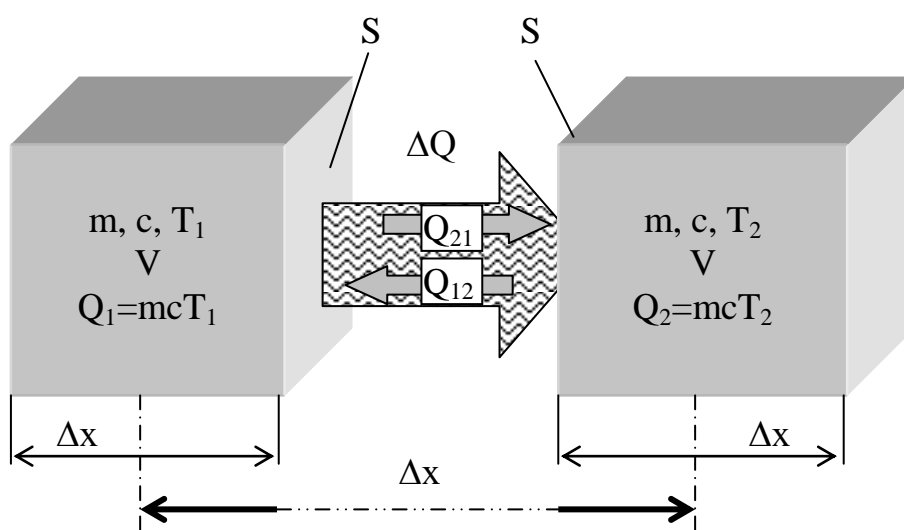


Рис.1.1. Параметры ячеек и потоки тепла между ними.

Каждая ячейка, которая принадлежит цепи, считается ячейкой идеального смешения, у которой все параметры (температура, теплоемкость, плотность, влагосодержание и т.д.) равномерно распределены по объему. В дальнейшем будут рассматриваться ячейки одинакового объема, представляемые в плоской модели квадратами. Сначала рассмотрим простейшую цепь, состоящую только из двух ячеек с номерами 1 и 2. Пусть каждая сторона ячейки в плане равна Δx ,

а перпендикулярно плоскости рисунка – единице. В реальности ячейки плотно примыкают друг к другу, а на чертеже разнесены, чтобы указать стрелки тепловых потоков. Таким образом, расстояние между центрами ячеек также равно Δx .

В соответствии с законом Фурье полное количество теплоты, переданное путем теплопроводности от ячейки 1 к ячейке 2 за время Δt , равно

$$\Delta Q = -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \Delta t = -\lambda S \frac{T_2}{\Delta x} \Delta t + \lambda S \frac{T_1}{\Delta x} \Delta t, \quad (1.27)$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Выделив в выражении (1.27) два слагаемых, мы получили, что поток складывается из двух противоположных потоков, причем каждый из них рассчитывается как поток теплопроводностью от температуры ячейки к нулевой температуре: от 1 к 2 (второе слагаемое) и от 2 к 1 (первое слагаемое). Выразив температуры через запасы тепла в ячейках, получим

$$\Delta Q = -\lambda S \frac{Q_2}{c\rho S} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \lambda S \frac{Q_1}{c\rho S} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = -dQ_2 + dQ_1, \quad (1.28)$$

где

$$d = \frac{\lambda}{c\rho S} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (1.29)$$

безразмерный, а

$$a = \frac{\lambda}{c\rho S} \quad (1.30)$$

размерный коэффициенты температуропроводности.

Припишем состоянию цепи в момент времени t_k индекс k . Тогда, спустя время перехода Δt , цепь перейдет в состояние $k+1$, в котором количества тепла в ячейке 1 составит

$$Q_1^{k+1} = Q_1^k - \Delta Q = Q_1^k - d Q_1^k + d Q_2^k. \quad (1.31)$$

Преобразуя (1.20) и записывая такой же баланс для ячейки 2, получим

$$Q_1^{k+1} = (1 - d)Q_1^k + d Q_2^k, \quad (1.32)$$

$$Q_2^{k+1} = d Q_1^k + (1 - d) Q_2^k. \quad (1.33)$$

Равенства (1.21), (1.22) удобно записать в матричной форме

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \begin{Bmatrix} Q_1^{k+1} \\ Q_2^{k+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-d & d \\ d & 1-d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1^k \\ Q_2^k \end{Bmatrix} = \mathbf{P}_Q \mathbf{Q}^k, \quad (1.34)$$

где \mathbf{Q} – вектор-столбец состояния цепи по запасам тепла в ячейках размером (число ячеек цепи) \times 1, \mathbf{P}_Q – квадратная матрица переходных вероятностей для теплоты размером, равным числу ячеек цепи.

Алгоритм построения этой матрицы прост и состоит в следующем:

- каждый столбец матрицы принадлежит к ячейке цепи в соответствие с ее номером;
- в этом столбце следует разместить d в строке с номером ячейки, куда переносит теплопроводность теплоту из данной ячейки;
- на главной диагонали, соответствующей переходу теплоты из ячейки в саму себя, то есть доле теплоты, оставшейся в ячейке, следует разместить 1 минус сумма всех d , встречающихся в этом столбце.

Очевидно, что при таком построении столбцы матрицы автоматически подчинены условию нормировки, то есть сумма всех элементов в столбце равна единице, как и положено в матрице переходных вероятностей. Величина самих

элементов должна находиться между нулем и единицей (в соответствии со смыслом переходной вероятности или просто баланса тепла). Это накладывает ограничение на величину d . В частности, для матрицы (1.34) $d \leq 1$. Это ограничение переходит в ограничение на выбор физической протяженности одного перехода Δt : $\Delta t \leq d\Delta x^2/a$, где Δx считается выбранным заранее.

Применив описанный выше алгоритм к цепи из трех ячеек, получим матрицу переходных вероятностей в виде

$$P_Q = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 \\ d & 1-2d & d \\ 0 & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (1.35)$$

где ограничением уже становится $d \leq 0,5$ с соответствующим переходом на ограничение в выборе Δt .

При одинаковых ячейках и одинаковых свойствах материала в них, когда запас теплоты прямо пропорционален температуре, переходная матрица для температуры также имеет смысл матрицы переходных вероятностей и равна переходной матрице для теплоты

$$\mathbf{T}^{k+1} = \begin{Bmatrix} T_1^{k+1} \\ T_2^{k+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-d & d \\ d & 1-d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1^k \\ T_2^k \end{Bmatrix} = \mathbf{P}_T \mathbf{T}^k. \quad (1.36)$$

В этих же работах описан алгоритм построения векторов состояния (температур) и матриц переходных вероятностей для двумерных объектов (плоских фигур), а также описан учет внешнего теплообмена через источники теплоты в периферийных ячейках фигуры.

Разработкой методов расчета нестационарного тепловлажностного состояния многослойных ограждающих конструкций зданий на основе ячеечных моделей занимались С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин и Н.Р. Порошин [91 - 93]. Ими показано, что в ячеечных моделях, описывающих перенос теплоты в

среде со скачком теплофизических свойств (многослойной стенке) к переходной матрице предъявляются дополнительные требования, зависящие от конкретных условий протекания процесса.

Авторами [91 - 93] разработана математическая модель сопряженного тепло-влажностного переноса, учитывающая фазовые переходы типа «конденсация-испарение» в однослойной стенке, позволяющая прогнозировать изменение распределения и установившиеся распределения параметров, характеризующих тепловлажностное состояние стенки как при постоянных, так и при переменных параметрах окружающей среды. Показано, что чаще всего тепловлажностное состояние стенки сопровождается формированием внутренней циркуляции влаги, энергетически поддерживаемой тепловыми потоками через стенку, причем в многослойной стенке может быть несколько контуров внутренней циркуляции, соответствующих каждому слою.

В численных экспериментах продемонстрирована работоспособность разработанной модели и выявлено влияние ряда конструктивных и режимных факторов на протекание совмещенных процессов.

Однако процессы, связанные с промерзанием конструкции, авторами [91 - 93] не рассматривались.

1.6. Постановка задачи исследования

Выполненный анализ литературных источников показал, что решение поставленной цели может быть основано на решении следующих сформулированных задач.

1. Разработать ячеечную математическую модель теплопередачи через однослойную стенку произвольной формы, в которой содержится влага, претерпевающая фазовые переходы «замерзание-оттаивание» с учетом наличия в ней закладных элементов.

2. Обобщить разработанную математическую модель на случай многослойной ограждающей конструкции здания при граничных условиях третьего рода.

3. На основе ячейной модели совмещенного нелинейного тепло- и влагопереноса разработать методику расчета переходных и стационарных тепловых процессов в ограждающей конструкции с учетом замерзания и оттаивания влаги и выполнить ее экспериментальную проверку.

4. Разработать программно-алгоритмическое обеспечение моделей и выполнить численные эксперименты, показывающие работоспособность модели, а также степень влияния различных факторов на протекание процесса.

5. Разработать инженерную методику расчета формирования фронта промерзания при различных внешних условиях и прогнозирования теплозащитных свойств многослойных ограждающих конструкций зданий.

6. Разработать методику учета влияния промерзания ограждающих конструкций на теплопотребление и установочную мощность системы отопления зданий.

7. Разработать и внедрить конкретные мероприятия по повышению теплозащитных свойств многослойных ограждающих конструкций зданий.

ГЛАВА 2. ПРОМЕРЗАНИЕ И ОТТАИВАНИЕ ВЛАГИ В ПЛОСКОЙ СТЕНКЕ (ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ)

2.1. Описание процесса в элементарной ячейке

Начнем описание процесса с одиночной элементарной ячейки, показанной на рис.2.1. Напомним, что элементарной ячейкой считается такой масштаб декомпозиции моделируемого объекта, в которой с достаточной для практических расчетов точностью можно предположить, что все исследуемые параметры процесса равномерно распределены по объему ячейки [129]. Поэтому показанная на рисунке локализация влаги и льда является условной: на самом деле влага и лед равномерно распределены по выделенному объему. Итак, выделенный объем состоит в общем случае из пористого каркаса массой M_c , которая не меняется в течение процесса, массы влаги M_w и массы льда M_i , причем $M_w + M_i = \text{const}$.

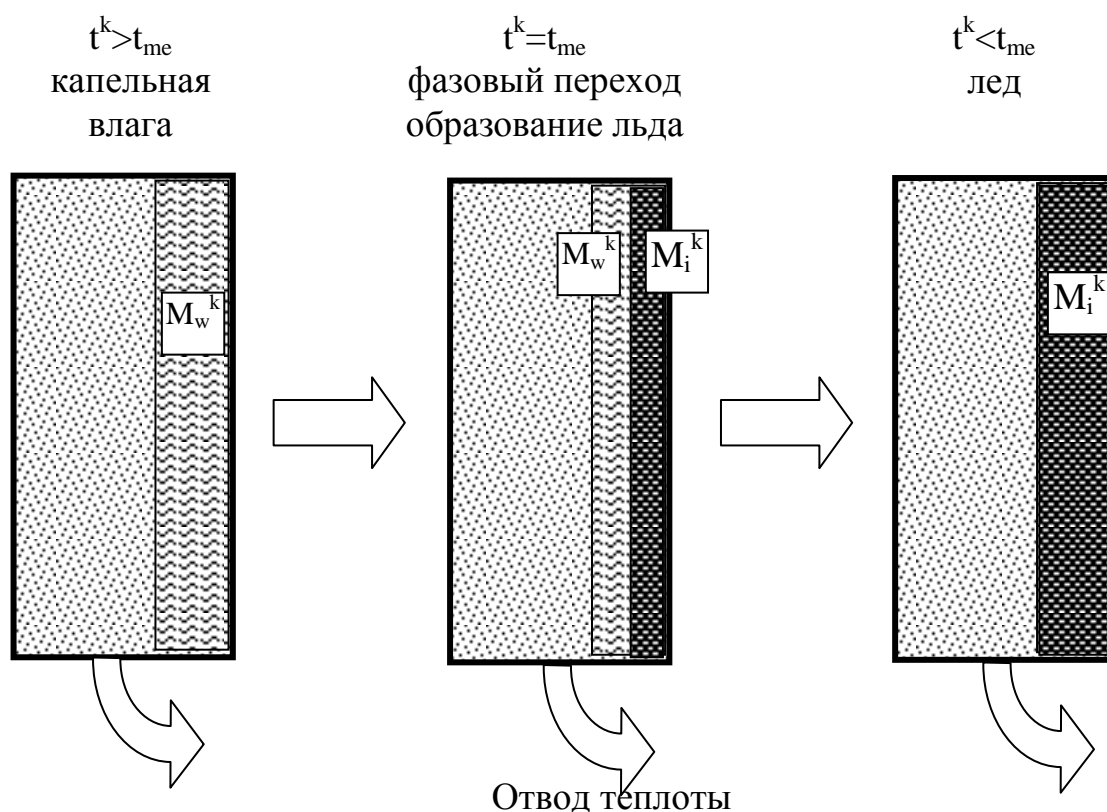


Рис.2.1. К процессу замерзания влаги в элементарной ячейке

Будем рассматривать состояние процесса через малые промежутки времени $\Delta\tau$ и фиксировать его параметры в дискретные моменты времени $\tau_k=(k-1)\Delta\tau$, где k – номер временного перехода, приписывая меняющимся величинам верхний индекс k . Текущие теплофизические свойства элементарной ячейки рассчитываются по формулам

$$\rho^k = \frac{\rho_c M_c + \rho_w M_w^k + \rho_i M_i^k}{M_c + M_w^k + M_i^k}, \quad (2.1)$$

$$c^k = \frac{c_c M_c + c_w M_w^k + c_i M_i^k}{M_c + M_w^k + M_i^k}, \quad (2.2)$$

где ρ и c – плотность и удельная теплоемкость, соответственно.

Пусть в начальный момент температура окружающей среды t_{out}^1 больше температуры замерзания влаги t_{me} и начинает понижаться по некоторому заданному закону. Здесь необходимо отметить, что в телах со сложной пористой структурой определение температуры замерзания влаги t_{me} является сложной экспериментально решаемой задачей [24]. Поскольку этот вопрос не является предметом рассматриваемого моделирования, в дальнейших расчетах будем считать ее равной 0°C .

На каждом временном переходе изменение теплоты ячейки рассчитывается по рекуррентному соотношению

$$Q^{k+1} = Q^k - \Delta Q^k = Q^k - \alpha S (t^k - t_{out}^k) \Delta\tau, \quad (2.3)$$

где t^k – текущая температура ячейки, α и S – коэффициент теплоотдачи и поверхность теплообмена.

При отсутствии фазового перехода это изменение теплоты вызовет изменение температуры ячейки

$$t^{k+1} = t^k - \frac{\Delta Q^k}{M c^k} = t^k - \frac{\alpha S \Delta\tau}{M c^k} (t^k - t_{out}^k). \quad (2.4)$$

Если же изменяющаяся температура ячейки достигает температуры фазового перехода, то тепловые балансы учитываются следующим образом. После каждого временного перехода температура во всех ячейках сравнивается с температурой фазового перехода t_{me} (температурой замерзания). Если происходит охлаждение ячейки, то есть $t^{k+1} < t^k$, и оказывается, что $t^{k+1} < t_{me}$ и $M_i^k < M_{imax}$ (замерзла не вся влага), то принимается, что $t^{k+1} = t_{me}$, а теплота ΔQ^k идет на формирование твердой фазы (льда), масса которой в конце перехода составит

$$M_i^{k+1} = M_i^k + \Delta Q^k / r, \quad (2.5)$$

где r – удельная теплота замерзания влаги. Если окажется, что после очередного перехода $M_i^{k+1} > M_{imax}$ (замерзла вся влага), то M_i^{k+1} приравнивается к M_{imax} и фазовый переход в этой ячейке заканчивается, а дальнейшая эволюция теплоты и температуры в ней контролируется условиями теплоотдачи. При нагреве ячейки, содержащей полностью или частично твердую фазу, идет противоположный процесс таяния льда, контролируемый в модели зависимостями, описанными выше.

Необходимо учитывать и тот факт, что температура замерзания воды существенно зависит от кривизны мениска жидкости в порах, определяемой размерами пор. И, чем более микропористым является материал конструкции, тем ниже температура замерзания воды. Отмечены случаи, когда наблюдалось наличие воды в текучем состоянии даже при температурах до -40 °С.

Существующие в настоящее время физические представления о замораживании воды в порах конструкционного строительного материала могут быть проиллюстрированы следующей моделью: при охлаждении насыщенного водой тела до температуры 0 °С в микропорах его наружных слоев вода превращается в лед, а при дальнейшем понижении температуры фронт замерзания уходит вглубь тела. Однако даже в верхних слоях не вся вода замерзает. Причиной ее нахождения в жидком состоянии при переохлаждении является ее особый «статус» в слоях моно- и полимолекулярной адсорбции. Замерзание воды в макропорах резко осложняет перемещение жидкой влаги во всех порах материала. С

последующим понижением температуры начинается замерзание влаги в микрокапиллярах, сопровождающееся увеличением объема твердой воды. Микропора как бы стремится вытолкнуть жидкую воду в макрокапилляр, чему, в свою очередь, препятствует лед макрокапилляров. Все это также способствует развитию внутренних напряжений, цикличность которых в процессах «замораживание-оттаивание» неизбежно приводит к потере прочности и разрушению структуры твердого тела. Еще одним важным аспектом является наличие растворимых неорганических солей в поровой жидкости, понижающих температуру замерзания.

Все указанные факторы, безусловно, необходимо учитывать при разработке математических моделей, протекающих в реальных системах; однако, принципиальных сложностей в развиваемом физико-математическом подходе они не вызывают. Поэтому в дальнейшем будем считать температуру замерзания равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, описанная выше модель процесса в элементарной ячейке полностью описывает ее охлаждение и нагревание с учетом протекающих в ней фазовых переходов: замерзания влаги или оттаивание льда.

Рассмотрим несколько примеров моделирования, демонстрирующих работоспособность модели и влияние условий охлаждения или нагревания на протекание процесса.

На рис.2.2 показана кинетика охлаждения ячейки с влагой при скачкообразном понижении температуры с $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На верхнем графике построено изменение температуры ячейки, а на нижнем – содержание льда в относительных единицах. Сначала происходит охлаждение ячейки вместе с содержащейся в ней влагой до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем наступает фазовый переход (образование льда), в течение которого температура не меняется, а после его завершения, когда замерзает вся влага, продолжается охлаждение ячейки.

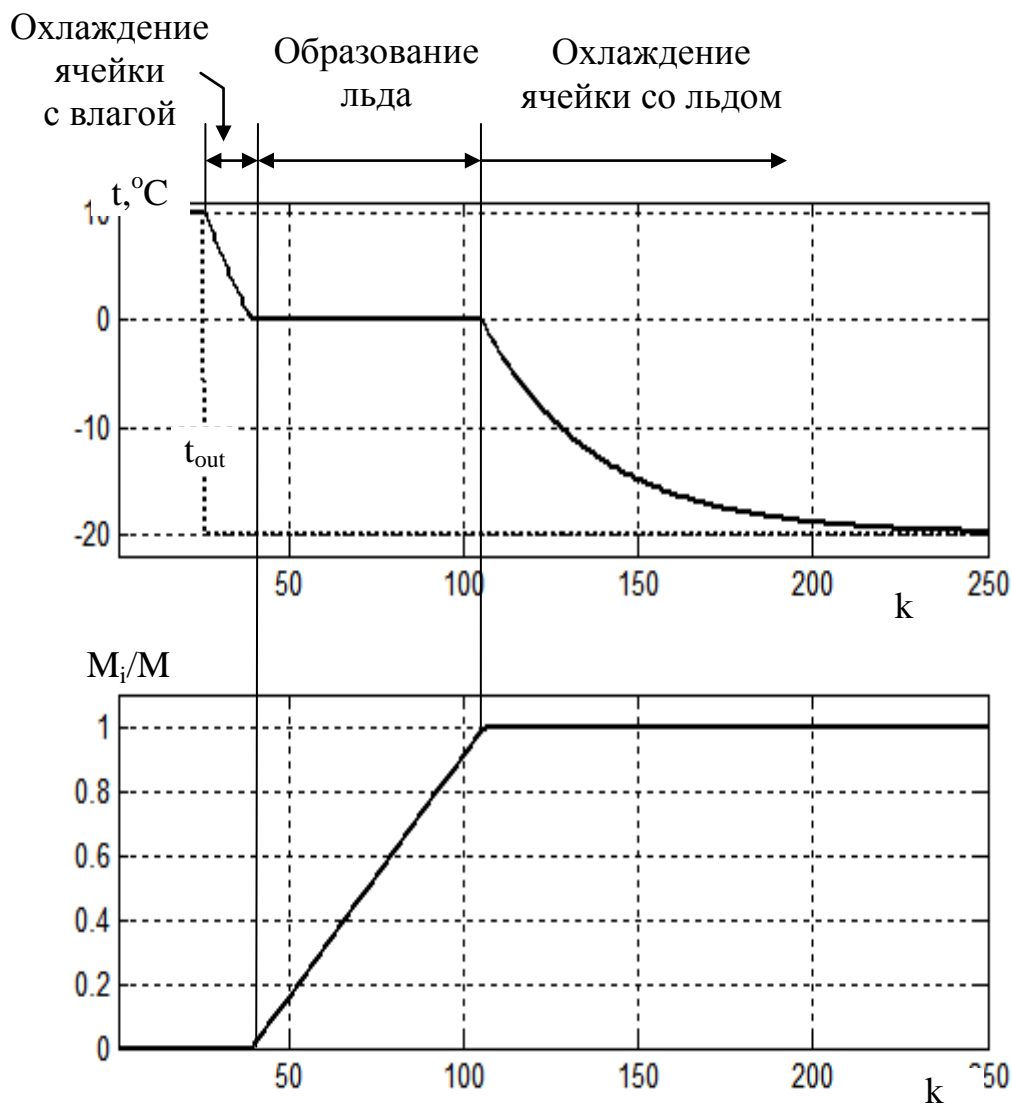


Рис.2.2. Кинетика охлаждения и промерзания влаги в ячейке при скачкообразном изменении внешней температуры

На рис.2.3 и 2.4 приведены результаты моделирования процесса с более сложным графиком изменения температуры окружающей среды. Рис.2.3 иллюстрирует случай линейного снижения окружающей температуры от $+10\text{ }^\circ\text{C}$ до $-20\text{ }^\circ\text{C}$ за половину отведенного числа временных переходов и постоянной температуры $-20\text{ }^\circ\text{C}$ во второй половине процесса. Здесь качественно прослеживаются те же закономерности процесса, что и на рис.2.2, хотя его количественные характеристики (в том числе, форма кривых) отличаются.

Еще более сложная картина изменения окружающей температуры соответствует графикам рис.2.4, где температура сначала понижается с $+10\text{ }^\circ\text{C}$ до $-20\text{ }^\circ\text{C}$, а затем повышается с $-20\text{ }^\circ\text{C}$ до $+5\text{ }^\circ\text{C}$, то есть замерзание сменяется от-

таиванием. На графике изменения температуры ячейки можно выделить 5 временных зон. В зоне 1 происходит охлаждение ячейки вместе с содержащейся в ней капельной влагой до температуры замерзания. В зоне 2 идет замерзание влаги; температура ячейки при этом не меняется. В конце зоны влага замерзает полностью. В зоне 3 происходит дальнейшее охлаждение ячейки вместе с содержащимся в ней льдом. В зоне 4 вследствие подъема окружающей температуры до положительного значения начинается нагрев ячейки до температуры плавления льда. В зоне 5 начинается таяние льда, то есть переход его в состояние капельной влаги; температура ячейки опять остается постоянной и равной температуре таяния. За 250 временных переходов таяние завершается не полностью, и в конце процесса в ячейке содержится около 70% льда и 30% капельной влаги. Очевидно, что модель может отслеживать любой график окружающей температуры.

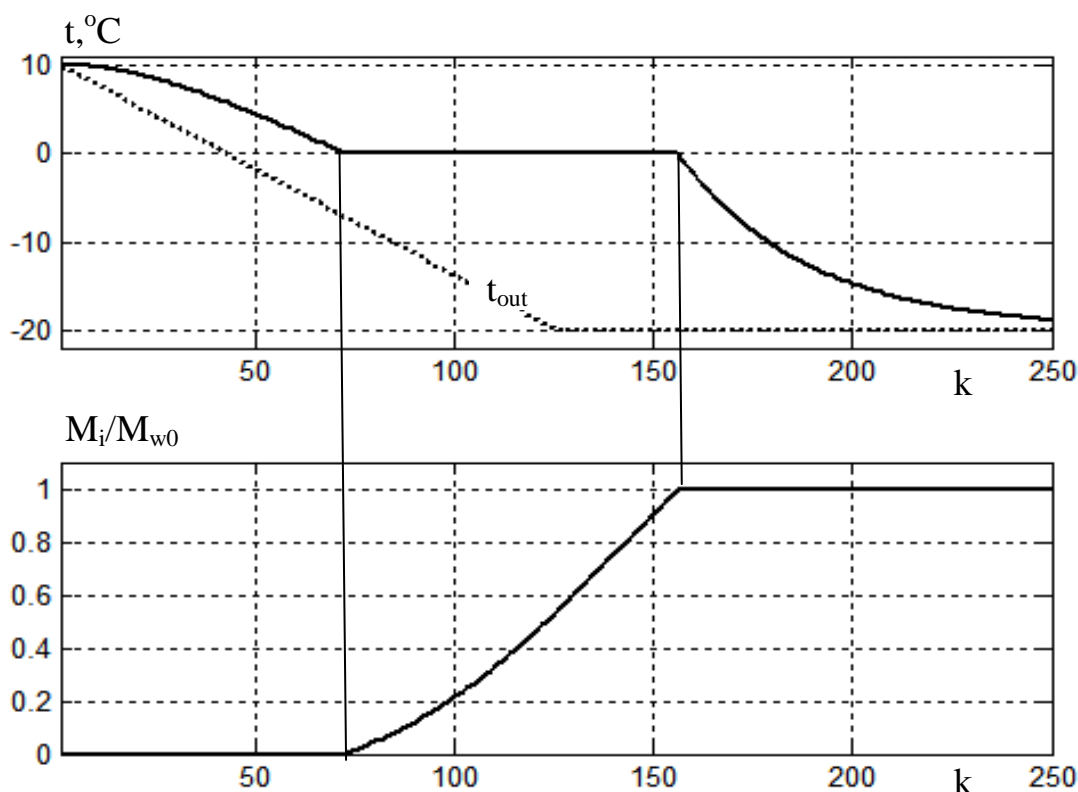


Рис.2.3. Кинетика охлаждения и промерзания влаги в ячейке при кусочно-линейном изменении внешней температуры

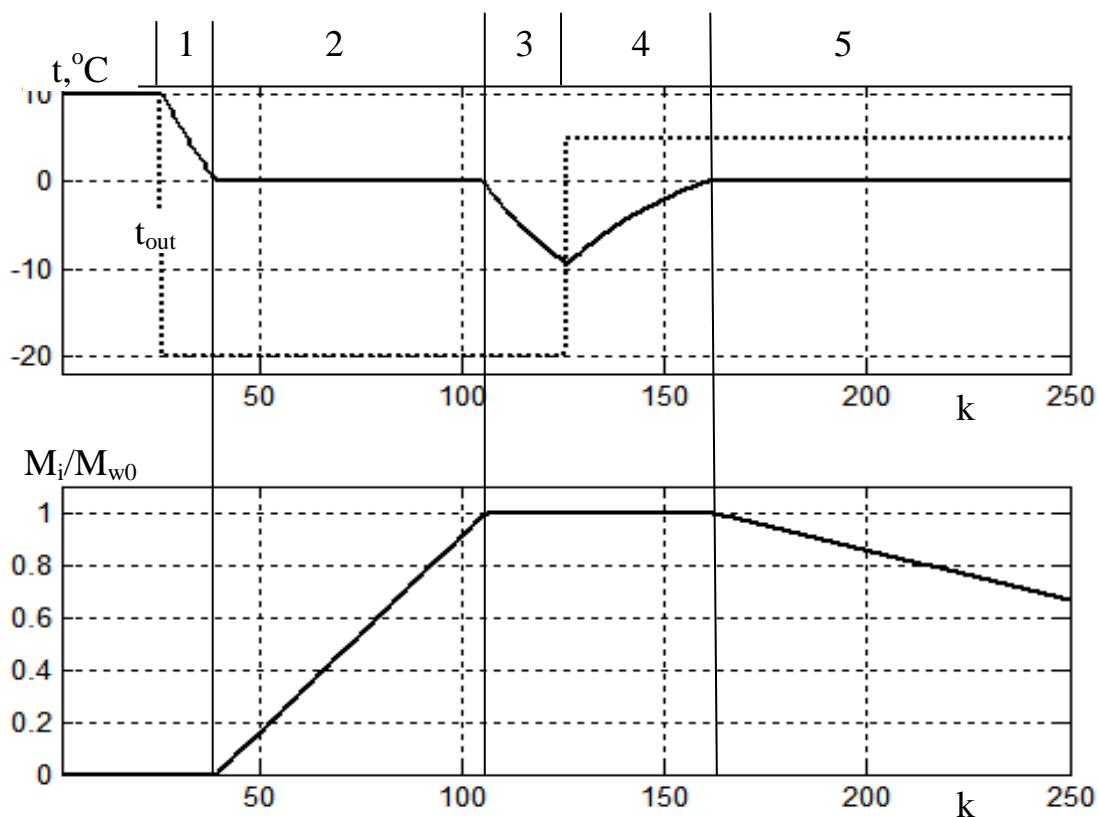


Рис.2.4. Кинетика охлаждения-нагрева и промерзания-оттаивания влаги в ячейке при многоступенчатом изменении внешней температуры

Описав свойства элементарной ячейки, с помощью специального алгоритма сборки, контролирующего потоки теплоты между ячейками, можно формировать из них модели процесса в объектах с разной пространственной размерностью.

2.2. Ячеечная модель процесса в плоской стенке

Начнем решение этой задачи с наиболее простого случая, когда ячейки объединены в одномерную прямолинейную цепь. Эта модель соответствует одномерному тепловому процессу в плоской стенке, где учитываются тепловые потоки только по нормали к ее поверхности. В этом случае можно говорить о тепловом процессе в теплоизолированном по боковой поверхности стержне, торцы которого открыты для теплового взаимодействия с окружающей средой.

Расчетная схема процесса и его ячейчная модель показана на рис.2.5.

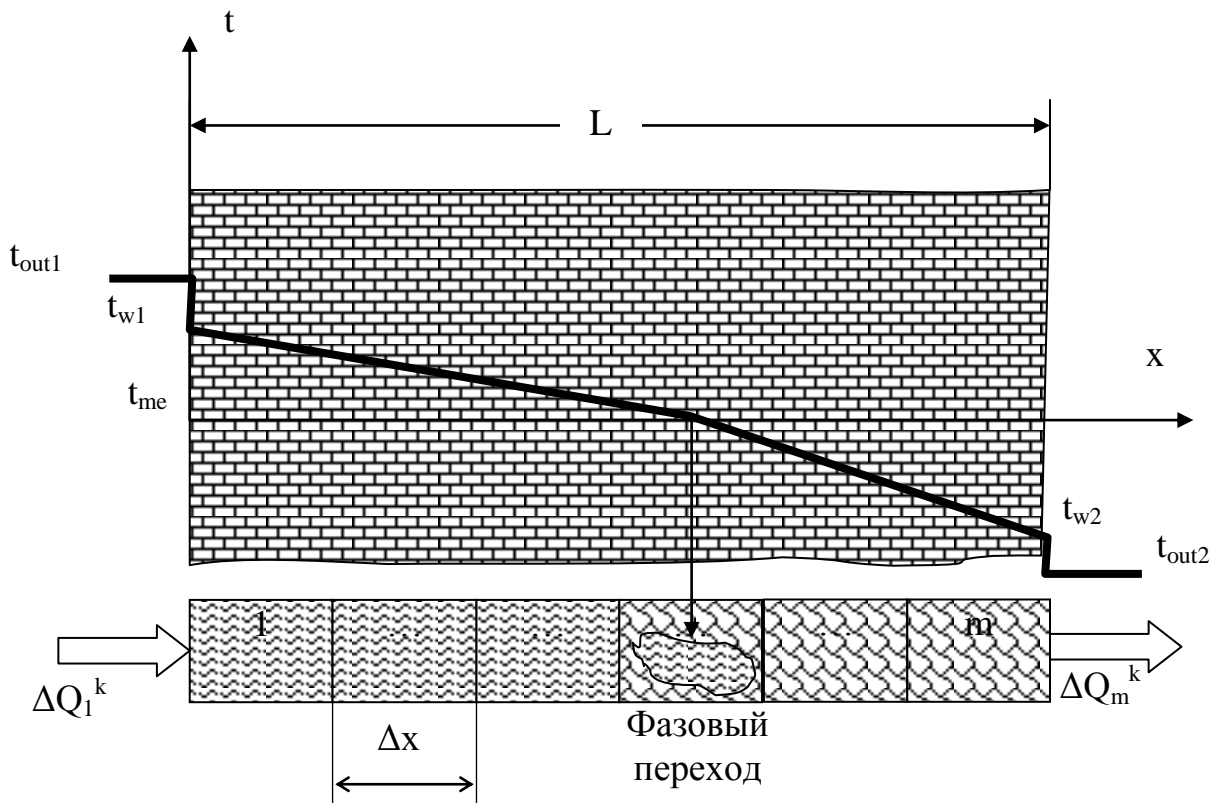


Рис.2.5. Расчетная схема процесса и его ячеечная модель

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 $m \times 1$. Как и ранее, 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

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}(\mathbf{Q}^k + \Delta \mathbf{Q}_e^k \pm \Delta \mathbf{Q}_{me}^k), \quad (2.6)$$

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, имею-

ший 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 – $M_{i\max}$ (масса полностью замерзшей в ячейке влаги).

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

$$\mathbf{t}^k = \mathbf{Q}^k ./ \mathbf{c} ./ \mathbf{\rho} ./ \mathbf{S} ./ \Delta x, \quad (2.7)$$

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

Таким образом, 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 соответствие с матрицей теплопроводности \mathbf{P}_Q .

Рассмотрим процедуру расчета входящих в равенство (2.6) векторов и операторов. 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:

$$\Delta Q_{e1}^k = \alpha_1 (t_{out1}(k) - t_1^k) S \Delta \tau, \quad (2.8)$$

$$\Delta Q_{em}^k = \alpha_2 (t_{out2}(k) - t_m^k) S \Delta \tau, \quad (2.9)$$

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

$$M_{ij}^{k+1} = M_{ij}^k + \Delta Q_{mej} / r, \quad (2.10)$$

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.

При изменении фазового состояния влаги в ячейках ее теплофизические свойства меняются, а теплопроводность уже относится к составной стенке. Правила построения матрицы теплопроводности для цепи ячеек с переменными теплофизическими свойствами рассмотрены в главе 9. Напомним об основных особенностях ее формирования, имеющих принципиальное значение. Они отражены на рис.2.6.

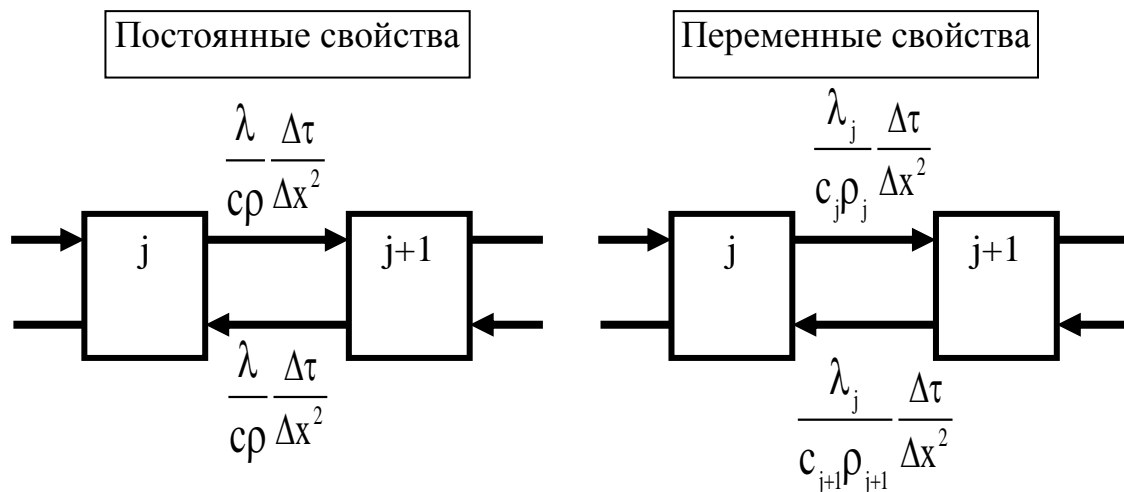


Рис.2.6. К построению матрицы теплопроводности в цепи с переменными свойствами ячеек

Если плотность и теплоемкость являются атрибутами самой ячейки и вычисляются в соответствие 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

$$\mathbf{P}_Q = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & 1 - \left(\frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} + \frac{\lambda_{j-1}}{c_{j-1} \rho_{j-1}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \right) & \frac{\lambda_j}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & \frac{\lambda_j}{c_j \rho_j} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & 1 - \left(\frac{\lambda_{j+1}}{c_{j+1} \rho_{j+1}} + \frac{\lambda_j}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \right) \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \frac{\lambda_{j+1}}{c_{j+1} \rho_{j+1}} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Выражение (2.11) замыкает определение всех величин, входящих в рекуррентное равенство (2.6), по которому теперь можно рассчитывать эволюцию 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 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.

2.3. Расчетное исследование процесса в плоской стенке

На рис.2.7-2.11 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 влагосодержанием $0,1\text{ кг/кг}$. Коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны принят равным $\alpha_1 = 5\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, с внешней – $\alpha_2 = 10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$.

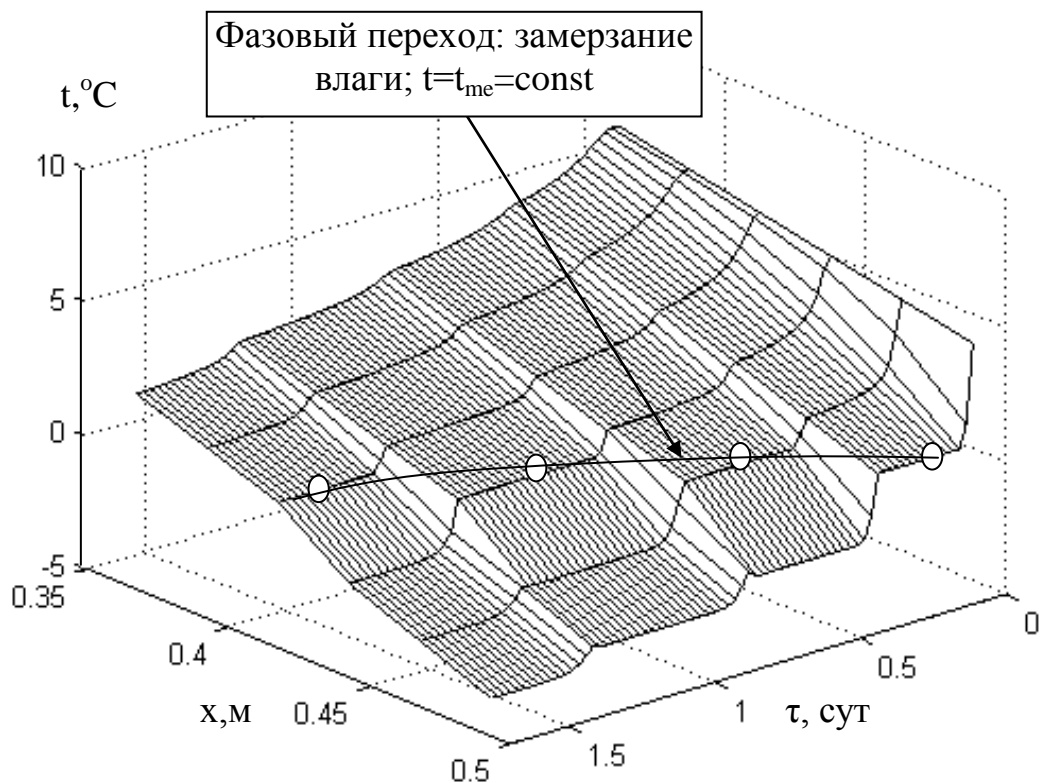


Рис.2.7. Эволюция распределения температуры в периферийных ячейках на начальной стадии процесса.

Рис.2.7 иллюстрирует изменение распределения температуры в стенке при наличии замерзания влаги, когда температура наружного воздуха скачком

меняется от 0 до -10 °С. Для наглядности представлены только несколько внешних ячеек и рассмотрена начальная стадия процесса.

Сначала происходит охлаждение всей стенки, причем температура внешней ячейки снижается быстрее всего. Когда она достигает температуры замерзания, начинается процесс образования льда, а температура остается постоянной. Это фиксирует тепловой поток в наружную среду, и характер распределения температуры меняется. Фазовый переход не может происходить одновременно в двух и более ячейках: при постоянной температуре в ячейке, в которой идет фазовый переход, предыдущая ячейка не может охладиться до температуры фазового перехода. Когда фазовый переход во внешней ячейке завершен, она снова начинает охлаждаться, а вместе с ней и предыдущая ячейка, пока в ней не достигается температура фазового перехода. Так процесс последовательно продвигается вглубь стенки до достижения установившегося состояния. При этом в граничной ячейке всегда будут одновременно присутствовать влага и лед.

На рис.2.8 показано изменение основных параметров этого процесса по всей глубине стенки вплоть до установившегося состояния.

Ступеньки фазовых переходов на графике изменения распределения температуры (рис.2.8а) менее заметны. Поэтому на нем нанесена линия, соответствующая нулевой температуре. Асимптотически устанавливается распределение температуры, соответствующее стационарному процессу в двухслойной стенке с разными коэффициентами теплопроводности. На рис.2.8б показана кинетика формирования льда, то есть продвижения фронта промерзания. Это продвижение более наглядно видно на контурном графике рис.2.8в. 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.

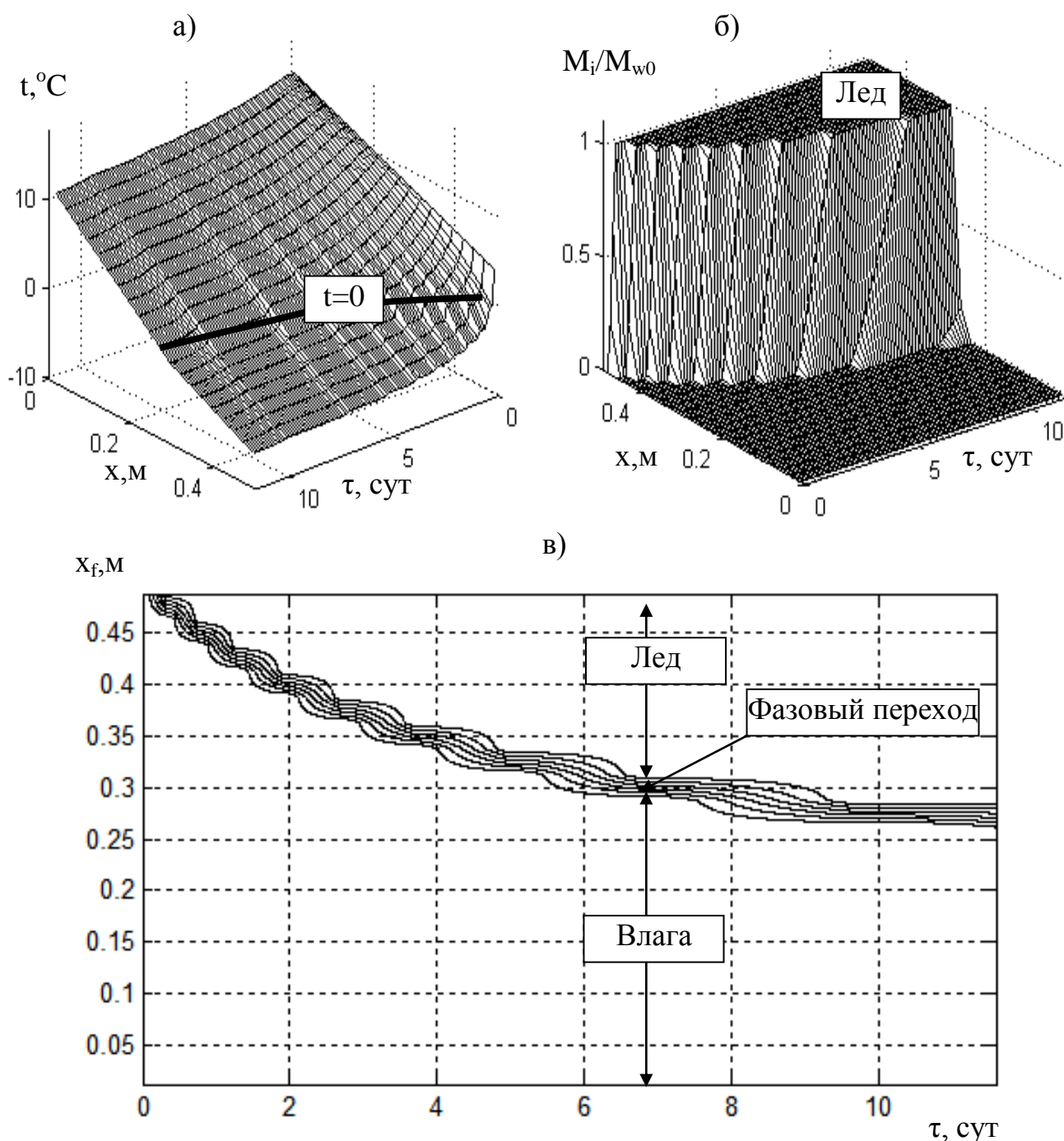


Рис.2.8. Эволюция распределения температуры (а) и формирования льда (б,в) при скачкообразном снижении наружной температуры от 0 до -10°C

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 рис.2.9, где внешняя температура сначала скачком убывает от 0°C до -10°C , а затем, спустя некоторое время, скачком возвращается к 0°C .

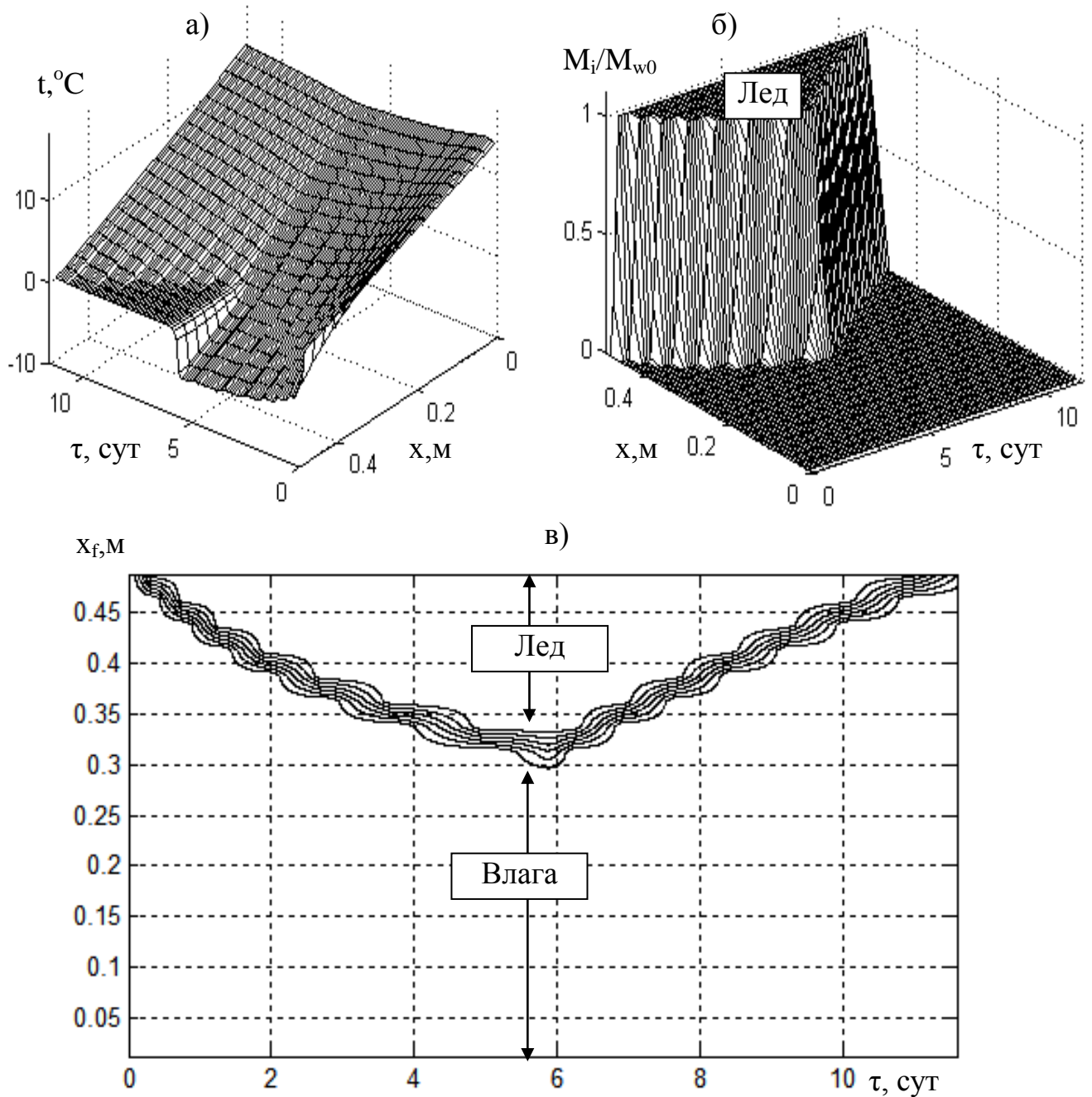


Рис.2.9. Эволюция распределения температуры (а) и формирования льда (б,в) при ступенчатом графике наружной температуры от 0 до -10°C

При обратном повышении температуры происходит относительно быстрый прогрев внешней зоны стенки до температуры фазового перехода и во внутренних ячейках цепи начинается таяние льда (рис.2.9а). Оно блокирует по-

вышение 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. Формирование и таяние льда наглядно видно на рис.2.9б,в. 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.

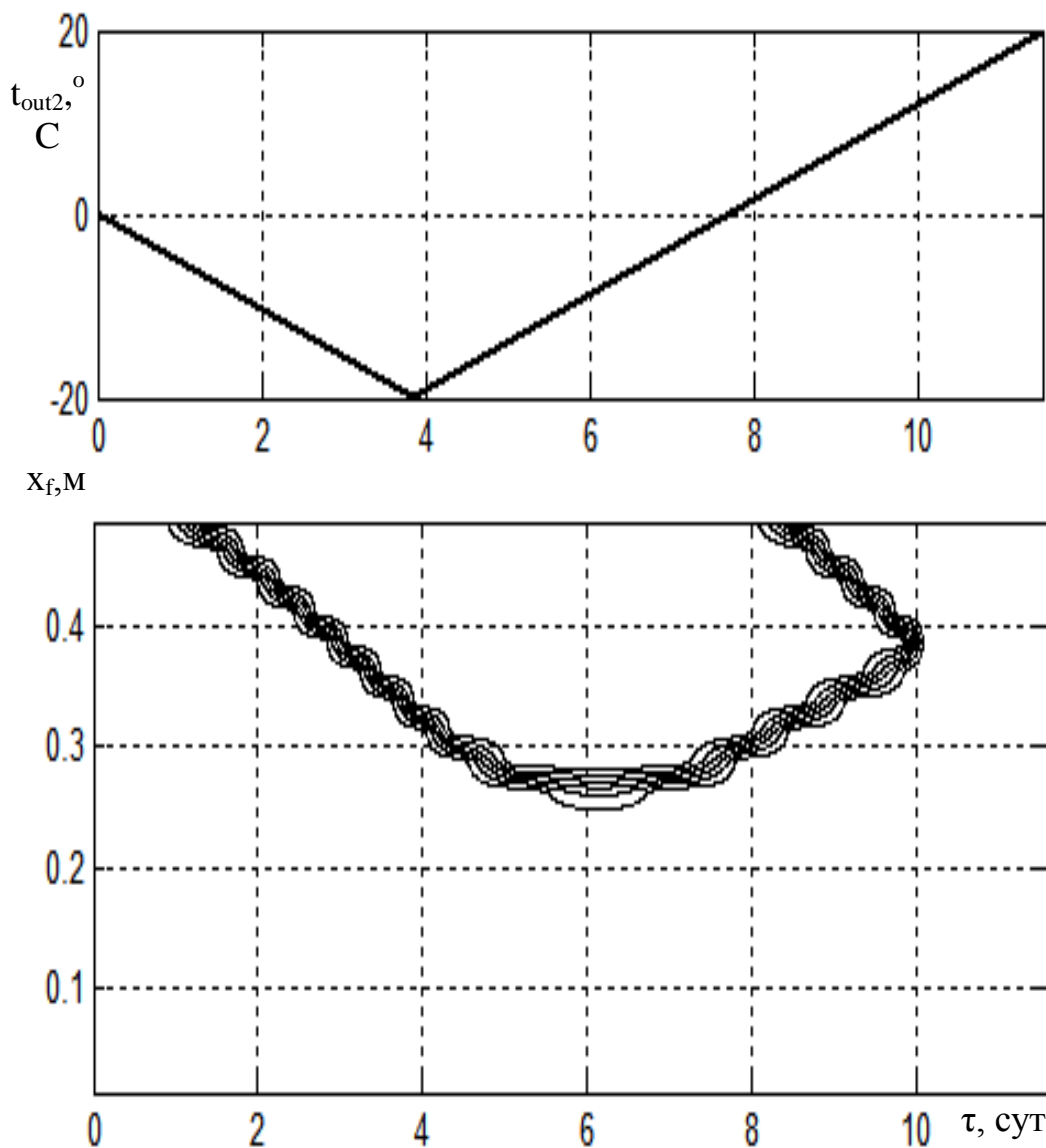


Рис.2.10. Продвижение фронта промерзания при кусочно-линейном графике наружной температуры

Естественно, что в модели может быть использован любой график измене-

ния внешней и внутренней температуры, задаваемой в равенствах (2.8), (2.9) функциями $t_{out2}(k)$ и $t_{out1}(k)$. Один из примеров показан на рис.2.10, где наружная температура сначала линейно снижается от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем линейно возрастает от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 10 см вглубь от нее.

Еще один пример расчета процесса по описанной выше модели показан на рис.2.11, где визуализировано продвижение фронта промерзания в кирпичной стенке толщиной 0,5 м при переменной температуре снаружи стенки, ступенчато меняющейся по приведенному сверху графику, и постоянной температуре внутри помещения, равной $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. За пределами крайних линий показанного семейства имеется однофазное состояние жидкости: влага или лед. Внутри интервала, соответствующего одной ячейке, фазовый переход не завершен и имеется смесь льда и влаги. Обобщение модели на случай многослойной стенки не представляет принципиальных трудностей: для этого необходимо ввести в матрицу P теплофизические свойства слоев по разработанной выше методике.

Таким образом, разработанная стратегия построения ячеечной модели теплопередачи через плоскую стенку с учетом замерзания/оттаивания в ней влаги может служить основой, как для непосредственных проектных расчетов, так и для описания более сложных процессов, рассмотренных в следующей главе.

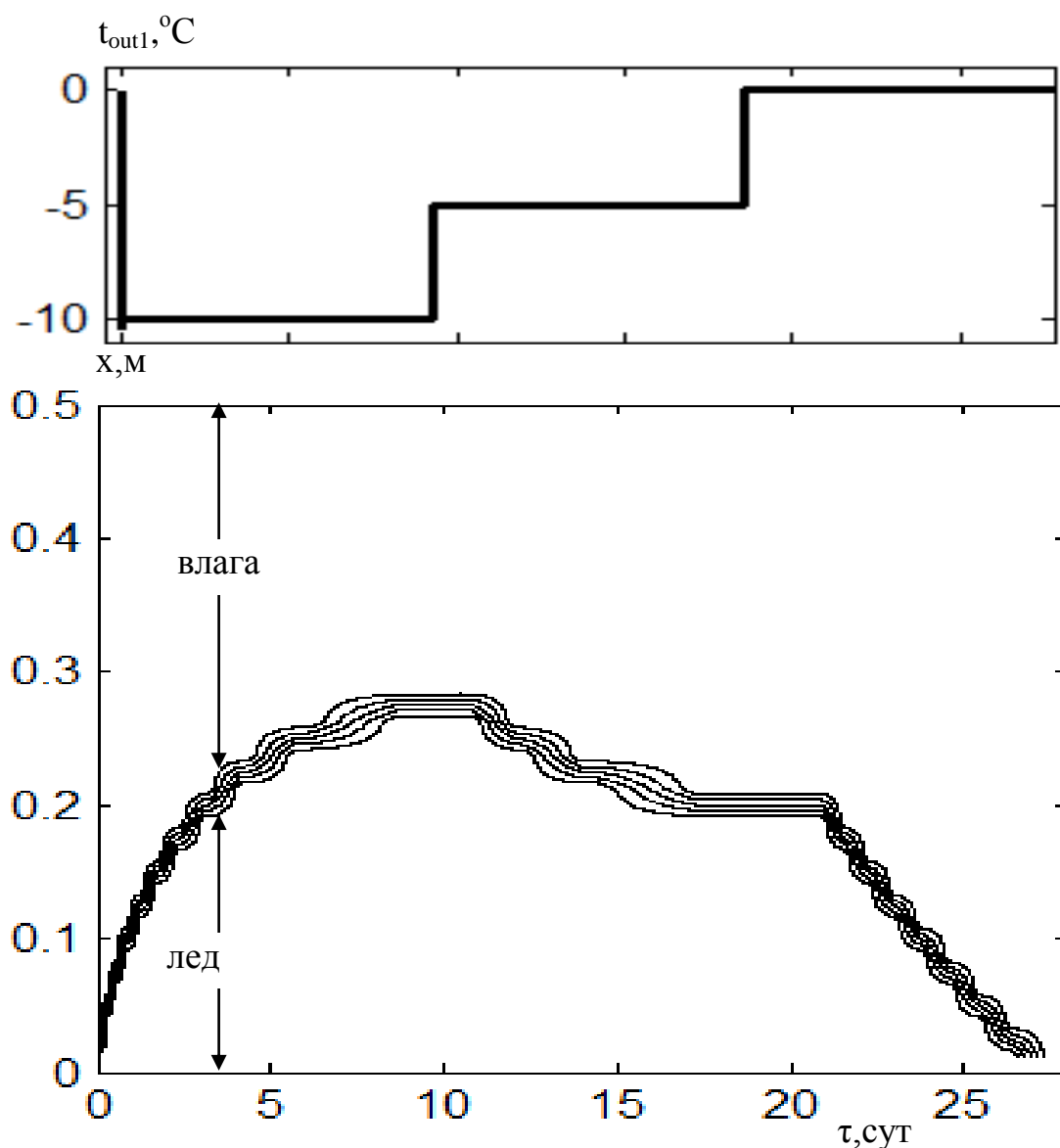


Рис.2.11. Продвижение фронта промерзания при многоступенчатом графике наружной температуры

2.4. Процессы промерзания и оттаивания в многослойных строительных изделиях

Исследование совместной работы строительных материалов с разными свойствами в слоистых и сложных строительных конструкциях. Поэтому естественным продолжением рассмотренных выше задач моделирования и расчета является переход к моделированию процессов промерзания в многослойной стенке. Для простоты ограничимся рассмотрением двухслойной стенки, по-

сколькo дальнейшее увеличение числа слоев является чисто формальной процедурой.

В принципе, предложенная выше стратегия моделирования может использоваться практически без изменений, так как разница в теплофизических свойствах ячеек уже учтена в модели. Однако ее практическое применение для многослойной конструкции требует ряда уточнений.

Рассмотрим двухслойную стенку, схематически показанную на рис.2.12.

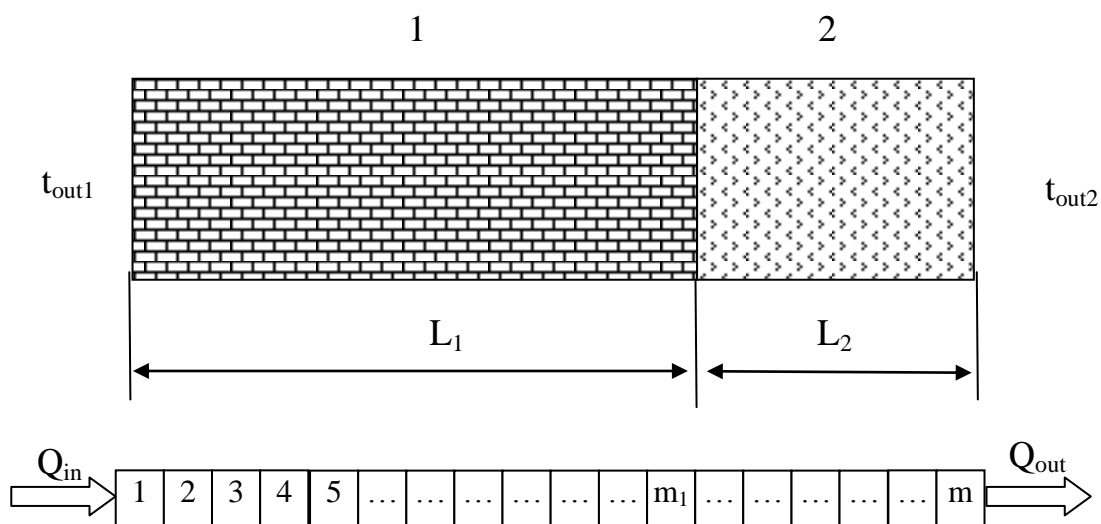


Рис.2.12. Расчетная схема многослойной стенки

Теперь теплофизические свойства ячеек (λ , ρ и c) характеризуются двумя наборами чисел: для содержащихся в них капельной и замерзшей влагой (льдом). Причем, если граница между слоями известна заранее и фиксирована, то граница фронта промерзания заранее неизвестна и формируется в течение самого процесса в зависимости от наружной температуры, определяющей распределение температур по ячейкам. Эти свойства могут быть представлены двумя наборами векторов λ , ρ и c размером $1 \times m$ (пусть векторы с индексом 1 группирует свойства при капельной, а с индексом 2 – при замерзшей влаге). Эволюция теплофизического состояния цепи по-прежнему описывается рекуррентным матричным равенством (2.6) с дальнейшей проверкой на каждом переходе на наличие фазового перехода, в зависимости от исхода которого ячейке приписываются свойства из вектора с индексом 1 или 2. Не приводя последова-

тельно все формулы для расчета, а только ссылаясь на них, мы хотим подчеркнуть универсальность предложенной выше расчетной процедуры, допускающей *любые* постановки задачи из исследуемого класса. Поэтому целесообразно перейти к результатам численных экспериментов, в которых слою 1 толщиной 0,5 м были приписаны свойства керамического кирпича, а слою 2 – свойства минеральной ваты Rockwell, выступающей в качестве теплоизоляции. Дополнительной начальной информацией является влагосодержание в слоях X_1 и X_2 . Чтобы не усложнять чрезмерно задачу будем считать, что влагоперенос между слоями отсутствует, то есть между ними проложена идеальная влагизоляция, не влияющая на теплоперенос.

2.5. Выводы по главе 2

Полученные в главе 2 результаты могут быть кратко суммированы в следующих выводах.

1. Описаны свойства элементарной ячейки при ее охлаждении и нагревании с наличием фазовых переходов типа «замерзание/оттаивание влаги» при переменной температуре окружающей среды.

2. Разработан алгоритм сборки моделей элементарных ячеек в нелинейную ячеечную модель теплопередачи через многослойную плоскую стенку при нестационарных тепловых параметрах окружающей среды, учитывающую промерзание стенки при отрицательных температурах и позволяющую прогнозировать глубину и продвижение фронта промерзания.

3. Выполнены численные эксперименты, подтвердившие работоспособность модели и выявившие характер продвижения фронта промерзания при различных стационарных и нестационарных условиях в окружающей среде.

4. Разработанная стратегия построения ячеечной модели теплопередачи через плоскую стенку с учетом замерзания/оттаивания в ней влаги может служить основой, как для непосредственных проектных расчетов, так и для описания более сложных процессов.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ДВУХМЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ С УЧЕТОМ ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ ВЛАГИ

3.1. Общий подход к построению двумерных ячеечных моделей

Переход к анализу тепловых процессов в угловых стыках ограждающих конструкций, а также в стенках, содержащих иные неоднородности (швы, закладные детали и т.д.) требует использования, как минимум, двумерных моделей теплопроводности в областях достаточно сложной конфигурации. Стратегия построения ячеечных моделей для двумерных областей рассмотрена в работах [37, 90,122]. Ниже будет рассмотрен несколько модифицированный алгоритм, более удобный для программирования.

Двумерная цепь ячеек представляет собой удобное средство представления параметров состояния процесса в виде матрицы размером $n_1 \times n_2$, где n_1 и n_2 – число строк и столбцов в сетке ячеек. Однако для описания эволюции процесса двумерная цепь должна быть преобразована в одномерную, в которой столбцы двумерной сетки расположены последовательно друг под другом, и сохранены стрелки, показывающие разрешенные переходы между ячейками (рис.3.1). При этом ячейки одномерной цепи должны иметь сквозную нумерацию от 1 до $n_1 n_2$.

Соответственно матричная запись параметров состояния для двумерной цепи переходит в векторную запись этих же параметров состояния со сквозной нумерацией. Например, распределение температуры для двумерной и одномерной цепи, показанной на рис.3.1, записывается следующим образом:

$$\mathbf{tm} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Операция преобразования матрицы в вектор в среде MATLAB осуществляется одной командой $t = \text{reshape}(tm, n_1 n_2, 1)$.

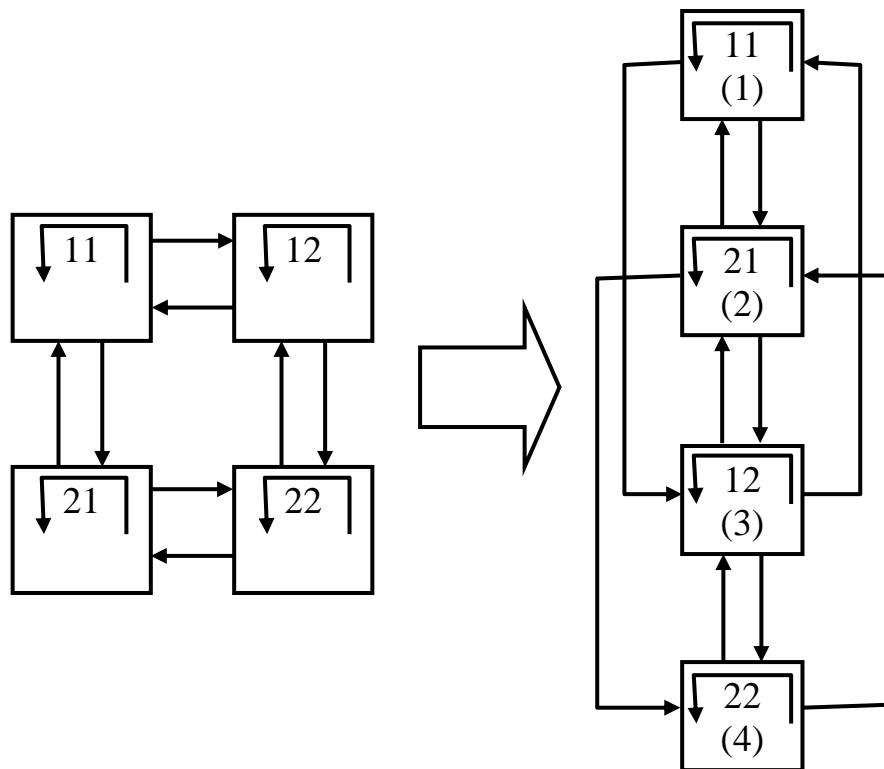


Рис.3.1. К преобразованию двумерной цепи ячеек в одномерную

В соответствии с одномерной цепью строится и переходная матрица. Если двумерный процесс изотропен, а ячейки имеют квадратную форму со стороной Δx , то эта матрица выглядит следующим образом

$$\mathbf{P}_Q = \begin{bmatrix} 1-2d & d & d & 0 \\ d & 1-2d & 0 & d \\ d & 0 & 1-2d & d \\ 0 & d & d & 1-2d \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

где $d = \lambda \Delta \tau / (\rho c \Delta x^2)$ – безразмерный коэффициент температуропроводности (сеточный критерий Фурье).

При работе с двумерной цепью ячеек большой размерности необходимо установить номера ячеек одномерной цепи, с которыми контактирует данная ячейка. Эта процедура показана на рис.3.2.

	j=1	...	j	...	n ₂
i=1					
...			n ₁ (j-1)+i-1		
i		n ₁ (j-2)+i	n ₁ (j-1)+i	n ₁ j+i	
...			n ₁ (j-1)+i+1		
n ₁					

Рис.3.2. К определению номеров ячеек, контактирующих с ячейкой ij в матричной записи

С помощью этой нумерации легко составить переходную матрицу для прямоугольной теплоизолированной по периметру области размером n₁xn₂ ячеек. Для области с постоянными теплофизическими свойствами ее элементы вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned}
 &P_{n_1(j-1)+i-1, n_1(j-1)+i} = d, \quad j=1:n_2, i=2:n_1 \text{ (переходы вверх),} \\
 &P_{n_1(j-1)+i+1, n_1(j-1)+i} = d, \quad j=1:n_2, i=1:n_1-1 \text{ (переходы вниз),} \\
 &P_{n_1(j-2)+i, n_1(j-1)+i} = d, \quad j=2:n_2, i=1:n_1 \text{ (переходы влево),} \\
 &P_{n_1j+i, n_1(j-1)+i} = d, \quad j=1:n_2-1, i=1:n_1 \text{ (переходы вправо),} \\
 &P_{j,j} = 1 - \sum_{i=1, i \neq j}^{n_1} P_{i,j} \quad j=1, \dots, n_1 n_2 \text{ (переходы «остаться»).}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Преобразование вектора теплоты в течение перехода описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}_Q (\mathbf{Q}^k + \Delta \mathbf{Q}_e^k), \quad (3.4)$$

где $\Delta \mathbf{Q}_e^k$ – вектор теплоты, передаваемой крайним ячейкам цепи от окружаю-

щей среды путем теплоотдачи, который формирует краевые условия.

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

$$\mathbf{t}^k = \frac{\mathbf{Q}^k}{\rho c \Delta x^2}. \quad (3.5)$$

На каждом переходе эти векторы состояния могут преобразовываться в матрицы состояния \mathbf{tm} и \mathbf{Qm} для наглядного представления этих распределений. Если на краях области (по всей периферии или на отдельных участках) заданы краевые условия 3-го рода (теплообмен с окружающей средой), то изменение теплоты в периферийных ячейках на каждом временном переходе рассчитывается по формуле (2.3), записываемой для каждой ячейки, контактирующей с окружающей средой. Если заданы условия 1-го рода (поддержание постоянной заданной температуры), то на каждом временном переходе ячейкам, для которых заданы эти условия, присваивается заданная температура.

Перейдем к рассмотрению области сложной конфигурации. Эта область должна быть накрыта прямоугольной сеткой ячеек, в которой отдельные ячейки будут принадлежать рассматриваемой области, а отдельные – нет. Форму области удобно описать матрицей формы \mathbf{Fm} размером $n_1 \times n_2$, в которой ячейкам, не принадлежащим области, приписать, например, единицу, а принадлежащим – ноль. По описанному выше правилу матрица формы \mathbf{Fm} может быть преобразована в вектор формы \mathbf{F} . С его помощью выполняется корректировка переходной матрицы \mathbf{P}_Q , первоначально записанной для покрывающей прямоугольной сетки ячеек. Корректировка состоит в запрете переходов в ячейки, которые не принадлежат моделируемой области. Поскольку все переходы в данную ячейку расположены в строке матрицы с номером этой ячейки, то достаточно обнулить элементы этой строки перед вычислением элементов главной диагонали, то есть перед последним равенством в (3.3) поставить условие

$$p_{i,f} = 0, \text{ если } F(f) = 1, f = 1, \dots, n_1 n_2. \quad (3.6)$$

Рассмотрим приложение описанной выше процедуры к расчету температурного поля для двух областей, показанных на рис.3.3. Область имеет размер 10×20 , на рис.3.3б темные ячейки не принадлежат к моделируемой области. Белым выделены ячейки, в которых заданы краевые условия 1-го рода.

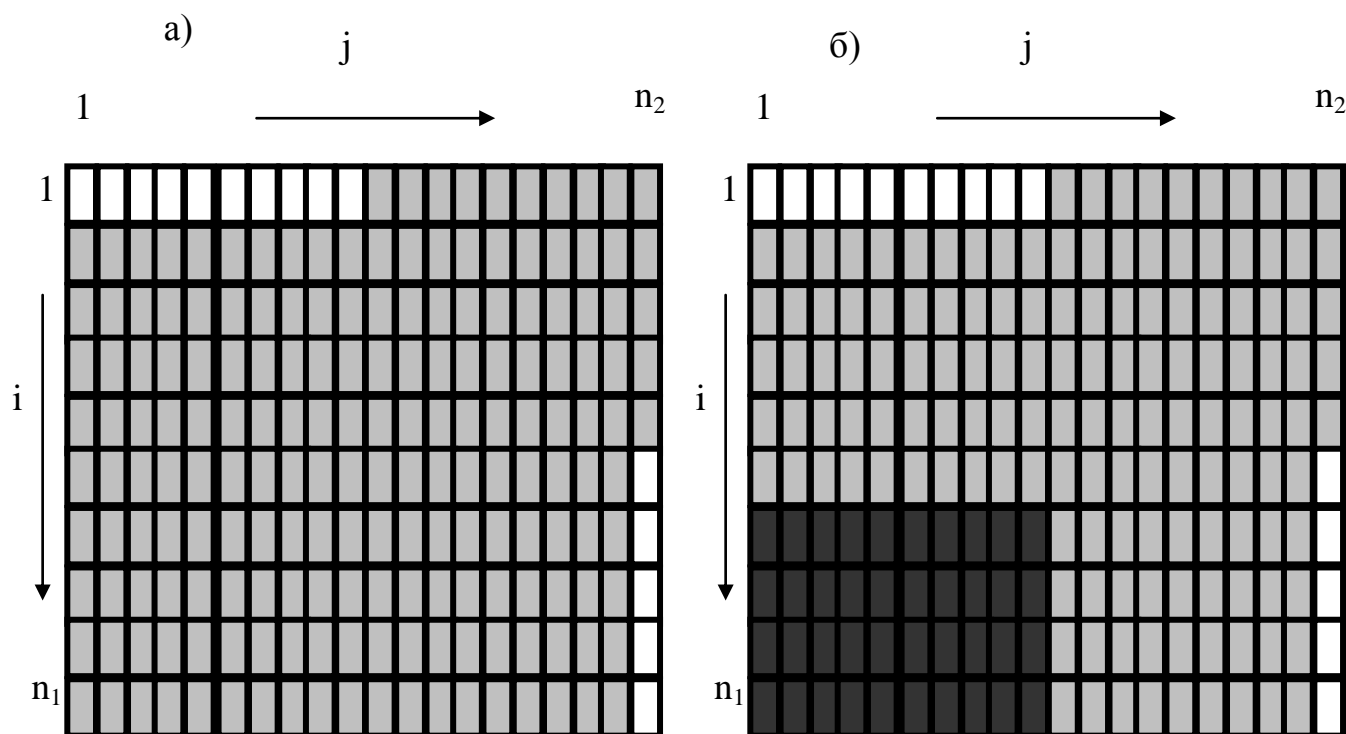


Рис.3.3. К примеру расчета: прямоугольная (а) и Г-образная (б) области моделирования. Белым отмечены ячейки, для которых задаются краевые условия 1-го рода

Результаты моделирования кинетики процесса показаны на рис.3.4.

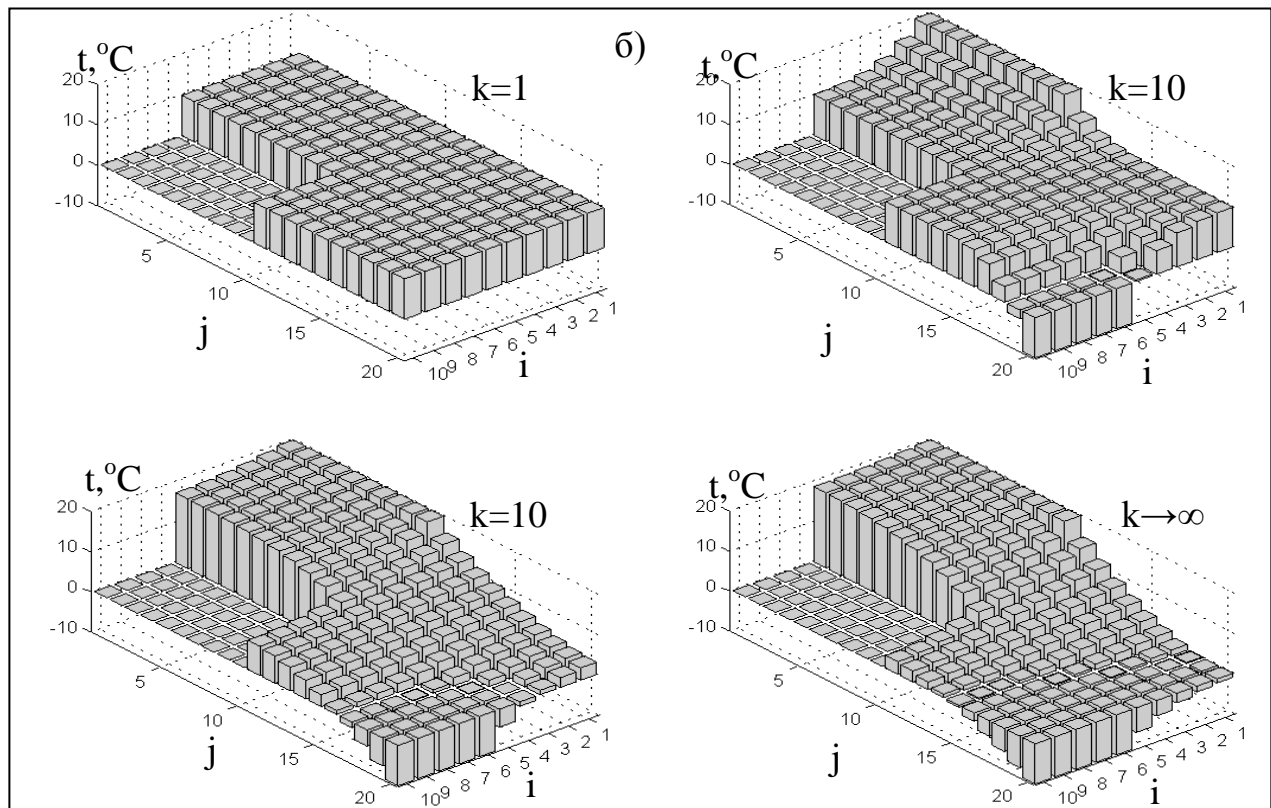
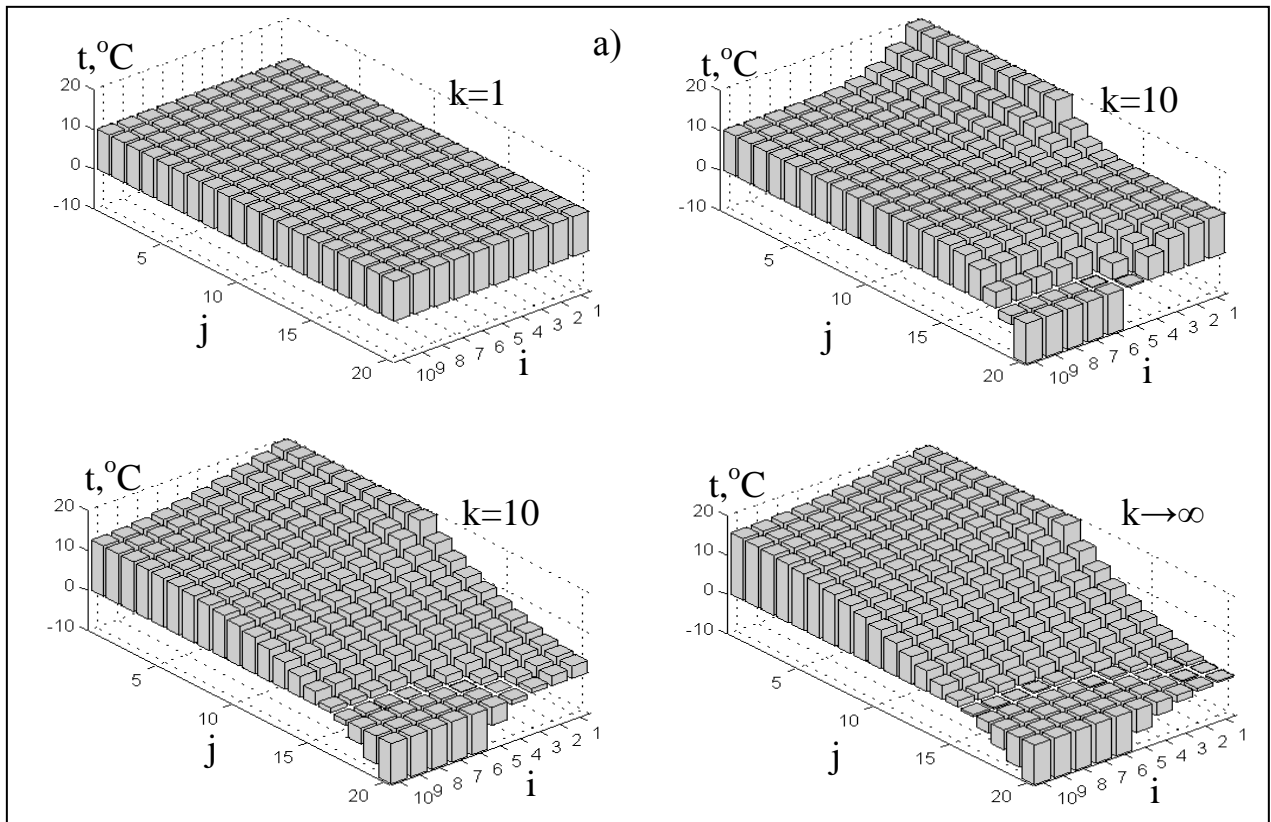


Рис.3.4. Эволюция распределения температуры в прямоугольной (а) и Г-образной (б) области с краевыми условиями 1-го рода (см. рис.3.3)

На графиках показана эволюция температурного поля в моделируемых областях от начального состояния – равномерного распределения температуры по области ($k=1$) до установившегося стационарного распределения ($k \rightarrow \infty$). Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности модели и непротиворечивости физике процесса получаемых с ее помощью распределений температуры.

При переменных теплофизических свойствах расчет элементов матрицы \mathbf{P}_Q выполняется по формулам, обобщающим правило, сформулированное в главе 2

$$\begin{aligned}
 P_{n_1(j-1)+i-1, n_1(j-1)+i} &= \frac{\lambda_{n_1(j-1)+i-1}^k}{c_{n_1(j-1)+i}^k \rho_{n_1(j-1)+i}^k} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}, \quad j=1:n_2, i=2:n_1, \\
 P_{n_1(j-1)+i+1, n_1(j-1)+i} &= \frac{\lambda_{n_1(j-1)+i}^k}{c_{n_1(j-1)+i}^k \rho_{n_1(j-1)+i}^k} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}, \quad j=1:n_2, i=1:n_1-1, \\
 P_{n_1(j-2)+i, n_1(j-1)+i} &= \frac{\lambda_{n_1(j-2)+i}^k}{c_{n_1(j-2)+i}^k \rho_{n_1(j-2)+i}^k} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}, \quad j=2:n_2, i=1:n_1, \\
 P_{n_1j+i, n_1(j-1)+i} &= \frac{\lambda_{n_1(j-1)+i}^k}{c_{n_1(j-1)+i}^k \rho_{n_1(j-1)+i}^k} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}, \quad j=1:n_2-1, i=1:n_1, \\
 p_{i,f} &= 0, \text{ если } F(f)=0, f=1, \dots, n_1 n_2, \\
 p_{j,j} &= 1 - \sum_{i=1, i \neq j}^{n_1} p_{i,j} \quad j=1, \dots, n_1 n_2.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Здесь учтено, что обратные переходы в данную ячейку из окружающих ее ячеек оперируют коэффициентом теплопроводности, рассчитываемым по параметрам состояния данной ячейки.

На каждом временном переходе температура в ячейках сравнивается с температурой фазового перехода. Если таковая достигается, то дальнейший процесс до завершения перехода описывается по приведенному в предыдущей главе алгоритму.

3.2. Моделирование процесса в стыке стеновых панелей

Используя разработанный алгоритм, перейдем к рассмотрению основного объекта моделирования – угловому стыку ограждающих конструкций, ограничившись рассмотрением симметричной относительно биссектрисы этого угла задачи. Расчетная схема углового стыка показана на рис.3.5.

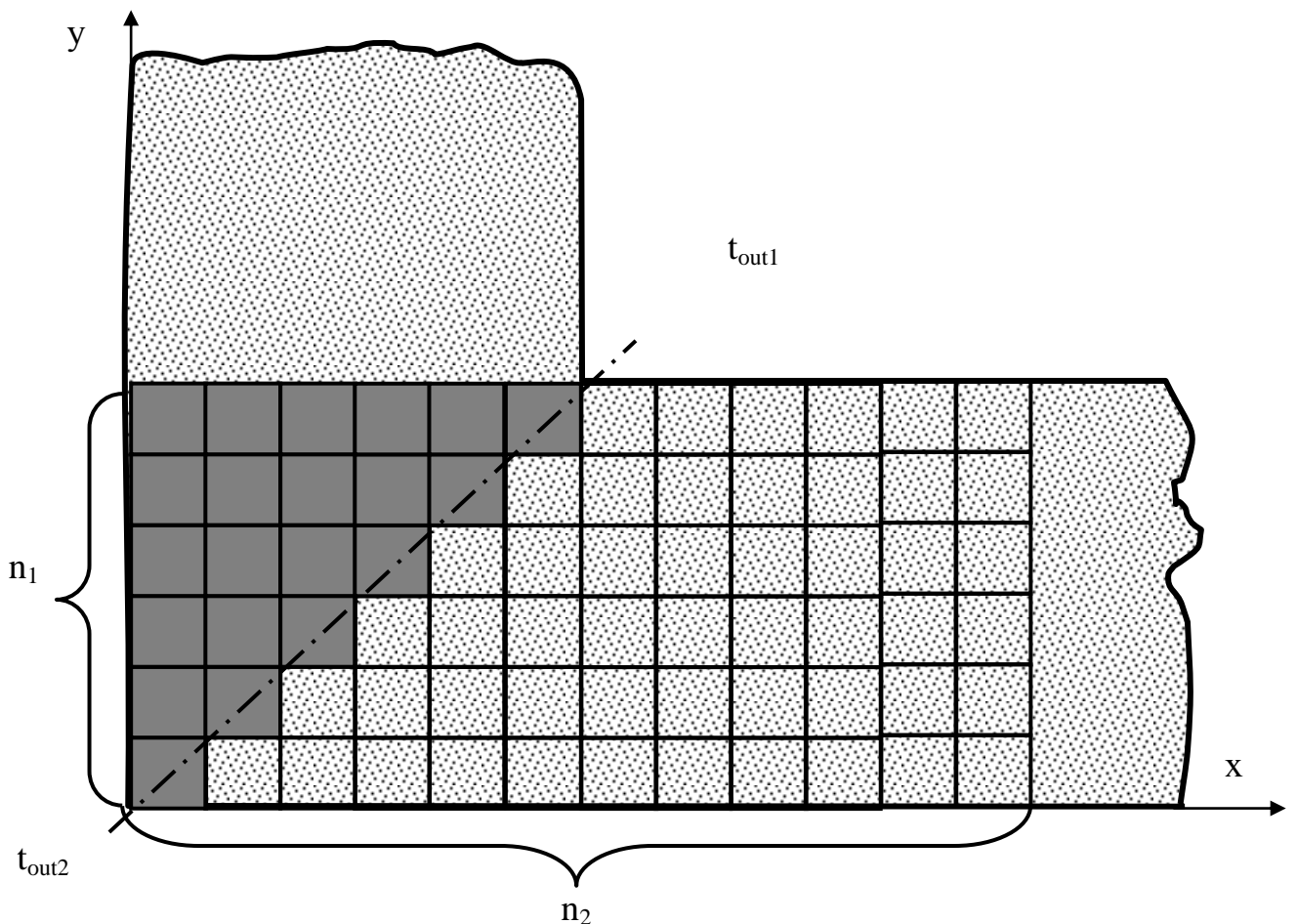


Рис.3.5. Двумерная сетка ячеек для моделирования процесса в зоне углового стыка

Базовой областью является прямоугольная сетка ячеек размером $n_1 \times n_2$, из которой исключены выделенные темным цветом ячейки, поскольку тепловой

поток через биссектрису угла равен нулю в силу симметрии задачи относительно этой биссектрисы. Матрица формы для показанной на рисунке области имеет вид

$$\mathbf{Fm} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Подставляя ее в разработанную выше модель, получим полную расчетную схему моделирования процесса.

Начнем исследование процесса, игнорируя фазовые переходы в ячейках, то есть с задачи чистой теплопроводности. Пример расчета установившегося распределения температуры в окрестности углового стыка показан на рис.3.6. Расчеты выполнены для плоской стенки толщиной $L = 0,5$ м, плотностью $\rho = 1900$ кг/м³ с теплоемкостью $c = 837$ Дж/(кг·°К). Коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны принят равным $\alpha_1 = 5$ Вт/(м²·°К), с внешней – $\alpha_2 = 10$ Вт/(м²·°К).

Температура снаружи стенки подобрана таким образом, чтобы на наружной поверхности стенки вдали от углового стыка составляла +0 °С, то есть ее промерзания не ожидалось. Поле температуры в стенке в окрестности стыка показано на рис.3.6а. При $x > 0,75$ м распределение температуры уже не зависит от x , то есть эти сечения можно считать вполне удаленными от углового стыка. По мере приближения к вершине угла температура поверхности понижается до -3 °С.

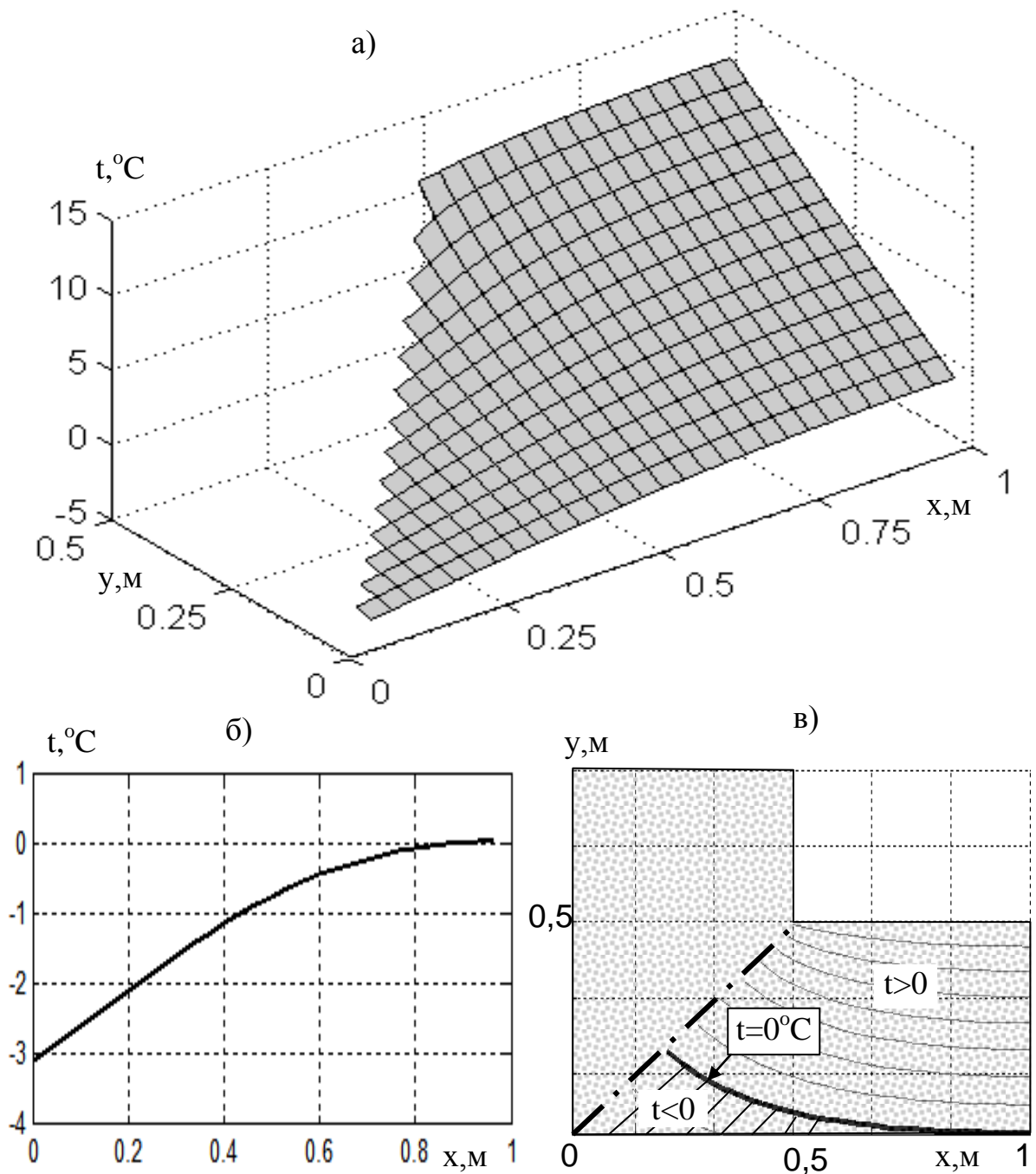


Рис.3.6. Температурное поле в окрестности углового стыка (а),
распределение температуры от угла вдоль стенки (б)
и ожидаемая зона промерзания (в)

Это наглядно видно из рис.3.6б, где нанесено изменение температуры поверхности стенки по мере удаления от вершины угла. При этом одновременно снижается и температура с внутренней стороны стенки. На рис.3.6в нанесено несколько изотерм в сечении углового стыка, среди которых выделена изотерма $t = 0^{\circ}\text{C}$. Ниже этой изотермы температуры в стенке отрицательны, и заштрихо-

ванная область является ожидаемой зоной промерзания, которого нет вдали от углового стыка.

Как упоминалось выше, расчет фазовых переходов (замерзания и оттаивания) выполняется по тому же алгоритму, что и в одномерной модели. На рис.3.7 показано установившаяся конфигурация фронта промерзания при различной внешней температуре. Из графиков видно, что глубина промерзания в окрестности углового стыка значительно выше, чем в удалении от него.

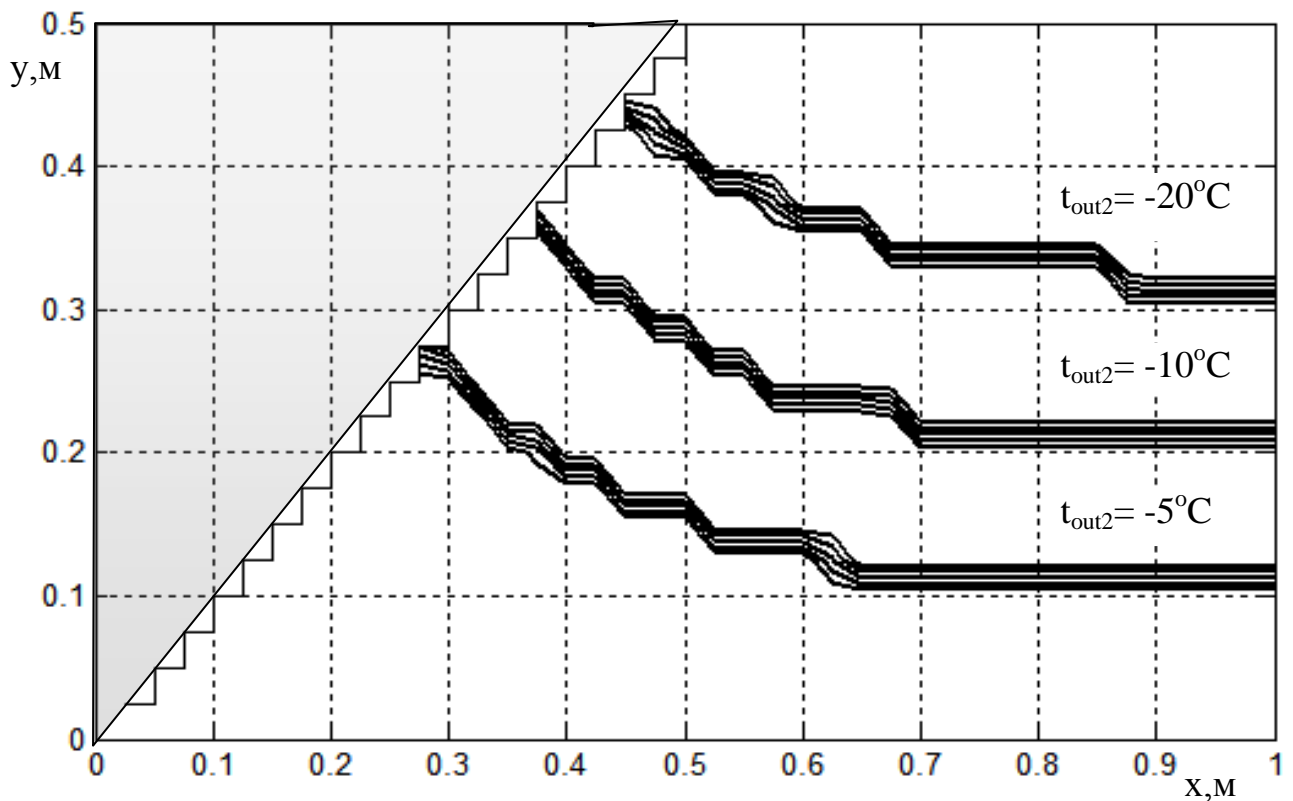


Рис.3.7. Установившееся положение фронта промерзания при различной внешней температуре ($\alpha_1=5\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{К})$, $\alpha_2=10\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{К})$)

Эти результаты обобщены на рис.3.8, где показана установившаяся глубина промерзания вдоль биссектрисы угла стыка в зависимости от внешней температуры.

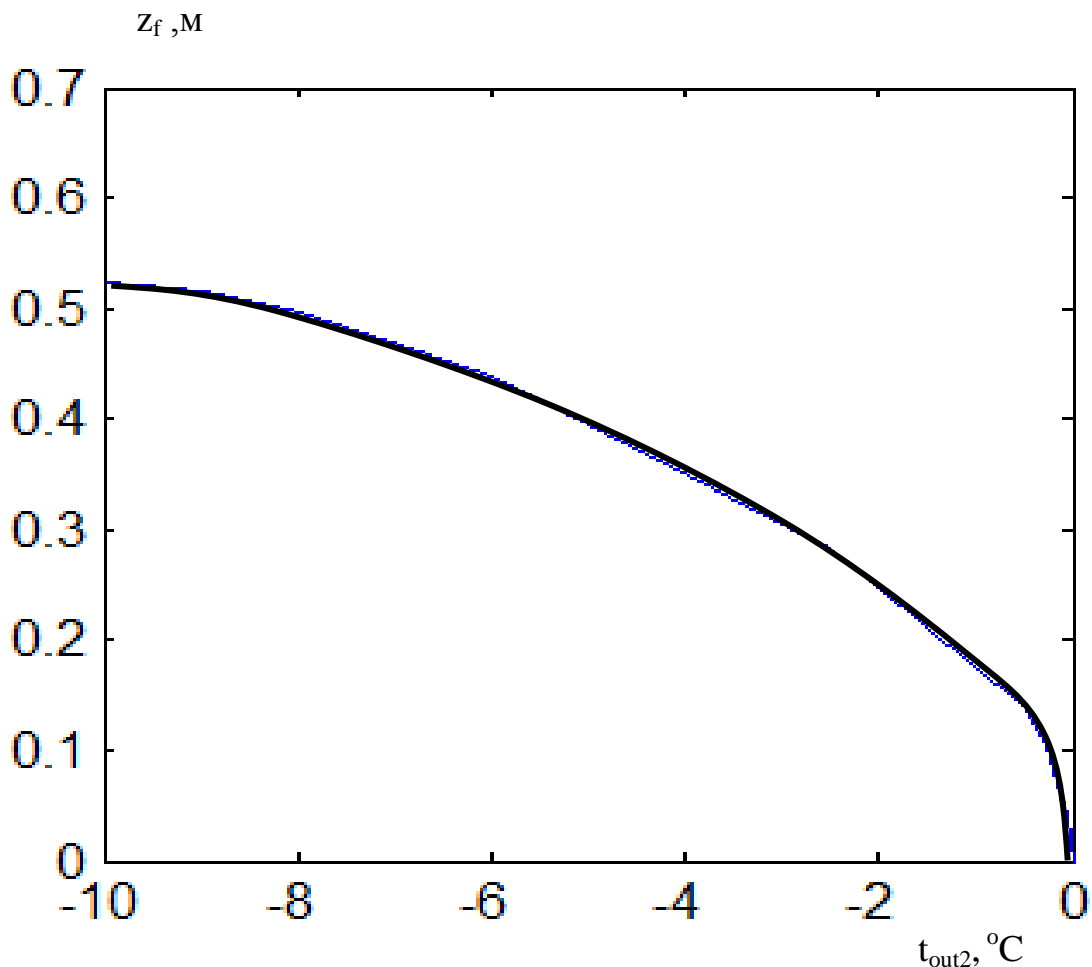


Рис.3.8. Установившаяся глубина промерзания вдоль биссектрисы угла стыка в зависимости от окружающей температуры

На следующем рис.3.9 показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи на конфигурацию фронта промерзания. Если коэффициент внутренней теплоотдачи (со стороны помещения) имеет более или менее постоянную величину, то коэффициент внешней теплоотдачи существенно зависит от скорости ветра и влажности воздуха и может меняться в несколько раз при изменении этих параметров окружающей среды.

Из графиков видно, что коэффициент внешней теплоотдачи довольно существенно влияет на глубину промерзания как вдали от стыка, так и в его окрестности.

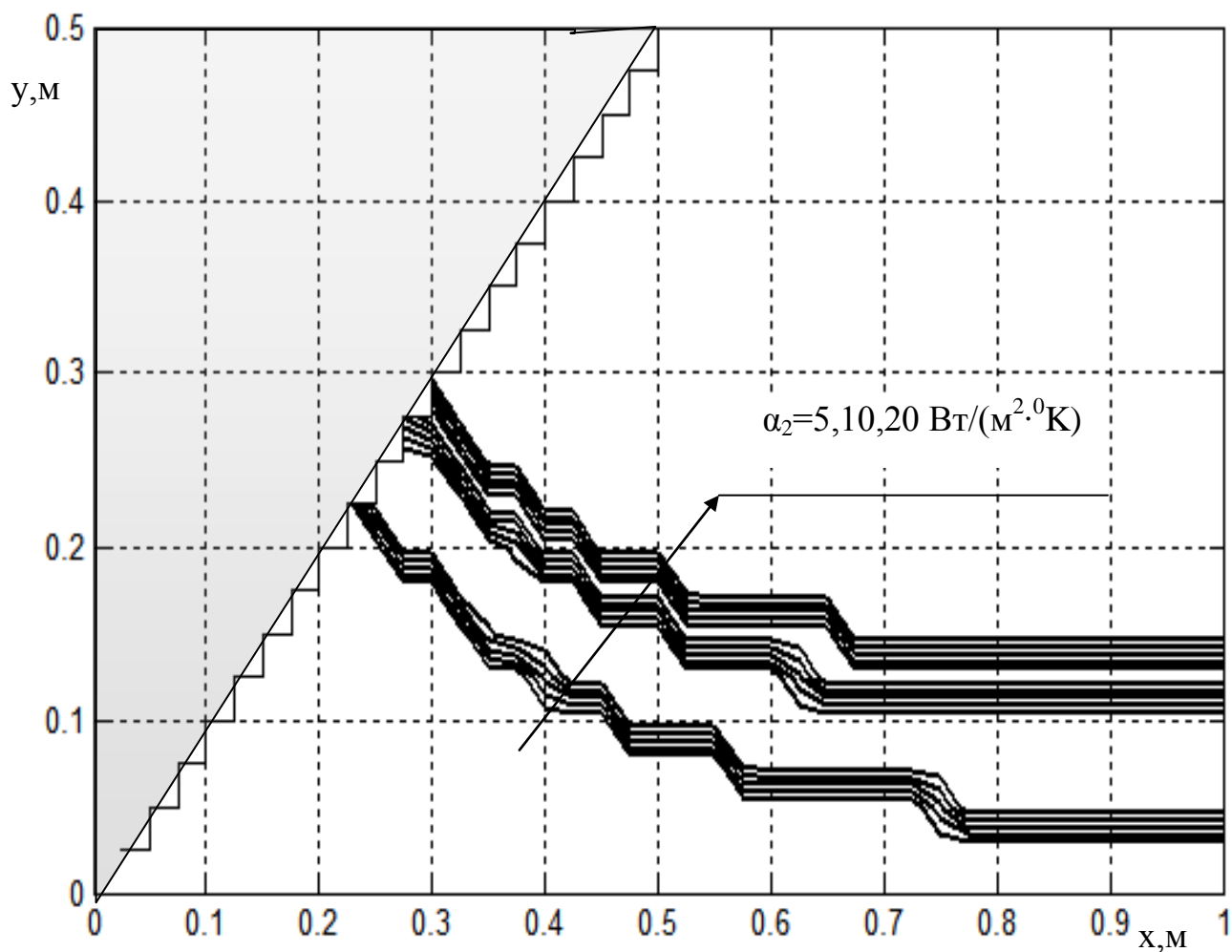


Рис.3.9. Установившееся положение фронта промерзания при различном коэффициенте внешней теплоотдачи ($t_{out2} = -5^{\circ}\text{C}$)

Таким образом, предложенная двумерная ячеечная модель позволяет прогнозировать промерзание ограждающих конструкций в окрестности их угловых стыков. Очевидно, что не составляет труда объединение разработанного алгоритма с алгоритмом теплопроводности в составной стенке, состоящей из нескольких слоев с разными теплофизическими свойствами. Это позволяет, например, включить в двумерную модель теплоизоляционные слои и/или слой декоративной отделки и исследовать влияние их свойств на процессы промерзания, как в плоских стенках, так и в окрестности их угловых стыков.

3.3. Процессы промерзания в окрестности закладных деталей

В ограждающих конструкциях зданий и сооружений практически всегда

присутствуют закладные детали, полностью или частично заглубленные в них. Эти детали, как правило, выполнены из металла и обладают значительно большей теплопроводностью, чем основной материал стенки. При отрицательных температурах с внешней стороны конструкции они формируют так называемые мостики холода [17,109], снижающие общее термическое сопротивление ограждающей конструкции и, как считается, способствующие проникновению зоны промерзания влаги вглубь стенки. Одними из самых распространенных мостиков холода являются сквозные металлические шпильки для жесткой затяжки металлических конструкций или балки крепления дополнительных наружных элементов отделки или инженерного оборудования. Поскольку мостики холода оказывают негативное влияние на тепловое состояние ограждающих конструкций, представляется важной задача о математическом моделировании теплопроводности в окрестности закладных деталей с учетом фазовых переходов при промерзании основного материала стенки.

Следует отметить, что описанный выше алгоритм ячеечного моделирования теплопроводности в области сложной конфигурации с помощью матрицы формы области может быть перенесен на рассматриваемые задачи практически без изменений. Единственное отличие заключается в следующем. Если в предыдущих моделях были ячейки, принадлежащие области моделирования, и ячейки, дополняющие эту область до прямоугольной, то теперь в самой области моделирования присутствуют зоны с разными теплофизическими свойствами. Однако эту разницу свойств также легко учесть с помощью несколько модифицированной матрицы формы.

Ограничимся рассмотрением плоской задачи теплопроводности в окрестности одиночной закладной детали, считая тепловое состояние симметричным относительно оси детали и рассматривая одну половину области слева от закладной детали, как это показано на рис.3.10.

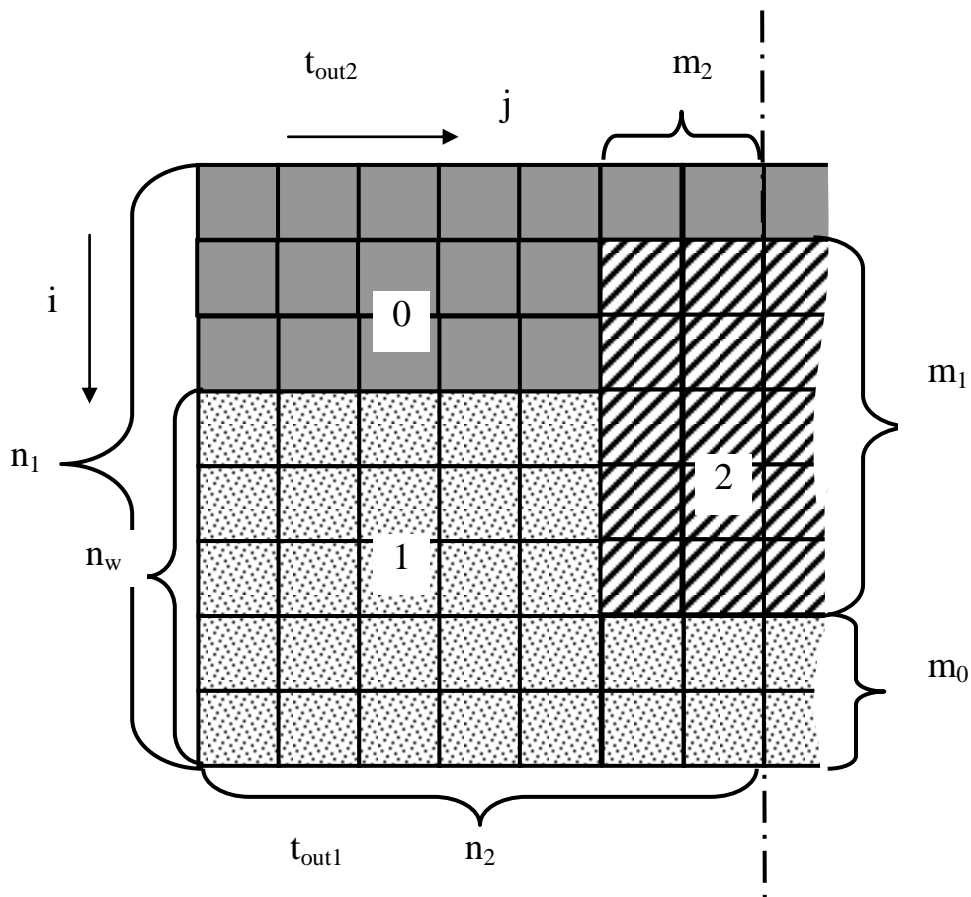


Рис.3.10. Расчетная схема ячеечного представления элемента стенки с закладной деталью (0 – наружная окружающая среда; 1 – основной материал стенки; 2 – закладная деталь)

Разобьем исследуемую область на прямоугольную сетку квадратных ячеек со стороной Δx , выделив на сетке ячейки, принадлежащие внешней окружающей среде (0), стенке (1) и закладной детали (2). Конфигурация рассматриваемого элемента может быть представлена матрицей формы

$$\mathbf{Fm} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \tag{3.9}$$

из которой видно, что с ее помощью легко может быть описана любая конфи-

гурация составляющих внутри выделенного элемента. 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, но граница между этими зонами заранее неизвестна.

Все дальнейшие расчеты выполнены для области, показанной на рис.3.11. Число ячеек, принадлежащих наружной окружающей среде в зависимости от решаемой задачи может быть выбрано с запасом, чтобы иметь возможность выдвигать в модели закладную деталь в наружную сторону. Размер области по горизонтали выбран из условия, чтобы на ее левом краю изменение распределения параметров процесса по толщине стенки практически прекращалось (чтобы левый край «не знал» о присутствии закладной детали). Во всех случаях закладная деталь считалась не пористой, то есть не содержащей влагу.

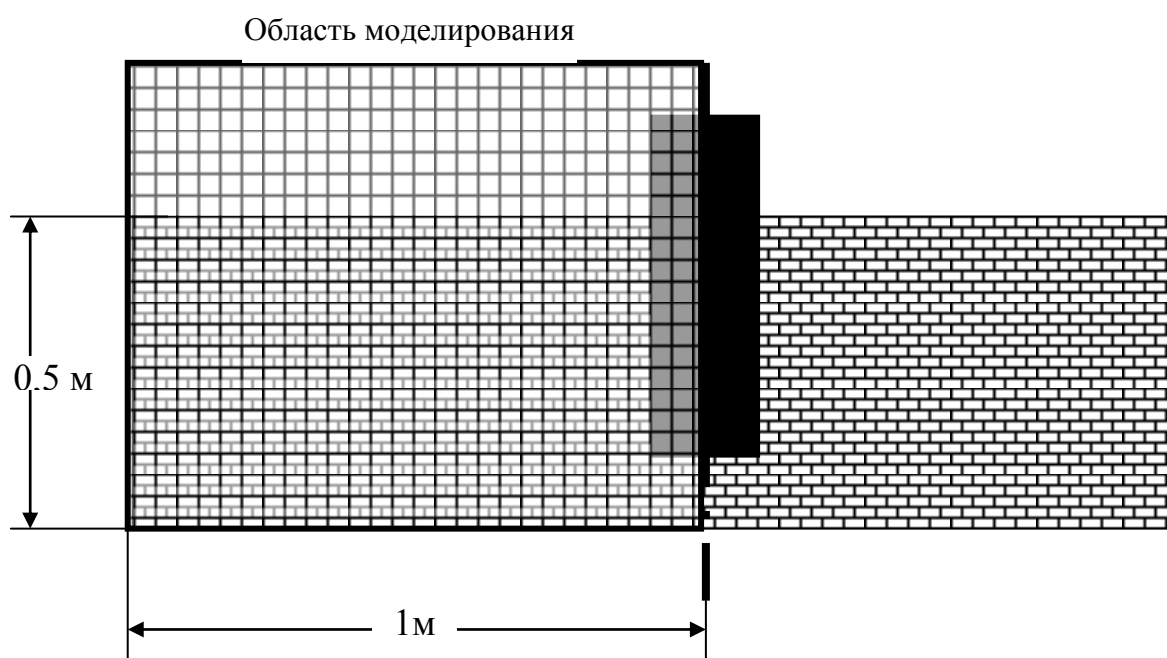


Рис.3.11. Выделенная область моделирования и ее характерные размеры

Сначала рассмотрим моделирование процесса, когда закладная деталь установлена заподлицо с наружной и внутренней поверхностью стенки и имеет коэффициент теплопроводности, в четыре раза больший или меньший коэффи-

циента теплопроводности стенки, а остальные свойства одинаковы со стенкой. Рассчитанные установившиеся поля температур и распределения плотности теплового потока показаны на рис.3.12, где для наглядности линейные размеры выражены через номера ячеек по вертикали и горизонтали.

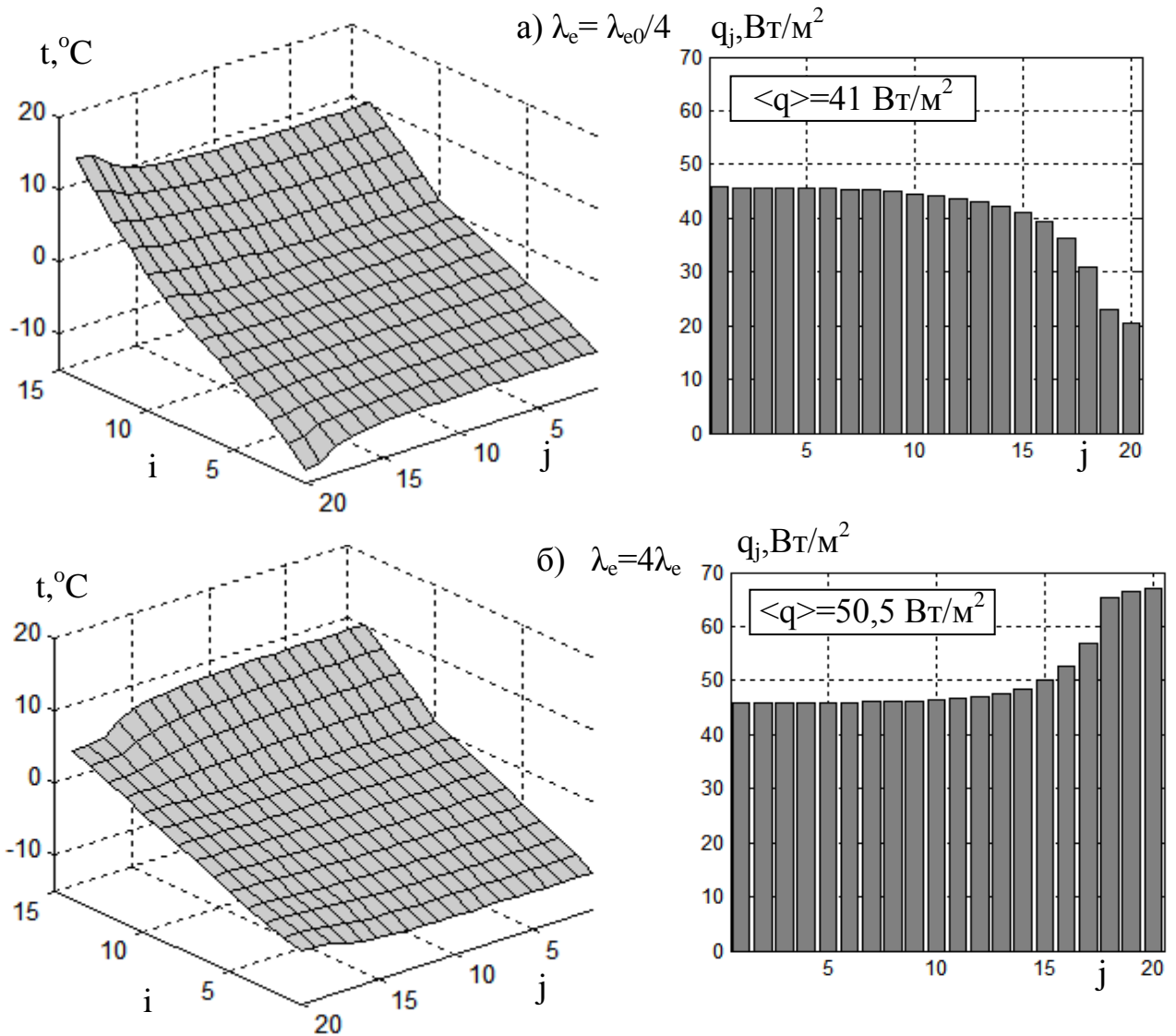


Рис.3.12. Установившееся распределение температуры и плотности теплового потока через стенку в окрестности закладной детали при различном соотношении коэффициентов теплопроводности детали и стенки (а – $\lambda_e = \lambda_{e0}/4$, б) – $\lambda_e = 4 \lambda_{e0}$)

Плотность теплового потока в стенку рассчитывалась по формуле

$$q_j = \alpha_1 (t_{out1} - t_{n1,j}), \quad (3.10)$$

где величина $t_{n,j}$ бралась из установившегося распределения температуры.

Среднее значение плотности теплового потока определялось усреднением величины q_j по нижней строке ячеек. В установившемся режиме это среднее значение, рассчитанное с внутренней стороны стенки и с ее наружной стороны, отличались не более чем на 0,1%, что как раз и свидетельствовало о наступлении установившегося режима.

Если коэффициент теплопроводности закладной детали меньше такового для стенки, термическое сопротивление в ее окрестности возрастает, а средняя плотность теплового потока снижается от 46 Вт/м^2 (сплошная стенка) до 41 Вт/м^2 . При коэффициенте теплопроводности у детали большем, чем у стенки, наоборот, плотность теплового потока в ее окрестности возрастает, а его среднее значение становится равным $50,5 \text{ Вт/м}^2$. Из графиков распределения температуры видно, что влияние закладной детали распространяется примерно на половину выбранной ширины области, то есть на расстояние, равное толщине стенки. Заметим, что глубина расположения фронта промерзания в обоих случаях оставалась одинаковой, а сам фронт - горизонтальным.

При металлической закладной детали ее свойства существенно отличаются от свойств стенки, причем, в первую очередь это касается коэффициента теплопроводности, который больше примерно в 50 раз. Результаты моделирования теплового процесса с установленной заподлицо металлической закладной деталью показаны на рис.3.13.

В связи с высокой теплопроводностью закладной детали перепад температуры между ее внутренней и наружной поверхностью очень незначителен, то есть ее внутренняя часть заметно охлаждается, а наружная – нагревается, причем до температуры, большей температуры замерзания. Вследствие этого фронт промерзания имеет сложную конфигурацию и почти отсутствует в окрестности самой детали. Плотность теплового потока через деталь увеличивается до 80 Вт/м^2 , и в этом смысле она, конечно, может быть названа «мостиком холода», но не в смысле заглупления фронта промерзания, с которым дело обстоит наоборот.

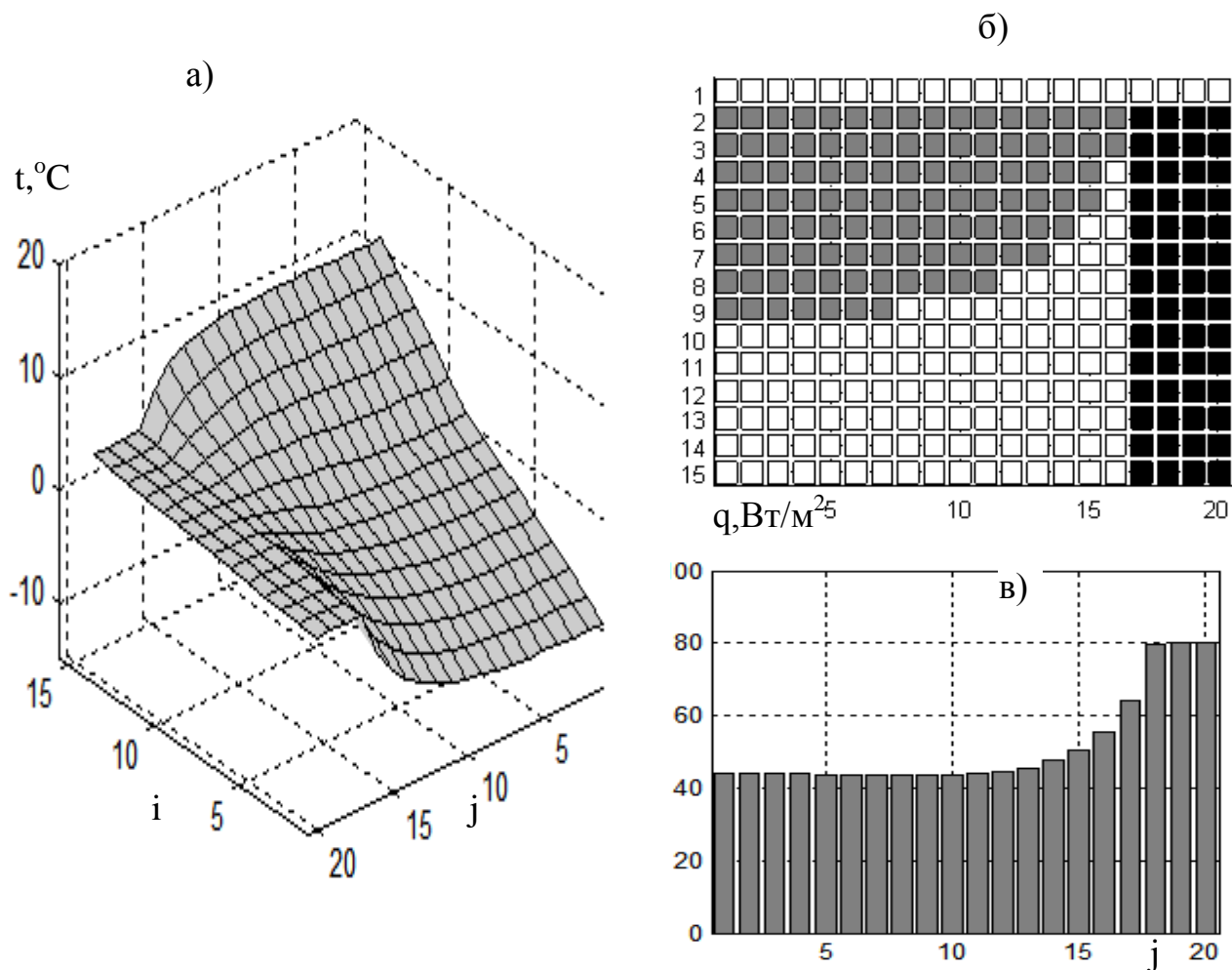


Рис.3.13. Установившееся распределение температуры (а), конфигурация фронта промерзания (б) и распределение плотности теплового потока через стенку (в) в окрестности металлической закладной детали

Для того чтобы исключить в модели промерзание, достаточно положить температуру замерзания влаги $t_{\text{ме}}$ заведомо более низкой, чем наружная температура. Расчет параметров процесса при игнорировании промерзания дает среднюю плотность теплового потока на 12% меньше, из чего следует, что расчет тепловых потерь без учета этого фактора вносит значительную ошибку в прогнозирование теплового состояния здания.

Здесь, как и выше, тепловое влияние закладной детали проявляется примерно на половине ширины области моделирования, то есть на расстоянии, равном толщине стенки.

Как только внутренний край закладной детали оказывается изолированным

от внутренней поверхности стенки, ситуация резко меняется (рис.3.13б,в). Не подогреваемая с внутренней стороны, она действительно становится «мостиком холода», продвигает фронт промерзания внутрь стенки и увеличивает плотность теплового потока через нее.

По мере укорачивания закладной детали с внутренней стороны тепловой поток сначала увеличивается, а затем уменьшается, поскольку присутствие детали начинает играть все меньшую роль. Но даже если она занимает около 30% толщины стенки, ее влияние сказывается на положении фронта промерзания: он, хотя и незначительно, продвигается вглубь стенки.

Из анализа графиков следует, что сквозная закладная деталь оказывается термически выгоднее, чем деталь, заглубленная, например, на 70% толщины стенки.

Рассмотрим далее влияние заглубления закладной детали постоянной длины, равной толщине стенки. Здесь влияние части детали, выходящей за наружную поверхность стенки, по сравнению с предыдущим случаем, усугубляется тем, что увеличивается площадь ее контакта с холодной окружающей средой, а, следовательно, и теплоотдача от нее. Результаты моделирования этого случая показаны на рис.3.14. Их целесообразно сравнить с данными предыдущего рисунка, когда деталь не выдвигалась, а просто укорачивалась. Вынос детали на $1/3$ ее длины практически не влияет на конфигурацию фронта промерзания, но увеличивает среднюю плотность теплового потока с $51,5 \text{ Вт/м}^2$ до $58,5 \text{ Вт/м}^2$ по сравнению с полностью утопленной деталью.

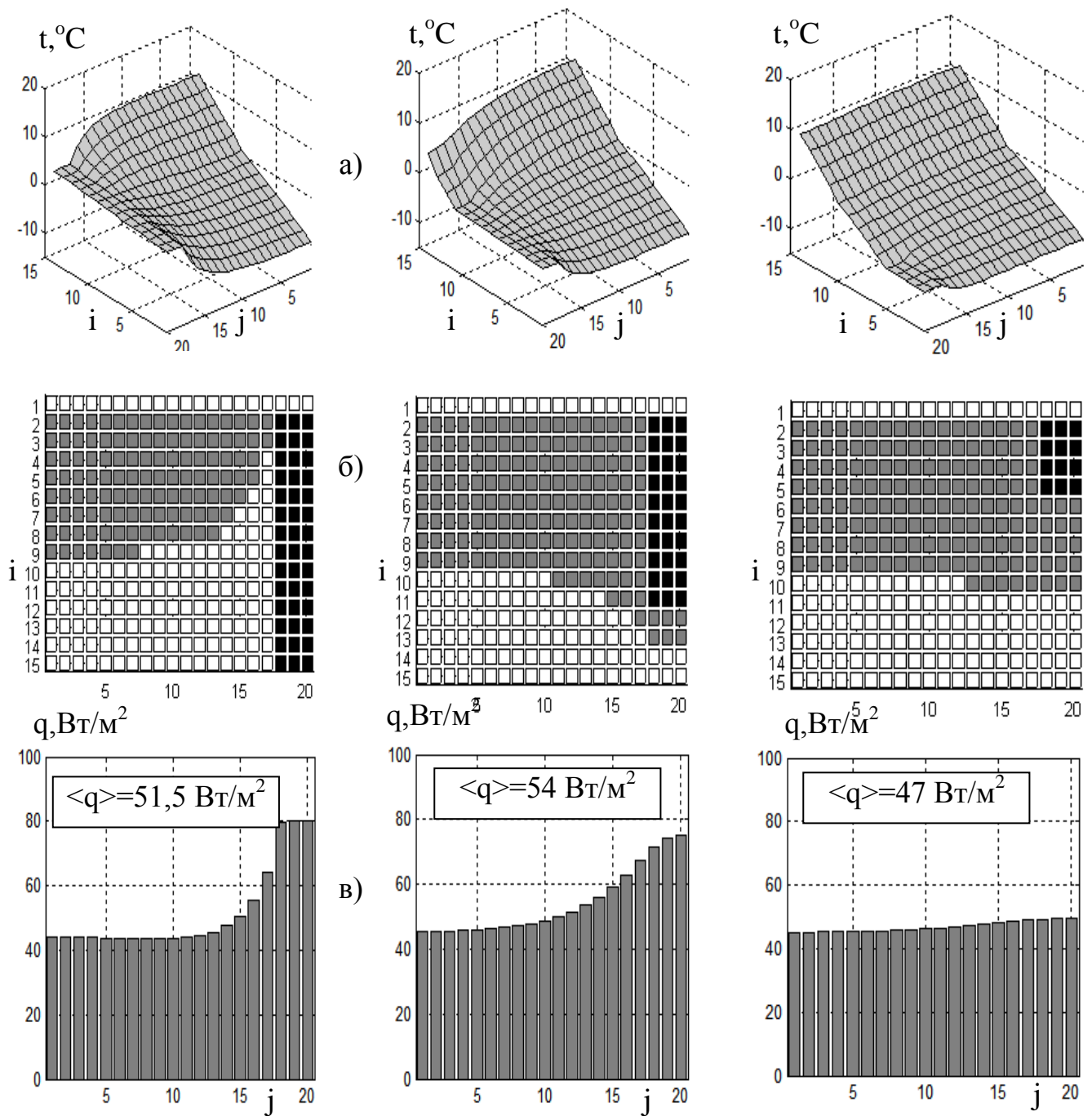


Рис.3.14. Влияние глубины погружения закладной детали, установленной заподлицо с наружной поверхностью, на установившееся поле температуры (а), конфигурацию фронта промерзания (б) и распределение плотности теплового потока (в)

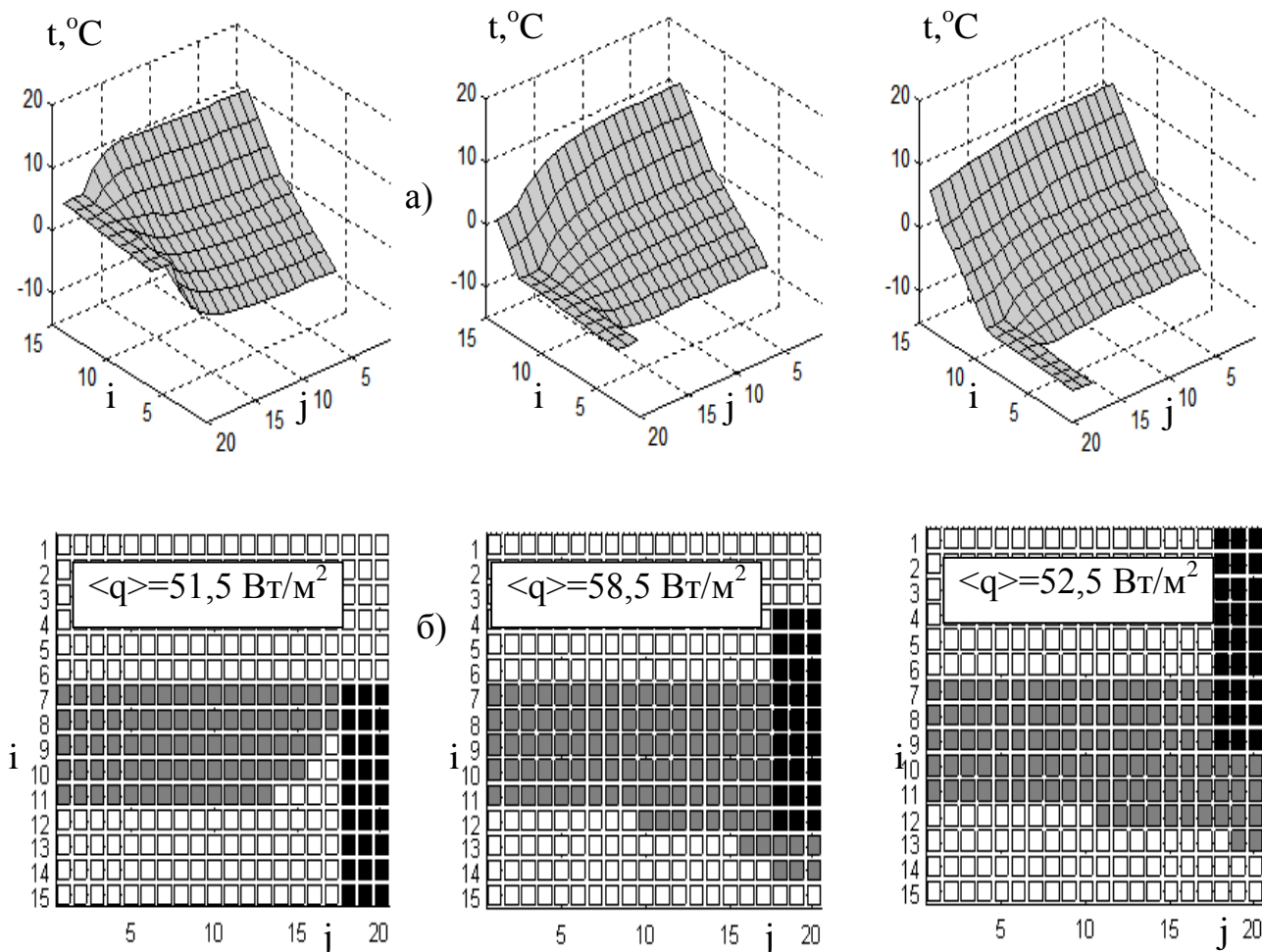


Рис.3.15. Влияние глубины погружения закладной детали постоянной длины на установившееся поле температуры (а) и конфигурацию фронта промерзания (б)

Вынос же детали на $2/3$ ее длины почти не меняет глубину фронта промерзания непосредственно под деталью по сравнению с предыдущим случаем, но заметно снижает среднюю плотность теплового потока. Первое объясняется более глубоким ее охлаждением из-за увеличившейся поверхности теплообмена с наружной средой, второе – меньшей ролью детали в термическом сопротивлении стенки.

Пусть теперь вылет закладной детали за наружную поверхность стеки зафиксирован по конструктивным соображениям. Ее заглубление в стенку определяется прочностными условиями, но одновременно меняет и тепловой поток в стенку. На рис.3.16 показано изменение средней плотности теплового потока по мере относительного заглубления детали в стенку (здесь $\langle q_0 \rangle$ - средняя

плотность теплового потока при отсутствии детали). Она линейно возрастает с заглублением и только при выходе детали на внутреннюю поверхность стенки снижается из-за прямого контакта торцевой поверхности детали с теплой внутренней средой. Поэтому если по прочностным соображениям требуется заглубление детали более чем на 60% толщины стенки, возможно, разумным решением является ее полное заглубление.

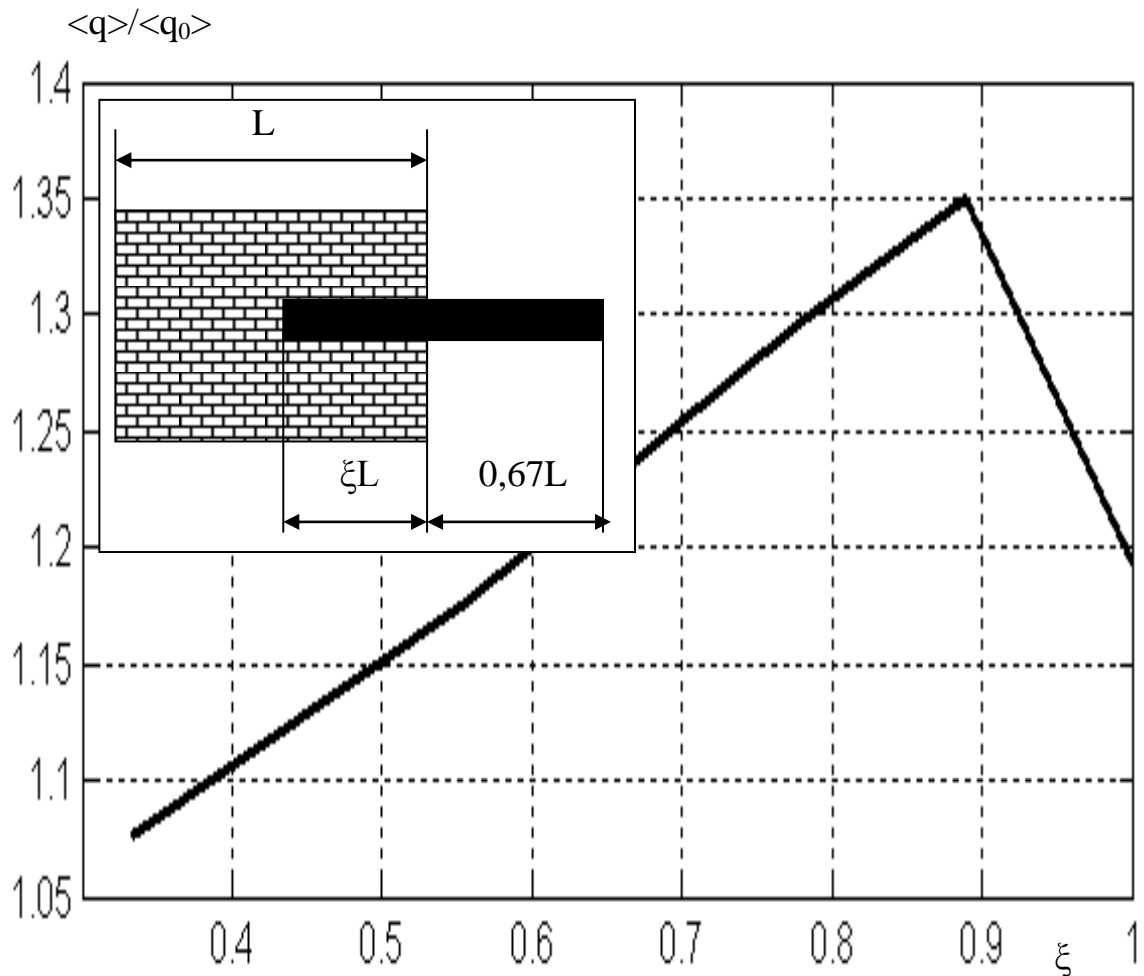


Рис.3.16. Увеличение средней плотности теплового потока при заглублении закладной детали в стенку при ее фиксированном наружном вылете

Необходимо отметить, что численные эксперименты со всеми рассмотренными выше вариантами расположения и размеров закладной детали не требуют корректировки алгоритма моделирования: все изменения проявляются только через матрицы формы и теплофизических свойств сред. В качестве последнего примера, демонстрирующего возможности модели, на рис.3.17 показано уста-

новившееся тепловое состояние стенки с закладной деталью более сложной формы, которое рассчитано только путем изменения матрицы формы.

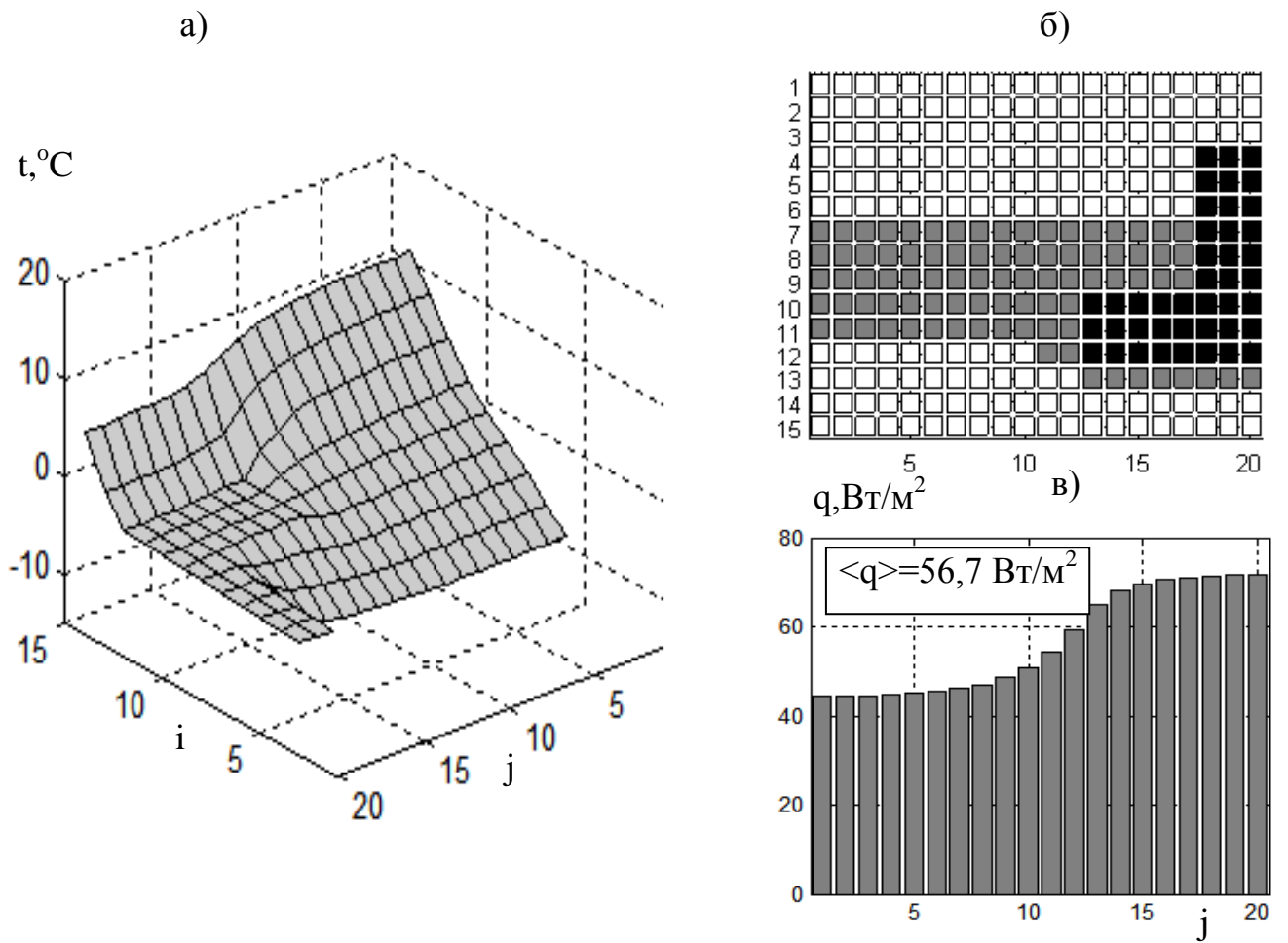


Рис.3.17. Установившееся распределение температуры (а), конфигурация фронта промерзания (б) и плотность теплового потока через стенку (в) в окрестности закладной детали со сложной формой сечения

3.4. Выводы по главе 3

Полученные в главе 3 результаты могут быть кратко суммированы в следующих выводах.

1. Разработанная в главе 2 одномерная ячеечная модель теплопроводности с учетом фазовых переходов обобщена на случай двухмерной теплопередачи, что позволяет прогнозировать конфигурацию и продвижение фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей сложной конфигурации.

2. Численные эксперименты с моделями позволили выявить влияние теплофизических свойств стенки и параметров окружающих сред на глубину и конфигурацию фронта промерзания в окрестности угловых стыков ограждающих конструкций и установленных в них закладных деталей.

3. Выполнена оценка вызванных промерзанием дополнительных тепловых потерь в зданиях из-за наличия в ограждающих конструкциях угловых стыков и закладных деталей.

4. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение моделирования и расчета двухмерных процессов теплопроводности в составных строительных изделиях с учетом замерзания и/или оттаивания влаги.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

4.1. Описание экспериментальной установки и результатов экспериментов

Для экспериментальной проверки разработанной математической модели была создана экспериментальная установка, схема которой показана на рис.4.1. Объектом исследования было измерение температуры во влажном цилиндрическом пористом губчатом образце с номинальными размерами: диаметр 15 мм, длина 150 мм при его охлаждении до отрицательных температур, то есть при наличии замерзания влаги.

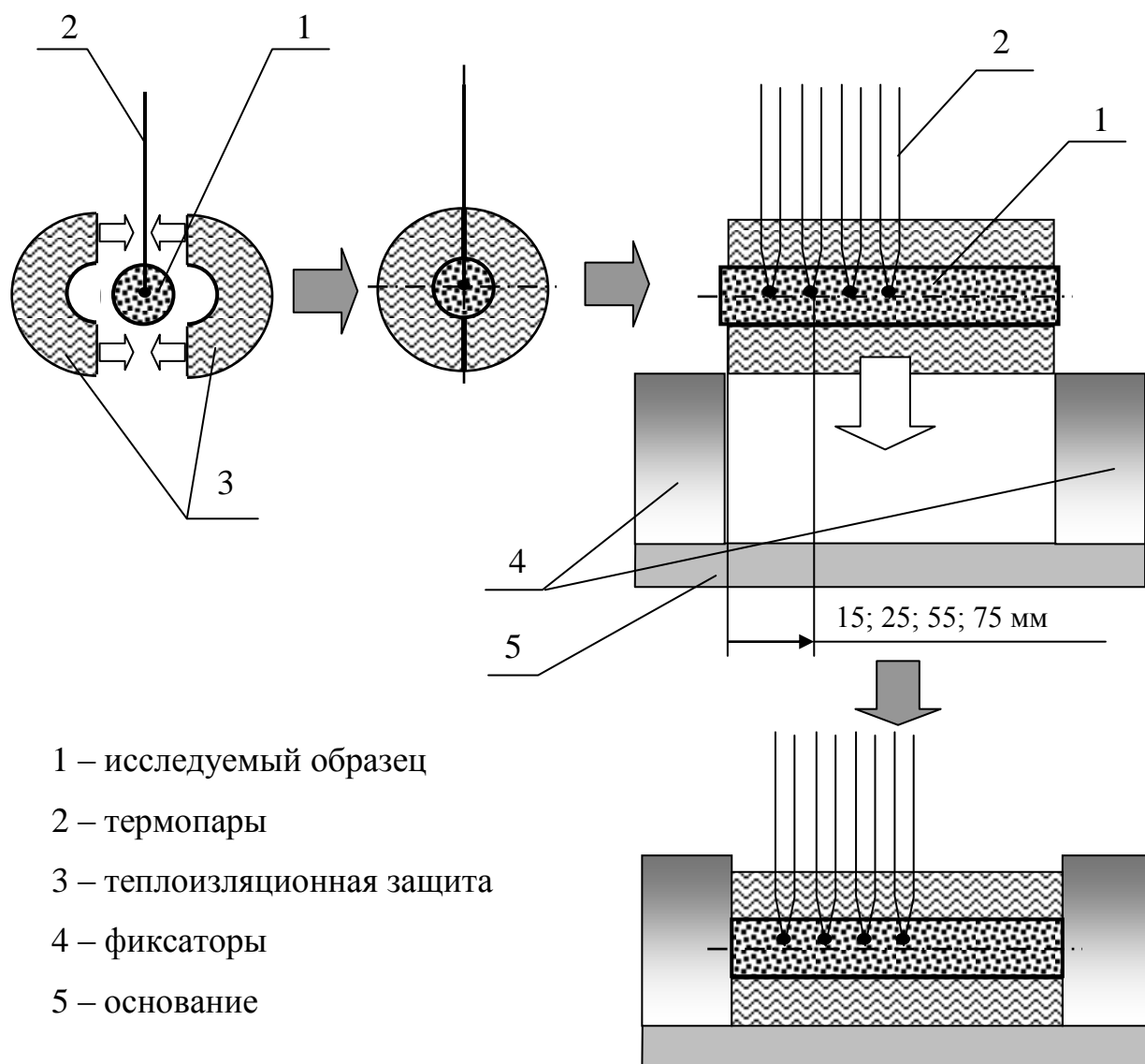


Рис.4.1. Схема экспериментальной установки

Поскольку проверке подвергалась одномерная модель, установка была спроектирована так, чтобы максимально приблизить реальный процесс к одномерному. На основании 5 были установлены массивные металлические фиксаторы, обладающие большой полной теплоемкостью. Основание с фиксаторами постоянно находилось в морозильной камере, в которой поддерживалась температура $-18 \pm 1^\circ\text{C}$ и до которой была охлаждена станина с фиксаторами.

Образец, плотность которого составляла $0,1 \text{ г/см}^3$, при полном насыщении водой имел плотность $0,86 \dots 0,88 \text{ г/см}^3$, то есть каждый кубический сантиметр удерживал в среднем $0,77 \text{ г}$ воды, что являлось предельным содержанием влаги в 1 см^3 материала. Образец с одной половины был снабжен четырьмя хромель-копелевыми термопарами (их расположение показано на рис.4.1), достаточно длинные провода от которых выходили на регистрирующее устройство.

Полностью заполненный водой образец помещался в состоящую из двух половин теплоизоляционную защиту, изготовленную жесткого пенополиуретана, имеющего теплопроводность $0,022 \text{ Вт/(м}^\circ\text{К)}$, после чего половины схватывались упругими кольцами (на рис.4.1 не показаны). Помещенный в защиту образец быстро вставлялся в зазор между фиксаторами, причем его торцы плотно прижимались к фиксаторам. После этого снимались показания термопар в следующие моменты времени: 7,5; 15; 30; 60 мин.

Такая организация экспериментальной процедуры была сделана для того, чтобы: а) считать, что образец-стержень теплоизолирован по боковой поверхности, то есть через нее охлаждение отсутствует или мало, по крайней мере в течение эксперимента; б) считать, что температура краев образца постоянна и равна температуре фиксаторов (-18°C), которая не меняется в течение эксперимента в силу большой полной теплоемкости фиксаторов. Последнее позволяло использовать при расчетах краевые условия 1-го рода и исключить из расчета коэффициенты теплоотдачи, экспериментальное определение которых обычно связано со значительной неопределенностью.

В расчетах использовалась описанная в главе 2 одномерная модель, в которой при краевых условиях 1-го рода вместо расчета температуры крайних ячеек с помощью равенств (2.8), (2.9) и после каждого временного перехода приписывалась температура -18°C . В силу того, что масса губчатого каркаса составляла всего 11% массы образца, а 89% составляла вода, теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость) брались при расчетах такими же, как у воды или льда, в зависимости от фазового состояния ячейки. При расчетах образец представлялся 15-ю ячейками длиной 10 мм. На рис.4.2 показано расчетное распределение температуры по половине образца в различные моменты времени и расположение точек замера температуры. Здесь кружки относятся к расчетным температурам в ячейках.

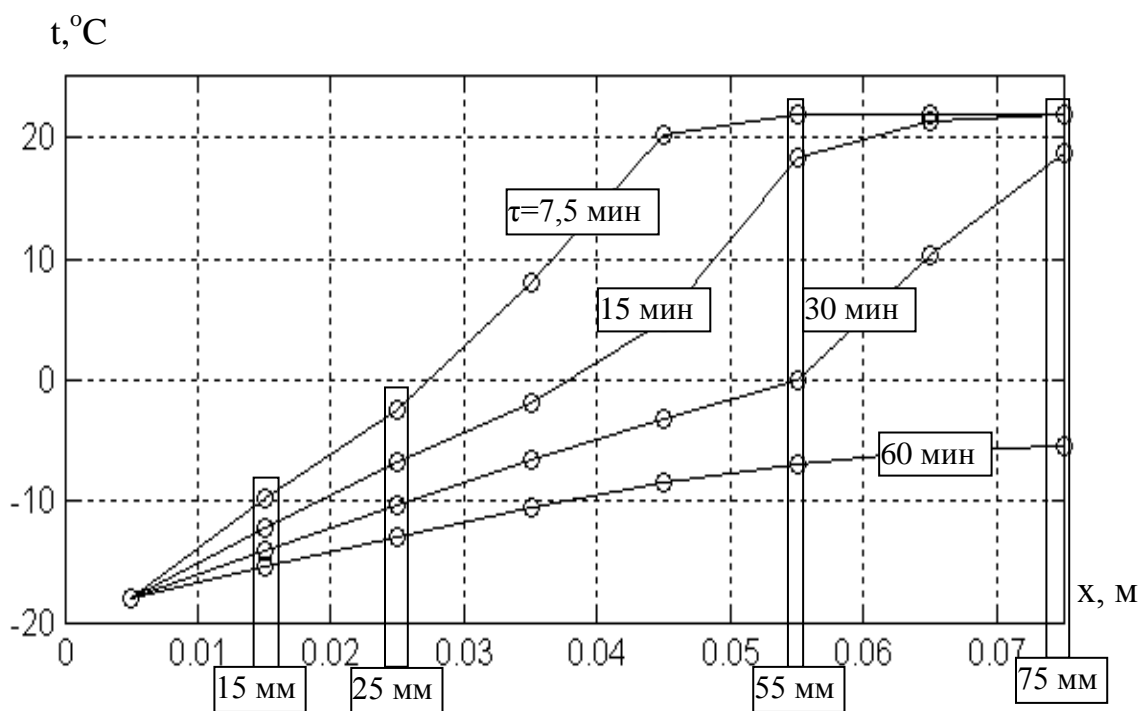


Рис.4.2. Расчетное распределение температуры по половине образца в различные моменты времени и расположение точек замера температуры

После отладки экспериментальной процедуры каждый опыт повторялся 5 раз. Сравнение расчетных и опытных изменений температуры во времени в различных сечениях образца показаны на рис.4.3. Характерный излом или горизонтальные участки на расчетных кривых соответствуют фазовым переходам в ячейках (образованию льда).

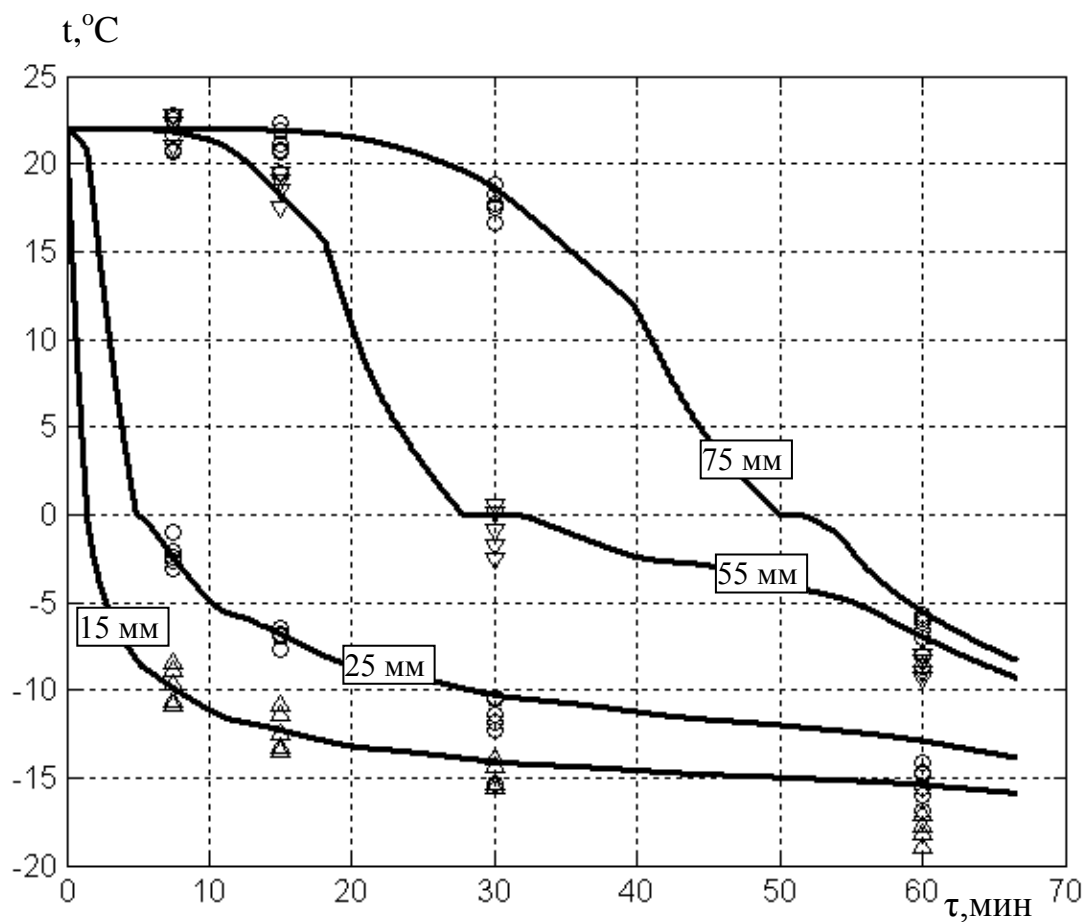


Рис.4.3. Сравнение расчетных и экспериментальных изменений температуры во времени в различных сечениях образца

Из сравнения расчетных и опытных данных 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 неидеальностью 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, несмотря на некоторое несоответствие условий опыта и расчета по одномерной модели, можно считать расчетные прогнозы обладаю-

щими приемлемой точностью для инженерных оценок промерзания строительных конструкций.

4.2. Основные зависимости для расчета процессов теплопередачи через ограждающую конструкцию.

Рассмотрим процессы теплопередачи от находящегося в помещении покоящегося воздуха с температурой t_a [°C], имеющего плотность ρ_a [кг/м³], удельную теплоемкость c_a [Дж/кг·°C] и коэффициент теплопроводности λ_a [Вт/м·°C], через ограждающую конструкцию, состоящую из n слоев, каждый из которых имеет толщину δ_i , [мм], коэффициент теплопроводности λ_i , плотность ρ_i удельную теплоемкость c_i ($i = 1, \dots, n$) в окружающую среду с температурой t_n [°C] при скорости ее движения (скорости ветра) w_n [м/с].

При стационарном режиме, когда температура окружающей среды и скорость ветра постоянны во времени, температуры по толщине ограждающей конструкции линейные, и рассчитываются по известной методике [53, 57, 84, 87, 109, 114], согласно которой разность температур на i -том слое n -слойной конструкции определяется по формуле:

$$\Delta t_i = (t_a - t_n) \frac{R_i}{R}, \quad (4.1)$$

где R_i и R – термическое сопротивление i -го слоя и всей конструкции в целом:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \quad R = R_{вн} + \sum_{i=1}^n R_i + R_n; \quad R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн}}; \quad R_n = \frac{1}{\alpha_n}, \quad (4.2)$$

где $\alpha_{вн}$ и α_n – коэффициенты теплоотдачи к внутренней и от наружной поверхности ограждающей конструкции в окружающую среду.

Однако следует заметить, что входящие в эти формулы величины, характеризующие теплофизические свойства материалов тепловой изоляции, могут весьма заметно изменяться в радиальном направлении, так как они зависят от температуры и влагосодержания материала. Кроме того, весьма важно, в каком фазовом состоянии присутствует влага в материале (табл. 4.1).

Табл. 4.1.

Теплофизические свойства воды и льда

№ п/п	Фазовое состояние	Температура, t °С	Коэффициент теплопроводности, $\lambda_{\text{вл}}$, Вт/м·°С	Удельная теплоемкость, $c_{\text{вл}}$ Дж/кг·°С	Плотность, $\rho_{\text{вл}}$ кг/м ³
1	Вода	+0,01	0,56	4212	999,8
2	Лёд	0	2,22	2050	916,2
3	Лёд	-10	2,30	2000	918,9

Для расчета плотности и удельной теплоемкости влажных материалов обычно используют правило аддитивности:

$$\rho = \rho_{\text{сух}} + u \cdot \rho_{\text{вл}}; \quad (4.3)$$

$$c = c_{\text{сух}} + u \cdot c_{\text{вл}}; \quad (4.4)$$

где u – влагосодержание материала, кг/кг сухого.

Температура мало влияет на удельную теплоемкость.

Гораздо сложнее дело обстоит с расчетом коэффициента теплопроводности влажных материалов, «эффективная теплопроводность» которых зависит от их внутренней структуры, то есть от размера, формы и расположения в них пор. В [58] в качестве простейшей модели теплопроводности рассматривается дисперсная система, состоящая из чередующихся друг с другом плоских слоев твердого скелета системы и пор (пустот), которые могут быть заполнены жидкостью, где слои могут быть расположены как перпендикулярно направлению теплового потока, так и параллельно ему. В первом случае эффективная теплопроводность системы будет минимальной и определяется выражением

$$\lambda_{\text{эфф}}^{\text{мин}} = \frac{\lambda_{\text{сух}} \lambda_{\text{вл}}}{u \lambda_{\text{вл}} + 1 - u \lambda_{\text{сух}}}, \quad (4.5)$$

Во втором случае эффективная теплопроводность системы будет максимальной:

$$\lambda_{\text{эфф}}^{\text{макс}} = u\lambda_{\text{вл}} + (1-u)\lambda_{\text{сух}} . \quad (4.6)$$

В работе [58] представлено более десятка формул различных авторов для расчета $\lambda_{\text{вл}}$ в зависимости от структуры материала. Для теплоизоляционных материалов опытным путем было получено такое соотношение для коэффициента теплопроводности [58]:

$$\lambda = \lambda_0 + A \cdot t \cdot u \cdot \exp(-B \cdot u) , \quad (4.7)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого тела при температуре $t = 0$ °С; А и В – постоянные, определяемые из опыта. Например, для пенополиуретана $A = 0,043$; $B = 1,9$.

Экспериментальные исследования [57, 58] показали, что теплопроводность и температуропроводность $a = \lambda/c_p$ некоторых тел с увеличением влагосодержания сначала увеличиваются, достигают максимума, а потом уменьшаются. Этот максимум соответствует переходу от одной формы связи влаги с материалом к другой.

Для того чтобы определить влагосодержание материала, находящегося в соприкосновении с воздухом, относительная влажность которого ϕ , можно воспользоваться уравнением изотермы десорбции. Для расчета этой зависимости можно использовать, например, формулу Б.А. Поснова [58]:

$$1/u = 1/u_m - B \cdot \ln \phi , \quad (4.8)$$

где u_m – максимальное гигроскопическое влагосодержание материала [%], В – коэффициент. Величины u_m и В зависят от температуры [6,11,56-58]. Например, для пенополиуретана

$$u_m = 290/(t + 273), \quad (4.9)$$

$$B = 0,67 \cdot 10^{-7} \cdot (t + 273)^{3,37} + 0,1. \quad (4.10)$$

При отрицательных температурах влага в порах материала может частично замерзнуть, что повлечет за собой резкое снижение коэффициента влагопроводности. Процесс перемещения влаги в строительных материалах при отрицательных температурах изучен очень слабо. Р. Е. Брилингом [15,16] установлено, что полного замерзания влаги, находящейся в порах строительных материалов, обычно не происходит. Всегда имеется часть влаги, которая может перемещаться из одной части материала в другую под влиянием различных сил. Температура замерзания влаги в капиллярах зависит от их диаметра: чем меньше будет диаметр капилляра, тем ниже будет температура замерзания в нем воды. Так, например, в капиллярах диаметром 1,57 мм вода замерзает при температуре - 6,4 °С; в капиллярах диаметром около 0,24 мм — при -14,2 °С, а в капиллярах диаметром 0,1 мм — при -18,6 °С.

Содержание незамерзшей воды в строительных материалах при отрицательной температуре неоднократно исследовалось. Установившегося мнения о причинах этого явления, о методах прогнозирования содержания незамерзшей воды и учета ее при расчетах влажностного режима ограждающих конструкций не имеется. Наиболее обоснованным представляется положение, объясняющее понижение температуры замерзания воды в дисперсных материалах отличием свойств воды, находящейся вблизи поверхности твердых частиц от ее объемных свойств. При этом количество незамерзшей воды пропорционально площади удельной поверхности материала.

Для определения количества незамерзшей влаги в строительных материалах, в зависимости от температуры и влажности материала предложена эмпирическая формула [16]:

$$\omega = a + b \cdot \omega_b + (c \cdot \omega_b + d)/t, \quad (4.11)$$

где ω_g — весовая влажность материала в %; ω — весовая влажность материала, отнесенная к незамерзшей в нем влаге, в %; t — температура материала в °С; a , b , c , d — эмпирические коэффициенты.

Формула (4.11) дает возможность определить также температуру, при которой начнется замерзание влаги в материале при данной его влажности - $t_{нз}$. Для этого в неё вместо ω подставляется ω_g и она решается относительно t . Полученная величина равна температуре начала замерзания:

$$t_{нз} = (c \cdot \omega_B + d) / [\omega_B \cdot (1 - b) - a] \quad (4.12)$$

Проведенные В.Г. Гагариным экспериментальные исследования [23,24] показали, что количество незамерзающей влаги не зависит от влагосодержания образца, а определяется только температурой. Для расчета этой величины предложена формула

$$w_{нз} = [6,8 + 29/(4 - t)] \cdot A \cdot \Delta \cdot \rho, \quad (4.13)$$

где A — удельная поверхность материала, м²/м³; Δ — статистическая толщина слоя адсорбированной воды, равная около $3 \cdot 10^{-10}$ м; ρ — плотность адсорбированной воды, равная 1000 кг/м³.

Необходимая для расчетов по этой формуле величина удельной поверхности материала связана с его сорбционной влажностью w_m известным выражением [23]:

$$A = w_m \cdot N_A \cdot A_m / M_a \quad (4.14)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{26}$ молекул/кмоль — число Авогадро; A_m — посадочная площадь одной молекулы воды (около $11,4 \cdot 10^{-20}$ м²); $M_a = 18$ кг/кмоль — молекулярная масса воды.

Расчеты по формулам (4.13)-(4.14) дают для цементно-песчаных смесей величину удельной поверхности от 19,1 до 55,3 м²/м³. Следовательно, при $t = -12$ °С количество незамерзающей влаги составит от 0,05 до 0,14 г/кг.

Коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности ограждающей конструкции $\alpha_{в}$ при нормативных для жилых зданиях значениях $t_{в} = 18$ °С, на 6 °С большей температуры внутренней поверхности, составляет 8,8 Вт/м²·°С.

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду принято рассчитывать по упрощенной формуле [69, 87]

$$\alpha_{н} = 11,6 + 7w_{н}^{0,5} \quad (4.15)$$

4.3. Описание интерфейса и порядка работы с компьютерным инженерным методом расчета

Разработанная модель трансформирована в инженерную методику расчета тепловлажностного состояния ограждающих конструкций для стационарных и переходных режимов эксплуатации, реализованную в виде компьютерной программы ТВСОК – «Тепловлажностное состояние ограждающих конструкций», вид главного окна которой представлен на рис.4.4.



Рис. 4.4 а. Вид главного окна компьютерной программы ТВСОК – «Тепловлажностное состояние ограждающих конструкций»

ТВСОК Исходные данные
 Параметры ограждающей конструкции | Режим эксплуатации | Вариант расчета

Дом
Нагрев

Улица
Охлаждение

	Материал	Толщина слоя, мм	Теплопроводность, Вт/мС	Теплоемкость, Дж/кгС	Плотность, кг/куб.	Гигроскопич. влагосод-е, %
1	Штукатурка	15	0,47	0,84	1600	2,55
2	Кирпич силикатный	510	0,70	0,88	1800	2,00
3	Мин.вата Rockwell	100	0,047	0,84	156	3,72
4	Декорат. покрытие	10	0,80	0,88	2850	0,41

δ_1 δ_2 δ_3 - Толщина слоя
 λ_1 λ_2 λ_3 - Теплопроводность
 ρ_1 ρ_2 ρ_3 - Теплоемкость
 ϵ_1 ϵ_2 ϵ_3 - Плотность
 u_1 u_2 u_3 - Гигроскопическое влагосодержание

Рис. 4.4 б. Вид главного окна компьютерной программы ТВСОК при заполнении раздела исходных данных «Параметры ограждающей конструкции»

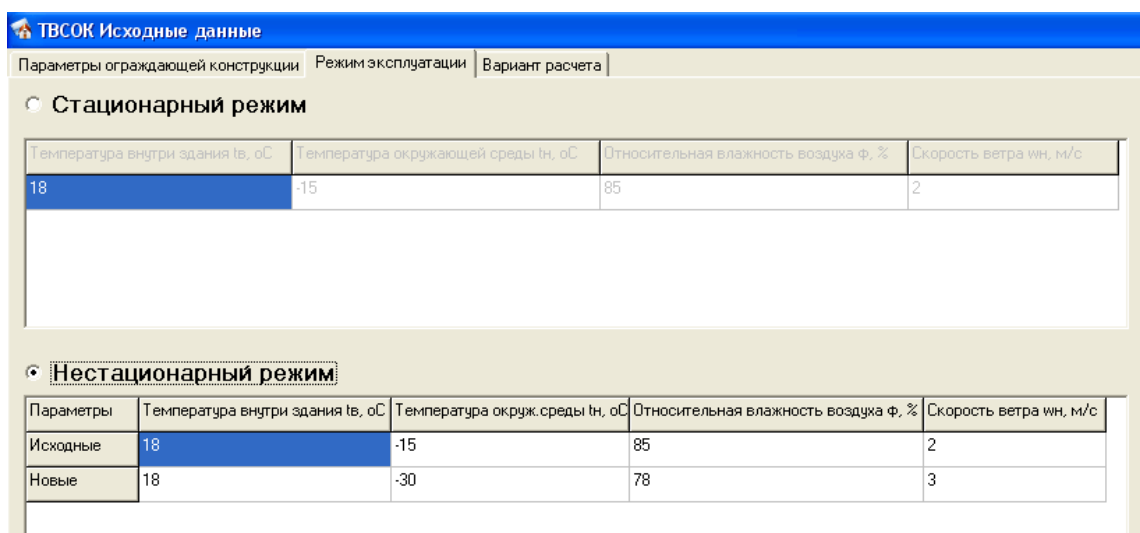


Рис. 4.4 в. Вид главного окна компьютерной программы ТВСОК при заполнении раздела исходных данных «Режим эксплуатации»

Расчет может быть выполнен в двух вариантах:

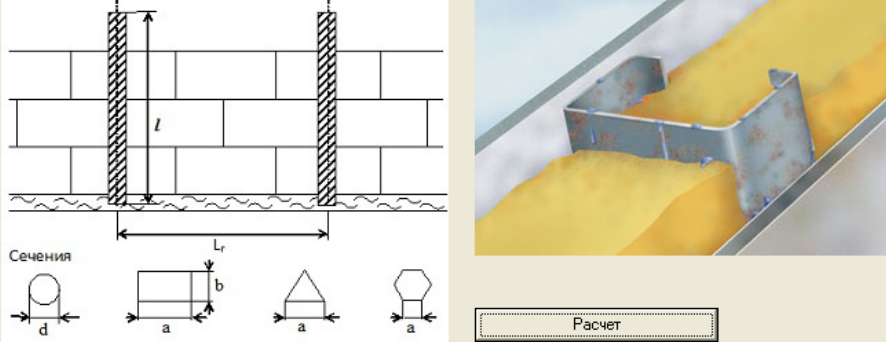
1. «Расчет элемента конструкции», в котором пользователю доступны подварианты «Наружная стенка», «Угол наружной стенки» и «Закладной элемент»;

2. «Расчет здания».

Перечень исходных данных для расчета делится на четыре группы: «Параметры ограждающей конструкции», «Режим эксплуатации», «Закладной элемент» и «Параметры здания». Первые две группы используются во всех вариантах расчета, поэтому таблицы для их заполнения представлены в главном окне.

В случае выбора варианта «Расчет здания» или подварианта «Закладной элемент» варианта «Расчет элемента конструкции» открываются дополнительные окна (рис. 4.5 и 4.6)

ТВСОК Тепловлажное состояние ограждающей конструкции: закладной элемент. Исходные данные



Сечения

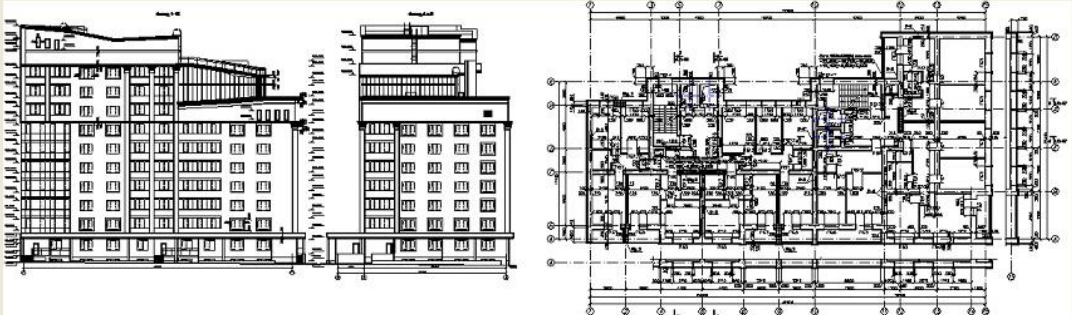
Расчет

Параметры закладного элемента

Форма сечения	Размеры, мм	Длина l, мм	Расстояние между элементами, мм		Материал		
			по горизонтали, L _г	по вертикали, L _в	Теплопроводность, Вт/м оС	Теплоемкость, кДж/кг оС	Плотность, кг/м ³
круглое	d = 25	360	2000	1500	51,7	0,46	7800
прямоугольное	aхb =						
треугольное	a =						
шестигранное	a =						

Рис. 4.5. Пример заполнения раздела исходных данных «Параметры закладного элемента»

ТВСОК Тепловлажное состояние ограждающей конструкции: Расчет здания



Параметры здания

Периметр в плане, м	138	Высота этажа, м	3,7
Количество углов, шт.		Коэффициент остекления, %	45,8
внешних	8	Термическое сопротивление окон, (м ² оК)/Вт	0,4
внутренних	4		
Количество этажей, шт.	10		

Расчет




Рис. 4.6. Пример заполнения раздела исходных данных «Параметры здания»

Количество закладных элементов здания рассчитывается исходя из расстояний между ними, указанными в группе исходных данных «Закладной элемент» (рис.4.6).

Вид выходных документов для каждого варианта расчета представлен на рис. 4.7-4.10. Все примеры относятся к случаю нестационарного режима эксплуатации.

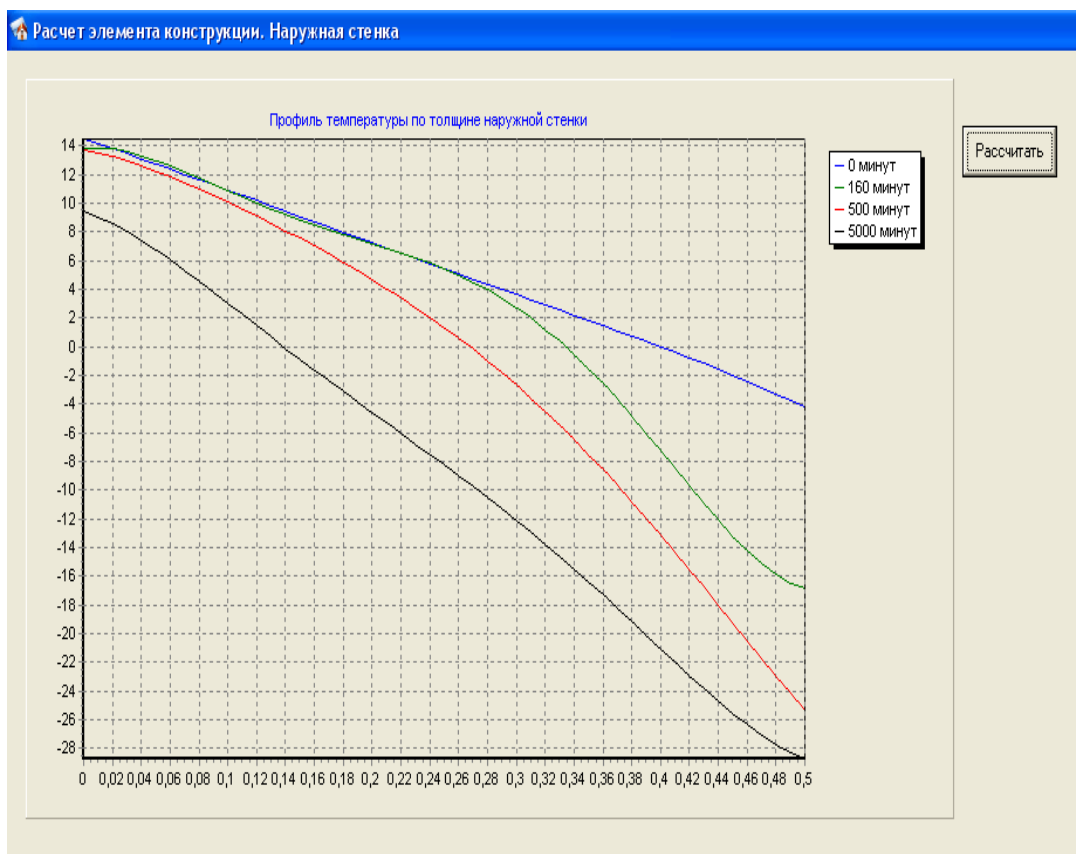


Рис. 4.7. Пример выходного документа расчета по варианту «Расчет элемента конструкции» подвариант «Наружная стенка»
1 – $\tau = 0$; 2 – $\tau = 160$; 3 – $\tau = 500$; 4 – $\tau = 5000$ мин.

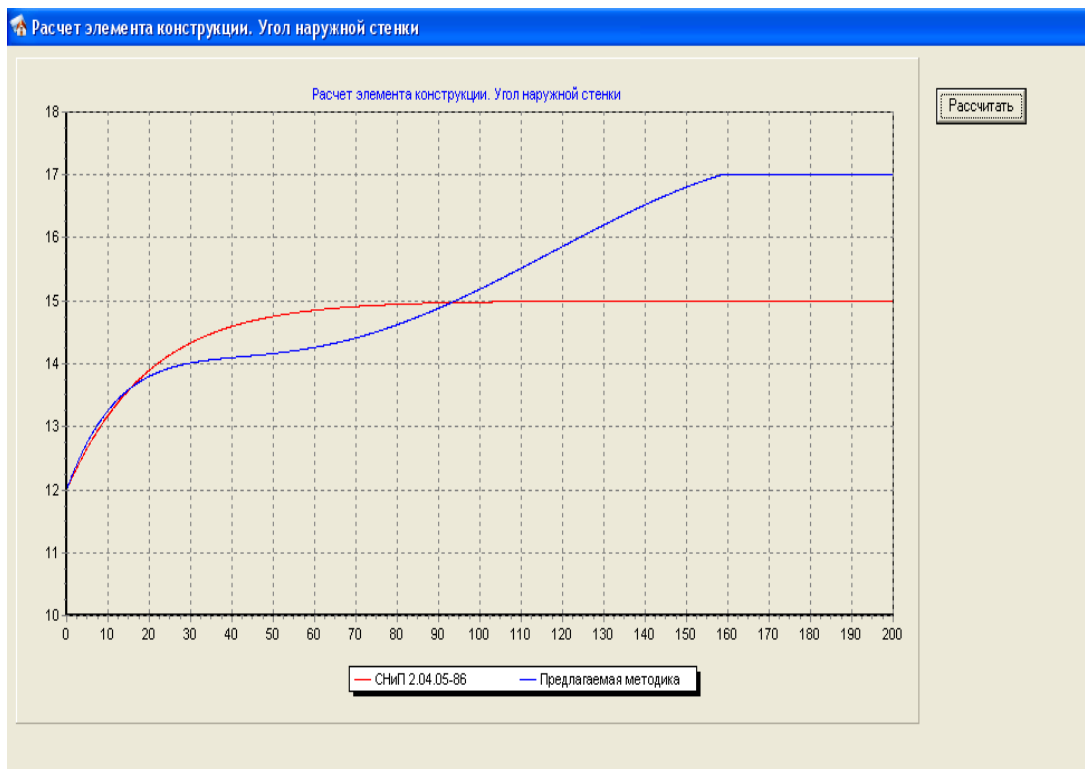


Рис. 4.8. Пример выходного документа расчета по варианту «Расчет элемента конструкции», подвариант «Угол наружной стенки»

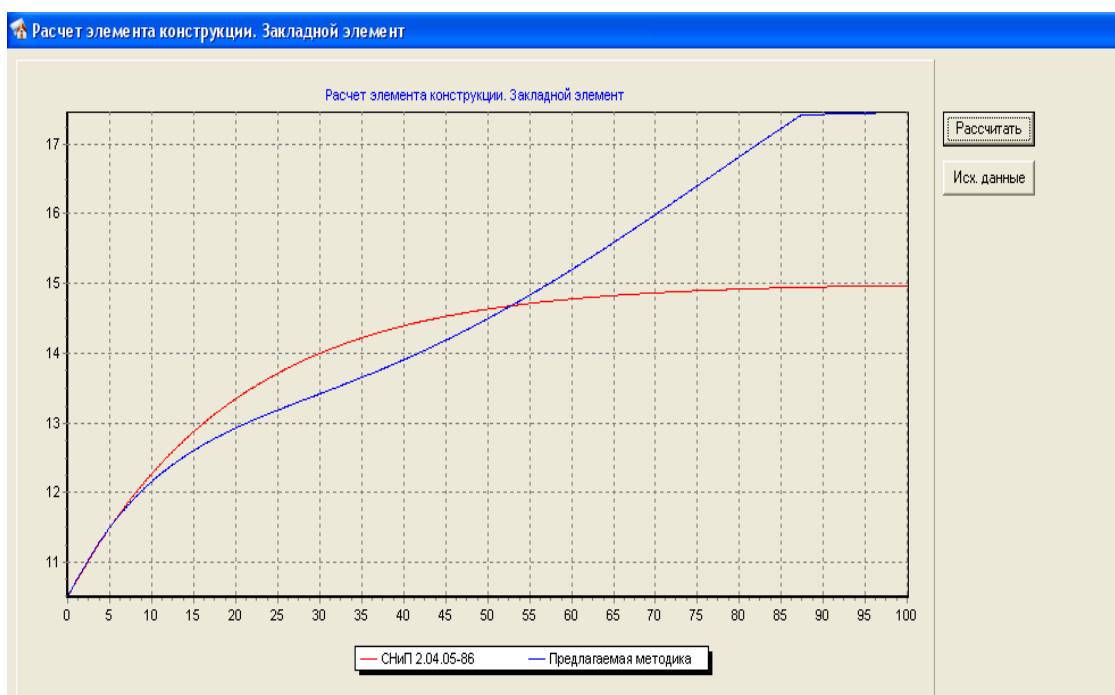


Рис. 4.9. Пример выходного документа расчета по варианту «Расчет элемента конструкции», подвариант «Закладной элемент»

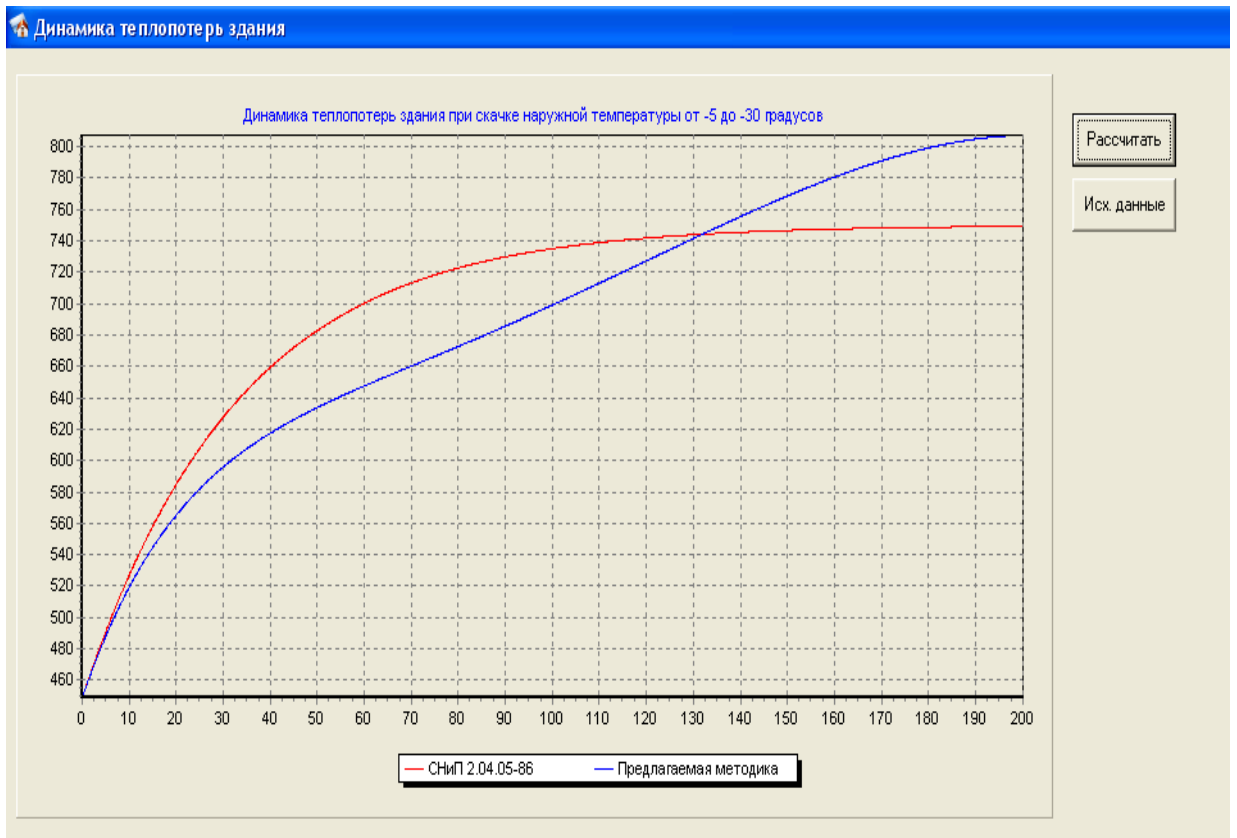


Рис. 4.10. Пример выходного документа расчета по варианту «Расчет здания»

4.4. Описание моделируемого объекта

Моделируемый объект представляет собой жилой дом, расположенный в Московской области (рис.4.11). Исходные данные для расчета представлены в табл.4.2 - 4.5.

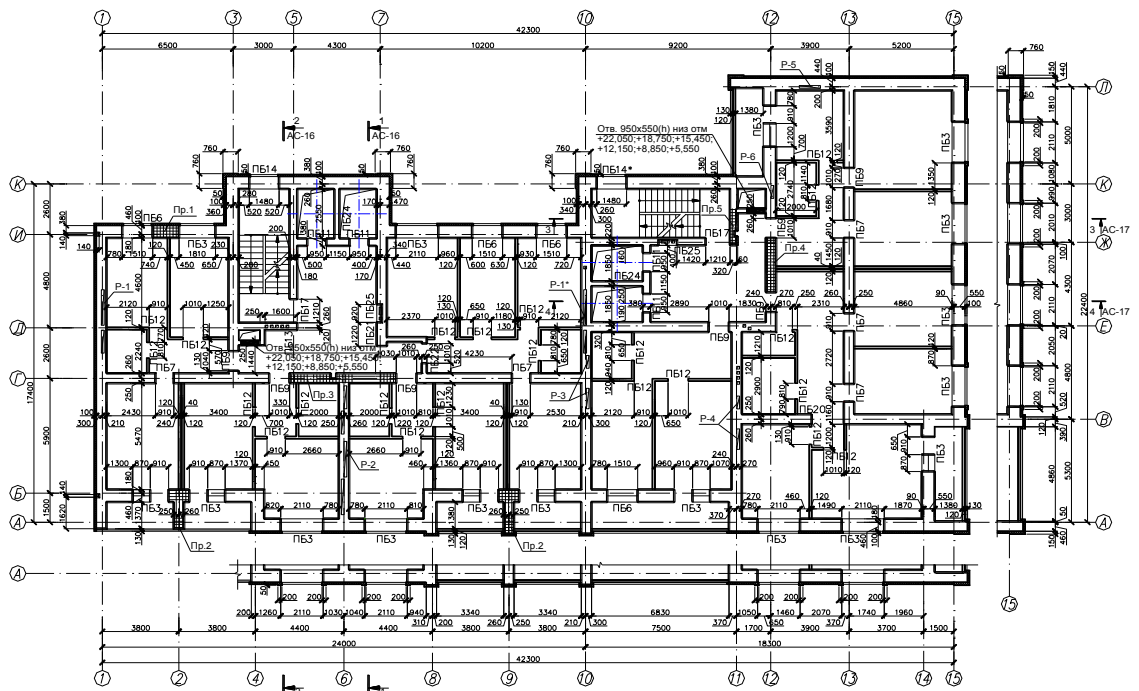
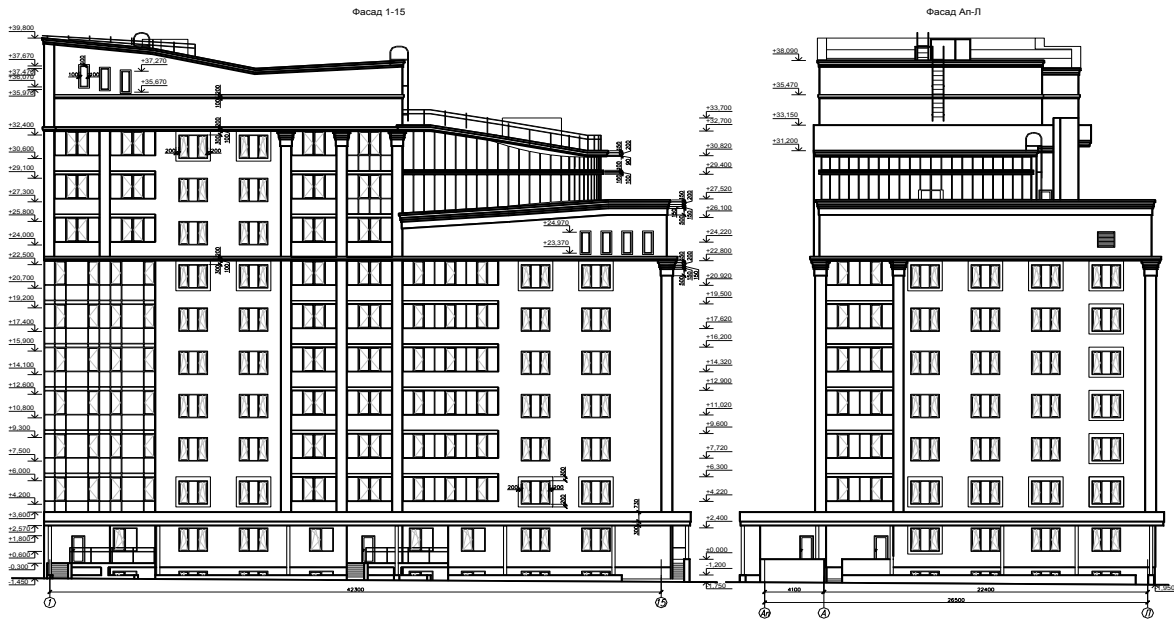


Рис.4.11. Схема моделируемого объекта.

Табл. 4.2

Параметры здания

Периметр в плане, м	Количество углов, шт.		Количество этажей, шт.	Высота этажа, м	Коэффициент остекления, %	Термическое сопротивление окон, (м ² ·°К)/Вт
	внешних	внутренних				
138	8	4	10	3,7	45,8	0,4

Табл. 4.3

Параметры ограждающей конструкции

№ п/п	Материал	Толщина слоя, δ, мм	Теплопроводность, λ, Вт/м·°С	Теплоемкость, с, кДж/кг·°С	Плотность, ρ, кг/м ³	Гигроскопическое влагосодержание u _m , %
1	Штукатурка	20	0,70	0,84	1600	2,55
2	Кирпич	250	0,81	0,88	1800	0,69
3	Минвата Rockwell	125	0,047	0,84	156	3,72
4	Декоративное покрытие	10	0,80	0,88	2850	0,41

Табл. 4.4

Параметры закладного элемента

Форма сечения	Размеры, мм	Длина l, мм	Расстояние между элементами, мм		Материал		
			по горизонтали L _г	по вертикали L _в	Теплопроводность, λ, Вт/м·°С	Теплоемкость, с, кДж/кг·°С	Плотность, ρ, кг/м ³
круглое	d = 10	360	2000	1500	51,7	0,46	7800
прямоугольное	a × b =						
треугольное	a =						
шестигранное	a =						

Табл. 4.5

Режим эксплуатации

Параметры	Температура внутри здания t _в , °С	Температура окружающей среды t _н , °С	Относительная влажность воздуха φ, %	Скорость ветра w _н , м/с
Исходные	18	-15	85	2
Новые	18	-30	78	3

Горизонт расчета τ = 6 часов

4.5. Описание и анализ результатов моделирования тепловлажностного состояния ограждающих конструкций моделируемого объекта

На рис. 4.12 представлены результаты расчета динамики распределения температуры в ограждающей конструкции при скачке температуры окружающей среды от -5 до -30 °С.

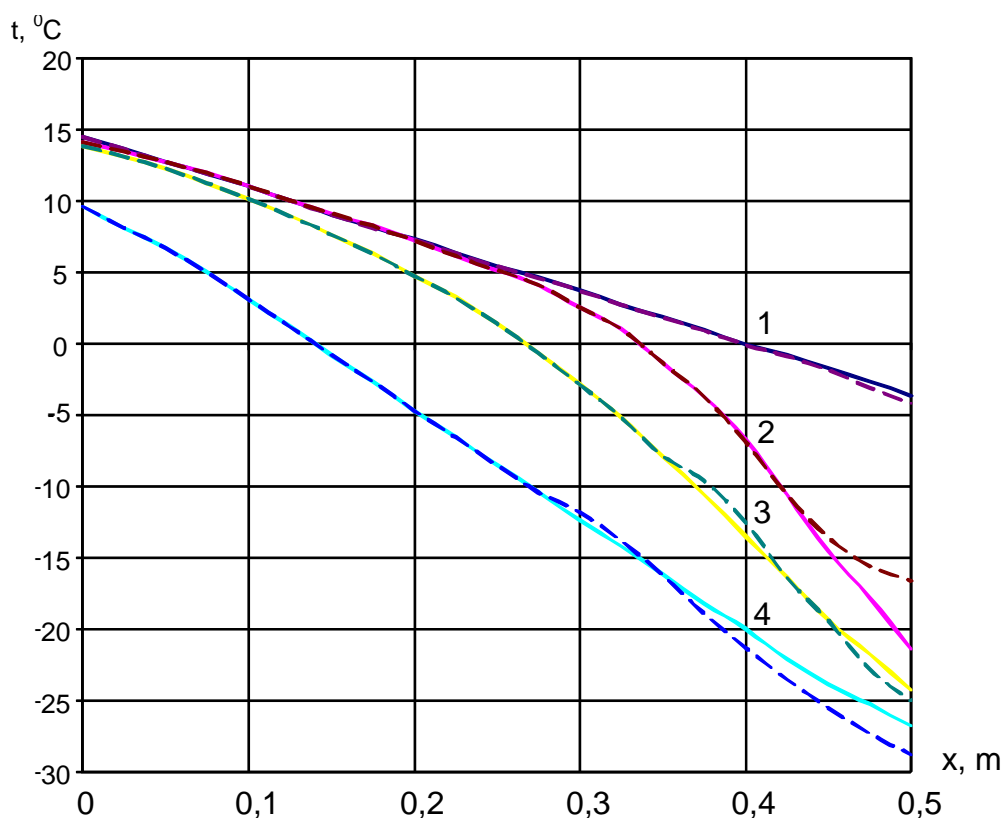


Рис. 4.12. Результаты расчета динамики температурного поля в ограждающей конструкции (сплошные линии – расчет по предлагаемой методике, пунктир – расчет без учета промерзания):
1 – $\tau = 0$; 2 – $\tau = 160$; 3 – $\tau = 500$; 4 – $\tau = 5000$ мин.

Влияние учета промерзания на исходное распределение температуры не велико, что объясняется сравнительно высокой температурой окружающей среды, при которой промерзание практически отсутствует (кривые 1). Влияние промерзания сильнее всего проявляется в начальный период времени (кривая 2), когда уменьшение температуры вблизи наружной поверхности ограждающей конструкции тормозится выделением теплоты в процессе фазового перехо-

да влаги из жидкого в твердое состояние. Когда часть влаги, находящейся в ограждающей конструкции вблизи её внешней поверхности, замерзает, коэффициент теплопроводности этой части конструкции увеличивается, и уменьшение температуры в этой зоне происходит быстрее. В то же время в той части конструкции, где продолжается фазовый переход (процесс замерзания влаги), уменьшение температуры происходит медленнее. Это хорошо видно на кривых 3, где точка пересечения сплошной и пунктирной кривых соответствует границе зоны с замерзшей влагой (справа от неё) и зоны, в которой происходит фазовый переход. При достаточно большом периоде времени процесс фазового перехода практически заканчивается, и термическое сопротивление ограждающей конструкции, рассчитанное с учетом промерзания влаги, становится меньше, чем рассчитанное без его учета (кривая 4).

На рис.4.13 представлено сравнение результатов расчета зависимости величины отопительной нагрузки здания от температуры наружного воздуха по предлагаемой методике и по нормативной [79] для установившегося тепловлажностного состояния ограждающей конструкции. При высоких температурах окружающей среды результаты практически совпадают, а влияние промерзания, которое начинает ощущаться начиная с $t_n < -12$ °С, по мере понижения t_n увеличивается, что подтверждается данными замеров фактического теплотребления здания (точки).

На рис.4.14 влияние промерзания представлено в виде отношения величины отопительной нагрузки, рассчитанной по предлагаемой методике, к аналогичной величине, рассчитанной по [79]. При минимальном значении температуры наружного воздуха расхождение между этими величинами достигает 8,5%.

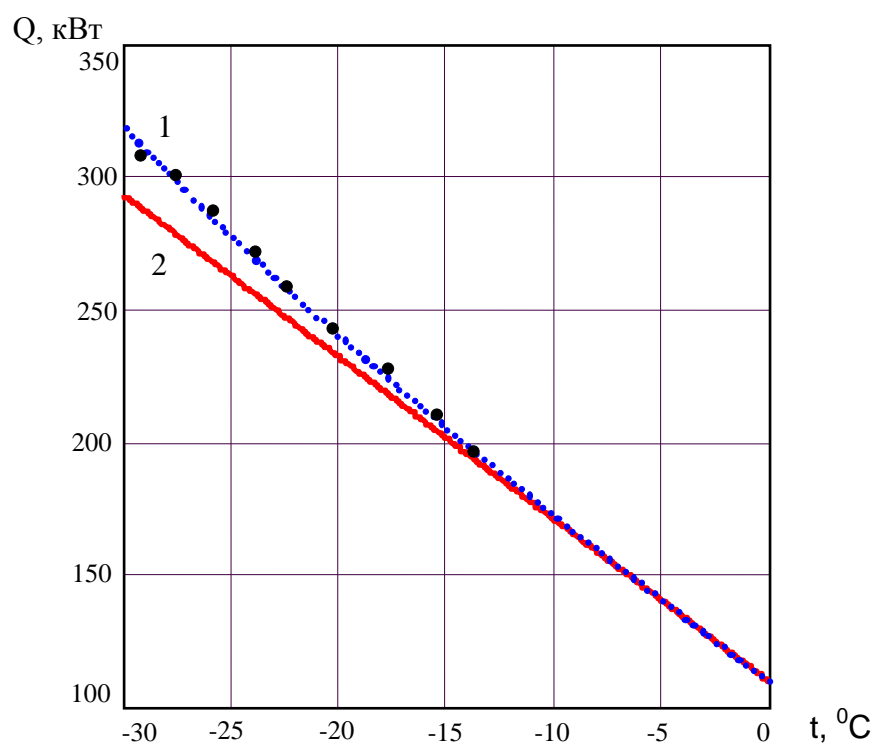


Рис. 4.13. Зависимость величины отопительной нагрузки здания от температуры наружного воздуха: 1 – расчет по предлагаемой методике; 2 – расчет по методике [78]; точки – фактические значения.

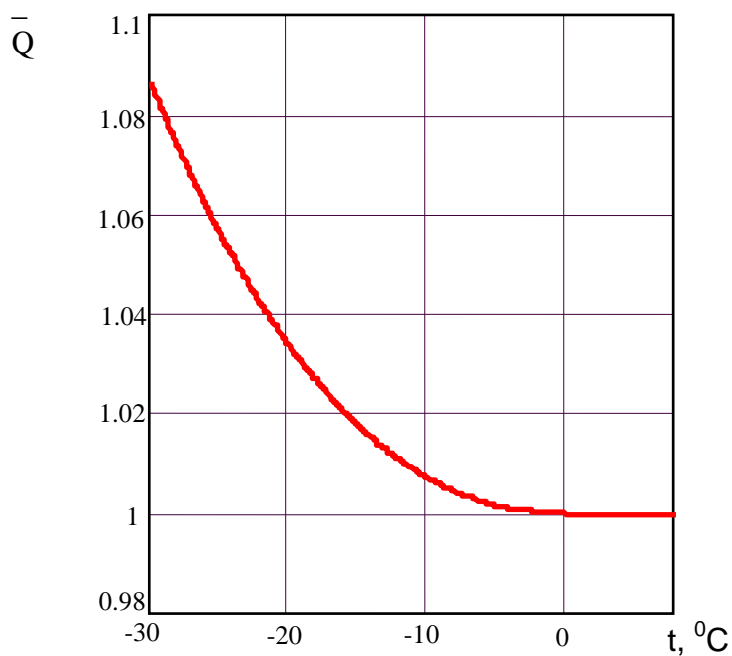


Рис. 4.14. Влияние промерзания ограждающей конструкции на величину отопительной нагрузки здания

На рис. 4.15-4.17 представлено сравнение результатов расчетов динамики теплопотерь через угол здания, через закладной элемент и всего рассматриваемого здания в целом при скачке наружной температуры от -5 до -30 °С, выполненных по предлагаемой методике (кривые 1) и по традиционно используемой для этих целей [78] (кривые 2).

Так как результаты, полученные для отдельных элементов и для здания в целом, весьма похожи, ограничимся анализом рис.4.17. Величина теплопотерь в течение переходного процесса изменяется в пределах, которые можно определить по графику рис. 4.13: от 140,39 кВт при -5 °С (так как при этой температуре промерзания практически отсутствует, то эта величина одинакова для обоих вариантов расчета) до 293,00 кВт (без учета промерзания) или 318,47 кВт (с учетом промерзания).

В процессе расчетов температура внутри здания предполагалась постоянной. Здесь, так же, как на рис.4.12, отчетливо видно, что на динамику теплопотерь оказывают влияние два конкурентных процесса:

- замерзание влаги, связанное с выделением теплоты фазового перехода, замедляющее увеличение теплопотерь;
- увеличение теплопроводности материала после замерзания содержащейся в нем влаги, ускоряющее увеличение теплопотерь.

В рассматриваемом конкретном случае первый процесс доминирует до момента времени $\tau = 73$ часа, когда влияние обоих процессов сравнивается, затем наблюдается доминирование второго процесса.

Продолжительность переходного процесса, рассчитанная с учетом промерзания ограждающей конструкции по предлагаемой методике, существенно больше, чем рассчитанная по традиционной методике (примерно 185 часов против 110 часов).

Для отдельных элементов здания продолжительность переходного процесса может быть различной. Например, для закладного элемента она значительно меньше, чем для здания в целом и составляет всего 86 часов.

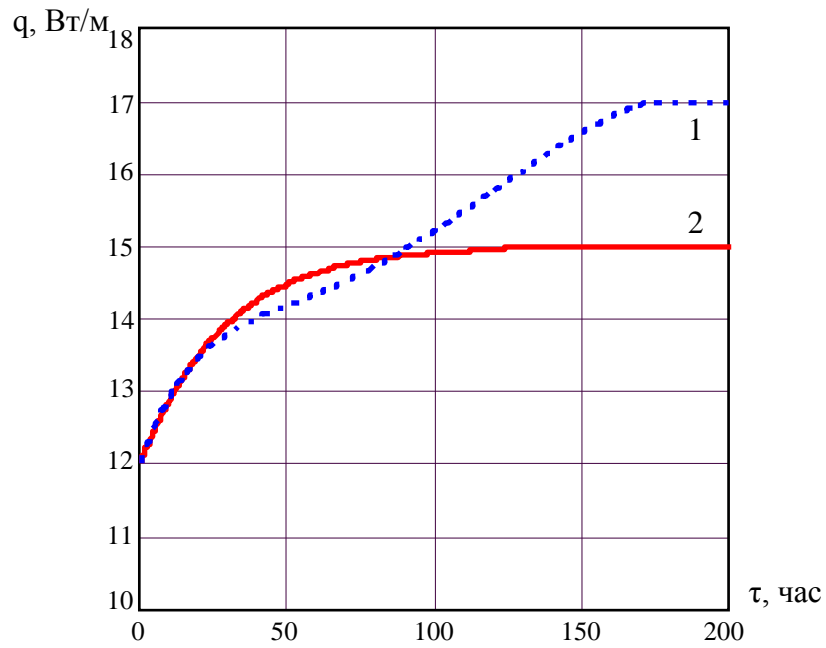


Рис. 4.15. Динамика теплотерь через угол здания при скачке наружной температуры от -5 до -30 °С:
 1 – расчет по предлагаемой методике;
 2 – расчет без учета промерзания:

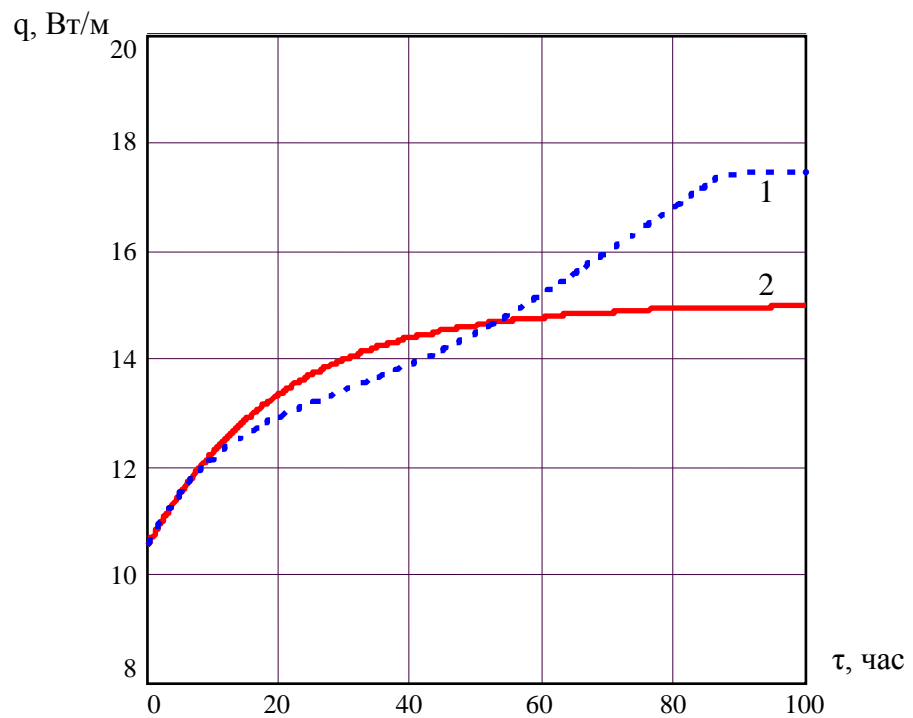


Рис. 4.16. Динамика теплотерь через закладной элемент при скачке наружной температуры от -5 до -30 °С:
 1 – расчет по предлагаемой методике;
 2 – расчет без учета промерзания:

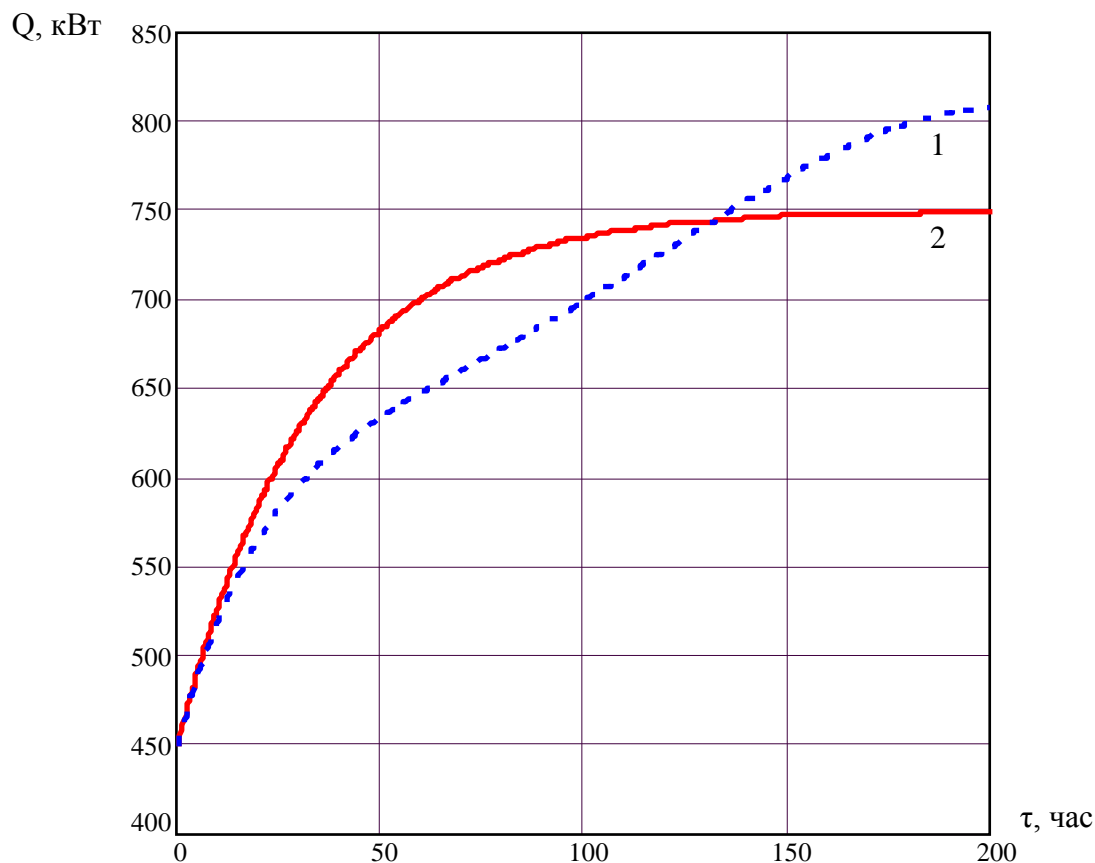


Рис. 4.17. Динамика теплотерь здания при скачке наружной температуры от -5 до -30 °С:
 1 – расчет по предлагаемой методике;
 2 – расчет по методике [78]

Следует отметить, что метод [78] не предполагает учета повышенных теплотерь через углы зданий и закладные элементы. По-видимому, эти теплотери учитываются значениями эмпирических коэффициентов, подобранных по результатам многочисленных натуральных обследований.

Оценить влияние закладных элементов на величину теплотерь здания при отсутствии промерзания ограждающих конструкций можно, рассчитав отношение потока тепла в окружающую среду через закладные элементы к общему потоку тепла через ограждающую конструкцию.

$$\delta q = (R/R_{33}) \cdot s_{33}, \quad (4.16)$$

где $R_{зз}$ и $s_{зз}$ – термическое сопротивление закладного элемента и доля площади ограждающей конструкции, которую он занимает.

Термическое сопротивление ограждающей конструкции рассчитывается с учетом коэффициента остекления

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i} \cdot (1 - \varphi) + R_{ок} \cdot \varphi, \quad (4.17)$$

где $R_{ок}$ и φ – термическое сопротивление окон и коэффициент остекления.

Расчет по формулам (4.16), (4.17) показывает, что для рассматриваемого объекта наличие закладных элементов приводит к увеличению теплопотерь на 3,8%. Однако при низких температурах наружного воздуха появляется зона промерзания материалов ограждающих конструкций вокруг закладного элемента, что приводит к уменьшению термического сопротивления этой зоны (рис.4.13). Теплопотери при этом увеличиваются, и величина δq возрастает до 6,9%, то есть почти вдвое.

На рис. 4.18 и 4.19 представлено сравнение результатов расчетов тепловых потерь здания в течение года по предлагаемой методике и по методике [78]. Очевидно, что в ноябре начинается частичное промерзание ограждающей конструкции, которое замедляет увеличение теплопотерь здания, в декабре влияние этого процесса максимальное, в январе влияние увеличения теплопроводности материалов начинает доминировать над влиянием фазового перехода «вода – лёд», достигая максимума в феврале.

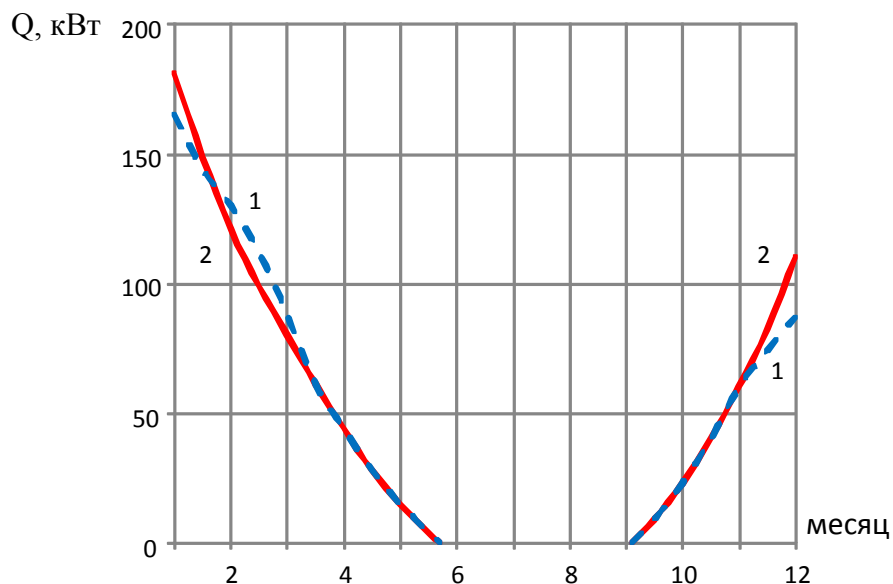


Рис. 4.18. Сравнение результатов расчетов отопительной нагрузки здания в течение года. 1 – расчет по предлагаемой методике; 2 – расчет по методике [78]

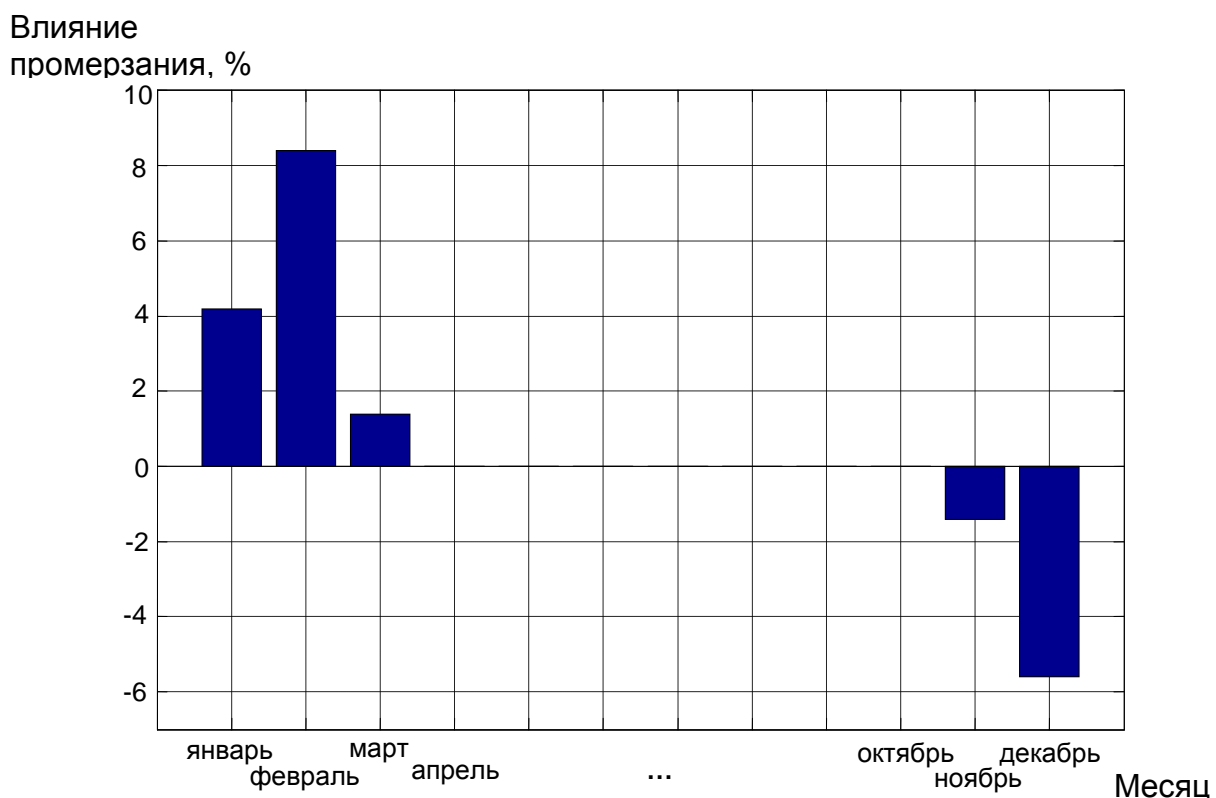


Рис. 4.19. Влияние учета промерзания наружной ограждающей конструкции здания на величину его тепловых потерь.

4.6. Результаты практического применения компьютерной программы ТВСОК

Разработанная методика расчета и ее компьютерная реализация в виде программы ТВСОК используется при проведении энергетических обследований и энергетического аудита жилых, общественных и производственных зданий, а также при прогнозировании энергетических затрат на их отопление.

В ряде случаев совместное использование инструментального обследования и компьютерного моделирования теплопередачи через ограждающие конструкции здания позволяет выявлять те элементы конструкции, тепловые потери через которые аномально велики, и принимать решение об их реконструкции.

Например, при энергетическом обследовании 12-этажного жилого дома, имеющего общую площадь наружных стен 5240 м^2 , ограждающие конструкции которого выполнены из слоя газобетона, утеплителя ПСБ-С 25Ф и лицевого керамического кирпича показало, что тепловые потери через металлические закладные элементы (1520 штук) составляют 12% общих теплопотерь. Выполнение рекомендованных мероприятий по дополнительной теплоизоляции закладных элементов от внутренней поверхности ограждающей конструкции позволило сократить эти теплопотери практически вдвое, при этом теплопотери здания уменьшились на 5,7%.

Результаты энергетического обследования 6-этажного здания торгово-офисного центра, имеющего общую площадь наружных стен 7620 м^2 , ограждающие конструкции которого выполнены из слоя железобетонных панелей и силикатного кирпича показали, что имеют место аномально высокие теплопотери через места стыков железобетонных плит с кирпичной кладкой. Выполнение рекомендованных мероприятий по дополнительной теплоизоляции этих стыков позволило сократить теплопотери здания на 8,4%.

В те периоды года, когда происходит промерзание и оттаивание ограждающих конструкций зданий, использование ПК ТВСОК позволяет более обоснованно регулировать тепловую нагрузку на отопление.

4.7. Выводы по главе 4.

Полученные в главе 4 результаты могут быть кратко суммированы в следующих выводах.

1. Выполнена экспериментальная проверка разработанной математической модели на лабораторной установке, которая показала, что расчетные прогнозы можно считать обладающими приемлемой точностью для инженерных оценок промерзания строительных конструкций.

2. Подобраны эмпирические зависимости для расчета:

- коэффициентов теплопроводности строительных материалов с учетом их зависимости от содержания влаги, находящейся в жидком и/или в твердом состоянии;

- для количества незамерзшей влаги, температуры начала её замерзания;

- коэффициентов теплоотдачи с поверхности,

которые вместе с разработанной математической моделью процессов теплопереноса через ограждающую конструкцию представляет собой компьютерный инженерный метод расчета её тепловлажностного состояния.

3. Разработана компьютерная программа ТВСОК для расчетов ограждающих конструкций.

4. Сравнение результатов расчета, полученных с помощью компьютерной программы, с результатами экспериментальных исследований показало их хорошую сходимость.

5. Выполнены вычислительные эксперименты по исследованию влияния замерзания части влаги в ограждающей конструкции здания на динамику тепловых потерь в окружающую среду здания в целом и через его отдельные элементы.

6. Исследована динамика температурного поля в ограждающей конструкции и величины тепловых потерь здания в целом и через его отдельные элементы при заданной динамике изменения параметров окружающего воздуха.

7. Разработанный метод расчета и его программно-алгоритмическое приняты к практическому использованию в ООО «Бармингов», (<http://barmingov.ru>) где используется при проведении энергетических обследований и энергетического аудита жилых зданий, а также разработки и реализации мероприятий по сокращению теплопотерь зданий.

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 двумерной 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 теплотерь 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 теплотери 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%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Ананьев, А. И.** Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций/А.И. Ананьев, О.А Хоров, Л.Д. Евсеев и др.// Строительный эксперт. - 2005. - №16(203). - С. 17-23.
2. **Башмаков, И.А.** Потенциал энергосбережения в России. И.А. Башмаков // Энергосбережение – 2009. - №1 –С.5-6.
3. **Беляев, Н.М.** Методы теории теплопроводности./Н.М. Беляев, А.А. Рядно - М.: Высшая школа. - 1982, в 2-х частях.
4. **Блази, В.** Справочник проектировщика. Строительная физика. – 2-е изд./В.Блази.-М.:Техносфера. – 2005. – 536 с.
5. **Богословский, В.К.** Влагоперенос в материалах ограждающих конструкций./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин//В кн.: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. - т. 2, М.: Минстрой РФ. – 1995. - с.50-53.
6. **Богословский, В.К.** Влажностный режим ограждающей конструкции./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин//В кн.: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. - т. 2, М.: Минстрой РФ. – 1995. - с. 53-54.
7. **Богословский, В. Н.** Исследование и моделирование естественного теплового режима здания в период ввода в эксплуатацию/В.Н. Богословский, О.Д. Самарин О. Д. // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 2001. — № 6. — С. 19—22.
8. **Богословский, В. Н.** Потенциал влажности. Теоретические основы./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин.//Российская Академия Архитектуры и Строительных Наук: Вестник отделения строительных наук. – 1996. - вып.1. - с. 12-14.
9. **Богословский, В.К.** Потенциал влажности материалов ограждающих конструкций./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин//В кн.: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. - т. 2, М.: Минстрой РФ. – 1995. - с.343-344.

10. **Богословский, В.Н.** Справочник проектировщика: в 3 ч. / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин; под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера -4-е изд., перераб. и доп.- М.: Стройиздат, 1992.

11. **Богословский, В.К.** Строительная теплофизика./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин, В.А. Могутов.// В кн.: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. - т. 2, М.: Минстрой РФ. – 1995. - с. 443.

12. **Богословский, В.Н.** Строительная теплофизика: теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Н. Богословский – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006 -399 с.

13. **Богословский, В.Н.** Теплозащитные свойства ограждающих конструкций./В.К. Богословский, В. Г. Гагарин, В.А. Могутов.// В кн.: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. - т. 2, М.: Минстрой РФ. – 1995. - с. 460-462.

14. **Богословский, В.Н.** Тепловой режим здания /В.Н. Богословский – М.: Стройиздат, 1979. – 248с.

15. **Брилинг, Р.Е.** Миграция влаги в строительных ограждениях // Исследования по строительной физике. /Р.Е. Брилинг - ЦНИИПС. - М.-Л. - 1949. - N 3. - С. 85...120.

16. **Брилинг, Р.Е.** Исследование морозостойкости строительных материалов в наружных ограждениях. /Р.Е. Брилинг // Исследования по строительной физике / ЦНИИПС. - М.-Л. - 1951. - С. 60...84.

17. **Васильев, Б.Ф.** Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий./Б.Ф.Васильев – М.: Госуд. изд-во литературы по строительству и архитектуре. – 1957. – 215 с.

18. **Власов, О. Е.** Основы строительной теплотехники./О.Е. Власов - ВИА РККА, 1938.

19. **Власов, О.Е.** Приложение теории потенциала к исследованию теплопроводности. /О.Е. Власов//Известия Теплотехнического института – 1928. - № 5 (38).

20. **Власов, О.Е.** Плоские тепловые волны. /О.Е. Власов //Известия Теплотехнического института – 1928. - № 3 (26).
21. **Власов О.Е.** Долговечность ограждающих и строительных конструкций. /О.Е. Власов - М.: НИИСФ. - 1963. - 116 с.
22. **Гагарин, В.Г.** О температурной зависимости коэффициентов теплопроводности строительных материалов./ В.Г. Гагарин//В кн.: Тепловой режим и теплозащита зданий. Сборник научных трудов. – М.: НИИСФ. – 1988. – с. 109-112.
23. **Гагарин, В.Г.** Об учете эксплуатационной влажности при проектировании трехслойных стеновых панелей. /В.Г. Гагарин//В кн.: Совершенствование проектирования, технической эксплуатации и реконструкции зданий. Сборник трудов. - М.: МИСИ. – 1989. - с.91-95.
24. **Гагарин, В.Г.** Способ определения количества незамерзшей влаги в капиллярно-пористых материалах./В.Г. Гагарин, В.С. Ройфе, В.Р. Хлевчук. - Авторское свидетельство № 1476368 (СССР). – Оpubл. в БИ №16, 30 04 1989.
25. **Гагарин, В.Г.** Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций /В.Г. Гагарин.// Строительные материалы. - 2010. - №12. - С. 4-12.
26. **Гагарин, В.Г.** Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий./В.Г. Гагарин // Academia. Архитектура и строительство. - 2009. - № 5. - с. 297-305.
27. **Гагарин, В.Г.** Учет влажностного режима при проектировании железобетонных ограждающих конструкций./ В. Г. Гагарин.//В кн.: Инженерные проблемы современного железобетона: Материалы международной конференции по бетону и железобетону. – Иваново: 1995. - с. 81-88.
28. **Гаранин, А.В.** Моделирование теплоустойчивости многослойных ограждающих конструкций. /А.В. Гаранин, В.К. Пыжов // Вестник ИГЭУ -2004 – вып.6 С.20-24.

29. **ГОСТ 26254-84.** Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций / Госстрой СССР. — М., 1985.
30. **ГОСТ 31168-2003.** Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление. - Введ.2003-07-01. - СПб.: Издательство ДЕАН, 2005. - 32с.
31. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия./А.А. гухман. – М.: Высшая школа. – 1963 – 286 с.
32. **Демидович, Б.П.** Численные методы анализа./Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова – М.: Госуд. изд.-во физ.-мат. литературы, 1962. – 367 с.
33. **Денисов, П.П.** Колебания температуры воздуха в помещениях под влиянием гармонических колебаний температуры наружного воздуха. / П.П. Денисов; в кн.: Практические задачи строительной теплофизики крупнопанельных зданий. – М.: Стройиздат, 1966. – с. 54-62.
34. **Диткин, В.А.** Интегральные преобразования и операционное исчисление./В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. – 1961. – 362 с.
35. **Дмитриев, А.Н.** Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия./А.Н. Дмитриев, М.М. Бродяч, Ю.А. Табунщиков. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 124 с.
36. **Докучаев, В. В.** Наши степи прежде и теперь./В.В. Докучаев - Спб., Типография Е.В. Евдокимова. - 1892.
37. **Зайцев, В.А.** Моделирование, оптимизация и расчет тепловых процессов (Опыт использования ячеечных моделей)/ В.А. Зайцев, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин. – Иваново: ИГХТУ. – 2012. – 200 с.
38. **Измаильский, А.А.** Избранные сочинения./А.А. Измаильский - М.: Сельхозгиз, 1937.- 75с.
39. **Ильинский, В.М.** Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учётом физико-климатических воздействий) / В.М. Ильинский – М.: Стройиздат, 1964. -120с.

40. **Ильинский, В. М.** Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий)/ В.М. Ильинский: учеб. пособие для инженерно-строительных вузов. - М.: Высшая школа, 1974.
41. **Ильинский В.М.** Расчет влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара // Промышленное строительство. 1965. - N 2. - с. 223-228.
42. **Исаченко, В.П.** Теплопередача./В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел А.С. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
43. **Каммерер, И.С.** Теплоизоляция в промышленном строительстве / И.С. Каммерер –М.: Стройиздат - 1965. - 98с.
44. **Каталог температурных полей узлов типовых ограждающих конструкций.** Пособие для проектирования./В.К. Ивашкова, Н. С. Трошина, М.П. Соловьева, В.Г. Гагарин, А.В. Щербаков, Е.Т. Артыкпаев. – М.: Стройиздат. – 1980. - 112 с.
45. **Киселев, И.Я.** Теплоперенос через волокнистые и ячеистые эффективные теплоизоляционные материалы./И.Я. Киселев - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 58-65.
46. **Киселев, И. Я.** Теплопроводность эффективных теплоизоляционных строительных материалов и изделий. /И.Я. Киселев // Журнал Academia. - 2004, № 4, с. 36–41.
47. **Коздоба, Л.А.** Методы решения нелинейных задач теплопроводности./Л.А. Коздоба - М.: Наука - 1975. - 227 с.
48. **Кутателадзе, С.С.** Основы теории теплообмена./С.С.Кутателадзе. – Новосибирск: Атомиздат. – 1970. - 416 с.
49. **Кудряшов, Л.И.** Приближенные методы решения нелинейных задач теплопроводности./ Л.И. Кудряшов, Н.Л. Меньших -М.: Высшая школа.- 1979. – 344 с.
50. **Ливчак, В.И.** К вопросу о точности определения расхода теплоты на отопление жилых и общественных зданий. В.И. Ливчак // Энергосбережение – 2008. - №5. – С. 7-8.

51. **Ливчак, В. И.** Энергосбережение при строительстве и реконструкции жилых зданий в России./В.И. Ливчак // Энергосбережение. - 2001. - №5.
52. **Лукьянов, В.И.** Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий./В.И. Лукьянов, В.Р. Хлевчук, В.Г. Гагарин. – М.: Стройиздат. – 1984 - 168 с.
53. **Лыков, А. В.** Теоретические основы строительной теплофизики./А.В. Лыков — Минск: АН БССР, 1961. - 520 с.
54. **Лыков А.В.** Теория сушки./А.В. Лыков – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 342 с.
55. **Лыков А.В.** Тепло- и массообмен в процессе сушки./А.В. Лыков. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 412 с.
56. **Лыков, А.В.** Теория тепло- и массопереноса. /А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 536 с.
57. **Лыков, А.В.** Теория теплопроводности./А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
58. **Лыков, А.В.** Тепломассообмен: (Справочник) / А.В. Лыков -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480с.
59. **Лыков А.В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах. / А.В. Лыков - М.: Гостехиздат. - 1954. - 296 с.
60. **Малявина, Е.Г.** Нормы теплотребления на отопление общественных зданий. - В кн.: Строительная физика в 21 веке./Е.Г. Малявина – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 190-194.
61. **Малявина, Е.Г.** Теплотери здания: справочное пособие/Е.Г. Малявина. – М: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
62. **Мартыненко, В.С.** Операционное исчисление./В.С. Мартыненко - М: Высшая школа, 4-е издание, переработанное и дополненное. – 1990. - 361 с.
63. **Мачинский, В.Д.** Теплотехнические основы гражданского строительства. / В.Д. Мачинский - М.: Госиздат, 1928. - 262 с.

64. **Мачинский, В.Д.** К вопросу о конденсации водяных паров в строительных ограждениях./ В.Д. Мачинский // Вестник инженеров и техников. - 1935. - N12. - С. 742...745.

65. **Методические указания по проведению энергетических обследований предприятий и организаций.** – Киров: Мир, 1999. – 37 с.

66. **МГСН 2.01-99***. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодозлектроснабжению. — М., 1999.

67. **МДС 55-1.2005** Стены с теплоизоляцией из пенополистирола и минераловатных плит с отделочным слоем из тонкослойной штукатурки. Материалы для проектирования и рабочие чертежи узлов – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 59с.

68. **Мизонов, В.Е.** Моделирование и оптимизация теплового состояния в секционированных объемах с внутренними источниками теплоты./В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, Е.А. Баранцева.- Иваново: ИГЭУ, 2010.- 128 с.

69. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева; изд. 2-е, стереотип. – М.: «Энергия», 1977 – 344с.

70. **Могутов, В.А.** Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов в широком диапазоне температур./ В.А. Могутов, Г.А. Потапова, Т.В. Рыкова - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 203-207.

71. **Никитина, Л.М.** Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалами./Л.М. Никитина - М.: Госэнергоиздат. - 1963. - 174 с.

72. **Никитина, Л.М.** Таблицы коэффициентов массопереноса влажных материалов./Л.М. Никитина - М.: Наука и техника. - 1964. - 186 с.

73. **Никитина, Л.М.** Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. /Л.М. Никитина – М.: Энергия, 1968. – 262 с.

74. **Орентлихер, Л.П.** Теплопроводность теплоизоляционных волокнистых материалов./Л.П. Орентлихер, Ю.Ю. Ивакина - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ. - 2006. – с. 144-147.

75. **Рудобашта, С.П.** Зональный метод расчета непрерывно действующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой./ С.П. Рудобашта, А.Н. Плановский, Э.Н. Очнев. // ТОХТ. - 1974. - т.8. -N 1. - с. 22-29.

76. **Руководство АВОК-8-2005** «Руководство по расчету теплопотребления эксплуатируемых жилых зданий» – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 216 с.

77. **Сахаров, А.А.** Ячеечная модель замерзания влаги в плоской теплопроводной стенке./ А.А. Сахаров, С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов// Строительство и реконструкция. №6(44), 2012, с. 96-101.

78. **СНиП 23-02-2003.** Тепловая защита зданий / Госстрой России. — М.:ФГУП ЦПП, 2004 – 64 с.

79. **СНиП 41-01-2003.** Отопление, вентиляция и кондиционирование / Госстрой России, 2004. – 54 с.

80. **СНиП II-3-79*.** Строительная теплотехника / Госстрой России. — М.: ГУП ЦПП, 1998.

81. **СП 23-101-2004** Проектирование тепловой защиты зданий. - СПб.: Издательство ДЕАН, 2007. - 320с.

82. **СТО 00044807-001-2006.** Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. – М.: РНТО Строителей, 2006. – 87 с.

83. **СТО 17532043-001-2005.** Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий. – М.: РНТО Строителей, 2006. – 45 с.

84. **Строительная физика**/Е. Шильд, Х.-В. Кассельман, Г. Дамен, Р. Поленц; Пер. с нем. В.Г. Бердичевского; под. ред. Э.Л. Дешко. – М.: Стройиздат, 1982. – 296 с.

85. **Табунщиков, Ю.А.** Энергоэффективные здания./ Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

86. **Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник**/ Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат. - 1982. – 512 с.

87. **Теплоснабжение**/А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.

88. **Тихонов, А.Н.** Уравнения математической физики./ А.Н. Тихонов, А.А. Самарский А.А. – М.: Наука. – 1977. – 736 с.

89. **Ушков, Ф.В.** Метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий /Ф.В. Ушков. – М.: МКХ РСФСР. - 1955. - 104 с.

90. **Федосов, С.В.** Моделирование и расчет систем утилизации теплоты уходящих газов в высокотемпературных процессах строительной индустрии./С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов. – Иваново: ИГАСУ. - 2010. – 268 с.

91. **Федосов, С.В.** Ячеечная модель нелинейной теплопередачи через многослойную стенку./С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Р. Порошин, Н.Н. Елин. //Строительство и реконструкция, №6 (38) 2011 (ноябрь-декабрь), с.50-56.

92. **Федосов, С.В.** Математическая модель тепловлажностного состояния многослойных ограждающих конструкций зданий./С.В. Федосов, Н.Р. Порошин, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов// Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3 (28), с.37-41

93. **Федосов, С.В.** Нелинейная ячейчатая модель взаимосвязанного тепло-влажностного переноса в ограждающей конструкции с внутренним источником влаги./ С.В. Федосов, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, Н.Р. Порошин.//Строительные материалы, №8, 2011. с.22-24.

94. **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.

95. **Федосов, С.В.** Ячеечная модель замерзания и оттаивания влаги в ограждающих конструкциях./ С.В. Федосов С.В., В.Е. Мизонов В.Е., Н.Н. Елин, Сахаров А.А.// Строительные материалы.- 2013, №3 – с. 70-74

96. **Фокин, К.Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. / К.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина – 5-е изд., пересмотр. – М.:АВОК-ПРЕСС, 2006. – 144с.

97. **Фокин, К.Ф.** Паропроницаемость строительных материалов./ К.Ф. Фокин // Проект и стандарт. - 1934. - N4. - С. 17...20.

98. **Фокин, К.Ф.** Расчет влажностного режима наружных ограждений. // К.Ф. Фокин - ОНТИ. - М.-Л., 1935. - 22 с.

99. **Фокин, К.Ф.** Расчет последовательного увлажнения материалов и наружных ограждений. / К.Ф. Фокин // Вопросы строительной физики в проектировании /ЦНИИПС. - М.-Л., 1941. - N2. - С. 2...18.

100. **Фокин, К.Ф.** Уточненный метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций./ К.Ф. Фокин. // Холодильная техника. - 1955.- N3.- С.28...32.

101. **Фоломеев, Д.Ю.** Моделирование теплового состояния секционированного объема с индивидуальными источниками теплоты в секциях./Д.Ю. Фоломеев // Вестник ИГЭУ. - вып.4. - 2006. – с. 62-65.

102. **Фоломеев, Д.Ю.** Математическое моделирование температурного режима в смежных помещениях с индивидуальными источниками теплоснабжения./ Д.Ю. Фоломеев, Н.Н. Елин, В.Е. Мизонов, В.И. Субботин. // Промышленная энергетика. - № 4 . - 2007. – с.28-31.

103. **Фоломеев, Д.Ю.** Моделирование теплового состояния в полости с термически толстыми стенками и внутренним источником теплоты./Д.Ю. Фоломеев, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, В.И. Субботин.// Изв. вузов «Химия и хим. технология». - вып.1. - 2007. - с.106-109.

104. **Франчук, А.У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов/А.У. Франчук – М.: НИИСФ, 1969.- 143 с.

105. **Франчук, А.У.** Определение сорбционной влажности строительных материалов//А.У. Франчук // Исследования по строительной физике: Науч. тр. / ЦНИИПС. М. - 1949. - N 3. - с. 163...192.

106. **Франчук, А.У.** Теоретические основы и метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий//А.У. Франчук //Исследования по строительной физике: Науч. тр. / ЦНИИПС. - М. - 1951. - N 4. - с. 17-59.

107. **Франчук, А.У.** Исследования и методы расчета тепло- и массообмена в пористых материалах ограждающих частей зданий.//А.У. Франчук // Сушка и увлажнение строительных материалов и конструкций: Сб. тр. - М. - 1953. - С. 18...41.

108. **Франчук А.У.** Вопросы теории и расчета влажности ограждающих частей зданий. /А.У. Франчук - М.: Стройиздат. - 1957. - 188 с.

109. **Хуторной, А.Н.** Закономерности теплопереноса в неоднородных теплоэффективных стенах зданий./А.Н. Хуторной - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 95-99.

110. **Хуторной, А.Н.** Теплоперенос в теплоэффективных монолитно возводимых наружных стенах зданий с фасадным утеплением. /А.Н. Хуторной - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 91-95.

111. **Цой, П.В.** Методы расчета отдельных задач тепломассопереноса./П.В. Цой - М.: Энергия. - 1971. - 384 с.

112. **Чудновский, А.Ф.** Теплообмен в дисперсных средах./А.Ф. Чудновский - М.: Гостехиздат. - 1954.

113. **Чураев, Н.В.** Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах/Н.В. Чураев. М.: Химия, 1990. 272 с.

114. **Шкловер, А.М.** Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков –М.: Стройиздат, 1956. -241с.

115. **Шкловер, А.М.** Теплопередача при периодических тепловых воздействиях / А.М. Шкловер –М.: Энергоиздат, 1961. -68с.

116. **Эпштейн А.С.** Расчет конденсационного увлажнения конструкций // Проект и стандарт. - 1936. - N11. - с. 10-14.

117. **Эфрос, А.М.** Операционное исчисление и контурные интегралы./А.М. Эфрос, А.М. Данилевский. - ОНТИ, Харьков1937.- 384

118. **Ясин, Ю.Д.** Тенденции развития современных ограждений./ Ю.Д. Ясин, В.Ю. Ясин - В кн.: Строительная физика в 21 веке. – М.: НИИ СФ, 2006. – с. 194-199.

119. **Algorithme de construction de modeles markoviens multidimensionnels pour le melange des poudres.**/К. Marikh, V. Mizonov, H. Berthiaux, E. Barantzeva, V. Zhukov.// Récents Progrès en Génie des Procédés. V15(2001)No.82. - pp.41-48.

120. **Application of the Theory of Markovian Chains to Processes Analysis and Simulation.**/V. Mizonov, H. Berthiaux, E. Barantzeva, V. Zhukov.//Ecole des Mines d'Albi Press, 2000, - 61p.

121. **Archer, J. W.** Convective Heat Loss With Mineral Fibre Insulation./ J. W. Archer //The Canadian Architect. – 1993. - 38 (9). - p.45-47.

122. **Berthiaux, H.** Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology./ H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov// Powder Technology 157 (2005) 128-137.

123. **Berthiaux, H.** Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review./ H. Berthiaux, V. Mizonov//The Canadian Journal of Chemical Engineering. V.85, No.6, 2004, pp.1143-1168.

124. **Chen, Youming,** New analysis method of dynamic heat transfer for building envelopes/ Chen Youming, Wang Shengwei – Beijing.: science publishing company, 2004. -65с.

125. **Gagarin, V.G.** Unsteady movement of fluid in building materials./V.G. Gagarin, V.A. Mogutov - Proceedings of the ICHMT symposium - "Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures", Hemisphere Publishing Corporation, New York. – 1990. - p.p. 43-62.

126. **Gagarin, V.G.** Vapour barrier in three-layer concrete wall panels with efficient insulation/V.G. Gagarin, V.A. Mogutov - Proceedings of the Eleventh International Symposium of Heating Refrigerating and Air-Conditioning INTER.CLIMA-91 "Energy, Ecology and Economy", Zagreb, 1991, p.35-42.

127. **Rivett, P.** Principles of model building. The construction of models for decision analysis/P. Rivett// [Chichester], 1972;

128. **Rousseau, M.Z.** Facts and Fictions of Rain-Screen Walls./M.Z. Rousseau //Construction Canada 32 (2) 1990 p.40, 40-44, 46.

129. **Tamir, A.** Applications of Markov chains in Chemical Engineering./A. Tamir. - Elsevier publishers, Amsterdam, 1998, -604 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014618663

**Моделирование кинетики промерзания стен зданий в
окрестности закладных деталей**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Мизонов Вадим Евгеньевич (RU), Митрофанов Андрей
Васильевич (RU), Елин Николай Николаевич (RU), Сахаров
Алексей Анатольевич (RU)*

Заявка № 2014616938

Дата поступления 16 июля 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 августа 2014 г.

*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий





«Утверждаю»
Генеральный директор
ООО «Бармингов»
С.Н. Сафьянов
15 августа 2015 года

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательской работы
«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ
В УСЛОВИЯХ ИХ ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ»

1. Научно-исследовательская работа «Разработка методов прогнозирования теплового состояния строительных изделий и конструкций в условиях их промерзания и оттаивания» выполнена сотрудниками ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (ИвГПУ) д.т.н., профессором Елиным Н.Н. (руководитель работы) и аспирантом Сахаровым А.А. (ответственный исполнитель) в период с 01.10.2012 по 15.08.2015.
2. Объектом исследования являлись тепловлажностные режимы многослойных стеновых конструкций в условиях их промерзания при переменном состоянии окружающей среды.
3. При выполнении работы проанализированы:
 - фактические режимы эксплуатации существующих ограждающих конструкций;
 - конфигурация и динамика продвижения фронта промерзания в окрестности угловых стыков, швов и закладных деталей сложной конфигурации.
 - влияние теплофизических свойств стенки и параметров окружающей среды на процесс промерзания ограждающих конструкций.
 - вызванные промерзанием дополнительные тепловые потери в зданиях из-за наличия в ограждающих конструкциях угловых стыков и закладных деталей.
4. Анализ выполнен с применением основанных на матричных моделях, разработанных коллективом исполнителей, инженерных методов расчета процессов тепломассообмена в многослойных ограждающих конструкциях зданий.
5. На основании проведенных исследований:
 - подтверждена адекватность разработанной математической модели тепловлажностного состояния многослойной ограждающей конструкции в условиях ее промерзания и основанного на ней инженерного метода расчета, оформленного в виде компьютерной программы ТВСОК;
 - - показано, что компьютерный инженерный метод расчета обеспечивает более высокую точность за счет учета влияния промерзания на динамику термического сопротивления конструкции, а также учета реальной динамики температуры и влажности наружного воздуха.
6. Компьютерная программа ТВСОК принята к использованию при проведении энергетических обследований и энергетического аудита зданий с целью уточнения научно-обоснованных норм расхода тепла на их отопление.
7. Выполнение рекомендованных мероприятий по дополнительной теплоизоляции закладных элементов и стыков, разработанных с помощью компьютерной программы ТВСОК, позволило сократить теплопотери одного здания на 5,7%, а другого - на 8,4%.

Главный инженер

П.Я. Федотов