

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



КОРНИЕНКО СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, конди-
ционирование воздуха, газоснабжение
и освещение

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
Перехоженцев Анатолий Георгиевич,
доктор технических наук, профессор

Волгоград — 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ. АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛО-ВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ	12
1.1. Методы оценки энергоэффективности зданий	12
1.2. Инженерные методы расчета тепловлагопереноса	19
1.3. Математические модели тепловлагопереноса	23
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЛАГИ В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	38
2.1. Развитие теории потенциала влажности	38
2.2. Связь между различными шкалами потенциала влажности	47
2.3. Абсолютный потенциал влажности	55
2.4. Относительный потенциал влажности	69
2.5. Удельная влагоемкость материалов	75
2.6. Влажностное состояние материалов при отрицательных температурах	78
2.7. Экспериментальная проверка шкалы потенциала влажности	82
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	85
3.1. Анализ экспериментальных методов определения характеристик влагопереноса в материалах ограждающих конструкций	85
3.2. Экспериментальное исследование характеристик переноса влаги в материалах ограждающих конструкций	96
3.3. Сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов влагопереноса, полученных по различным методикам	106
3.4. Учет влияния температуры на влагоперенос в материалах ограждающих конструкций	110
3.5. Учет влияния влажности на характеристики состояния и переноса тепла в материалах ограждающих конструкций	118
4. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	126
4.1. Расчет профиля влагосодержания по толщине ограждающей конструкции	126
4.2. Определение плоскости наибольшего увлажнения	133
4.3. Расчет ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения	139
5. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ	148
5.1. Математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса	148
5.2. Решение задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса	154
5.3. Описание компьютерной программы «СОВТ-3» для расчета трехмерных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций	170
5.4. Пример расчета трехмерных температурных и влажностных полей для фрагмента ограждающей конструкции	175
6. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ	190

6.1. Тестирование на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток	190
6.2. Тестирование на различных математических моделях влаготеплопереноса	195
6.3. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий при тестировании разработанного метода	202
6.3.1. Тепловизионное обследование жилого здания	202
6.3.2. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания	207
6.3.3. Натурные измерения параметров микроклимата помещений	214
6.3.4. Оценка теплозащиты ограждающих конструкций жилого здания	222
7. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В КРАЕВЫХ ЗОНАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТЕПЛОЗАЩИТУ ЗДАНИЙ	234
7.1. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах	234
7.2. Оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах на теплозащитные свойства ограждающих конструкций	237
7.3. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащитные свойства оболочки здания	257
8. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЕЕ ПОВЫШЕНИЕ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПОТЕРЬ В КРАЕВЫХ ЗОНАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЯ	263
8.1. Расчет энергетических показателей по зданию за отопительный период	263
8.1.1. Энергозатраты на отопление	263
8.1.2. Энергозатраты на горячее водоснабжение	277
8.1.3. Энергозатраты на электроснабжение	277
8.2. Компьютерная программа «Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)»	277
8.2.1. Описание компьютерной программы «ЭНПАС»	277
8.2.2. Пример расчета по компьютерной программе «ЭНПАС»	284
8.3. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования краевых зон наружных ограждений	297
8.4. Оценка энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита	300
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	313
ПРИЛОЖЕНИЯ	317
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	357

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сокращение энергетических природных запасов ставит остро проблему энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий. Решение этой проблемы тесно связано с повышением требований к качеству проектирования зданий, поскольку ошибки проектирования приводят к снижению теплозащитных свойств ограждающих конструкций и повышают энергозатраты на эксплуатацию здания.

Выбор рационального конструктивного решения на стадии проектирования связан с проблемой исследования процессов теплообмена, прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций и повышения точности теплотехнических расчетов, поскольку температурно-влажностный режим ограждений непосредственно влияет на микроклимат помещений, теплозащитные свойства, надежность и экологическую безопасность зданий.

Наиболее сложным является прогноз температурно-влажностного режима в теплотехнически неоднородных участках ограждений (краевых зонах), в которых перенос теплоты и влаги происходит по двух- и трехмерной схемам. Более 40% общих тепловых потерь ограждения отмечается через краевые зоны. Локализация влаги на этих участках выше допустимых значений приводит к ухудшению влажностного режима, снижая теплозащиту и срок эксплуатации всего здания. Вместе с тем, отсутствие современных методов расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций, удобных для практического применения, затрудняет оценку влияния краевых зон на теплозащиту и энергоэффективность зданий.

Таким образом, проблема энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий приводит к необходимости исследования процессов теплообмена и разработки методов расчета температурно-

влажностного режима ограждающих конструкций. Этим определяется актуальность проблемы *повышения теплозащиты и энергоэффективности зданий в условиях отсутствия научно-методического аппарата по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений.*

Цель работы — разработка научно обоснованных методов прогноза температурно-влажностного режима с учетом процессов влаготеплопереноса в краевых зонах ограждающих конструкций при оценке тепловой защиты и энергоэффективности зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения.

2. Разработать методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов при стационарных граничных условиях, доступные широкому кругу проектировщиков.

3. Разработать метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагодпереноса.

4. Выполнить оценку влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на микроклимат помещений, теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- разработана новая энергетическая шкала абсолютного потенциала влажности, определяющая влажностное состояние материалов в не-

изотермических условиях в широком диапазоне влажности, включая сверхсорбционное увлажнение материалов;

- установлена научно обоснованная связь между абсолютным потенциалом влажности и экспериментальным потенциалом влажности В.Н. Богословского, что способствует дальнейшему развитию теории потенциала влажности и получению новых результатов по теме диссертации;
- предложена экспресс-методика экспериментального определения характеристик переноса влаги путем сушки разрезных образцов влажных материалов от полного водонасыщения, позволяющая более точно определить из одного опыта все искомые характеристики влагопереноса;
- разработаны научно обоснованные методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций на основе шкалы абсолютного потенциала влажности при стационарных граничных условиях, достоинством которых являются возможность количественной оценки степени переувлажнения материалов и применимость к расчету ограждений с мультizonальной конденсацией влаги;
- разработан новый метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе нелинейной математической модели совместного нестационарного тепловлагопереноса с применением шкалы абсолютного неизотермического потенциала влажности, позволяющей упростить модель и построить эффективный алгоритм решения задачи;
- получены результаты, позволяющие раскрыть сложные механизмы локализации теплоты и влаги в многомерных элементах ограждений, физически обусловленные неоднородностью конструкции и нелинейностью процесса тепловлагопереноса, приводящие к ухудшению

параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждений;

- предложены методики расчета теплозащитных и энергетических характеристик здания за отопительный период с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций;
- на основе применения разработанных в диссертации методов доказано, что краевые зоны ограждающих конструкций оказывают существенное влияние на микроклимат помещений, теплозащитные и энергетические характеристики зданий; снижение тепловых потерь в краевых зонах ограждений имеет высокий потенциал энергосбережения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны и внедрены программно-вычислительный комплекс «ЭНТЕЗА», все программы которого зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности и использованы на многочисленных объектах жилищно-гражданского и производственного назначения; РМД 51–25–2015 «Рекомендации по проектированию и монтажу фасадных систем для нового строительства и реконструкции жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге» (в соавторстве); СТО 03984362.574100.056–2015 (ООО «ЛСР. Стеновые–СЗ») и СТО 73090654.001–2015 (ООО «КНАУФ Инсулейшн») по оценке влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле; «Альбом технических решений тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций жилых, общественных и производственных зданий и сооружений на основе изделий из стеклянного штапельного волокна КНАУФ Инсулейшн» (в соавторстве) и другие нормативно-инструктивные документы;

- определены области перспективного практического использования разработанных теоретических основ и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты;
- создана система практических рекомендаций по повышению уровня тепловой защиты и энергоэффективности зданий с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений помещений для учебных, проектных и производственных организаций;
- представлен научно-методический аппарат по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений, результаты апробации и внедрения которого позволяют рекомендовать его для использования в практике работы организаций и предприятий, занимающихся теоретическими и прикладными исследованиями в области тепловой защиты зданий, а также при подготовке специалистов по направлению «Строительство и архитектура».

Методология и методы исследования:

- комплекс существующих базовых методов на основе развития теории потенциала влажности;
- метод сушки для лабораторного исследования характеристик влагопереноса в материалах ограждений;
- математическое моделирование процесса совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях;
- метод конечных разностей для численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагопереноса в ограждениях;
- экологически безопасные методы неразрушающего контроля для натурных эксплуатационных исследований параметров микроклимата

помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждений;

- вероятностно-статистические методы обработки результатов экспериментальных исследований теплофизических свойств материалов и конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения с применением энергетической шкалы абсолютного потенциала влажности.

2. Методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов при стационарных граничных условиях: расчет профиля влагосодержания, определение плоскости наибольшего увлажнения, расчет конструкции по предельно допустимому состоянию увлажнения.

3. Метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепловлагоденоса.

4. Методики расчета теплозащитных и энергетических характеристик здания за отопительный период с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций.

Степень достоверности результатов подтверждается:

- значительным объемом многолетних натурных исследований параметров микроклимата помещений, температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждающих конструкций, результатов анализа теплоэнергетических показателей зданий, выполненных автором с применением высокоэффективного сертифицирован-

ного оборудования, обеспечивающего необходимую точность измерений;

- обеспечением повторяемости полученных результатов экспериментальных наблюдений;
- соответствием полученных автором теоретических данных с экспериментальными данными;
- верификацией разработанного в диссертации метода численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях различными способами;
- согласованностью полученных в диссертации основных результатов исследований с данными других авторов.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», поскольку процессы тепломассообмена в ограждающих конструкциях, обеспечивающих защиту от внешних неблагоприятных климатических воздействий, непосредственно влияют на температурно-влажностный режим в помещениях зданий, распределяя температуру и влажность на внутренней поверхности ограждений, и создают вместе с инженерными системами надлежащий микроклимат помещений. Область исследования диссертации соответствует п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, *тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях*» паспорта специальности.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях НИИСФ РААСН (Москва, 1997—2003); 3-й международной научно-практической конференции «Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов» (Пенза, 2001); международной научно-практической конференции «Рациональные энергосбере-

гающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве» (Белгород, 2002); международной научно-практической конференции «Строительство–2003» (Ростов н/Д, 2003); международном форуме по проблемам науки, техники и образования (Москва, 2003); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития АПК» (Волгоград, 2005); научно-технической конференции «Строительная физика в XXI веке», посвященной 50-летию НИИСФ РААСН (Москва, 2006); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, 2007); 64-й научно-технической конференции НГАСУ (Сибстрин) (Новосибирск, 2007); международных научно-технических конференциях «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» МГСУ (Москва, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015); ежегодных академических чтениях НИИСФ–МГСУ, посвященных памяти академика РААСН Г.Л. Осипова (Москва, 2009—2017); международном конгрессе, посвященном 180-летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве» (Санкт-Петербург, 2012); международной конференции МГСУ «Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях» (Москва, 2014); международном конгрессе «Энергоэффективность. XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий» (Санкт-Петербург—Москва, 2014—2018); международных конференциях СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, 2014—2018); международной конференции «Биоповреждение строительных конструкций» (Санкт-Петербург, 2017); научно-технической конференции «Техногенная энергобезопасность и энергоресурсосбережение» (Москва, 2018); ежегодных научно-практических конференциях ВолгГТУ.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ. АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Приведен обзор методов оценки энергоэффективности зданий. Дан анализ математических моделей и методов расчета тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях.

1.1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

Теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий оценивают исходя из обеспечения нормируемого энергопотребления здания. В основу концептуального подхода по нормированию энергоэффективности зданий положены теоретические разработки В.Н. Богословского [1, 2] и О. Фангера [3, 4] в части теории комфорта помещений зданий и Ю.А. Табунщикова [5—8] в части теории рассмотрения здания как единой энергетической системы. Такой подход соответствует современной направленности работ в области стандартизации теплозащиты зданий и разработки моделей энергетических стандартов.

Проблеме энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий посвящены работы В.К. Савина [9—11], В.Г. Гагарина [12—16], И.Л. Шубина [17], А.И. Ананьева [18—20], А.Г. Перехоженцева [21], Ю.А. Матросова [6, 22], В.С. Ройфе [23], А.Н. Дмитриева [24], Ю.Я. Кувшинова [25, 26], В.И. Прохорова [27], Т.А. Дацюк [28, 29], Н.И. Ватина [357, 364—367], А.Г. Сотникова [30], А.К. Соловьева [31], В.Н. Куприянова [148—150], Е.Г. Малявиной [32, 33], О.Д. Самарина [34, 35], А.М. Берегового [36], K. Gertis [37], W. Feist [38], M. Tenpieric [39], Y. Cheng [40], A. Alajmi [41], C. Rode [315], G. Hauser [344, 345] и других ученых [316—343, 346—356, 358—363, 368—410].

Оценка энергоэффективности зданий производится по удельному энергопотреблению q , при этом должно быть выполнено следующее условие: $q \leq q_{req}$ (q_{req} — нормируемое удельное энергопотребление здания). Величина q_{req} устанавливается на национальном уровне стандартизации и зависит от назначения здания, климатических условий, микроклимата помещений, экономических и политических условий. Величина q рассчитывается или измеряется на основе процедур, учитывающих теплофизические характеристики здания, его инженерные системы и расчетные условия. Энергоэффективность определяется путем сравнения расчетного и нормируемого энергопотребления здания.

Остановимся кратко на различных подходах к расчету энергопотребления зданий.

Наиболее простой подход состоит в учете только теплотехнических характеристик оболочки здания. Этот метод заключается в расчете трансмиссионных теплопотерь через ограждающие конструкции. Повышение энергоэффективности здесь достигается, главным образом, за счет применения эффективных строительных материалов и совершенствования конструктивного решения наружных ограждений. Этот метод используется при комплексной оценке тепловой защиты зданий [15, 16], несмотря на то, что он учитывает только одну составляющую энергопотребления здания — теплопотери через ограждающие конструкции.

Другой подход заключается в определении удельного расхода тепловой энергии на отопление здания. Этот показатель включает трансмиссионные теплопотери через ограждения, энергозатраты на нагревание инфильтрующегося воздуха через оболочку здания, внутренние тепловыделения, теплопоступления от солнечной радиации. Расчет производится за отопительный период в годовом цикле эксплуатации здания. Такой подход позволяет более точно рассчитать расход тепловой энергии на отопление здания.

В проекте ТСН «Энергосбережение в зданиях» [42] и других работах предлагается включить в энергопотребление здания затраты энергии на горячее водоснабжение. Здесь учитываются практически все составляющие тепловой энергии, затрачиваемой на эксплуатацию здания.

Еще более общим является метод расчета энергопотребления здания на основе комплексного показателя — эксплуатационной энергетической характеристики [27]. Этот показатель включает расход тепловой и электрической энергии для систем отопления, вентиляции, кондиционирования, горячего водоснабжения за годовой период эксплуатации. Такой подход позволяет получить более полные данные по затратам и экономии энергии. В настоящее время этот подход внедрен в стандарт организаций СТО 17532043–001–2005 «Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий» и широко используется для оценки энергоэффективности зданий. В табл. 1.1 приведены различные пути повышения энергоэффективности зданий и дана их количественная экспертная оценка.

Таблица 1.1

Различные пути повышения энергоэффективности зданий

Пути повышения энергоэффективности	Энергосберегающие мероприятия	Снижение энергозатрат, %
Совершенствование объемно-планировочных решений здания	Рациональная ориентация здания по сторонам горизонта с учетом розы ветров и солнечной радиации, повышение компактности здания, дополнительное секционирование входных тамбуров	3...5
Применение ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами	Дополнительное утепление наружных стен, герметизация притворов, применение энергоэффективных светопрозрачных ограждений	1...15

Продолжение табл. 1.1

Повышение эффективности систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, канализации	Установка теплосчетчиков в тепловых пунктах, установка термостатов на отопительных приборах, применение систем принудительной вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты, поквартирный учет расхода воды, разделение хозяйственных и фекальных вод с рекуперацией теплоты при помощи теплонасосных установок	2...10
Применение возобновляемых природных источников энергии	Использование нетрадиционной энергии: применение солнечной энергии для теплоснабжения и электроснабжения зданий, использование тепловых насосов для преобразования низкопотенциального преобразования рек, применение ветровой энергии для выработки электроэнергии	
Совершенствование методов теплотехнического проектирования зданий	Применение новых методов проектирования, основанных на компьютерных технологиях	

Особый интерес представляет проблема повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций на основе анализа температурно-влажностного режима.

Широкие исследования влияния влажности на теплофизические свойства различных строительных материалов были начаты А.У. Франчуком. По результатам этих исследований были составлены соответствующие таблицы теплотехнических характеристик строительных материалов [43]. В последующем они были доработаны и в уточненном виде приведены в действующих строительных нормах — СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий» и СП 23–101–2004 «Проектирование тепло-

вой защиты зданий». В них даны некоторые постоянные средние значения теплофизических характеристик для различных условий эксплуатации ограждающих конструкций в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности территории России.

Метод, приведенный в СНиП 23–02–2003, позволяет учесть комплексное воздействие влажностного режима помещений и наружного климата на эксплуатационное влажностное состояние ограждающих конструкций. Поскольку в строительных нормах указаны теплофизические характеристики материалов, то этот метод применим, строго говоря, только для однослойных конструкций. При этом никак не учитывается место расположения теплоизоляционного слоя в многослойной конструкции.

Методика расчета теплофизических характеристик многослойных ограждающих конструкций в зависимости от влажностного состояния разработана В.Н. Богословским на основе теории потенциала влажности [1]. Суть методики заключается в следующем. По зоне влажности пункта строительства определяют относительный потенциал влажности и среднегодовую температуру, по которым находят потенциал влажности наружного климата. По назначению помещения определяют относительный потенциал влажности, температуру и потенциал влажности внутреннего воздуха. Вычисляют температуру и потенциал влажности слоя в многослойной ограждающей конструкции и относительный потенциал влажности слоя. По относительному потенциалу влажности слоя определяют условия эксплуатации ограждающей конструкции, по которым принимают расчетное значение коэффициента теплопроводности, используемое для оценки теплозащитных свойств ограждения.

Достоинством указанной методики является то, что она позволяет расширить границы применимости метода СНиП 23–02–2003 и определить теплофизические свойства материалов с учетом расположения слоя

в многослойной конструкции. Однако отсутствие теплофизических характеристик для широкого круга материалов в шкале потенциала влажности [1] сдерживает применение данной методики в проектной практике.

Вышеуказанные методы основаны на поэлементной оценке теплозащитных свойств зданий.

В.Г. Гагарин разработал методику учета влияния влажности материалов ограждающих конструкций на расчетное удельное теплопотребление зданий [13]. Эта методика рассмотрена на примере зданий серии 600.11 со стенами из газобетонных панелей в г. Санкт-Петербурге. Необходимые для расчета влажностного режима и теплозащиты стен теплотехнические характеристики материала были получены экспериментально. Расчеты влажностного режима стен проведены по компьютерной программе, соответствующей модели одномерного нестационарного влагопереноса с уравнением, учитывающим диффузию водяного пара в порах материала и теплопроводность материала [44, 45]. Расчет удельного теплопотребления проводился по методике МГСН 2.01–99 «Энергосбережение в зданиях». Значения сопротивления теплопередаче всех ограждающих конструкций здания, кроме стен, были приняты равными требуемым по условиям второго этапа энергосбережения по СНиП II–3–79* «Строительная теплотехника». Зависимость сопротивления теплопередаче стен от влажности газобетона учитывалась при расчетах приведенного трансмиссионного коэффициента теплопередачи секций здания. Зависимость удельного годового расхода тепловой энергии на отопление здания от влажности газобетона стен представлена в виде формулы [13]:

$$q_h^{des} = q_{h0}^{des} + \Delta q_h^{des} w_{des},$$

где q_h^{des} — расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление здания за год; q_{h0}^{des} — то же при нулевой влажности газобетона стен;

Δq_h^{des} — приращение удельного расхода тепловой энергии на отопление здания за год на 1 % влажности; w_{des} — расчетная влажность материала.

Полученные данные позволяют определить предельные значения влажности газобетона стен, при которых удовлетворяются требования по энергосбережению [13]:

$$w_{des} \leq \frac{q_h^{des} - q_{h0}^{des}}{\Delta q_h^{des}}.$$

Указанная методика позволяет решать практические задачи, связанные с учетом влияния влажности материалов ограждающих конструкций на теплопотери здания и расход тепловой энергии на его отопление.

В монографии [25] показано влияние влажности теплоизоляционного материала в многослойной конструкции на удельную тепловую характеристику здания, которая является количественной характеристикой теплозащиты здания и определяет трансмиссионные теплопотери:

$$q_{sh}(w) = q_{sh}(w_0) + k_e \left(\frac{A_i}{A_e} \right) \frac{1}{(R_{hi})^2} \frac{\delta}{\lambda} \Delta \lambda (w - w_0),$$

где $q_{sh}(w)$, $q_{sh}(w_0)$ — соответственно удельная тепловая характеристика здания при влажности теплоизоляционного материала w и w_0 ; k_e — коэффициент компактности здания; A_i — площадь i -й ограждающей конструкции здания; A_e — суммарная площадь всех ограждающих конструкций оболочки здания; R_{hi} — сопротивление теплопередаче i -й ограждающей конструкции; δ — толщина слоя теплоизоляционного материала в i -й ограждающей конструкции; λ — коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала в i -й ограждающей конструкции при влажности w_0 ; $\Delta \lambda$ — приращение коэффициента теплопроводности материала на 1 % влажности.

Выполненный обзор методов оценки энергоэффективности зданий показал, что приведенные методы не учитывают влияние процессов теп-

ломассообмена в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащитные свойства и энергоэффективность зданий ввиду отсутствия эффективного метода расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций. Между тем, как показывает практика, именно в краевых зонах ограждающих конструкций зачастую отмечается ухудшение температурно-влажностного режима, что приводит к снижению экологической безопасности и теплозащиты всего здания. Этим определяется актуальность данной работы.

1.2. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА

Инженерными считаются методы расчета, которые могут быть проведены при проектировании ограждающих конструкций без применения специальных компьютерных программ с использованием вычислительной техники. Необходимость в таких методах сохраняется, поскольку они отражают физику процесса и их целесообразно включать в нормативные документы. Область применения инженерных методов расчета ограничена многослойными ограждающими конструкциями при стационарных условиях тепловлагопереноса.

Впервые необходимость учета влажностного режима как самостоятельного фактора отмечена в работе В.Д. Мачинского в конце 20-х годов прошлого века [46]. В ней указывается на перемещение водяного пара в ограждении за счет разности парциальных давлений пара по обе стороны ограждения. Водяной пар перемещается от теплой стороны ограждения к холодной и конденсируется на холодных поверхностях, что приводит к снижению теплозащитных и санитарно-гигиенических качеств конструкций [46, 47]. Однако В.Д. Мачинский не предлагает конкретной методики расчета, а лишь рекомендует некоторые строительные приемы: устройство слоев пароизоляции с теплой стороны ограждения, правильное с точки зрения влажностного режима расположение слоев в

многослойных конструкциях и т.п. Более подробно механизм увлажнения ограждающих конструкций был описан А.Н. Борщевским [48].

Впервые метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций был разработан К.Ф. Фокиным в 1932 г. [49]. Данный метод основан на модели диффузии водяного пара за счет разности парциального давления пара по обе стороны ограждения. Метод позволяет определить зону возможной конденсации влаги и количество конденсата в ограждении, определяемое по разности количеств водяного пара, притекающего к зоне конденсации и уходящего от нее. Производя расчет влажностного режима для годового периода, можно рассчитать годовой баланс влаги и таким образом установить, будет ли ограждение с течением времени увлажняться или высыхать. Из-за простоты и ясности физической модели и малой трудоемкости различные модификации этого метода широко применяются в настоящее время как в отечественной, так и зарубежной практике.

Среди модификаций метода К.Ф. Фокина можно отметить работу Э.Х. Одельского [50], который усовершенствовал его учетом фильтрации влажного воздуха и применил к расчету деревянных покрытий. А.М. Шкловер предложил при определении зоны конденсации учитывать инерционность ограждения к температурно-влажностным воздействиям среды [51], разработав методику определения расчетной температуры наружного воздуха. Ф.В. Ушков предложил метод фокусов [52, 53], который позволяет весьма просто определить зону возможной конденсации водяного пара в многослойном ограждении. В.М. Ильинский разработал метод расчета ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения и определения требуемого сопротивления паропрооницанию ограждений [54, 55]. М.В. Поликанов предложил метод теплотехнического расчета ограждающих конструкций по предельным градиентам [56, 57], который позволяет подобрать два слоя

ограждения (теплозащитный и пароизоляционный) при условии отсутствия конденсации влаги. В настоящее время этот метод усовершенствован А.Г. Перехоженцевым и использован для нормирования влажностного режима ограждающих конструкций зданий [58]. Д.А. Андреев, В.А. Могутов и А.Н. Цирлин предложили методику выбора расположения слоев ограждающей конструкции, критерием которого является недопущение внутренней конденсации [59]. Ю.С. Вытчиков и И.Г. Беляков разработали метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций на основе безразмерных характеристик [60, 61], который позволяет определить плоскость конденсации для многослойных ограждений. Более общий метод определения параметров зоны конденсации ограждающей конструкции с учетом влагопроводности материалов разработан В.В. Козловым [62].

Метод расчета, аналогичный предложенному К.Ф. Фокиным, был разработан в ФРГ в конце 50-х годов прошлого века Н. Glaser'ом [63]. Этот метод послужил основой для разработки раздела «Diffusionsberechnungen» немецких норм DIN 4108 «Wärmeschutz im Hochbau». Метод Н. Glaser'а является базовым в ФРГ [64—72] и включен в нормы некоторых западноевропейских стран.

Особый интерес представляют инженерные методы расчета на основе потенциала влажности. Использование потенциала влажности позволяет рассчитать влажностный режим многослойных ограждающих конструкций при сверхсорбционной влажности в широком диапазоне изменения температуры.

В.Н. Богословский предложил метод расчета влагопередачи через ограждение на основе экспериментального потенциала влажности [1]. Данный метод основан на стационарной модели влагопередачи за счет разности потенциалов влажности по обе стороны ограждения. Метод позволяет строить профиль влагосодержания по толщине ограждения по

известному распределению температуры и потенциала влажности. В.Г. Гагарин и В.В. Козлов разработали метод расчета [73, 74] на основе функции, названной ими потенциалом F , учитывающей совместный перенос пара и жидкой влаги. Введение этого потенциала позволило существенно упростить уравнение влагопереноса и решить его аналитически. Потенциал F рассчитывается по характеристикам, традиционно используемым для строительных материалов и содержащимся в справочной литературе: коэффициентам паропроницаемости, влагопроводности и изотермам сорбции (десорбции). Результатом расчета является профиль влагосодержания по толщине ограждающей конструкции, который строится по известной зависимости $F(w, t)$. Полученные расчетом результаты могут служить для проверки влагонакопления в ограждающей конструкции. В настоящее время этот метод модифицирован В.В. Козловым для учета фильтрации влажного воздуха через ограждение [75, 76].

Все рассмотренные выше методы основаны на стационарных условиях тепло- и влагопереноса. Методы стационарного массообмена удобны для экспресс-оценки влажностного режима наружных ограждений, просты и наглядны и поэтому часто используются на практике. Однако они являются приближенными, так как не учитывают течение процесса во времени. Малая интенсивность влагопереноса в строительных материалах, переменность температурно-влажностных воздействий воздушной среды и существенная нелинейность характеристик влагопереноса не позволяют установиться стационарному влажностному режиму в ограждающей конструкции. Поэтому более точными являются методы расчета, основанные на моделях нестационарного влагопереноса.

1.3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА

Всесторонний обзор исследований и методов расчета влагопереноса в строительных материалах наружных ограждений выполнен В.Г. Гагариным [13]. Следует отметить большой вклад в создание теоретических основ и методов расчета влажностного режима ограждающих конструкций отечественных ученых, работы которых обеспечили нашей стране приоритет и ведущее положение в мировой науке. Нами проведен анализ этих методов с точки зрения физических процессов движения влаги, потенциалов и уравнений переноса. Показаны преимущества и недостатки различных моделей влагопереноса.

В отличие от теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий, где движущей силой переноса является температура, относительно выбора потенциалов влагопереноса нет единого мнения. Выбор потенциала влажности имеет большое значение для общей применимости и точности математических моделей и компьютерных программ, разработанных на их основе. Так как в материалах наружных ограждений влага может перемещаться в виде пара или жидкости под действием различных движущих сил, в модели влагопереноса может быть принято несколько потенциалов переноса.

Однако не потеряли своего практического значения модели, которые рассматривают только перенос пара в ограждающих конструкциях. В практике строительного проектирования и в нормативных методах в настоящее время используется теория диффузии пара в сорбирующей среде. Эта теория рассматривает процессы влагопереноса только при сорбционной влажности строительных материалов. За потенциал влажности в этой теории принимают парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, заполняющем поры материала, предполагая, что сорбированная материалом влага прочно связана с ним и в жидком состоянии

неподвижна. Перемещение влаги происходит посредством диффузии под влиянием градиента парциального давления водяного пара. Дифференциальное уравнение диффузии пара в сорбирующей среде для одномерной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1.1)$$

где ω — концентрация влаги в материале, кг/м^3 ; τ — время, с; x — пространственная координата, м; μ — коэффициент паропроницаемости материала, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; p — парциальное давление водяного пара, Па.

В формуле (1.1) концентрация влаги ω , кг/м^3 , связана с влагосодержанием w , кг/кг , следующей формулой:

$$\omega = \rho_0 w,$$

где ρ_0 — плотность материала в сухом состоянии, кг/м^3 .

Влагосодержание материала связано с парциальным давлением водяного пара зависимостью $w(p, t)$, определяемой по изотермам сорбции (десорбции). Изотермы сорбции строительных материалов экспериментально исследованы К.Ф. Фокиным [77], А.У. Франчуком [78], Т.А. Литвиновой [79], С.В. Александровским [80], В.Г. Гагариным [13] и др. Поскольку парциальное давление водяного пара зависит от влагосодержания материала и его температуры, то величина p является неизотермическим потенциалом переноса водяного пара. В изотермических условиях ($t = \text{const}$) парциальное давление водяного пара пропорционально относительной влажности воздуха ϕ .

Метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций, основанный на уравнении (1.1), был рассмотрен А.С. Эпштейном [81, 82]. Решение этого уравнения производилось методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации, при этом устойчивость достигалась с помощью итераций в пределах каждого временного шага.

Метод А.С. Эпштейна ввиду сложности расчета находит ограниченное практическое применение.

Распространяя аналогию между теплопроводностью и диффузией на нестационарные условия, К.Ф. Фокин разработал метод последовательного увлажнения материалов в наружных ограждениях [83] на основе уравнения:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\mu p_s}{\rho_0 \xi_0} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (1.2)$$

где p_s — давление насыщенного водяного пара, Па; ξ_0 — удельная относительная пароемкость материала, кг/кг, полученная дифференцированием функции $w(\varphi)$, определяемой по изотерме сорбции ($\xi_0 = \frac{dw}{d\varphi}$).

Решая уравнение (1.2), определяют значения парциального давления пара в различных сечениях конструкции на некоторые моменты времени и, пользуясь изотермами сорбции (десорбции), переводят их в соответствующие равновесные влагосодержания.

Заметим, что уравнение (1.2) может быть получено из уравнения (1.1) путем следующих преобразований:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \rho_0 \xi_0 \cdot \frac{\partial \left(\frac{p}{p_s} \right)}{\partial \tau} = \frac{\rho_0 \xi_0}{p_s} \cdot \frac{\partial p}{\partial \tau}.$$

Решение уравнения (1.2) получено К.Ф. Фокиным методом конечных разностей по явной схеме. Для устойчивости принятой расчетной схемы накладывалось ограничение на шаги по координате. Для удобства расчета разбивка ограждения на расчетные слои проводилась графическим способом, предложенным О.Е. Власовым [84], при этом толщина расчетных слоев принималась пропорциональной $\sqrt{p_s}$. Изотермы сорбции

водяного пара в материале ограждения принимались в виде прямых, удельная относительная пароемкость материала постоянна ($\xi_0 = \text{const}$).

В дальнейшем К.Ф. Фокин значительно усовершенствовал этот метод [85, 86]. В окончательном варианте метода последовательного увлажнения [87, 88] для устойчивости принятой конечно-разностной схемы на временной шаг накладывается ограничение при произвольной разбивке ограждения на расчетные слои, а удельная относительная пароемкость зависит от влажности материала. Температурный режим ограждения принят стационарным в течение каждого месяца (сезона) года.

Поскольку в рассмотренных моделях не учитывается перенос жидкой влаги, они имеют ограниченное применение.

Одними из первых исследовали перенос жидкой фазы влаги в пористых материалах О.Е. Власов [89] и Р.Е. Брилинг [90]. Основываясь на этих исследованиях, К.Ф. Фокин [86] предложил дополнить метод последовательного увлажнения учетом перемещения жидкой фазы влаги. На основе экспериментальных исследований он показал, что имеется два основных механизма переноса влаги в материалах: диффузия водяного пара под действием градиента парциального давления пара и капиллярная диффузия жидкости под действием градиента влагосодержания. При расчете совместного перемещения парообразной и жидкой фаз влаги дифференциальное уравнение влагопереноса имеет вид:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial p}{\partial x} + \beta \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (1.3)$$

где w — влагосодержание, кг/кг; μ — коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·с·Па); β — коэффициент влагопроводности материала, кг/[м·с·(кг/кг)].

Первый член в правой части (1.3) учитывает перемещение пара в сорбционной зоне, при этом предполагается, что адсорбированная жид-

кость связана со стенками пор и не перемещается, второй — перемещение жидкой влаги в сверхсорбционной зоне.

В.Г. Гагариным предложена математическая модель [44], которая является обобщением модели, принятой в методе последовательного увлажнения. В этой модели, основанной на уравнении влагопереноса (1.3), дополнительно учитываются: перемещение незамерзшей влаги при отрицательных температурах; зависимость изотерм сорбции (десорбции) материалов от температуры; увлажнение поверхности ограждений косыми дождями; зависимость скорости капиллярного всасывания материалов от влажности и температуры; зависимость коэффициентов паропроницаемости от влажности и коэффициентов теплопроводности от температуры. На основе этой модели В.Г. Гагарин [44, 45] разработал компьютерные программы для расчета нестационарного влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий.

В моделях, основанных на теории теплопроводности [91—93], в качестве основных движущих сил влагопереноса приняты влагосодержание материала и температура. В изотермических условиях перемещение влаги при любом соотношении между парообразной и жидкостной фазами влаги происходит под действием градиента влагосодержания. В неизотермических условиях во влажном материале предполагают поток влаги, вызванный градиентом температуры [94]. Это явление, открытое А.В. Лыковым в 1935 г., называют термовлагопроводностью. Дифференциальное уравнение влагопереноса в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial \omega}{\partial x} + k_t \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1.4)$$

где k_m — коэффициент диффузии влаги в материале, м²/с; k_t — коэффициент термодиффузии влаги в материале, кг/(м·с·°С).

В правой части (1.4) первый член учитывает суммарный перенос влаги (без разделения на отдельные фазы) в изотермических условиях,

второй — влагоперенос в неизотермических условиях под действием градиента температуры.

Преимуществом моделей, основанных на теории влагопроводности, является возможность описать влагоперенос без точного знания физической основы процесса. Эта модель нашла широкое применение при исследовании высокоинтенсивных процессов влагопереноса в теории сушки [95, 96], при моделировании массопереноса в технологических процессах строительной индустрии [97, 98], в физике почв [99, 100]. В расчетах влажностного режима ограждающих конструкций модель, основанная на теории влагопроводности, пока не нашла широкого практического применения ввиду сложности экспериментального определения коэффициентов влагопереноса, зависящих от влагосодержания и температуры.

Представляет интерес произвести пересчет этих коэффициентов на коэффициенты паропроницаемости и влагопроводности, которые содержатся в справочной литературе. Выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned}\mu \nabla p &= \mu \left(\frac{\partial p}{\partial \omega} \nabla \omega + \frac{\partial p}{\partial t} \nabla t \right) = \mu \left(\frac{\partial(\varphi p_s)}{\partial \omega} \nabla \omega + \frac{\partial(\varphi p_s)}{\partial t} \nabla t \right) = \\ &= \mu \left(p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \nabla \omega + \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t} \nabla t \right).\end{aligned}$$

С учетом перемещения жидкой фазы влаги получим:

$$\mu \nabla p + \beta \nabla \omega = \left(\mu p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} + \beta \right) \nabla \omega + \mu \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t} \nabla t = k_m \nabla \omega + k_t \nabla t,$$

где $k_m = \mu p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} + \beta$, $k_t = \mu \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t}$.

В зарубежной практике модели на основе теории влагопроводности использовали Phillip J.R. и de Vries D.A. [101], R. Kohonen и J. Maatta [102], D. Gavin и P. Klemm [103], C. Rode [104] и другие ученые.

По аналогии с методами теории сушки А.У. Франчук предложил рассчитывать нестационарный теплоперенос совместно с расчетом влагопереноса в ограждении. Теоретические разработки А.У. Франчука базируются на экспериментальных и теоретических исследованиях О.Е. Власова и Р.Е. Брилинга [89, 90] о переносе в строительных материалах жидкой влаги. Методы, разработанные А.У. Франчуком, пригодны для расчета как сорбционного, так и сверхсорбционного увлажнения материалов [105—107]. В этих методах учитываются зависимости коэффициентов влагопереноса материалов от влагосодержания и температуры. Однако методы А.У. Франчука сильно формализованы, что затрудняет их использование в практических расчетах. Развитию методов А.У. Франчука посвящены работы его учеников — В.И. Лукьянова [44, 108, 109], Ю.Д. Ясина [110—112], О.В. Дегтярева [113].

Выбор математической модели влагопереноса, в которой нашли бы отражение все механизмы переноса влаги, имеет определяющее значение. В работе [44] В.И. Лукьяновым для решения задач влажностного режима приводится следующее уравнение влагопереноса:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \operatorname{div} (k_{\omega} \nabla \omega + k_t \nabla t + k_p \nabla p + k_P \nabla P), \quad (1.5)$$

где ω — концентрация влаги в материале, кг/м^3 ; t — температура, $^{\circ}\text{C}$; p — парциальное давление водяного пара в материале, Па; P — давление воздуха, Па; k_{ω} , k_t — соответственно коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$, и термодиффузии, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C})$, жидкой влаги в материале; k_p — коэффициент диффузии водяного пара в материале, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})$; k_P — коэффициент фильтрации влажного воздуха в материале, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})$.

Уравнение (1.5) учитывает различные факторы, влияющие на нестационарный влагоперенос. В уравнении нестационарной теплопроводности также учитывается теплота фазовых переходов влаги. В дальнейшем В.И. Лукьянов усовершенствовал модель, разработав многофакторный

метод [109], который учитывает практически все факторы, влияющие на тепловлажностный режим ограждения, в том числе, наряду с переносом жидкой и парообразной влаги, а также влажного воздуха дополнительно учитываются влияние засоления материалов и возможного образования трещин в стыковых соединениях и перенос водорастворимых компонентов. Использование метода В.И. Лукьянова дает возможность определять двумерные влажностные поля [44, 109], например, в зоне стыковых соединений панелей, ограждений с вентилируемыми прослойками. Решение этой многофакторной задачи требует экспериментального определения многочисленных характеристик тепловлагопереноса. Сложность их определения затрудняет применение этой модели на практике.

Главная трудность при использовании моделей на основе влагосодержания заключается в разрывности функции влагосодержания на стыках различных материалов. Это приводит к необходимости задания сложных граничных условий. Так К.Ф. Фокин предположил [86, 87], что влага, конденсирующаяся на стыке двух материалов, распределяется между материалами пропорционально их среднесуточным скоростям капиллярного всасывания. Вопрос о скорости капиллярного всасывания влаги материалами изучался Р.Е. Брилингом, им были проведены опыты по определению скорости капиллярного всасывания для ряда строительных материалов [90]. W. Cammerer показал [114], что количество впитанной телом влаги пропорционально $\sqrt{\tau}$. Позднее Н. Künzel [115] и В. Schwarz [116] экспериментально определили величину коэффициента капиллярного всасывания для ряда строительных материалов. На основании закономерностей движения жидкости по капиллярам В.Г. Гагарин предложил общее уравнение капиллярного всасывания воды строительными материалами [13]. Использование коэффициента капиллярного всасывания более обоснованно для характеристики процесса по сравнению со средней суточной скоростью капиллярного всасывания воды.

Ю.Д. Ясин предложил рассчитывать равновесную влажность исходя из равенства капиллярных давлений в соприкасающихся материалах [110]. А.Г. Перехоженцев показал [117], что влагосодержания соприкасающихся материалов в сверхсорбционной области их увлажнения связаны между собой линейно.

Наиболее просто равновесное влагосодержание на стыке материалов определяется на основе теории потенциала влажности.

В теории потенциала влажности, разработанной В.Н. Богословским, поток влаги в ограждении не разграничивается на отдельные составляющие. Этот потенциал учитывает практически все механизмы переноса влаги в материалах наружных ограждений, что позволяет достаточно просто записать уравнение влагопроводности [1]:

$$\eta \rho_0 \frac{\partial \Theta_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial \Theta_B}{\partial x} \right), \quad (1.6)$$

где Θ_B — потенциал влажности В.Н. Богословского, °В; η — удельная влагоемкость материала, (кг/кг)/°В; κ — коэффициент влагопроводности материала, кг/(м·с·°В).

Уравнение влагопроводности (1.6) полностью аналогично уравнению теплопроводности, поэтому для его решения можно использовать хорошо разработанные методы теории теплопроводности. Потенциал влажности В.Н. Богословского позволяет очень просто записать условия распределения влаги на стыке различных материалов. Распределение влаги, образующейся в плоскости соприкосновения двух материалов, можно принимать, считая, что величины потенциала влажности обоих материалов в этой плоскости одинаковы. Потенциал влажности Θ_B позволяет сравнительно просто описать математически сложный процесс нестационарной влагопередачи в многослойных конструкциях, находящихся в неизотермических условиях, во всем диапазоне влажности. Сложность

зависимости $w(\Theta_B, t)$ а также отсутствие достаточного количества экспериментальных данных по характеристикам состояния и переноса влаги в материалах сдерживает широкое применение этой модели на практике.

А.В. Лыков предложил модель, в которой все виды влагопереноса (при постоянном внешнем давлении) могут быть описаны с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента изотермического потенциала влагопереноса $\nabla\Theta_L$ и градиента температуры ∇t в виде [92]:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \Theta_L}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_m \nabla \Theta_L + \lambda_m \delta_m \nabla t), \quad (1.7)$$

где c_m — удельная изотермическая влагоемкость (массоемкость) материала, (кг/кг)/°М; Θ_L — изотермический потенциал влагопереноса А.В. Лыкова, °М; λ_m — коэффициент изотермической влагопроводности, кг/(м·с·°М); δ_m — термоградиентный коэффициент, °М/°С.

Уравнение (1.7) учитывает перенос влаги в изотермических условиях (первый член в правой части уравнения) и перенос влаги в неизотермических условиях (второй член).

Достоинством данной модели является использование потенциала влагопереноса, что позволяет упростить запись граничных условий на стыках разных материалов конструкции. Однако, наличие в уравнении влагопереноса дополнительного слагаемого, определяющего термовлагопроводность, существенно усложняет решение этого уравнения.

А.Г. Перехоженцев разработал шкалу относительного изотермического потенциала влагопереноса и предложил модель влагопереноса [118], в основе которой лежит дифференциальное уравнение вида:

$$c_{\Theta} \rho_0 \frac{\partial \Theta_o}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_{\Theta} \nabla \Theta_o) + W_t \quad (1.8)$$

с источником (стоком) влаги за счет градиента температуры

$$W_t = \operatorname{div}(\lambda_{\Theta} \delta_{\Theta} \nabla t),$$

где c_{Θ} — удельная изотермическая влагоемкость материала, $(\text{кг}/\text{кг})/^{\circ}\text{В}$; ρ_0 — плотность материала в сухом состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; Θ_0 — относительный потенциал влагопереноса, $^{\circ}\text{В}$; τ — время, с; λ_{Θ} — коэффициент изотермической влагопроводности материала, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{В})$; δ_{Θ} — термоградиентный коэффициент, $^{\circ}\text{В}/^{\circ}\text{С}$, позволяющий поток влаги определить через градиент температуры.

Для определения температурно-влажностного режима ограждающих конструкций уравнение влагопереноса (1.8) решается совместно с нестационарным уравнением теплопроводности. Такое представление модели позволяет составить четкий алгоритм решения системы, в которой вначале решается уравнение теплопроводности, затем по известному температурному полю определяется величина W_t , далее по аналогии с уравнением теплопроводности решается уравнение влагопроводности (1.8) с известным источником (стоком) влаги за счет градиента температуры. Коэффициенты влагопереноса, отнесенные к потенциалу, могут быть получены расчетным путем [118] с использованием изотермы капиллярного испарения (десорбции) от полного насыщения материала на основе представления модели пористого строительного материала как дисперсной системы для широкого класса материалов. Переход от потенциалов влагопереноса к равновесным влагосодержаниям материалов производится в конце решения задачи. Система дифференциальных уравнений нестационарной тепло- и влагопроводности решается методом конечно-разностной аппроксимации с использованием схемы продольно-поперечной прогонки. На основе данной модели разработана компьютерная программа расчета двумерных нестационарных температурно-влажностных полей неоднородных участков наружных ограждений [118].

В работе [119] предложен другой метод решения двумерной задачи нестационарного тепло- и влагопереноса на основе локально-одномерной схемы, который позволяет производить расчет температурно-влажностного режима неоднородных участков ограждающих конструкций более сложной формы.

В [120] разработан метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса на основе относительного изотермического потенциала влажности Θ_0 с использованием симметричной локально-одномерной схемы И.В. Фрязинова. Использование в данной модели относительного потенциала влагопереноса при описании процесса влагопроводности позволяет упростить математическую модель тепло- и влагопереноса. Существенно упрощается запись граничных условий. Коэффициенты влагопереноса, отнесенные к потенциалу, позволяют охарактеризовать все процессы, происходящие в порах влажных материалов во всем диапазоне изменения влажности материалов. Однако, наличие в уравнении влагопроводности дополнительного члена, характеризующего термовлагопроводность, усложняет решение задачи.

К. КieβI предложил модель [121], в которой влагоперенос разбивается на две отдельные составляющие — перенос пара и жидкости. Диффузию водяного пара он разбил на две части — «температурную», учитывающую перенос пара за счет градиента температуры (термодиффузия пара) и «влажностную» за счет градиента относительной влажности воздуха в материале. Для капиллярного переноса жидкой фазы влаги К. КieβI ввел новый независимый от материала потенциал влажности ϕ . Величину ϕ он назвал обобщенным потенциалом влажности (generalized moisture potential). Этот потенциал равен относительной влажности воздуха в области сорбционного увлажнения материалов, а в сверхсорбционной области он представляет собой некоторую функцию распределения пор по радиусам. Уравнение влагопереноса в данной модели имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \operatorname{div} \left[\operatorname{FKU} \frac{d\omega}{d\phi} \nabla \phi + \rho_w (\operatorname{FDP} \cdot \nabla \phi + \operatorname{FDT} \cdot \nabla t) \right], \quad (1.9)$$

где ω — концентрация влаги в материале, кг/м^3 ; ϕ — потенциал влажности К. Киргоя; ρ_w — плотность воды, кг/м^3 ; ϕ — относительная влажность воздуха; t — температура, $^{\circ}\text{C}$; FKU — коэффициент диффузии капиллярной влаги, $\text{м}^2/\text{с}$; FDP — коэффициент диффузии пара в изотермических условиях, $\text{м}^2/\text{с}$; FDT — коэффициент термодиффузии пара, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Первый член в правой части (1.9) учитывает перенос жидкой фазы влаги при любых температурных условиях, второй — перенос пара в изотермических условиях, третий — перенос пара под действием градиента температуры. На основе данной модели разработана компьютерная программа, с помощью которой были определены профили влагосодержания различных конструкций наружных стен и крыш зданий. Различные модификации модели К. Киргоя подробно рассмотрены в работе [122]. Недостатком модели является большая трудоемкость экспериментального определения коэффициентов влагопереноса FDP и FDT .

В физике почв широко применяется модель [100], в которой влагоперенос описывается с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента парциального давления водяного пара ∇p , определяющего диффузию пара, и градиента капиллярного давления ∇p_k , характеризующего перенос жидкой фазы влаги. В основе этой модели лежит дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \operatorname{div} (\mu \nabla p - k_p \nabla p_k), \quad (1.10)$$

где μ — коэффициент паропроницаемости материала, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; p — парциальное давление водяного пара в материале, Па ; k_p — коэффици-

ент капиллярной проводимости влаги, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{Па})$; p_k — капиллярное давление, Па.

В уравнении (1.10) капиллярное давление принято в качестве потенциала переноса жидкости. Капиллярное давление является удобным измерителем состояния влаги в материале в области сверхсорбционного увлажнения. Главное преимущество данной модели заключается в том, что равновесное влагосодержание на стыке разных материалов можно определить исходя из равенства капиллярных давлений. Это позволяет значительно упростить граничные условия. К недостаткам модели (1.10) можно отнести некоторое неудобство практического применения шкалы капиллярного давления как потенциала влажности, поскольку с ростом капиллярного давления влагосодержание уменьшается.

Н.М. Künzel показал [122], что капиллярное давление (до предела капиллярной насыщенности) может быть вычислено по относительной влажности воздуха в порах материала с помощью уравнения Кельвина:

$$p_k = -\rho_w R_D T \ln \varphi,$$

где ρ_w — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; R_D — газовая постоянная водяного пара, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T — температура, К; φ — относительная влажность воздуха.

Используя уравнение Кельвина, преобразуем второй член в правой части уравнения (1.10) следующим образом:

$$k_p \nabla p_k = k_p \left(\frac{\partial p_k}{\partial \varphi} \nabla \varphi + \frac{\partial p_k}{\partial T} \nabla T \right) = -k_p \rho_w R_D \left(\frac{T}{\varphi} \nabla \varphi + \ln \varphi \nabla T \right).$$

Пренебрегая вторым членом правой части этого выражения, учитывая перенос капиллярной влаги за счет градиента температуры ($\ln \varphi \nabla T = 0$), после подстановки в уравнение (1.10) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \text{div}(\mu \nabla p + k_\varphi \nabla \varphi), \quad (1.11)$$

где $k_\varphi = \frac{k_p \rho_w R_D T}{\varphi} \nabla \varphi$ — коэффициент переноса жидкой влаги, м²/с.

Модель на основе уравнения влагопереноса (1.11) предложена Н.М. Künzel'ем [122]. В этом уравнении отдельно учитывается диффузия водяного пара (первый член в правой части уравнения) и перенос жидкой влаги (второй член). Таким образом, влагоперенос описывается с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента парциального давления водяного пара ∇p и градиента относительной влажности воздуха $\nabla \varphi$. Эти параметры просты в измерении и хорошо представлены в справочной литературе. Другим преимуществом данной модели является достаточно простая запись граничных условий. Недостатком модели является резкий рост влагосодержания при малом изменении φ в области сверхсорбционного увлажнения материалов, что существенно влияет на точность определения влагосодержания в этом диапазоне. Уравнение влагопроводности (1.11) решается совместно с уравнением теплопроводности методом конечных разностей по неявной схеме аппроксимации. С помощью разработанной модели Н. Künzel решает двумерную задачу нестационарного тепло- и влагопереноса.

Проведенный анализ показал преимущества математических моделей и методов расчета тепловлагопереноса, основанных на теории потенциала влажности. Применение теории потенциала влажности позволяет существенно упростить математическую модель влагопереноса и расширить область применения модели на сверхсорбционную зону влажности материалов ограждающих конструкций. Вместе с тем отсутствуют эффективные методы расчета температурно-влажностного в трехмерных областях ограждающих конструкций, удобные для практического применения, что и определяет актуальность диссертации.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЛАГИ В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Разработаны и исследованы характеристики состояния влаги в строительных материалах, необходимые для моделирования влагопереноса в ограждающих конструкциях.

2.1. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

В ограждающих конструкциях влагообмен происходит под влиянием разности влагосодержаний, давлений, температур и сил, вызванных разными энергиями связи в соприкасающихся материалах. Для анализа сложных процессов влагопереноса в ограждающих конструкциях наиболее удобна физико-математическая модель, основанная на потенциале влажности. При использовании этой модели можно рассматривать процесс влагообмена в широком диапазоне влажности и температуры с учетом перемещения влаги в парообразном и жидком состояниях под действием различных сил.

В отличие от переноса теплоты в ограждающих конструкциях, где движущей силой (потенциалом) переноса является температура, относительно выбора потенциала переноса влаги нет единого мнения.

Наиболее общая оценка влажностного режима наружных ограждений может быть получена на основе теории потенциала влажности, разработанной В.Н. Богословским [1, 123, 124]. В 1952 г. им был предложен и разработан метод расчета влагопередачи в ограждающих конструкциях, основанный на потенциале влажности, который по термодинамическому смыслу является «полным потенциалом». С его помощью по принятой шкале и методике определения можно учесть все силовые факторы, действующие на влагу. Движение влаги совместно в парообразной и жидкой фазах определяется градиентом потенциала влажности, а накоп-

ление влаги — влагоемкостью, выраженной через изменение потенциала влажности.

Физико-математическое обоснование метода «потенциала влажности» дано в работах А.В. Лыкова [92, 125, 126], где подчеркнуто единство явлений тепло- и массообмена, а для их описания использован аппарат термодинамики необратимых процессов.

В дальнейшем теория потенциала влажности развивалась В.Н. Богословским и его учениками — Е.И. Тертичником [127], А.М. Микшером [128], Б.В. Абрамовым [129] и др. Развитию теории и практики потенциала влажности посвящены работы Л.М. Никитиной [130], А.Г. Перехоженцева [58, 118], В.Г. Гагарина [13, 73, 131], К. Кießl'я [121], Н.М. Künzel'я [122], а также автора [120]. Достаточно полный обзор истории возникновения и трансформации понятия потенциала влажности дан в работе В.Г. Гагарина [132].

Характеризуя влажностное состояние системы, потенциал влажности зависит от многих факторов: вида материала, степени влажности, давления, температуры и потенциалов различных силовых полей [1]. Поэтому его величину можно также измерять шкалой влажности, давления и с помощью других показателей. Однако необходимым условием является исключение влияния в процессе этого измерения изменений других, кроме выбранного, факторов, от которых зависит величина потенциала.

В основу определения потенциала влажности положен следующий постулат [1, 133], подтвержденный опытами. Если два влажных тела из разных материалов находятся во влажностном равновесии с третьим влажным телом из другого материала, то они находятся во влажностном равновесии друг с другом.

В.Н. Богословский предложил определять потенциал влажности экспериментально путем измерения равновесной влажности определенного материала, принятого за эталонный. Таким образом исключается влия-

ние на результат измерений вида материала. Влияние температуры исключается переводом результатов измерений при произвольной температуре к условиям при эталонной температуре.

В качестве эталонного тела выбрана фильтровальная бумага, эталонная температура $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Шкала потенциала влажности В.Н. Богословского определяется формулой [128]:

$$\Theta_B = \left(\frac{w_0}{w_0^{m.s}} \right)_{t_0} 100, \quad (2.1)$$

где w_0 — влагосодержание эталонного тела, кг/кг, при эталонной температуре t_0 ; $w_0^{m.s}$ — максимальное сорбционное влагосодержание эталонного тела, кг/кг, при той же температуре.

Потенциал влажности В.Н. Богословского измеряется в градусах влажности ($^{\circ}\text{В}$). Шкала потенциала влажности равномерная и построена по двум следующим точкам. Для сухой фильтровальной бумаги $\Theta_B = 0^{\circ}\text{В}$, при максимальной сорбционной влажности ее потенциал $\Theta_B = 100^{\circ}\text{В}$. Изменение потенциала влажности на $1\text{ }^{\circ}\text{В}$ соответствует изменению влажности фильтровальной бумаги на 0,01 ее максимальной сорбционной влажности при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При максимальной сорбционной влажности все материалы имеют величину $\Theta_B = 100\text{ }^{\circ}\text{В}$.

Потенциал влажности, измеренный таким образом, является экспериментальным потенциалом в отличие от теоретического, который может быть определен через термодинамические функции.

Для определения потенциала влажности строительного материала при заданном температурно-влажностном состоянии его приводят в соприкосновение с фильтровальной бумагой в условиях отсутствия влагообмена с окружающей средой. После установления влажностного равновесия определяют равновесное влагосодержание фильтровальной бума-

ги при эталонной температуре, по которому определяют потенциал влажности данного строительного материала.

Экспериментально установлено [1], что потенциал влажности Θ_B характеризует влажностное состояние материалов в неизотермических условиях, а градиент потенциала $\nabla\Theta_B$ определяет влагоперенос. Поскольку равновесное влагосодержание материала является функцией потенциала влажности и температуры $w = w(\Theta_B, t)$, то имеет место формула:

$$\nabla\Theta_B = \left(\frac{\partial \Theta_B}{\partial w} \right) \nabla w + \left(\frac{\partial \Theta_B}{\partial t} \right) \nabla t.$$

Удельный поток влаги q_m , кг/(м²·с), в произвольном диапазоне влажности и температуры пропорционален градиенту потенциала влажности $\nabla\Theta_B$:

$$q_m = -\kappa \nabla\Theta_B,$$

где κ — коэффициент влагопроводности, кг/(м·с·°В).

Математическая модель, основанная на потенциале влажности В.Н. Богословского, дает возможность расчета влажностного режима многослойных конструкций в широком диапазоне влажности и температуры при сложных граничных условиях с учетом перемещения влаги в парообразном и жидком состояниях под действием различных сил, в том числе градиента температуры. Однако, применение в качестве эталонного тела фильтровальной бумаги, свойства которой зависят от условий эксперимента, может внести погрешность в результаты измерений. Следует также отметить и большую трудоемкость измерений с использованием фильтровальной бумаги. Кроме того, для большинства строительных материалов отсутствуют теплофизические характеристики в шкале потенциала влажности, что затрудняет внедрение метода расчета влажностного режима на основе этой шкалы в инженерную практику.

Сложность зависимости $w(\Theta_B, t)$ также вызывает затруднения в применении шкалы потенциала влажности Θ_B . Возникает необходимость в показателе, зависящем от потенциала влажности, температуры и однозначно определяющем влагосодержание материала. Е.И. Тертичник [127] предложил шкалу относительного потенциала влажности Φ_Θ , определяемого по формуле:

$$\Phi_\Theta = \frac{k_1 \Theta_B + k_2}{k_3 \Theta_B^{m.s} + k_4}, \quad (2.2)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — коэффициенты; $\Theta_B^{m.s}$ — максимальный сорбционный потенциал влажности, °В.

Шкала относительного потенциала влажности позволяет продолжить изотермы сорбции на область сверхсорбционной влажности материалов, т.е. производить оценку влажностного состояния материалов в широком диапазоне влажности. Относительный потенциал влажности является обобщающим показателем и удобен для оценки влажностного состояния внутренней среды, материалов и наружного климата.

Б.В. Абрамов определил потенциал влажности наружного климата [129]. Этот потенциал является собирательным показателем сложных тепловлажностных воздействий на ограждение наружных факторов

$$\Theta_{ext} = f(t_{ext}, \Phi_{ext}, q, i, v_{ext} \text{ и направление ветра})$$

и характеризуется только их произвольным сочетанием, независимо от материала ограждающей конструкции. Здесь t_{ext} , Φ_{ext} — соответственно температура и относительная влажность наружного воздуха; q — плотность теплового потока солнечной радиации; i — плотность потока влаги, вносимой на поверхность ограждения осадками; v_{ext} — скорость ветра.

Для количественной оценки влияния климатических характеристик на Θ_{ext} были проведены экспериментальные исследования. По результа-

там статистической обработки экспериментальных данных с применением аппарата корреляционно-регрессионного анализа были получены следующие зависимости Θ_{ext} [129]:

$$\Theta_{ext} = \begin{cases} -3,81 + 0,195t_{ext} + 0,164\varphi_{ext} - 0,0027q - 0,035v_{ext}, & t \leq -20; \\ 6,027 + 0,227t_{ext} + 0,046\varphi_{ext} - 0,00143q - 0,0483v_{ext}, & -20 < t \leq -10; \\ 2,86 + 0,219t_{ext} + 0,09651\varphi_{ext} - 0,00349q - 0,0081v_{ext}, & -10 < t \leq 0; \\ -4,01 + 0,488t_{ext} + 0,169\varphi_{ext} - 0,00468q + 0,0165v_{ext}, & 0 < t \leq 10; \\ -13,6 + 1,22t_{ext} + 0,204\varphi_{ext} - 0,0026q + 0,022v_{ext}, & 10 < t \leq 20^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Указанные зависимости были получены для Москвы. В [1] приведены результаты подобных расчетов для других населенных пунктов. Однако такие методы расчета еще недостаточно апробированы, поэтому потенциал влажности наружного климата в настоящее время наиболее надежно может быть определен по данным наблюдений.

Предложенная А.В. Лыковым шкала потенциала влагопереноса Θ_L , измеряемого в массообменных градусах ($^\circ\text{M}$), также основана на равновесной влажности фильтровальной бумаги. Однако в отличие от потенциала влажности В.Н. Богословского этот потенциал определяет влажностное состояние материалов в изотермических условиях. Шкала потенциала влагопереноса А.В. Лыкова определяется формулой [92]:

$$\Theta_L = \left(\frac{w_0}{w_0^{m.s}} \right)_t 100, \quad (2.3)$$

где w_0 — влагосодержание эталонного тела, кг/кг, при температуре t ; $w_0^{m.s}$ — максимальное сорбционное влагосодержание эталонного тела, кг/кг, при той же температуре.

Удельный поток влаги q_m^w , кг/(м²·с), в изотермических условиях при любом соотношении между парообразными и жидкостными перемещениями, равен:

$$q_m^w = -\lambda_m \nabla \Theta_L,$$

где λ_m — коэффициент массопроводности (вагопроводности), кг/(м·с·°М).

В неизотермических условиях во влажном материале поток влаги q_m^t , кг/(м²·с), вызванный градиентом температуры, равен [92]:

$$q_m^t = -\lambda_m \delta_m \nabla t,$$

где δ_m — термоградиентный коэффициент, °М / °С.

$$\text{Суммарный поток влаги } q_m = q_m^w + q_m^t.$$

По сравнению с потенциалом влажности В.Н. Богословского экспериментальное определение изотермического потенциала влагопереноса Θ_L значительно проще. Однако при использовании потенциала влагопереноса Θ_L существенно усложняется математическая модель влагопереноса в наружных ограждениях, поскольку для учета температурного градиента в уравнение потока влаги необходимо добавлять слагаемое, учитывающее это влияние. Кроме того, потенциалу влагопереноса А.В. Лыкова свойственны все недостатки, связанные с применением в качестве эталонного тела фильтровальной бумаги.

В последние годы теория потенциала влажности получила развитие в работах А.Г. Перехоженцева [58] и К. Кießl'я [121], которые использовали шкалы потенциала влажности, основанные на характеристиках пористой структуры материалов.

Удобным с точки зрения проведения расчетов и хорошо разработанным является относительный потенциал влагопереноса Θ_o , °В, предложенный А.Г. Перехоженцевым [58]:

$$\Theta_o = \frac{\Theta_a}{\Theta_a^{max}} 100, \quad (2.4)$$

где Θ_a — абсолютный потенциал влагопереноса, определяемый по формуле:

$$\Theta_a = -RT \ln \left(1 - \frac{p}{p_s} \right), \quad (2.5)$$

где R — газовая постоянная для водяного пара, Дж/(кг·К); T — температура, К; p — парциальное давление водяного пара в материале, Па; p_s — давление насыщенного водяного пара, Па; Θ_a^{max} — значение абсолютного потенциала при p/p_s , соответствующем заполнению влагой пор радиусом до 0,1 мм по механизму капиллярной конденсации.

Относительный потенциал влагопереноса Θ_o позволяет производить расчеты влажностного режима ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности в изотермических условиях. Использование в качестве эталонного тела влажного воздуха, свойства которого стабильны, повышает точность определения потенциала и позволяет достаточно точно определить теплофизические характеристики материалов, необходимые для расчета влажностного режима ограждающих конструкций. Однако потенциал Θ_o является характеристикой состояния влаги в материале в изотермических условиях, а влагоперенос в общем случае определяется $\nabla \Theta_o$ и ∇t , что существенно усложняет математическую модель влагопереноса и затрудняет разработку методов расчета влажностного режима наружных ограждений. Возникает необходимость в определении потенциала влажности, который был бы удобен как для оценки влажностного состояния материалов наружных ограждений, так и при решении проблемы влагопереноса в неизотермических условиях.

Потенциал влажности К. Кießl'я (generalized moisture potential), рассмотренный в работе Н.М. Künzel'я [122], определяется формулой:

$$\vartheta = \begin{cases} \varphi, & \text{при } \varphi \leq 0,9, \\ 1,7 + 0,1 \cdot \lg(r), & \text{при } \varphi > 0,9, \end{cases} \quad (2.6)$$

где φ — относительная влажность воздуха в порах материала; r — радиус капилляра, м.

Этот потенциал удобен для практического применения, но для его использования необходимо экспериментальное определение радиусов капилляров, что существенно повышает трудоемкость исследований.

В.Г. Гагарин и В.В. Козлов в качестве потенциала влажности используют функцию F , определяемую по формуле [74]:

$$F(w, t) = \varphi(w)p_s(t) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta, \quad (2.7)$$

где w — влагосодержание материала, кг/кг; t — температура, °С; φ — относительная влажность воздуха в порах материала (относительное давление водяного пара); p_s — давление насыщенного водяного пара, Па; μ — коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·с·Па); β — коэффициент влагопроводности материала, кг/[м·с·(кг/кг)].

Определенную таким образом функцию F они называли «потенциалом F », величина которого измеряется в Па. В работе [73] показано, что функция F является потенциалом векторного поля плотности потока влаги в материале. Правая часть уравнения (2.7) состоит из двух слагаемых, первое из которых является парциальным давлением водяного пара, а второе — «эквивалентным дополнительным давлением», обусловленным влагопроводностью материала. Градиент эквивалентного дополнительного давления определяет поток жидкой влаги в материале, численно равный потоку парообразной влаги, обусловленному таким же по величине градиентом парциального давления водяного пара.

Функция F определяется состоянием материала вне зависимости от того, в какой конструкции он находится. По известным коэффициентам паропроницаемости и влагопроводности материала определяется зависимость потенциала F от влагосодержания и температуры. Потенциал влажности F позволяет значительно упростить решение уравнения стационарного влагопереноса на основе диффузии водяного пара и влаго-

проводности. На основе потенциала F разработан инженерный метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов и температуры [73], удобный для практического применения. Однако использование в определении потенциала влажности F характеристик состояния и переноса влаги затрудняет отдельный анализ влажностного состояния и влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий.

2.2. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ШКАЛАМИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

Представляет интерес установить связь между различными шкалами потенциала влажности. Условно разделим рассмотренные в 2.1 потенциалы на две группы: *изотермические*, характеризующие влажностное состояние материалов при постоянной температуре (в обязательном сочетании с характеристикой неизотермического влагопереноса при градиенте температуры), и *неизотермические*. В группу изотермических потенциалов входят относительная влажность воздуха φ в порах материала, изотермический потенциал влагопереноса А.В. Лыкова Θ_L , относительный потенциал влагопереноса А.Г. Перехоженцева Θ_o , относительный потенциал влажности Е.И. Тертичника φ_Θ , потенциал влажности К. Кießl'я Θ . К неизотермическим относят экспериментальный потенциал влажности В.Н. Богословского Θ_B , потенциал F В.Г. Гагарина и В.В. Козлова. По термодинамическому смыслу неизотермический потенциал является полным потенциалом, с помощью которого можно учесть все силовые факторы, действующие на влагу.

Установим связь между изотермическими потенциалами влажности. Для решения поставленной задачи удобно в качестве базового принять изотермический потенциал влагопереноса Θ_L .

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и относительным потенциалом влагопереноса Θ_o устанавливается следующим образом. В сорбционной области для построения зависимости $\Theta_o(\Theta_L)$ использованы определение потенциала Θ_L по формуле (2.3), изотерма сорбции-десорбции фильтровальной бумаги при температуре $t_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $w_o(\varphi)_{t_o}$ [92] и определение потенциала Θ_o по формуле (2.4). Таким способом определены узлы (27; 3,9), (32,5; 5,55), (40,7; 9,95), (48,8; 17,5), (100; 35). Значение $\Theta_L = 100\text{ }^{\circ}\text{M}$ находится по равновесному влагосодержанию фильтровальной бумаги, соответствующему переходу от адсорбционно-капиллярной зоны к области массовой капиллярной конденсации при $\varphi = 0,96$ и $t_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [92]. В сверхсорбционной области определяем дополнительные узлы (200; 45,6), (300; 57,5). Значение $\Theta_L = 300\text{ }^{\circ}\text{M}$ находится по равновесному влагосодержанию фильтровальной бумаги, соответствующему переходу от зоны массовой капиллярной конденсации к капиллярно-насыщенной области при $\varphi = 0,995$ и $t_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [92]. На основании определенных узлов путем интерполяции данных кубическими сплайн-функциями построена зависимость $\Theta_o(\Theta_L)$ на интервале $27 \leq \Theta_L \leq 300\text{ }^{\circ}\text{M}$ в программе MathCAD [134]. График функции $\Theta_o(\Theta_L)$ представлен ниже на рис. 2.1.

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и относительной влажностью воздуха φ в порах материала устанавливается на основании построенной функции $\Theta_o(\Theta_L)$ и определения потенциала Θ_o (рис. 2.1).

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и относительным потенциалом влажности φ_{Θ} устанавливается следующим образом. На основании результатов, приведенных в работе [127], можно показать, что при $\varphi \leq 0,954$ $\varphi_{\Theta} = \varphi$ и для построения зависимости $\varphi_{\Theta}(w_o)$

используется изотерма сорбции фильтровальной бумаги при эталонной температуре. При $\varphi > 0,954$ зависимость $\varphi_{\Theta}(w_0)$ имеет вид:

$$\varphi_{\Theta}(w_0) = 1,052 w_0 + 0,741. \quad (2.8)$$

Формула (2.8) получена на основании определения φ_{Θ} по формуле (2.2) и определения Θ_B по формуле (2.1) при следующих параметрах: $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $k_1 = 6,052 \text{ Па/}^{\circ}\text{В}$; $k_2 = 1733 \text{ Па}$; $k_3 = 6,052 \text{ Па/}^{\circ}\text{В}$; $k_4 = 1733 \text{ Па}$; $\Theta_B^{m.s} = 100 \text{ }^{\circ}\text{В}$; $w_0^{m.s} = 0,246 \text{ кг/кг}$. Таким образом, зависимость $\varphi_{\Theta}(\Theta_L)$ можно определить по формуле:

$$\varphi_{\Theta}(\Theta_L) = \begin{cases} \varphi(\Theta_L), & 27 \leq \Theta_L \leq 82,1^{\circ}\text{М}, \\ 0,00259 \Theta_L + 0,741, & 82,1 < \Theta_L \leq 300^{\circ}\text{М}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Значение $\Theta_L = 27 \text{ }^{\circ}\text{М}$ соответствует $\varphi = 0,3$, а $\Theta_L = 82,1 \text{ }^{\circ}\text{М}$ — $\varphi = 0,954$. График функции $\varphi_{\Theta}(\Theta_L)$ приведен на рис. 2.1.

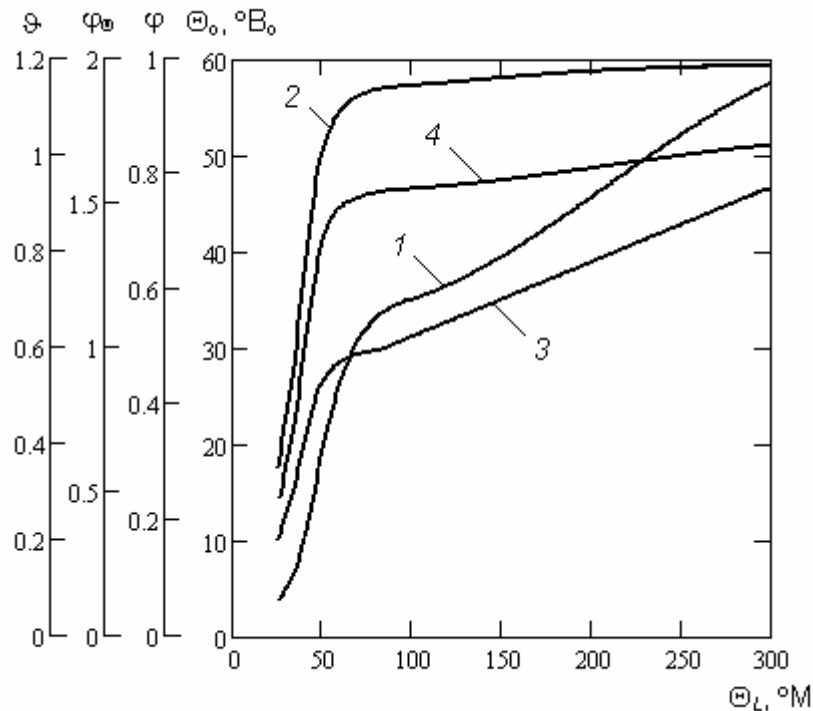


Рис. 2.1. Графики функций: 1 — $\Theta_0(\Theta_L)$; 2 — $\varphi(\Theta_L)$;
3 — $\varphi_{\Theta}(\Theta_L)$; 4 — $\Theta(\Theta_L)$

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и потенциалом влажности ϑ устанавливается следующим образом. По определению потенциала влажности ϑ (формула 2.6) при $\varphi \leq 0,9$ $\vartheta = \varphi(\Theta_L)$, при $\varphi > 0,9$ $\vartheta = \vartheta(r)$. Зависимость между радиусом капилляра r , заполненного жидкостью, и относительным парциальным давлением водяного пара p/p_s в капилляре при данной температуре устанавливается с помощью известного уравнения Кельвина по формуле:

$$\varphi(r) = \exp\left(-\frac{1,0745 \cdot 10^{-9}}{r}\right).$$

Таким образом, связь между потенциалами Θ_L и ϑ выражается формулой:

$$\vartheta(\Theta_L) = \begin{cases} \varphi(\Theta_L), & 27 \leq \Theta_L \leq 58,5^\circ \text{М}, \\ 1,7 + 0,1 \cdot \lg\left(-\frac{1,0745 \cdot 10^{-9}}{\ln(\varphi)}\right), & 58,5 < \Theta_L \leq 300^\circ \text{М}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Значение $\Theta_L = 58,5^\circ \text{М}$ соответствует $\varphi = 0,9$. График зависимости $\vartheta(\Theta_L)$ представлен на рис. 2.1.

Связь между изотермическими потенциалами влажности представлена в табл. 2.1. Установленная связь имеет место при произвольной температуре.

Таблица 2.1

Связь между изотермическими потенциалами влажности

Изотермический потенциал влагопереноса $\Theta_L, ^\circ \text{М}$	Относительный потенциал влагопереноса $\Theta_o, ^\circ \text{В}_o$	Относительная влажность воздуха φ	Относительный потенциал влажности φ_Θ	Потенциал влажности ϑ
27	3,9	0,3	0,3	0,3
32,5	5,55	0,4	0,4	0,4
40,7	9,95	0,6	0,6	0,6

Продолжение табл. 2.1

45	13,8	0,72	0,72	0,72
48,8	17,5	0,8	0,8	0,8
55	22,7	0,876	0,876	0,876
58,5	25	0,9	0,9	0,9
62	27	0,917	0,917	0,909
65	28,6	0,928	0,928	0,916
70	30,5	0,94	0,94	0,924
75	32	0,948	0,948	0,93
82,1	33,4	0,954	0,954	0,936
85	33,9	0,956	0,961	0,938
90	34,4	0,958	0,974	0,94
95	34,7	0,959	0,987	0,941
100	35	0,96	1	0,942
136	37,9	0,97	1,09	0,954
165	41,2	0,977	1,17	0,967
200	45,6	0,985	1,26	0,985
238	50,6	0,991	1,36	1,01
272	54,7	0,994	1,45	1,02
300	57,5	0,995	1,52	1,03

Установим теперь связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и экспериментальным потенциалом влажности Θ_B . Используем связь между экспериментальным потенциалом влажности Θ_B и относительным потенциалом влажности φ_Θ , определяемую формулой (2.2). Используемые в этой формуле значения $\Theta_B^{m.s}$ в зависимости от температуры приведены в таблице [127]. Путем интерполяции табличных данных кубическими сплайн-функциями построена зависимость $\Theta_B^{m.s}(t)$ на интервале $0 \leq t \leq 30$ °C в программе MathCAD [134]. Значения коэффициентов в формуле (2.2) определяются в зависимости от Θ_B и температуры: при $40 \leq \Theta_B < 616$ °В и $t \leq 16,9$ °C $k_1 = 6,052$ Па/°В; $k_2 = 1733$ Па;

$k_3 = 70,158 \text{ Па/}^\circ\text{В}$; $k_4 = -568,3 \text{ Па}$; при $40 \leq \Theta_B < 616 \text{ }^\circ\text{В}$ и $t > 16,9 \text{ }^\circ\text{С}$
 $k_1 = 6,052 \text{ Па/}^\circ\text{В}$; $k_2 = 1733 \text{ Па}$; $k_3 = 6,052 \text{ Па/}^\circ\text{В}$; $k_4 = 1733 \text{ Па}$. Используя зависимость $\varphi_\Theta(\Theta_B, t)$, данную формулой (2.2), и ранее установленную зависимость $\varphi_\Theta(\Theta_L)$ по формуле (2.9), получим искомую зависимость $\Theta_B(\Theta_L, t)$. График функции $\Theta_B(\Theta_L, t)$ представлен на рис. 2.2.

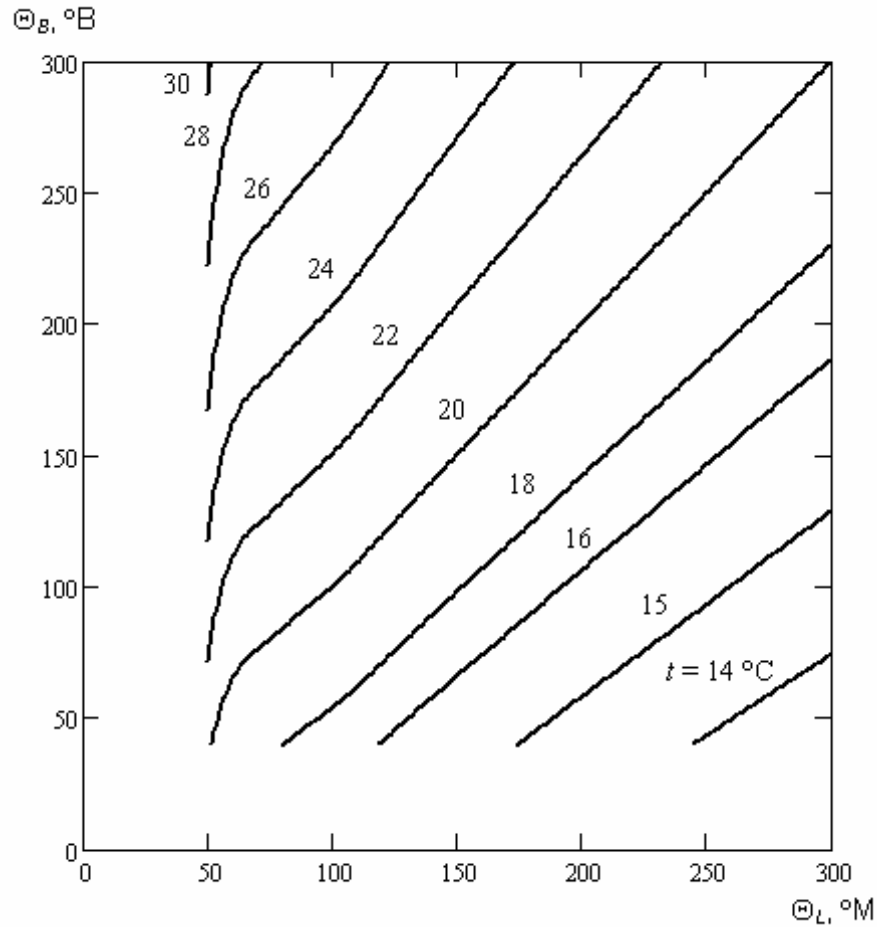


Рис. 2.2. График функции $\Theta_B(\Theta_L, t)$

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и экспериментальным потенциалом влажности Θ_B приведена в табл. 2.2.

В заключение установим связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и потенциалом F . Поскольку в определении потенциала Θ_L в качестве эталонного тела используется фильтровальная бумага,

будем определять потенциал F для материалов, близких по теплофизическим свойствам к фильтровальной бумаге.

Таблица 2.2

**Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L
и экспериментальным потенциалом влажности Θ_B**

Θ_L , °М	Значения Θ_B , °В, при температуре t , °С									
	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30
50	—	—	—	—	—	71,5	118	167	223	287
52	—	—	—	—	40,5	83,2	131	182	239	306
60	—	—	—	—	64,6	110	162	217	278	350
65	—	—	—	—	71,8	119	171	227	290	363
70	—	—	—	—	76,3	124	176	234	297	371
80	—	—	—	40	84	132	186	244	309	385
100	—	—	—	53,9	100	151	207	267	335	414
120	—	—	41	70,8	119	172	231	295	366	449
175	—	40,3	86	120	175	235	302	375	456	550
212	—	66,5	116	152	212	277	350	428	515	616
245	40,1	89,6	142	181	245	314	391	475	568	—
275	58,8	111	167	208	275	348	430	518	616	—
300	74,1	129	187	230	300	376	462	554	—	—

Примечание. Знак «—» в таблице означает выход значения Θ_B за пределы рассматриваемого интервала $40 \leq \Theta_B < 616$ °В.

При сорбционной влажности $F(w, t) = \varphi(w)p_s(t)$. Зависимость $\varphi(w)$ на интервале $0,077 \leq w \leq 0,3$ кг/кг построена на основании табличных данных [88] для сосны ($\rho_0 = 500$ кг/м³) при температуре 20 °С путем интерполяции данных кубическими сплайн-функциями. В [122] приведена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры, определяемая эмпирическим уравнением при $-20 \leq t \leq 30$ °С:

$$p_s(t) = 611 \exp\left(\frac{at}{b+t}\right), \quad (2.11)$$

с коэффициентами

$a = 22,44, b = 272,44$ °C при $-20 \leq t < 0$ °C;

$a = 17,08, b = 234,18$ °C при $0 \leq t \leq 30$ °C.

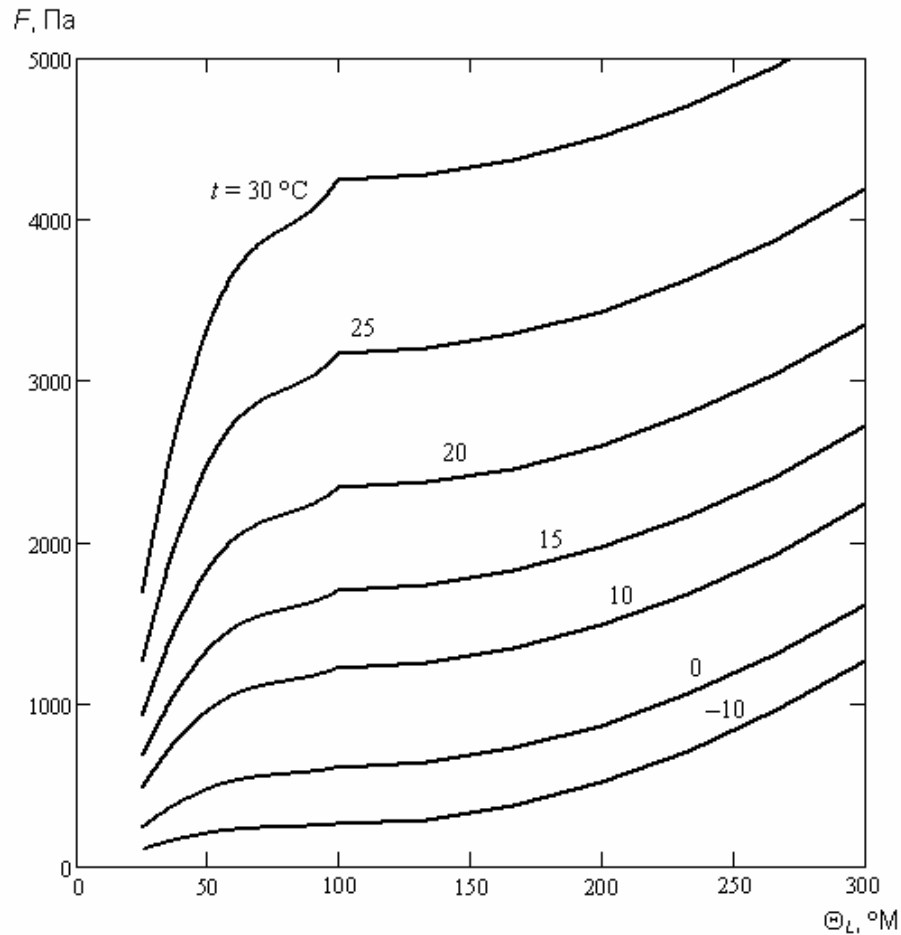


Рис. 2.3. График функции $F(\Theta_L, t)$

При сверхсорбционной влажности $F(w, t) = p_s(t) + \frac{1}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta$. Коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,0722 \cdot 10^{-9}$ кг/(м·с·Па) [88]. Зависимость $\beta(w)$ на интервале $0,3 \leq w \leq 2,5$ кг/кг построена путем интерполяции кубическими сплайн-функциями табличных данных [88] для древесных опилок. Интегрируя функцию $\beta(w)$ по переменному верхнему пределу, получим функцию $F(w, t)$ в сверхсорбционной области.

Используя определение Θ_L по формуле (2.3), находим функцию $F(\Theta_L, t)$. График функции $F(\Theta_L, t)$ представлен на рис. 2.3.

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и потенциалом F приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Связь между изотермическим потенциалом влагопереноса Θ_L и потенциалом F

Θ_L , °М	Значения F , Па, при температуре t , °С								
	–10	–5	0	5	10	15	20	25	30
25,7	104	161	244	349	492	683	937	1269	1700
30,7	130	201	306	437	615	854	1171	1587	2125
36,3	156	241	367	524	738	1025	1406	1904	2550
43,3	182	281	428	611	861	1196	1640	2221	2975
52	208	321	489	699	984	1367	1874	2539	3400
68,3	234	361	550	786	1107	1537	2108	2856	3825
100	260	402	611	873	1230	1708	2343	3174	4250
167	378	520	729	991	1348	1827	2461	3292	4368
267	965	1106	1316	1578	1935	2413	3047	3878	4955
300	1270	1412	1622	1884	2240	2719	3353	4184	5261

Установленная связь между различными шкалами потенциала влажности кроме чисто познавательного имеет практический интерес. Возможность перехода от одной шкалы потенциала влажности к другой способствует более глубокому пониманию теории потенциала влажности и дальнейшему обобщению этой теории для прогноза сложных процессов тепло- и массообмена в наружных ограждениях зданий.

2.3. АБСОЛЮТНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВЛАЖНОСТИ

Для определения новой шкалы потенциала влажности воспользуемся термодинамическим методом исследования процессов переноса тепла и массы влаги. Этот метод базируется на законе сохранения и превраще-

ния энергии и законе сохранения массы вещества, которые составляют всеобщий закон природы.

В основу теории потенциала положены два закона [124]. Согласно первому закону, *в состоянии термодинамического равновесия потенциалы тела в различных его частях равны между собой*. Это означает, что в условиях, когда имеет место равновесие тепла и влаги в материале, или в системе, состоящей из нескольких материалов, потенциалы во всех точках системы одинаковы. Второй закон положения о потенциале состоит в том, что *перенос энергии (массы) происходит в направлении от большего потенциала к меньшему*.

Согласно терминологии, принятой в термодинамике, влажный материал ограждающих конструкций можно считать открытой гетерогенной системой, состоящей из нескольких компонентов: скелета материала (геометрия, состав и химические свойства которого в процессе влагопереноса остаются неизменными), воздуха и влаги [133]. Влага в строительных материалах может находиться в виде нескольких фаз: парообразной (водяной пар), жидкой (капиллярная и пленочная влага) и твердой (лед). В объеме влаги необходимо выделить поверхностные слои в отдельную фазу. Различные фазы влаги в материале находятся в контакте между собой, и между ними происходит тепло- и массообмен.

С помощью термодинамического метода, используя в качестве характеристической функции свободную энергию, а в качестве независимых переменных температуру, объем и массу, можно написать уравнения состояния отдельных компонентов и фаз влаги для рассматриваемой системы. Термодинамическое равновесие в точке, а также право суммирования емкостных показателей (энтропии и массы) позволяет вместо системы уравнений состояния отдельных фаз влаги или компонентов написать одно уравнение состояния влажного материала в виде [1, 133]:

$$dF = -S dT + \Theta dM, \quad (2.12)$$

где F , S , M — свободная энергия, удельная энтропия и масса влажного материала (всей системы); T — температура; Θ — потенциал влажности.

В уравнении (2.12) первое слагаемое определяет теплообмен, второе — влагообмен. Из уравнения состояния следует, что процессы тепло- и массообмена протекают совместно, взаимно влияя друг на друга.

Потенциал влажности Θ нельзя определить непосредственным измерением в эксперименте. Поэтому уравнение состояния влажного материала следует рассматривать только как теоретическую основу явления. Пользуясь правом произвольного выбора шкалы [1], величину Θ можно измерять различными показателями влажностного состояния любого тела.

За основу построения шкалы потенциала влажности примем адсорбционный потенциал Гиббса Θ_μ , который равен изменению химического потенциала адсорбата при переходе его из стандартного состояния (жидкость, насыщенный водяной пар) на поверхность адсорбента [125]. Между относительным парциальным давлением водяного пара в материале p/p_s и адсорбционным потенциалом Гиббса при данной температуре существует термодинамическое соотношение [125]:

$$\Theta_\mu = \frac{10^{-3} RT}{M} \ln \left(\frac{p}{p_s} \right), \quad (2.13)$$

где R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К; M — молярная масса адсорбата, кг/моль; p — парциальное давление водяного пара в материале, Па; p_s — давление насыщенного водяного пара, Па.

Из формулы (2.13) видно, что потенциал Θ_μ зависит от p/p_s и температуры. Определяющим параметром для этого потенциала является относительное парциальное давление водяного пара в материале p/p_s . Следовательно, исходным эталонным телом для адсорбционного потенциа-

ла Гиббса является влажный воздух, содержащийся в порах материала. Использование в качестве эталонного тела влажного воздуха, свойства которого стабильны, исключает влияние вида материала и повышает точность определения потенциала. Адсорбционный потенциал Гиббса является четким показателем влажностного состояния материалов в сорбционной области. Однако его применение в сверхсорбционной области может привести к снижению точности вычислений, так как здесь наблюдается интенсивный рост влагосодержания при небольшом изменении адсорбционного потенциала [120].

Для удобства практического применения шкалы потенциала влажности изменим формулу (2.13) следующим образом. Используем выражение (2.5) для абсолютного потенциала влагопереноса, полученное А.Г. Перехоженцевым на основе фундаментального адсорбционного уравнения Гиббса применительно к влажному материалу. В качестве определяющего параметра для этого потенциала принято изменение парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара ($1 - p/p_s$). Исключим влияние температуры на величину потенциала, приняв значение температуры равным эталонной температуре ($T_0 = 293,15$ К). С учетом этого при стандартных параметрах водяного пара ($R = 8,31451$ Дж/(моль·К), $M = 18,0153 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) и эталонной температуре получим следующую формулу:

$$\theta = -135,3 \ln(1 - \varphi), \quad (2.14)$$

где $\varphi = p/p_s$ — относительное парциальное давление водяного пара в материале при эталонной температуре.

Абсолютный потенциал влажности θ , кДж/кг, определяемый формулой (2.14), показывает изменение удельной энергии системы «влажный материал — воздух» при изменении парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного

пара при эталонной температуре $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Корниенко С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 88—89). Определение абсолютного потенциала влажности θ исключает влияние вида материала и температуры, что полностью согласуется с идеей В.Н. Богословского, положенной в основу определения экспериментального потенциала влажности [124].

Если влажное тело имеет произвольную температуру, то его абсолютный потенциал равен абсолютному потенциалу тела, которое находится с ним в состоянии неизотермического влажностного равновесия и имеет эталонную температуру $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это положение следует из первого закона теории потенциала влажности В.Н. Богословского и определения абсолютного потенциала влажности, данного формулой (2.14).

Аналогично влажному материалу абсолютный потенциал влажности воздуха определяется по формуле (2.14), в которой в качестве φ принимается относительная влажность воздуха. В состоянии влажностного равновесия между материалом и окружающей его воздушной средой абсолютные потенциалы влажности материала и воздуха равны.

Установим границы шкалы абсолютного потенциала влажности на основе теории капиллярной конденсации влаги в материале при эталонной температуре.

В работе [135] показано, что пористый материал можно моделировать в виде системы не связанных между собой цилиндрических капилляров разных радиусов. Известно, что парциальное давление водяного пара p в капиллярах при данной температуре меньше давления насыщенного водяного пара p_s свободной жидкости при той же температуре. Понижение давления пара в капиллярах приводит к капиллярной конденсации в материале. Зависимость между радиусом капилляра r , заполненного жидкостью, и относительным парциальным давлением водяного

пара p/p_s в капилляре при данной температуре устанавливается с помощью известного уравнения Кельвина:

$$\ln\left(\frac{p}{p_s}\right) = -\frac{2\sigma M}{\rho R T r}, \quad (2.15)$$

где σ — поверхностное натяжение воды, Н/м; M — молярная масса воды, кг/моль; ρ — плотность воды, кг/м³; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К.

Применяя уравнение (2.15) к рассматриваемой модели пористого материала, имеем, что при фиксированных значениях температуры и давления пара p в материале происходит объемное заполнение влагой пор с радиусом, равным или меньшим значения r , определяемого из (2.15). При эталонной температуре $t_0 = 20$ °С и стандартных параметрах ($\sigma = 0,07269$ Н/м; $M = 18,0153 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\rho = 1000$ кг/м³; $R = 8,31451$ Дж/(моль·К); $T = 293,15$ К) уравнение (2.15) имеет вид:

$$p/p_s = \exp\left(-1,0745 \cdot 10^{-9} \frac{1}{r}\right). \quad (2.16)$$

Область применимости формулы (2.16) ограничена физической возможностью существования мениска жидкости в капилляре.

Как показано в [135], нижней границей этой области является $p/p_s = 0,3$, что соответствует объемному заполнению влагой пор радиусом $r = 0,9 \cdot 10^{-9}$ м, определенном из уравнения (2.16). Капиллярная конденсация в порах с меньшим радиусом происходит по механизму, зависящему только от свойств влаги, но не от размера пор, поэтому уравнение Кельвина при $p/p_s < 0,3$ неприменимо. Верхней границей области применимости уравнения (2.16) является $p/p_s = 0,9999$ [58, 118], что соответствует заполнению влагой пор радиусом $r = 1,07 \cdot 10^{-5}$ м. При $p/p_s > 0,9999$ давление пара в материале практически равно давлению

насыщенного пара свободной жидкости, уравнение Кельвина в этом случае также неприменимо.

Таким образом, область капиллярной конденсации в материале, определяемая уравнением Кельвина, ограничена условием:

$$0,3 \leq p/p_s \leq 0,9999 \quad (0,9 \cdot 10^{-9} \leq r \leq 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ м}).$$

Внутри рассматриваемой области выделим зону массовой капиллярной конденсации, где наиболее интенсивно происходит рост влагосодержания в материале. На основе экспериментальных исследований в [92] показано, что массовая капиллярная конденсация в материале наступает при $p/p_s = 0,96$ ($r = 2,63 \cdot 10^{-8}$ м), а завершается при $p/p_s = 0,99$ — $0,995$ ($r = 1,07$ — $2,14 \cdot 10^{-7}$ м).

Для приведенных выше значений p/p_s по формуле (2.14) определим значения абсолютного потенциала влажности θ .

Таким образом, область капиллярной конденсации в материалах ограждающих конструкций можно разделить на три зоны:

адсорбционно-капиллярная (сорбционная) при $48,2 \leq \theta < 436$ кДж/кг; заполнение влагой пор материала обусловлено полимолекулярной адсорбцией и капиллярной конденсацией;

массовой капиллярной конденсации при $436 \leq \theta \leq 717$ кДж/кг; заполнение основного объема пор происходит за счет интенсивной капиллярной конденсации в материале;

капиллярно-насыщенная при $717 < \theta \leq 1246$ кДж/кг; действие капиллярных сил ослабевает, происходит постепенный переход к состоянию водонасыщения материала.

Пользуясь предложенным зонированием области капиллярной конденсации, определим равновесное влагосодержание материалов в шкале абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре.

В сорбционной области для построения зависимости $w(\theta)_{t_0}$ используется изотерма сорбции-десорбции $w(p/p_s)_{t_0}$ при $t_0 = 20$ °С и определение абсолютного потенциала влажности по формуле (2.14). В сверхсорбционной области зависимость $w(\theta)_{t_0}$ строится по трем точкам: при $\theta = 436$ кДж/кг равновесное влагосодержание материалов принимается равным максимальному сорбционному влагосодержанию $w_{m.s}$, равновесному $p/p_s = 0,96$; при $\theta = 717$ кДж/кг — свободному капиллярному насыщению w_m ; при $\theta = 1246$ кДж/кг — максимальному водонасыщению материала w_{max} .

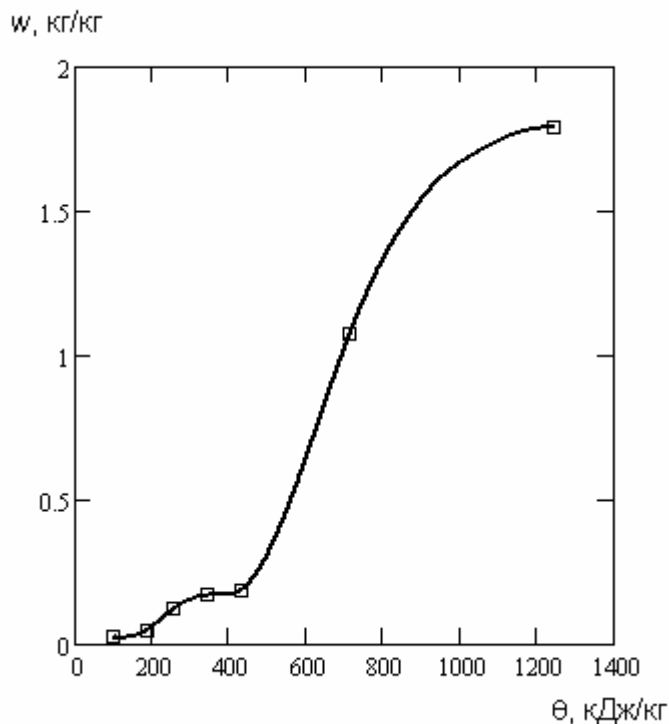


Рис. 2.4. График зависимости $w(\theta)_{t_0}$ для газосиликата ($\rho_0 = 390$ кг/м³) при эталонной температуре $t_0 = 20$ °С

На рис. 2.4 представлен график зависимости $w(\theta)_{t_0}$, построенный по приведенной выше методике для газосиликата ($\rho_0 = 390$ кг/м³). Маркерами показаны экспериментальные данные по влагосодержанию, соответствующие значениям потенциала влажности. Влагосодержание w_m , соответствующее свободному капиллярному насыщению, принято по

данным [106]. Сплошная линия представляет собой интерполяцию данных с помощью линейных сплайн-функций. Из графика (рис. 2.4) видно, что наиболее интенсивный рост влагосодержания происходит в области массовой капиллярной конденсации, при переходе к капиллярно-насыщенной зоне рост влагосодержания замедляется.

Полученная зависимость $w(\theta)_{t_0}$ является обобщением изотермы сорбции-десорбции при эталонной температуре на весь участок увлажнения капиллярно-пористого материала в шкале абсолютного потенциала влажности.

В табл. 2.4 приведены значения равновесного влагосодержания строительных материалов в шкале абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре, полученные на основе имеющихся в литературе экспериментальных данных [1, 87, 106].

Таблица 2.4

Значения равновесного влагосодержания w строительных материалов, соответствующие значениям абсолютного потенциала влажности θ при эталонной температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$

θ , кДж/кг	Значения $w \times 10^2$, кг/кг, для материалов									
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
87	0,37	3,1	2,6	6,2	2,3	1,1	0,09	0,37	0,36	1,3
174	0,69	4,9	4,7	8,1	3,5	1,7	0,23	0,54	0,73	1,8
261	1,1	8,9	7,8	9,3	12,3	2,6	0,41	0,75	1,4	2,3
348	1,3	10,9	9,3	10	16,7	3,1	0,49	0,85	1,7	2,5
436	1,4	11,8	10,0	11	18,7	3,3	0,53	0,9	1,9	2,6
523	1,98	16,1	15,4	12,3	36,4	4,07	2,74	2,47	15,9	—
610	2,93	23,3	24,7	14,8	66,8	5,32	6,67	5,24	41,8	—
697	3,97	31	34,7	19,4	100	6,69	11	8,3	72,4	—
784	4,8	37,4	42,8	—	128	7,82	14,5	10,8	—	—
871	5,37	42	48,4	—	148	8,64	17	12,6	—	—
958	5,72	45	52	—	162	9,2	18,5	13,7	—	—

Продолжение табл. 2.4

1045	5,91	47	53,9	—	170	9,57	19,4	14,4	—	—
1132	5,99	48,1	54,8	—	176	9,8	19,8	14,8	—	—
1246	6	48,8	55	—	179	9,96	20	15	—	—

Примечание. В указанной таблице используются следующие материалы: А — бетон тяжелый ($\rho_0 = 2160 \text{ кг/м}^3$); Б — керамзитобетон ($\rho_0 = 1180 \text{ кг/м}^3$); В — пенобетон ($\rho_0 = 775 \text{ кг/м}^3$); Г — газобетон ($\rho_0 = 700 \text{ кг/м}^3$); Д — газосиликат ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$); Е — раствор цементный ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$); Ж — кирпич керамический ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$); И — кирпич силикатный ($\rho_0 = 1780 \text{ кг/м}^3$); К — минераловатные плиты ($\rho_0 = 350 \text{ кг/м}^3$); Л — пенополистирол ($\rho_0 = 30 \text{ кг/м}^3$).

Установим связь между абсолютным потенциалом влажности θ и экспериментальным потенциалом влажности Θ_B . Используя определение относительного потенциала влажности φ_θ по формуле (2.2), находим зависимость $\varphi_\theta(\Theta_B)_{t_0}$ при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ на интервале $82,1 \leq \Theta_B \leq 300^\circ\text{В}$, при этом значению $\Theta_B = 82,1^\circ\text{В}$ соответствует $\varphi_\theta = 0,954$, а $\Theta_B = 300^\circ\text{В}$ — $\varphi_\theta = 1,52$. На основании узлов, определенных из табл. 2.1, путем интерполяции данных кубическими сплайн-функциями строим зависимость $\varphi(\varphi_\theta)$ при $0,954 \leq \varphi_\theta \leq 1,52$ [134], при этом значению $\varphi_\theta = 0,954$ соответствует $\varphi = 0,954$, а $\varphi_\theta = 1,52$ — $\varphi = 0,995$. Пользуясь определением абсолютного потенциала влажности по формуле (2.14), строим зависимость $\theta(\varphi)$ на интервале $0,954 \leq \varphi \leq 0,995$. На основании построенной цепочки зависимостей находим искомую зависимость $\theta(\Theta_B)$ при $82,1 \leq \Theta_B \leq 300^\circ\text{В}$. На интервале $20,3 \leq \Theta_B < 82,1^\circ\text{В}$ зависимость $\theta(\Theta_B)$ строим на основании определений θ и Θ_B , используя изотерму сорбции фильтровальной бумаги $w_0(\varphi)_{t_0}$ при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ [127]. Сшивкой отрезков полиномов строим зависимость $\theta(\Theta_B)$ на интервале $20,3 \leq \Theta_B \leq 300^\circ\text{В}$. Колебания относительных ошибок функции $\theta(\Theta_B)$ на узлах от $-4,76$ до $2,75\%$. График зависимости $\theta(\Theta_B)$ приведен на рис. 2.5. В табл. 2.5 показана связь между шкалами θ и Θ_B .

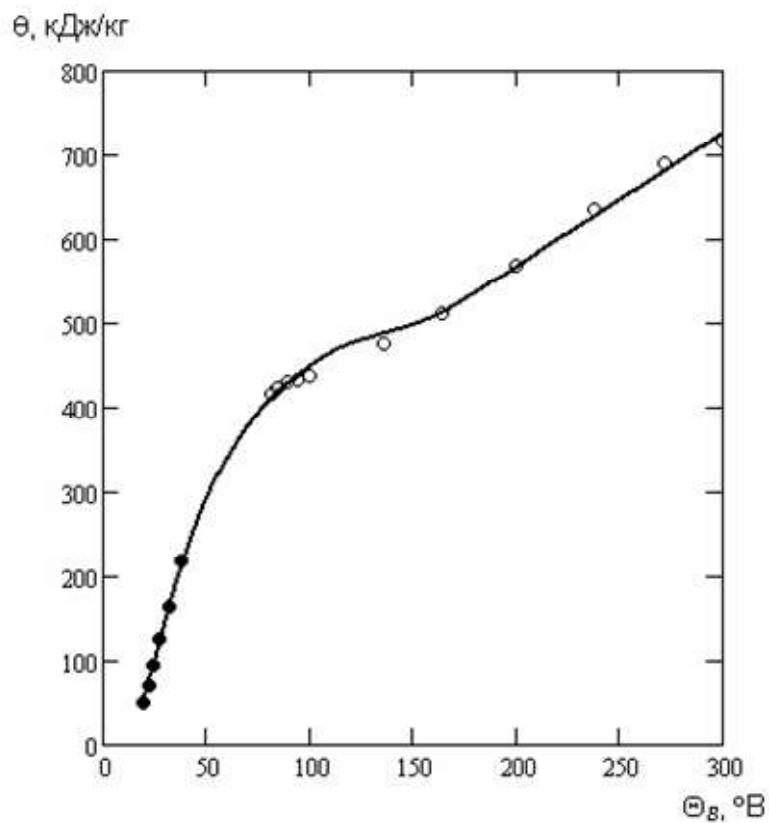
Рис. 2.5. График функции $\theta(\Theta_B)$

Таблица 2.5

**Связь между абсолютным потенциалом влажности θ
и экспериментальным потенциалом влажности Θ_B**

$\Theta_B, ^\circ B$	$\theta, \text{кДж/кг}$	$\Theta_B, ^\circ B$	$\theta, \text{кДж/кг}$
20,3	50,7	90	428
22,5	72,9	95	439
25	97,2	100	448
30	143	110	464
35	186	120	475
40	224	130	483
45	257	140	490
50	287	160	507
55	314	180	535
60	337	200	566
65	357	220	598

Продолжение табл. 2.5

70	375	240	630
75	391	260	661
80	405	280	693
85	418	300	725

Связь между шкалами θ и Θ_B может быть установлена другим способом на основании зависимости равновесного влагосодержания фильтровальной бумаги от абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре $w_o(\theta)_{to}$ и определения экспериментального потенциала влажности Θ_B по формуле (2.1).

На рис. 2.6, *а* приведены графики зависимости $\theta(\Theta_B)$, полученной указанными способами (1 — сшивкой отрезков полиномов; 2 — на основании зависимости $w_o(\theta)_{to}$). Расхождение данных составляет от $-7,42$ до $7,06$ % на интервале $50 \leq \Theta_B < 300$ °В (рис. 2.6, *б*), что подтверждает корректность вышеприведенных способов получения зависимости $\theta(\Theta_B)$.

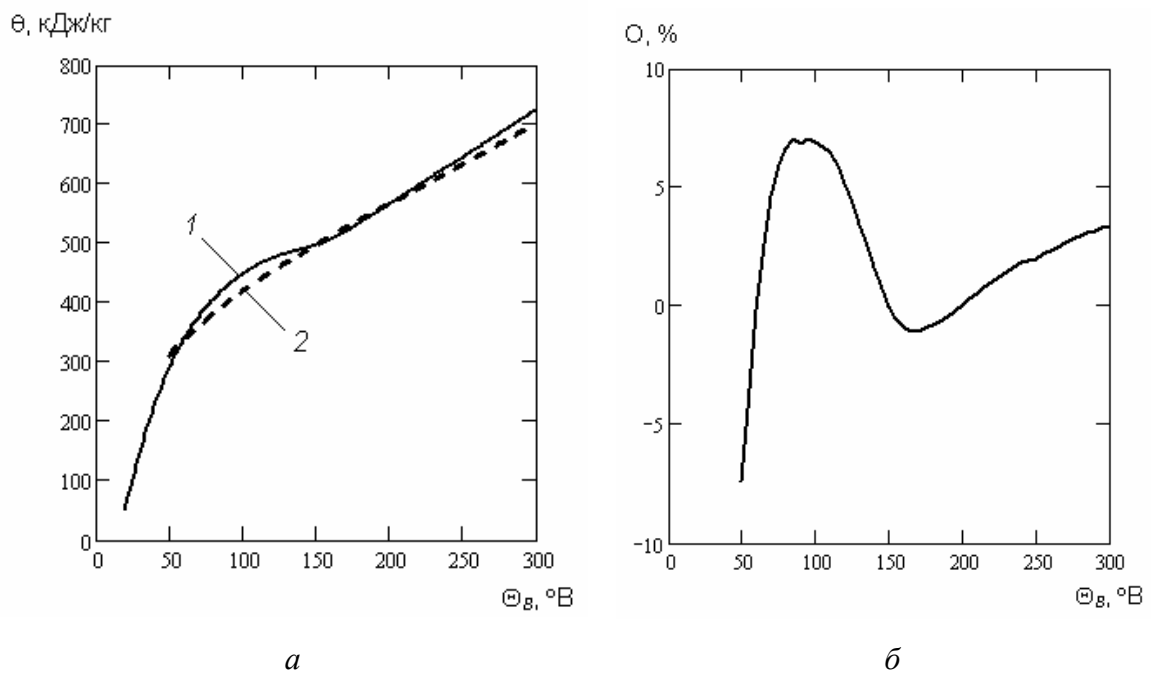


Рис. 2.6. Сравнение различных способов получения зависимости $\theta(\Theta_B)$

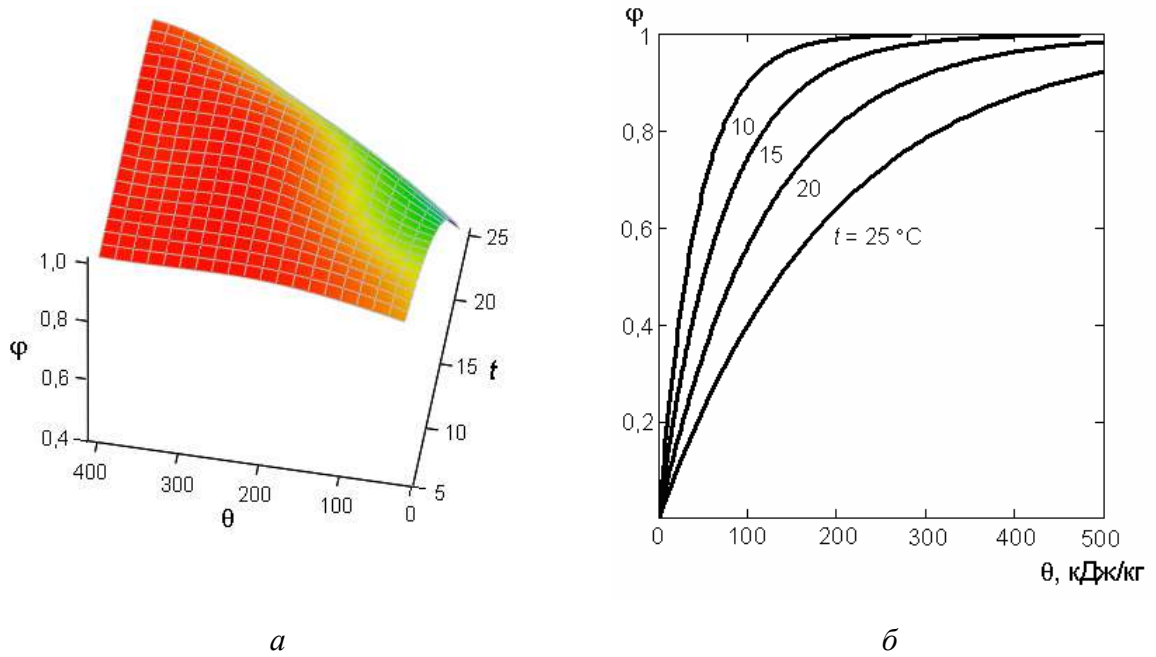


Рис. 2.7. График зависимости $\varphi(\theta, t)$ в виде: *a* — поверхности; *б* — семейства изотерм

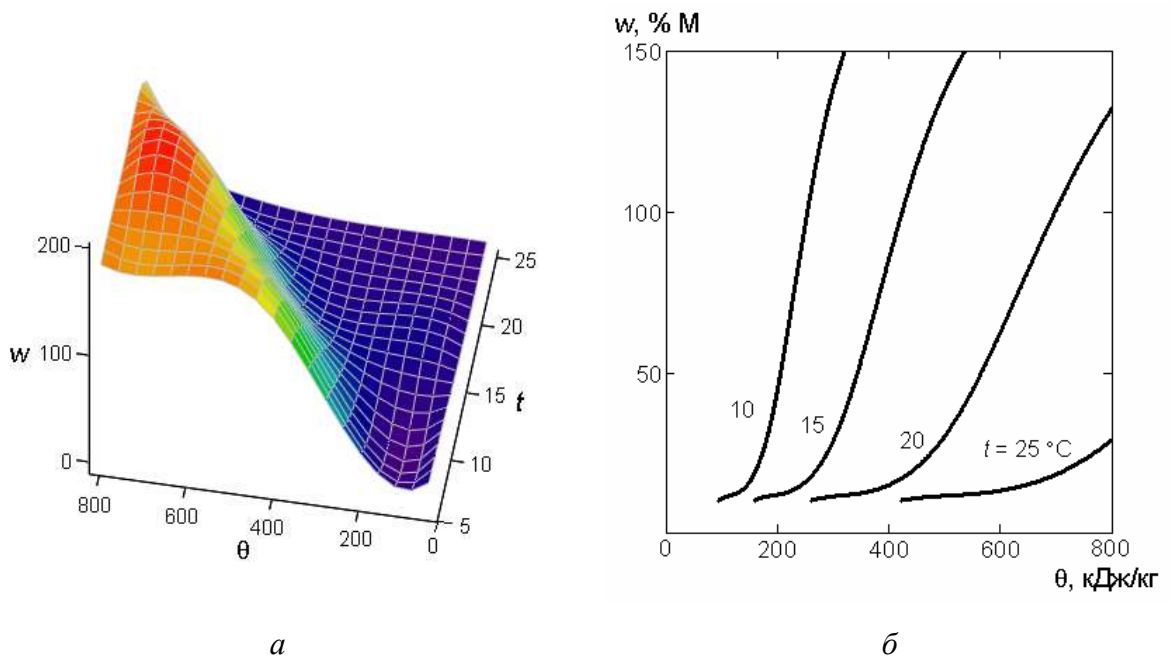


Рис. 2.8. График зависимости $w(\theta, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$) в виде:
a — поверхности; *б* — семейства изотерм

Пользуясь установленной связью между различными потенциалами влажности, можно показать, что абсолютный потенциал влажности характеризует влажностное состояние материалов и воздушной среды в неизотермических условиях.

На рис. 2.7 и 2.8 представлены графики зависимостей $\varphi(\theta, t)$ для воздуха и $w(\theta, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$), построенные на основании экспериментальных данных и установленной связи между различными шкалами потенциала влажности. Графики получены путем двумерной сплайн-интерполяции данных в системе MathCAD [134].

График функции $\varphi(\theta, t)$ построен на основании ранее установленных зависимостей $\Theta_B(\Theta_L, t)$ [табл. 2.2], $\theta(\Theta_B)$ [табл. 2.5] и экспериментально полученной зависимости $\varphi(\Theta_L)$ [табл. 2.1]. Можно отметить хорошее совпадение изотермы $\varphi(\theta)_{\text{ю}}$ зависимости $\varphi(\theta, t)$ с графиком функции $\varphi(\theta)$, полученным на основании определения абсолютного потенциала влажности воздушной среды (рис. 2.7). Максимальная относительная ошибка $\delta_{\text{max}} = 5,8 \%$.

График функции $w(\theta, t)$ для газосиликата построен на основании зависимостей $\Theta_B(\Theta_L, t)$, $\theta(\Theta_B)$ и $w(\Theta_L)$ [92]. Из графика (рис. 2.8, б) видно, что с ростом абсолютного потенциала влажности влагосодержание материала при данной температуре возрастает. При фиксированном значении θ с ростом температуры влагосодержание уменьшается. В области сверхсорбционного увлажнения материала с повышением температуры интенсивность роста влагосодержания уменьшается. С ростом температуры область сорбционного увлажнения материала увеличивается. Можно также отметить хорошее совпадение изотермы зависимости $w(\theta, t)$ при эталонной температуре с графиком функции $w(\theta)_{\text{ю}}$, построенным на основании табл. 2.4 (рис. 2.8). Максимальная относительная ошибка $\delta_{\text{max}} = 7,8 \%$.

Установленная связь между различными шкалами потенциала влажности позволяет строить зависимости равновесного влагосодержания в шкале абсолютного потенциала влажности при разных температурах для широкого круга материалов.

Таким образом, абсолютный потенциал влажности θ является характеристикой влажностного состояния материалов ограждающих конструкций и воздушной среды в неизотермических условиях.

2.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВЛАЖНОСТИ

Сложность зависимостей $w(\theta, t)$ и $\varphi(\theta, t)$ вызывает затруднения в применении шкалы θ для оценки влажностного состояния материалов ограждающих конструкций и воздушной среды. Возникает необходимость в показателе, зависящем от абсолютного потенциала влажности и температуры, однозначно определяющем влажностное состояние материала и воздуха.

С целью определения такого показателя исходим из аналогии влагопереноса на основе потенциала влажности с теорией диффузии водяного пара в сорбирующей среде [87]. Подобно тому, как в этой теории относительная влажность воздуха φ характеризует состояние влаги в материале, так и в теории потенциала влажности определим *относительный потенциал влажности* θ_φ по формуле:

$$\theta_\varphi = \frac{\theta}{\theta_{m.s}}, \quad (2.17)$$

где θ — абсолютный потенциал влажности при данном температурно-влажностном состоянии, кДж/кг; $\theta_{m.s}$ — абсолютный потенциал влажности, кДж/кг, при той же температуре, соответствующий максимальному сорбционному влагосодержанию материала при $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

Относительный потенциал влажности воздуха определим по формуле (2.17), приняв в ней в качестве θ абсолютный потенциал влажности воздуха при данном температурно-влажностном состоянии, $\theta_{m.s}$ — абсолютный потенциал влажности воздуха при той же температуре, соответствующий относительной влажности воздуха $\varphi = 0,96$. В состоянии влажностного равновесия относительные потенциалы влажности материала и воздуха равны.

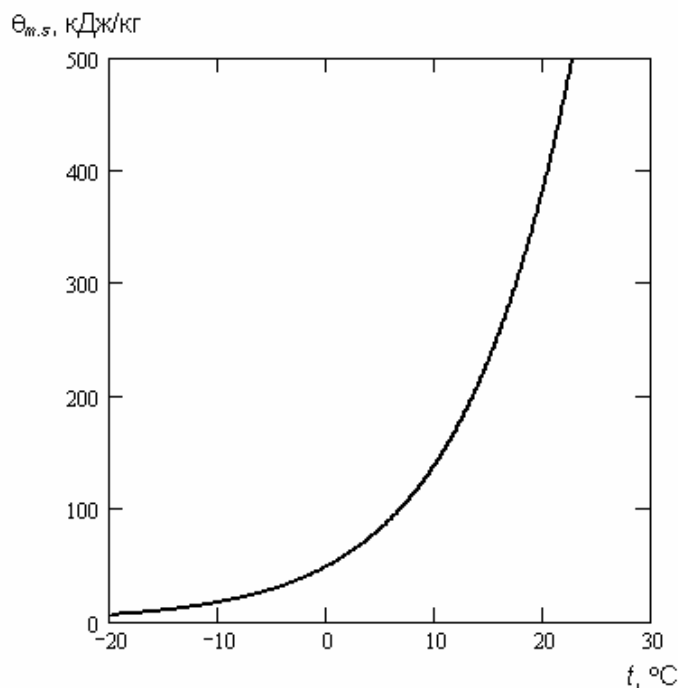


Рис. 2.9. График зависимости $\theta_{m.s}(t)$

Зависимость $\theta_{m.s}$ от температуры можно установить на основании зависимости $\varphi(\theta, t)$ (рис. 2.7, б). Определяя множество значений θ , соответствующих относительной влажности воздуха $\varphi = 0,96$ при разных температурах, путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов получим зависимость $\theta_{m.s}(t)$ при $-20 \leq t \leq 30$ °C в виде:

$$\theta_{m.s}(t) = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp(-0,106 t)}. \quad (2.18)$$

Погрешность аппроксимации функцией (2.18) не превышает 10 %. График зависимости $\theta_{m.s}(t)$, определяемой формулой (2.18), представлен на рис. 2.9.

Покажем, что относительный потенциал влажности θ_φ характеризует влажностное состояние воздушной среды.

На основании зависимости $\varphi(\theta, t)$ и определения θ_φ по формуле (2.17) получим зависимость $\varphi(\theta_\varphi, t)$. Из графика зависимости $\varphi(\theta_\varphi, t)$ видно (рис. 2.10, а), что температура оказывает незначительное влияние на изменение относительной влажности воздуха в шкале относительного потенциала влажности. Это позволяет определить зависимость $\varphi(\theta_\varphi)$ формулой:

$$\varphi(\theta_\varphi) = 1 - \exp(-3,219\theta_\varphi). \quad (2.19)$$

График этой зависимости в виде жирной линии представлен на рис. 2.10, а.

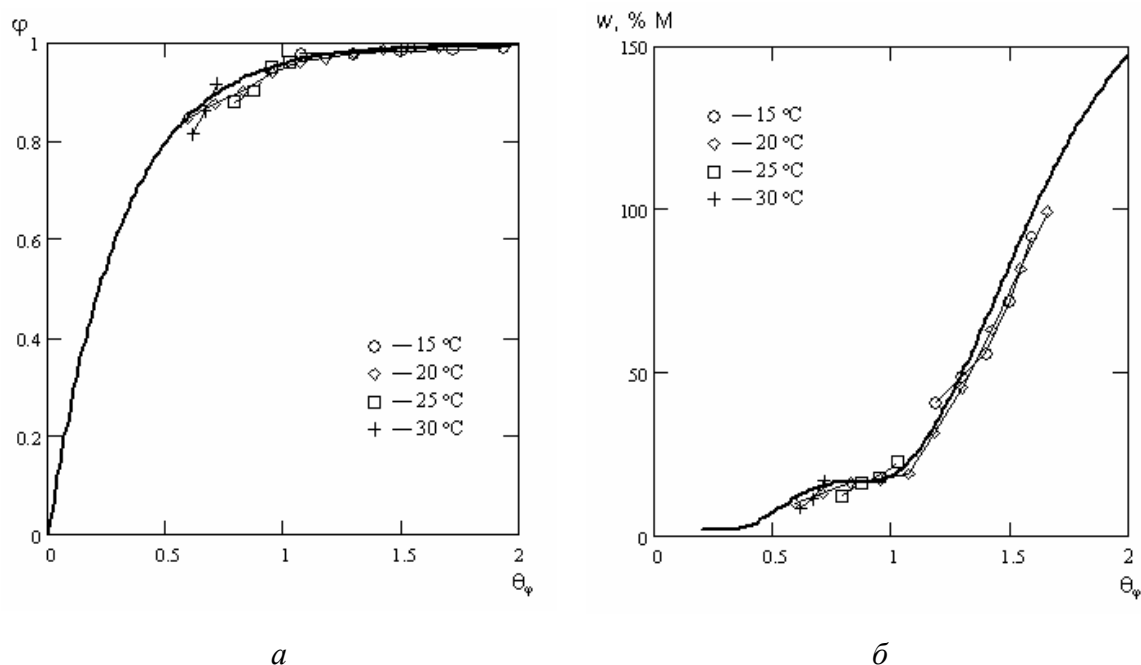


Рис. 2.10. Графики зависимостей: а — $\varphi(\theta_\varphi, t)$; б — $w(\theta_\varphi, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$)

В табл. 2.6 приведены параметры внутреннего воздуха жилых и общественных зданий из условия комфортности для холодного и теплого периодов года. При построении таблицы использованы данные ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и формулы (2.17)—(2.19). Параметры внутреннего воздуха зданий производственного назначения следует принимать согласно ГОСТ 12.1.005–88* «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений.

Таблица 2.6

**Параметры внутреннего воздуха жилых и общественных зданий
для холодного и теплого периодов года**

Тип здания	Холодный период года				Теплый период года			
	$t_{int}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{int}, \%$	$\theta_{int},$ кДж/кг	θ_{φ}^{int}	$t_{int}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{int}, \%$	$\theta_{int},$ кДж/кг	θ_{φ}^{int}
Жилые	20	55	95	0,25	24	60	161	0,29
Лечебные учреждения	21	55	105	0,25	24	60	161	0,29
Дошкольные учреждения	22	55	116	0,25	24	60	161	0,29
Общественные административного назначения	18	50	68	0,22	24	60	161	0,29

Примечания: **1.** Для зданий, не указанных в табл. 2.6, температуру t_{int} и относительную влажность воздуха φ_{int} следует принимать согласно ГОСТ 30494–96. — **2.** В соответствии с ГОСТ 30494–96 к холодному периоду года относится период, характеризующийся среднесуточной температурой наружного воздуха, равной $8\text{ }^\circ\text{C}$ и ниже, к теплому периоду – период со среднесуточной температурой наружного воздуха выше $8\text{ }^\circ\text{C}$.

В таблице (табл. 2.7) приведены параметры наружного воздуха для Волгограда, рассчитанные по данным СНиП 23–01–99* «Строительная климатология».

Таблица 2.7

Параметры наружного воздуха для Волгограда

Месяцы	$t_{ext}, ^\circ\text{C}$	$p_{ext}, \text{гПа}$	$\theta_{ext}, \text{кДж/кг}$	θ_{ϕ}^{ext}
I	–7,6	3,0	19	0,85
II	–7,0	3,3	27	1,00
III	–1,0	4,8	26	0,60
IV	10,0	7,1	37	0,27
V	16,7	9,9	63	0,23
VI	21,3	12,8	95	0,22
VII	24,6	14,0	110	0,20
VIII	22,1	12,8	96	0,20
IX	16,0	10,2	66	0,26
X	8,0	7,4	41	0,36
XI	–0,6	6,0	46	1,00
XII	–4,2	4,4	32	1,00
Год	8,2	8,0	55	0,52

Таким образом, относительный потенциал влажности θ_{ϕ} является обобщенным показателем и удобен для оценки влажностного состояния воздушной среды.

Покажем, что относительный потенциал влажности θ_{ϕ} характеризует влажностное состояние материалов ограждений. На основании зависимости $w(\theta, t)$ и определения θ_{ϕ} можно установить зависимость $w(\theta_{\phi}, t)$. Из графика зависимости $w(\theta_{\phi}, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$) видно (рис. 2.10, б), что температура оказывает незначительное влияние на изменение равновесного влагосодержания материала в шкале θ_{ϕ} , поэтому влиянием температуры можно пренебречь и определить зависимость $w(\theta_{\phi})$ при эталонной температуре (жирная линия на рис. 2.10, б).

Относительный потенциал влажности характеризует влажностное состояние материалов в широком диапазоне увлажнения. Переход от адсорбционно-капиллярной к области массовой капиллярной конденсации отмечается при $\theta_{\phi} \approx 1$. Для зоны массовой капиллярной конденсации характерен линейный участок в диапазоне изменения относительного потенциала влажности θ_{ϕ} от 1 до 1,6. Ослабление капиллярной связи влаги и переход к капиллярно-насыщенной области отмечается при $\theta_{\phi} \approx 1,6$.

Таблица 2.8

Значения равновесного влагосодержания w строительных материалов, соответствующие значениям относительного потенциала влажности θ_{ϕ}

θ_{ϕ}	Значения $w \times 10^2$, кг/кг, для материалов									
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
0,2	0,37	3,1	2,6	6,2	2,3	1,1	0,09	0,37	0,36	1,3
0,4	0,69	4,9	4,7	8,1	3,5	1,7	0,23	0,54	0,73	1,8
0,6	1,1	8,9	7,8	9,3	12,3	2,6	0,41	0,75	1,4	2,3
0,8	1,3	10,9	9,3	10	16,7	3,1	0,49	0,85	1,7	2,5
1,0	1,4	11,8	10,0	11	18,7	3,3	0,53	0,9	1,9	2,6
1,2	1,98	16,1	15,4	12,3	36,4	4,07	2,74	2,47	15,9	—
1,4	2,93	23,3	24,7	14,8	66,8	5,32	6,67	5,24	41,8	—
1,6	3,97	31	34,7	19,4	100	6,69	11	8,3	72,4	—
1,8	4,8	37,4	42,8	—	128	7,82	14,5	10,8	—	—
2,0	5,37	42	48,4	—	148	8,64	17	12,6	—	—
2,2	5,72	45	52	—	162	9,2	18,5	13,7	—	—
2,4	5,91	47	53,9	—	170	9,57	19,4	14,4	—	—
2,6	5,99	48,1	54,8	—	176	9,8	19,8	14,8	—	—
2,86	6	48,8	55	—	179	9,96	20	15	—	—

Примечание. В указанной таблице используются следующие материалы: А — бетон тяжелый ($\rho_0 = 2160 \text{ кг/м}^3$); Б — керамзитобетон ($\rho_0 = 1180 \text{ кг/м}^3$); В — пенобетон ($\rho_0 = 775 \text{ кг/м}^3$); Г — газобетон ($\rho_0 = 700 \text{ кг/м}^3$); Д — газосиликат ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$); Е — раствор цементный ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$); Ж — кирпич керамический ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$); И — кирпич силикатный ($\rho_0 = 1780 \text{ кг/м}^3$); К — минераловатные плиты ($\rho_0 = 350 \text{ кг/м}^3$); Л — пенополистирол ($\rho_0 = 30 \text{ кг/м}^3$).

В табл. 2.8 на основе экспериментальных данных [1, 87, 106] приведены значения равновесного влагосодержания строительных материалов в шкале относительного потенциала влажности.

2.5. УДЕЛЬНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

В 2.3 показано, что равновесное влагосодержание материалов является функцией абсолютного потенциала влажности и температуры. При исследовании процессов поглощения влаги в материалах ограждающих конструкций важно знать скорость изменения равновесного влагосодержания w при изменении абсолютного потенциала влажности θ при разных температурах. Определим *абсолютную удельную влагоемкость* материала c_m , (кг/кг)/(кДж/кг), как скорость изменения влагосодержания материала w при изменении его абсолютного потенциала влажности θ в неизотермических условиях. По определению величина c_m равна частной производной влагосодержания по абсолютному потенциалу влажности:

$$c_m = \frac{\partial w(\theta, t)}{\partial \theta}. \quad (2.20)$$

На рис. 2.11, *a* представлен график зависимости $c_m(\theta, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$), построенный дифференцированием зависимости $w(\theta, t)$. По графику видно, что абсолютная удельная влагоемкость при данной температуре возрастает до некоторого максимума c_m^{max} , а затем снижается. Величина c_m^{max} характеризует переход от одной формы связи влаги к другой. С ростом температуры значение максимума c_m^{max} уменьшается, что полностью согласуется с физикой процесса.

Как видно из графика (рис. 2.11, *a*), зависимость $c_m(\theta, t)$ является сложной для практического применения. В связи с этим удобно перейти к шкале относительного потенциала влажности θ_ϕ и определить *относительную удельную влагоемкость* материала в виде:

$$c_{m\varphi} = \frac{\partial w(\theta_\varphi)}{\partial \theta_\varphi}. \quad (2.21)$$

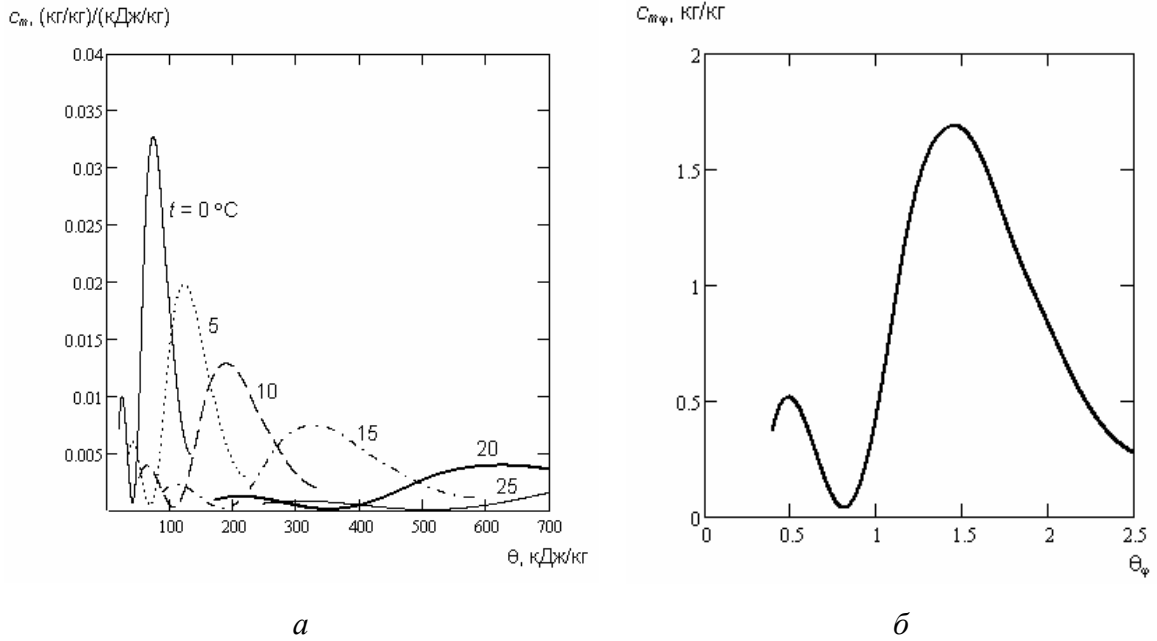


Рис. 2.11. Графики зависимостей для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$):

a — $c_m(\theta, t)$; b — $c_{m\varphi}(\theta_\varphi)$

Связь между абсолютной и относительной влагоемкостью материала определяется следующим образом:

$$c_m = \frac{\partial w}{\partial \theta} = \frac{\partial w}{\partial \theta_\varphi} \cdot \frac{\partial \theta_\varphi}{\partial \theta} = \frac{\partial w}{\partial \theta_\varphi} \cdot \frac{\partial \left(\frac{\theta}{\theta_{m.s}} \right)}{\partial \theta} = \frac{1}{\theta_{m.s}} \cdot \frac{\partial w}{\partial \theta_\varphi}$$

или окончательно

$$c_m = \frac{c_{m\varphi}}{\theta_{m.s}}, \quad (2.22)$$

где $\theta_{m.s}$ — абсолютный потенциал влажности, kJ/kg , соответствующий максимальному сорбционному влагосодержанию материала при данной температуре.

На рис. 2.11, b представлен график зависимости $c_{m\varphi}(\theta_\varphi)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$), полученный дифференцированием функции

$w(\theta_\phi)$. Зависимость $c_{m\phi}(\theta_\phi)$ проще, чем $c_m(\theta, t)$. Относительная удельная влагоемкость $c_{m\phi}$ является обобщающим показателем поглощения влаги материалом.

Таблица 2.9

**Значения относительной удельной влагоемкости $c_{m\phi}$,
соответствующие относительному потенциалу влажности θ_ϕ**

θ_ϕ	Значения $c_{m\phi} \times 10^2$, кг/кг, для материалов									
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
0,2	0,77	—	2,89	11,1	—	0,85	0,61	0,64	2,06	4,13
0,4	2,13	18,9	15,6	7,82	36,9	4,45	0,79	1,00	2,12	1,69
0,6	1,67	16,8	12,9	4,11	39,3	3,85	1,01	1,04	5,06	4,13
0,8	0,35	3,96	1,88	4,23	3,99	1,16	2,79	2,18	19,3	0,53
1,0	1,45	10,9	12,6	4,46	40,8	2,01	4,57	3,31	33,6	0,62
1,2	4,07	30,6	39,3	12,4	128	5,35	16,4	11,6	86,2	—
1,4	5,24	39,2	50,9	2,81	167	6,88	21,8	15,4	220	—
1,6	4,83	36,2	46,6	82,8	158	6,44	20,2	14,3	—	—
1,8	3,48	27,6	34,1	—	119	4,85	15	10,8	—	—
2,0	2,26	18,6	22,7	—	84,4	3,39	9,81	7,11	—	—
2,2	1,3	12,2	13,3	—	53,2	2,27	5,76	4,3	—	—
2,4	0,64	7,63	6,5	—	33	1,46	3,16	2,71	—	—
2,6	0,2	3,76	2,67	—	24,8	0,87	1,11	1,37	—	—
2,86	—	2,29	—	—	—	0,42	0,88	0,3	—	—

Примечание. В указанной таблице используются следующие материалы: А — бетон тяжелый ($\rho_0 = 2160 \text{ кг/м}^3$); Б — керамзитобетон ($\rho_0 = 1180 \text{ кг/м}^3$); В — пенобетон ($\rho_0 = 775 \text{ кг/м}^3$); Г — газобетон ($\rho_0 = 700 \text{ кг/м}^3$); Д — газосиликат ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$); Е — раствор цементный ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$); Ж — кирпич керамический ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$); И — кирпич силикатный ($\rho_0 = 1780 \text{ кг/м}^3$); К — минераловатные плиты ($\rho_0 = 350 \text{ кг/м}^3$); Л — пенополистирол ($\rho_0 = 30 \text{ кг/м}^3$).

В табл. 2.9 приведены значения относительной удельной влагоемкости строительных материалов в шкале относительного потенциала влажности. Являясь функцией потенциала влажности, удельная влаго-

емкость характеризует состояние влаги в материалах и может быть использована для моделирования влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий.

2.6. ВЛАЖНОСТНОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В области отрицательных температур остаются справедливыми все положения о потенциале влажности. В мерзлых материалах часть влаги превращается в лед, но между фазами воды сохраняется равенство потенциалов влажности.

При отрицательных температурах влага в материале может находиться в виде водяного пара, незамерзшей воды и льда. Фазы влаги находятся в контакте между собой, и между ними происходит тепло- и массообмен.

Известно [136—140], что температура замерзания влаги в материале ниже температуры замерзания свободной жидкости. Для модельного капиллярно-пористого материала в виде системы не связанных между собой цилиндрических капилляров различных радиусов на основе теории капиллярной конденсации установлена связь между понижением температуры фазового превращения и радиусом капилляров, заполненных влагой [141]:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{2\sigma M}{\rho \Delta H r}, \quad (2.23)$$

где $\Delta T = T_0 - T$; T_0 — температура замерзания свободной жидкости, К; T — температура замерзания жидкости в капилляре, К; σ — поверхностное натяжение воды, Н/м; M — молярная масса воды, кг/моль; ρ — плотность воды, кг/м³; r — радиус капилляра, м; ΔH — молярная теплота фазового перехода жидкость–лед, Дж/моль, определяемая по формуле [141]:

$$\Delta H = M(333700 - 2000\Delta T). \quad (2.24)$$

Из (2.23) видно, что с увеличением радиуса капилляра величина ΔT уменьшается, т. е. температура замерзания влаги в капилляре приближается к температуре замерзания свободной жидкости. При этом для рассматриваемого модельного материала считается, что замерзание влаги в капилляре с радиусом r не связано с ее замерзанием в капиллярах другого радиуса. Тогда объем всех пор вплоть до пор с радиусом r численно равен количеству влаги, замерзающей в этих порах при температуре T .

Область применения уравнения (2.23) ограничена физической возможностью существования мениска жидкости в капилляре. В работе [135] показано, что капиллярные свойства проявляются в сквозных капиллярах с предельным радиусом $r_{max} \approx 10^{-5}$ м. С учетом этого по формуле (2.23) получим значение $\Delta T_{min} \approx 0,01$ К, что соответствует предельным условиям капиллярной конденсации в материале.

В [135] с помощью уравнения Кельвина установлена связь между относительным парциальным давлением водяного пара p/p_s в капилляре и его радиусом:

$$\ln\left(\frac{p}{p_s}\right)_{T_0} = -\frac{2\sigma M}{\rho R T r}. \quad (2.25)$$

Из (2.25) и (2.23) получим зависимость относительного парциального давления водяного пара p/p_s от температуры замерзания жидкости:

$$\ln\left(\frac{p}{p_s}\right)_{T_0} = -\frac{\Delta H \Delta T}{R T_0 T}. \quad (2.26)$$

В 2.4 установлена зависимость относительного потенциала влажности θ_ϕ от относительного парциального давления водяного пара [формула (2.19)]. Из (2.26) и (2.19) с учетом (2.24) получим связь между понижением температуры замерзания жидкости и относительным потенциалом влажности:

$$\theta_{\varphi} = -0,311 \ln \left[1 - \exp \left[- \frac{M(333700 - 2000 \Delta T) \Delta T}{RT_0(T_0 - \Delta T)} \right] \right]. \quad (2.27)$$

Формула (2.27) дает связь между температурой замерзания жидкости в материале и относительным потенциалом влажности, соответствующим фазовому превращению. График зависимости $\theta_{\varphi}(\Delta T)$, построенный на основании (2.27) при стандартных параметрах ($M = 18,0153 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $R = 8,31451$ Дж/(моль·К), $T_0 = 273,15$ К), представлен на рис. 2.12. Из графика видно, что с понижением температуры относительный потенциал влажности уменьшается, причем более интенсивный темп снижения θ_{φ} отмечается при небольших значениях ΔT . Таким образом, относительный потенциал влажности является характеристикой состояния влаги, определяющей при температуре ниже 0 °С фазовые превращения влаги.

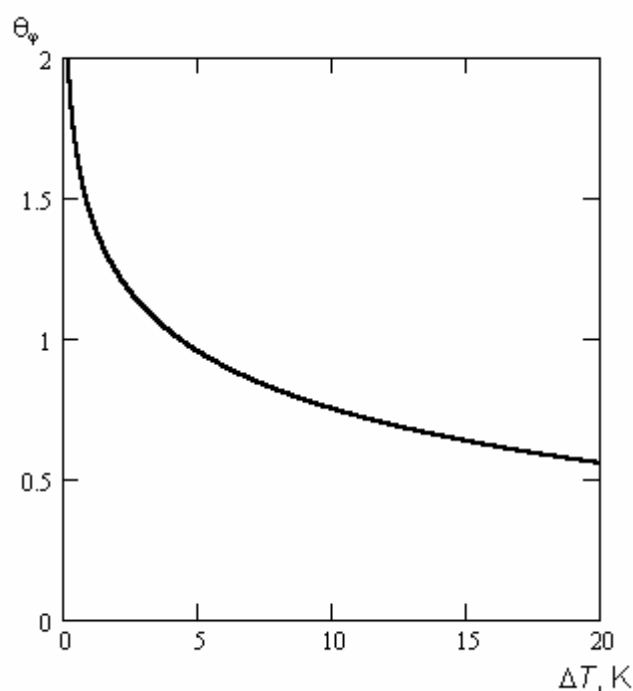


Рис. 2.12. График зависимости $\theta_{\varphi}(\Delta T)$

На основании формулы (2.27) по имеющимся зависимостям $w(\theta_{\varphi})$ для разных материалов (табл. 2.8) определено содержание незамерзшей

воды $w_{u,f}$ в зависимости от понижения температуры замерзания жидкости. На рис. 2.13 представлены графики зависимости $w_{u,f}(\Delta T)$ для газобетона и глиняного кирпича. На том же рисунке пунктиром показаны результаты экспериментального определения калориметрическим методом [142] содержания незамерзшей воды для тех же материалов.

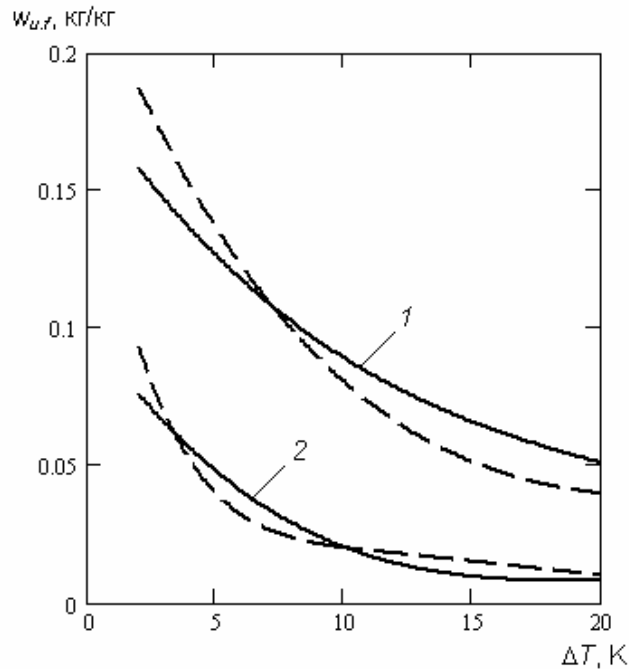


Рис. 2.13. Графики зависимости $w_{u,f}(\Delta T)$ для материалов:

1 — газобетон ($\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$); 2 — глиняный кирпич ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$)

По графикам (рис. 2.13) видно, что количество незамерзшей воды зависит от температуры и различно для разных материалов. Интенсивность фазовых превращений вблизи 0°C наибольшая и постепенно затухает, но льдообразование не прекращается вплоть до -20°C . Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их хорошую сходимость, что подтверждает достоверность расчетных данных.

Разработанные характеристики состояния влаги включены в базу данных «Теплофизические свойства материалов» и использованы для моделирования влагопереноса в ограждающих конструкциях.

2.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ШКАЛЫ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

В работе [143] приведены натурные данные по среднегодовой влажности однослойных легкобетонных стен для жилых зданий, длительное время находившихся в эксплуатации в различных влажностно-климатических зонах. Воспользуемся этими данными для экспериментальной проверки разработанной шкалы потенциала влажности.

В процессе эксплуатации наружные ограждения подвергаются совместному влажностному воздействию внутренней среды помещений и наружного климата. В условиях стационарной влагопередачи ограждение имеет некоторое влагосодержание, равновесное совместному действию внутренней и наружной сред. Для упрощения решения задачи примем коэффициент влагопроводности материала конструкции постоянным, а коэффициенты влагообмена на поверхностях одинаковыми. При этих допущениях среднее за год значение абсолютного потенциала влажности ограждения θ_k определяется по формуле:

$$\theta_k = 0,5(\theta_{int} + \theta_{ext}), \quad (2.28)$$

где θ_{int} , θ_{ext} — соответственно среднегодовые значения абсолютного потенциала влажности внутреннего и наружного воздуха.

Пользуясь шкалой θ , можно достаточно точно оценить влажностное состояние воздушной среды. Для расчета приняты пункты, находящиеся в различных влажностно-климатических зонах: Североморск — во влажной зоне, Москва — в нормальной, Самара — в сухой. Для указанных пунктов в СНиП 23–01–99* «Строительная климатология» приведены значения средней месячной температуры и парциального давления водяного пара наружного воздуха. По этим данным рассчитаны значения средней месячной относительной влажности наружного воздуха. С помощью зависимости $\varphi(\theta, t)$, полученной в 2.3, определены значения

среднего месячного абсолютного потенциала влажности, по которым вычислено среднегодовое значение. Относительный потенциал влажности определен по формуле (2.17). Расчетные параметры внутреннего воздуха для жилых зданий приняты по табл. 2.6.

Таблица 2.10

**Характеристики тепловлажностного состояния системы
«внутренняя среда—ограждение—наружная среда»**

Пункт	Зона влажно- сти	Температура t , °С, абсолютный потенциал влажности θ , кДж/кг, и относительный потенциал влажности θ_ϕ								
		внутреннего воздуха			наружного воздуха			ограждения		
		t_{int}	θ_{int}	θ_ϕ^{int}	t_{ext}	θ_{ext}	θ_ϕ^{ext}	t_k	θ_k	θ_ϕ^k
Северо-морск	Влажная	20	95	0,25	−3,7	29	0,81	8,2	62	0,53
Москва	Нормальная	20	95	0,25	4,1	46	0,58	12,1	71	0,41
Самара	Сухая	20	95	0,25	4,2	41	0,55	12,1	68	0,39

По среднегодовым значениям абсолютного потенциала влажности внутреннего и наружного воздуха по формуле (2.28) рассчитаны значения абсолютного потенциала влажности θ_k ограждения для указанных пунктов. Средние за год значения температуры t_k ограждения определены по данным температур внутреннего и наружного воздуха. Среднегодовые значения относительного потенциала влажности ограждения рассчитаны по формуле (2.17) при значениях $\theta_{m.s.}$, определенных формулой (2.18). В табл. 2.10 приведены характеристики тепловлажностного состояния системы «внутренняя среда—ограждение—наружная среда» для указанных пунктов.

Анализ данных (табл. 2.10), показывает, что перенос влаги происходит от внутренней среды к наружной, т. е. от большего абсолютного по-

тенциала влажности к меньшему. Из таблицы видно, что наружный климат оказывает существенное воздействие на влажностное состояние конструкции. Конструкции, находящиеся в эксплуатации во влажной зоне, подвергаются большему воздействию влаги, и относительный потенциал влажности для них больше.

С помощью зависимости $w(\theta_\phi)$, приведенной в табл. 2.8, по значениям относительного потенциала влажности θ_ϕ^k определяем значения равновесного влагосодержания w наружных стен.

Сравнение результатов расчета равновесного влагосодержания однослойных легковесных стен на основе потенциала влажности с натурными данными Б.Ф. Васильева (в пересчете на среднегодовые условия) представлено в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Равновесное влагосодержание однослойных легковесных стен

Пункт	Равновесное влагосодержание w , % по массе		
	Расчет	Натурные данные [143]	Относительная ошибка, %
Североморск	4,6	5,4	14,8
Москва	2,4	2,7	11,1
Самара	4,4	5,0	12,0

Из табл. 2.11 видно, что результаты расчета согласуются с натурными данными (максимальная относительная ошибка расчетных данных для Североморска составляет 14,8 %).

Выполненная экспериментальная проверка шкалы абсолютного потенциала влажности подтверждает возможность применения этой шкалы для расчетов влажностного режима ограждающих конструкциях зданий.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик влагопереноса в строительных материалах на основе потенциала влажности, необходимые для расчетов температурно-влажностного режима ограждающих конструкций.

3.1. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГОПЕРЕНОСА В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Одной из наиболее исследованных характеристик влагопереноса в материалах ограждающих конструкций является *коэффициент паропроницаемости*. Метод экспериментального определения этого коэффициента был разработан К.Ф. Фокиным в 1934 г. [49, 144, 145]. Исследуемый образец материала в виде цилиндра влагоизолируют по боковой поверхности и устанавливают на бюксе, частично заполненной водой, примыкание образца к бюксе герметизируется. Под действием разности парциальных давлений водяного пара в бюксе и в окружающей среде происходит диффузия водяного пара через образец. Количество влаги, проходящее через образец, определяется по потере массы при взвешивании бюксы с образцом через определенные интервалы времени. После установления стационарных условий диффузии водяного пара определяют коэффициент паропроницаемости μ , кг/(м·с·Па), по формуле

$$\mu = \frac{q_m \delta}{p_1 - p_2}, \quad (3.1)$$

где q_m — плотность потока водяного пара через образец, кг/(м²·с); δ — толщина образца, м; p_1, p_2 — парциальное давление водяного пара, Па, с одной и другой сторон образца.

Метод К.Ф. Фокина используются в настоящее время практически без изменений (ГОСТ 25898–83 «Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропрооницанию»), а часть экспериментальных данных, полученных им в 30-е годы прошлого века, входит в действующие строительные нормы СП 23–101–2004.

В дальнейшем проводились исследования влияния температуры и влагосодержания материала на коэффициент паропрооницаемости. В работе [146] экспериментально установлено, что температура при малых влагосодержаниях материалов почти не оказывает влияния на коэффициент паропрооницаемости. При влагосодержании материалов, близком к максимальному сорбционному, коэффициент паропрооницаемости при отрицательных температурах несколько ниже, чем при положительных. С повышением влагосодержания материалов коэффициент паропрооницаемости возрастает. Обычно коэффициент паропрооницаемости определяют при сорбционном влагосодержании материала, соответствующем относительной влажности воздуха 80 % по изотерме сорбции. Пересчет коэффициента паропрооницаемости на другие влагосодержания производится по формуле, предложенной В.М. Ильинским [147]:

$$\mu_x = \mu_{80} \frac{w_x}{w_{80}}, \quad (3.2)$$

где μ_x — соответствует сорбционному влагосодержанию материала w_x ; μ_{80} — соответствует сорбционному влагосодержанию материала w_{80} при $\varphi = 80\%$.

Разработанные в настоящее время методики позволяют экспериментально определить коэффициенты паропрооницаемости строительных материалов в зависимости от влажности и температуры.

В последнее время вопросы паропрооницаемости ограждающих конструкций исследованы в работах В.Н. Куприянова [148—150].

Перемещение влаги в капиллярно-пористом материале при высоких значениях сорбционного влагосодержания происходит не только в виде водяного пара, но и в жидкой фазе за счет влагопроводности в виде пленок влаги, слабо связанных с поверхностью пор и капилляров, что является недостатком данного метода.

Влагопроводность строительных материалов является менее исследованной характеристикой переноса влаги. *Коэффициент влагопроводности* материала определяется по методике [90], разработанной Р.Е. Брилингом в 1949 г., суть которой сводится к следующему. Исследуемый образец материала в виде призмы влагоизолируют по боковым поверхностям и устанавливают вертикально в герметичном сосуде с водой так, чтобы уровень воды был несколько выше нижней поверхности материала. Сосуд с образцом помещают в термостат. Материал впитывает воду через нижнюю поверхность, а испарение влаги происходит через верхнюю поверхность образца. В процессе эксперимента периодическими взвешиваниями сосуда с образцом определяют поток влаги, проходящей через образец. После установления стационарных условий перемещения влаги в образце его разрезают на несколько частей по высоте и определяют влагосодержание каждой части. Пользуясь кривой распределения влагосодержания по высоте образца, определяют градиенты влагосодержания и вычисляют значения коэффициента влагопроводности по формуле:

$$\beta = -\frac{q_m}{\nabla w}, \quad (3.3)$$

где β — коэффициент влагопроводности материала, $\text{кг}/[\text{м} \cdot \text{с} \cdot (\text{кг}/\text{кг})]$; q_m — плотность потока влаги через образец, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ∇w — градиент влагосодержания по высоте образца, $(\text{кг}/\text{кг})/\text{м}$.

Из формулы (3.3) видно, что коэффициент влагопроводности β есть функция влагосодержания, т. е. $\beta = \beta(w)$.

В [87] приведены значения коэффициента влагопроводности ряда строительных материалов при температуре 15 °С. Для пересчета этих значений на другие температуры А.У. Франчуком предложена следующая формула:

$$\beta_t = \beta_{15} \frac{1 + 0,04 t}{1,6}, \quad (3.4)$$

где β_t — коэффициент влагопроводности материала при температуре t ; β_{15} — коэффициент влагопроводности того же материала при температуре 15 °С.

Формула (3.4) может быть получена из условия, что коэффициент влагопроводности пропорционален поверхностному натяжению и обратно пропорционален динамической вязкости воды, что следует из уравнения стационарной влагопроводности О. Кришера [151].

Область применимости формулы (3.4) ограничена только положительными температурами. При отрицательных температурах зависимости поверхностного натяжения и вязкости воды от температуры имеют более сложный характер. С учетом этих зависимостей В.Г. Гагарин [152] получил выражение для пересчета коэффициента влагопроводности в диапазоне температур от –40 °С до 60 °С в виде полинома третьей степени:

$$\beta_t = \beta_{20} \left(-8,46 \cdot 10^{-7} t^3 + 1,16 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,89 \cdot 10^{-2} t + 0,582 \right), \quad (3.5)$$

где β_{20} — коэффициент влагопроводности материала при температуре 20 °С.

Погрешность аппроксимации формулой (3.5) не превышает 4 %.

Преимуществом указанного метода, основанного на формуле (3.3), является высокая точность определения коэффициента влагопроводности. Недостатком метода экспериментального определения коэффициента влагопроводности является то, что плотность потока влаги q_m в фор-

муле (3.3) определяется не только движением жидкой фазы влаги, но и водяного пара. Другим недостатком метода является то, что он неприменим к материалам, интенсивно впитывающим воду, так как при этом исследуемые образцы полностью насыщаются водой, и градиент влаго содержания в любом сечении образца равен нулю. Кроме того, следует отметить и весьма большую продолжительность эксперимента, определяемую установлением стационарных условий перемещения влаги в образце.

Известны также методы ускоренного определения коэффициента влагопроводности строительных материалов [110], основанные на теоретических представлениях движения влаги в материалах. Однако эти методы имеют большую погрешность по сравнению с методами стационарной влагопроводности и применимы для ограниченного круга материалов.

Рассмотренные выше методы определения коэффициента влагопроводности основаны на впитывании влаги образцами материалов. В работе В.Д. Ермоленко [153] предложен метод определения коэффициента переноса влаги из кривой кинетики сушки образца путем измерения влагосодержания всего образца и его части в конце опыта. Суть метода заключается в следующем. Три пластины из одного и того же материала одинаковой толщины плотно прижимают друг к другу и сушат в термостате. Боковая поверхность образца (трех сложенных вместе пластин) имеет тепло- и влагоизоляцию. Регистрация убыли массы производится непрерывно для всего образца. К концу опыта определяется влагосодержание средней пластины и всего образца.

Данные опыта используются для аналитического решения одномерной задачи нестационарного влагопереноса в неограниченной пластине [126]. На основании результатов решения этой задачи получена расчет-

ная формула для определения *коэффициента диффузии влаги (коэффициента потенциалопроводности)* a_m , м²/с, во влажном материале [153]:

$$a_m = - \frac{q_m (R^2 - R_1^2)}{6 R \rho_0 (\bar{w}_1 - \bar{w})}, \quad (3.6)$$

где q_m — плотность потока влаги в материале, кг/(м²·с); R, R_1 — соответственно половина толщины всего образца и внутреннего слоя, м; ρ_0 — плотность материала в сухом состоянии, кг/м³; \bar{w}_1, \bar{w} — соответственно среднее влагосодержание, кг/кг, внутреннего слоя и всего образца к концу опыта.

Достоинством метода В.Д. Ермоленко является то, что он позволяет определить коэффициент потенциалопроводности влажных материалов, учитывающий совместный влагоперенос без разделения влаги на отдельные фазы (парообразную, пленочную, жидкую). К недостаткам метода можно отнести возможность определения коэффициента потенциалопроводности влаги лишь для фиксированного момента времени.

Методы определения коэффициентов массопереноса достаточно подробно рассмотрены в фундаментальной монографии А.В. Лыкова [92].

Особый интерес представляет рассмотрение методов определения влажностных характеристик, основанных на понятии «потенциала влажности» [124].

Е.И. Тертичником разработан способ получения влажностных характеристик на основе потенциала влажности путем применения разрезной колонки [154]. Разрезная колонка выполняется в форме вертикальной призмы из слоев исследуемого и эталонного материалов. Слои эталонного материала, в качестве которого используется фильтровальная бумага, служат «градусомерами» влажности. Собранный колонка влагоизолируется по боковой поверхности и устанавливается на впитывание влаги

при постоянной температуре. Под влиянием разности потенциалов влажности на торцах колонки влага устремляется вверх, активно насыщая слои исследуемого и эталонного материалов и частично испаряясь с верхнего торца. После достижения всеми слоями состояния влажностного равновесия колонка разбирается, определяется влагосодержание слоев исследуемого и эталонного материалов. Влагосодержание эталонного материала переводится в градусы влажности по общепринятой методике [1].

Коэффициент проводимости влаги κ , кг/(м·с·°В), для i -го слоя исследуемого материала определяется по формуле:

$$\kappa_i = \frac{q_m \delta_i}{\Theta_{B_1}^i - \Theta_{B_2}^i}, \quad (3.7)$$

где q_m — плотность потока влаги, проходящей через образец, кг/(м²·с); δ_i — толщина i -го слоя исследуемого материала, м; $\Theta_{B_1}^i$ $\Theta_{B_2}^i$ — соответственно потенциал влажности, °В, нижней и верхней поверхностей слоя, определяемые по потенциалу влажности прилегающих полуслоев фильтровальной бумаги.

Способ разрезной колонки, разработанный Е.И. Тertichnikом, позволяет также получить зависимость равновесного влагосодержания от потенциала влажности $w(\Theta_B)$, удельную влагоемкость $\eta(\Theta_B)$ и коэффициент потенциалопроводности $a_m(\Theta_B)$.

Для получения зависимости $w(\Theta_B)$ для i -го слоя достаточно знать среднее влагосодержание этого слоя w_i , кг/кг, и среднее значение потен-

$$\bar{\Theta}_B^i = \frac{\Theta_{B_1}^i + \Theta_{B_2}^i}{2}.$$

Удельная влагоемкость $\eta(\Theta_B)$, (кг/кг)/°В, определяется дифференцированием зависимости влагосодержания от потенциала влажности:

$$\eta(\Theta_B) = \frac{\partial w(\Theta_B)}{\partial \Theta_B}.$$

Коэффициент потенциалопроводности $a_m(\Theta_B)$, м²/с, определяется по формуле:

$$a_m(\Theta_B) = \frac{\kappa(\Theta_B)}{\rho_0 \eta(\Theta_B)}. \quad (3.8)$$

Способ разрезной изотермической колонки позволяет определять влажностные характеристики строительных материалов в широком диапазоне значений потенциала влажности из одного опыта на одних и тех же образцах. К недостаткам этого способа можно отнести все недостатки, присущие стационарным методам.

В работе [155] описан экспресс-метод получения влажностных характеристик на основе потенциала влажности [124] с использованием электрического датчика локального влагосодержания. Методика эксперимента заключается в следующем: на одну из боковых поверхностей образца, выполненного в виде вертикальной призмы, на некотором расстоянии от нижнего торца накладывается и закрепляется малогабаритный емкостный датчик локального влагосодержания [156], соединяемый с измерительным прибором. Боковые поверхности образца влагоизолируются, образец в вертикальном положении устанавливается на впитывание влаги. Периодически через некоторые интервалы времени снимаются показания измерительного прибора. Эксперимент заканчивается при наступлении установившегося потока влаги в данном сечении образца. По полученным данным строится кривая изменения во времени потенциала влажности Θ_B в рассматриваемом сечении, при этом показания прибора переводятся в значения потенциала влажности с помощью кривой равновесного влагосодержания $w(\Theta_B)$. Плотность потока влаги,

проходящего через рассматриваемое сечение, находят интегральным методом расчета [91] по кривым распределения влаги в двух сечениях. Коэффициент влагопроводности определяется по формуле [155]:

$$\kappa(\Theta_B) = \frac{x q_m}{2\tau \frac{\partial \Theta_B}{\partial \tau}}, \quad (3.9)$$

где x — расстояние от нижнего торца образца до рассматриваемого сечения, м; q_m — плотность потока влаги, кг/(м²·с); τ — время, с; Θ_B — потенциал влажности, °В.

К достоинствам экспресс-метода можно отнести значительное сокращение продолжительности эксперимента по сравнению со стационарными методами, проведение исследований на неразрезных образцах, простота технической реализации. Кроме того, метод позволяет из одного опыта получить влажностные характеристики (коэффициент влагопроводности, удельную влагоемкость) в широком диапазоне изменения потенциала влажности. Однако данный метод имеет меньшую точность по сравнению со стационарными методами. Как показано в [155], расхождения между значениями коэффициента влагопроводности, полученными описанным экспресс-методом и стационарным, не превышают 15 %, что можно считать удовлетворительным для инженерной практики.

Позднее способ разрезной колонки был усовершенствован [1] и распространен на испытания при неизотермических условиях. Разрезную колонку, собранную из пластин исследуемого материала и фильтровальной бумаги, помещают в тепло- и влагоизолированную обойму и устанавливают между термостатами с разными температурами. В процессе опыта происходит перераспределение влаги по длине колонки под действием градиента температуры. По равновесным влагосодержаниям эталонного тела в разных сечениях колонки в различные моменты времени

$w_0(x, \tau)$ пользуясь зависимостью $w_0(\Theta_B, t)$, полученной Е.И. Тертичником [1], устанавливают зависимость $\Theta_B(x, \tau)$.

После установления влажностного равновесия в колонке, когда перераспределение влаги прекращается, определяют равновесные влагосодержания исследуемого и эталонного материалов в различных сечениях колонки. По зависимости $w(w_0)$ и известной зависимости $w_0(\Theta_B, t)$ устанавливают зависимость влагосодержания исследуемого материала от потенциала влажности при разных температурах $w(\Theta_B, t)$. Дифференцированием зависимости $w(\Theta_B, t)$ определяют удельную влагоемкость материала $\eta(\Theta_B, t)$.

Коэффициент влагопроводности κ , кг/(м·с·°В), определяется по формуле:

$$\kappa(\Theta_B, t) = \frac{\rho_0 \eta(\Theta_B, t) \frac{\partial \Theta_B}{\partial \tau}}{\nabla^2 \Theta_B}, \quad (3.10)$$

$$\text{где } \nabla^2 \Theta_B = \frac{\partial^2 \Theta_B}{\partial x^2}.$$

Формула (3.10) получена из уравнения баланса влаги для элементарного слоя колонки (отдельной пластины) для каждого расчетного интервала времени между измерениями, считая κ в пределах данного пространственно-временного интервала неизменным. Для определения зависимости $\kappa(\Theta_B, t)$ используют метод конечных разностей.

Методом разрезной неизотермической колонки могут быть достаточно точно получены все необходимые для расчета нестационарной влагопередачи зависимости из одной серии опытов на одном образце. Однако, сложность постановки, проведения эксперимента и обработки его результатов сдерживает широкое практическое применение данного метода.

В заключение остановимся на определении влагообмена ограждающих конструкций с окружающей средой. В инженерных методах расчета принимают, что влагообмен на поверхностях ограждения, граничащих с воздухом, описывается уравнением [87]:

$$q_m = \alpha_m (p_{su} - p_a), \quad (3.11)$$

где q_m — плотность потока влаги, испаряющейся с поверхности, кг/(м²·с); α_m — коэффициент влагообмена, кг/(м²·с·Па); p_{su} , p_a — соответственно парциальное давление водяного пара на поверхности ограждения и в воздухе, Па.

Для внутренней поверхности ограждений коэффициент влагообмена α_m , кг/(м²·с·Па), может быть достаточно точно определен по формуле:

$$\alpha_m^{si} = 6,12 \cdot 10^{-10} (\Delta t)^{0,33} (\Delta p)^{0,4}, \quad (3.12)$$

где $\Delta t = t_{int} - \tau_{si}$ — разность температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения, °С; $\Delta p = p_{si} - p_{int}$ — разность парциальных давлений водяного пара на внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха, Па.

Формула (3.12) получена на основании результатов экспериментальных исследований тепло- и массообмена при конденсации водяного пара из паровоздушной смеси на вертикальных поверхностях, полученных Н.Г. Петровым [157, 158].

В.М. Ильинским для определения сопротивления влагообмену (величины, обратной коэффициенту влагообмена) у внутренней поверхности ограждения предложена формула [147]:

$$R_m^{si} = 1 - \frac{\varphi_{int}}{100}, \quad (3.13)$$

где φ_{int} — относительная влажность воздуха в помещении, %.

По данным К.Ф. Фокина [88] для практических расчетов можно принимать постоянные значения сопротивления влагообмену (коэффициен-

тов влагообмена): у внутренней поверхности ограждения — $R_m^{si} = 97,2 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ [$\alpha_m^{si} = 1,03 \cdot 10^{-8} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$]; у наружной поверхности ограждения — $R_m^{se} = 46,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ [$\alpha_m^{se} = 2,14 \cdot 10^{-8} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$]. Данные К.Ф. Фокина близки к экспериментальным, определенным по формуле (3.13) при стандартных эксплуатационных параметрах помещения: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_{int} = 55 \text{ \%}$; $p_{int} = 1286 \text{ Па}$; $\tau_{si} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{si} = 2338 \text{ Па}$ (максимальное расхождение минус 13,4 %).

В работе [69] используются следующие значения коэффициента влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_m^{si} = 2,81 \cdot 10^{-8} - 4,08 \cdot 10^{-8} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; у наружной поверхности — $\alpha_m^{se} = 10,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ [при штиле] и $\alpha_m^{se} = 83,3 \cdot 10^{-8} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ [при ветре]. Н.М. Künzel [122] рекомендует использовать в практических расчетах значения коэффициента влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_m^{si} = 25 \cdot 10^{-9} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$; у наружной поверхности — $\alpha_m^{se} = 75 \cdot 10^{-9} \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$.

Анализ экспериментальных методов определения характеристик влагопереноса в материалах ограждающих конструкций позволяет разработать метод определения этих характеристик в шкале абсолютного потенциала влажности.

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Аналитическая теория тепло- и влагопереноса в материалах ограждающих конструкций разработана достаточно глубоко, и получен ряд решений для полей температуры и влажности [1, 126]. Однако применение этой теории к практическим расчетам затруднено в связи с отсутствием экспериментальных данных по характеристикам переноса влаги.

Существующие методы определения характеристик влагопереноса основаны на измерении распределения влагосодержания внутри и на поверхности тела в процессе увлажнения или сушки материалов. Методы, основанные на увлажнении образцов, сложны, так как требуют использования образцов достаточно большой длины и продолжительны по времени. При использовании методов, основанных на сушке влажных образцов, продолжительность опытов значительно сокращается. Однако произвольный выбор начального влагосодержания материалов не позволяет получить характеристики влагопереноса в полном диапазоне влажности материалов.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования характеристик переноса влаги методом сушки влажных материалов от полного водонасыщения до равновесного влагосодержания с воздушной средой, полученные автором.

Рассмотрим одномерную задачу, причем образец исследуемого материала имеет форму неограниченной пластины толщиной $2R$. Так как температурный перепад внутри образца незначителен, то переносом влаги за счет температурного градиента можно пренебречь. В этом случае изменение влагосодержания тела $w(x, \tau)$ по координате x с течением времени τ можно определить из соотношения [96]:

$$\frac{\bar{w}_0 - w(x, \tau)}{\bar{w}_0} = \int_0^\tau \frac{q_m(\vartheta) d\vartheta}{R \rho_0 \bar{w}_0} - \frac{q_m(\tau)}{a_m \rho_0 \bar{w}_0} \left(\frac{R^2 - 3x^2}{6R} \right) + \varepsilon(x, \tau), \quad (3.14)$$

где \bar{w}_0 — начальное влагосодержание; $q_m(\tau)$ — плотность потока влаги в материале; ρ_0 — плотность материала в сухом состоянии; a_m — коэффициент потенциалопроводности, характеризующий диффузию водяного пара и перенос капиллярной влаги в материале; $\varepsilon(x, \tau)$ — остаточный член, отображаемый в виде суммы экспоненциальных функций, которым можно пренебречь спустя определенный промежуток времени.

Среднее влагосодержание $\bar{w}(\tau)$ определим из соотношения:

$$\frac{\bar{w}_0 - \bar{w}(\tau)}{\bar{w}_0} = \int_0^\tau \frac{q_m(\vartheta) d\vartheta}{R \rho_0 \bar{w}_0}. \quad (3.15)$$

Из (3.14) и (3.15) получим:

$$w(x, \tau) = \bar{w}(\tau) + \frac{q_m(\tau)}{a_m \rho_0} \left(\frac{R^2 - 3x^2}{6R} \right). \quad (3.16)$$

Среднее влагосодержание слоя толщиной $R_1 < R$ равно:

$$\bar{w}_1(\tau) = \frac{1}{R_1} \int_0^{R_1} w(x, \tau) dx = \bar{w}(\tau) + \frac{q_m(\tau)}{6a_m \rho_0 R} (R^2 - R_1^2). \quad (3.17)$$

Среднее влагосодержание слоя толщиной $l = R - R_1$ равно:

$$\bar{w}_2(\tau) = \frac{1}{R - R_1} \int_{R_1}^R w(x, \tau) dx = \bar{w}(\tau) - \frac{q_m(\tau) R_1}{6a_m \rho_0 R} (R + R_1). \quad (3.18)$$

Из (3.17) и (3.18) находим следующее выражение для коэффициента потенциалопроводности:

$$a_m = \frac{q_m(\tau)(R + R_1)}{6\rho_0 [\bar{w}_1(\tau) - \bar{w}_2(\tau)]}. \quad (3.19)$$

Таким образом, для определения коэффициента a_m необходимо знать разность между средним влагосодержанием $\bar{w}_1(\tau)$ слоя R_1 и средним влагосодержанием $\bar{w}_2(\tau)$ слоя l , а также интенсивность сушки $q_m(\tau)$. Величина $q_m(\tau)$ определяется из кривой сушки по величине скорости сушки $d\bar{w}/d\tau$, т. е.

$$q_m(\tau) = -R\rho_0 \frac{d\bar{w}}{d\tau}. \quad (3.20)$$

Подставляя (3.20) в (3.19), получим расчетную формулу для определения коэффициента потенциалопроводности:

$$a_m = -\frac{R(R + R_1)}{6[\bar{w}_1(\tau) - \bar{w}_2(\tau)]} \frac{d\bar{w}}{d\tau}. \quad (3.21)$$

Коэффициент влагопроводности λ_m определяется по формуле:

$$\lambda_m = a_m c_m \rho_0, \quad (3.22)$$

где c_m — абсолютная удельная влагоемкость материала, определяемая формулой (2.20).

Коэффициент влагообмена β_m , отнесенный к разности влагосодержания $\bar{w}(\tau)$ и равновесного влагосодержания с воздушной средой w_e , определяется из условия баланса влаги на поверхности тела:

$$\beta_m = \frac{q_m(\tau)}{\rho_0 [\bar{w}(\tau) - w_e]}. \quad (3.23)$$

С учетом (3.20) получим расчетную формулу для определения коэффициента влагообмена:

$$\beta_m = - \frac{R}{\bar{w}(\tau) - w_e} \frac{d\bar{w}}{d\tau}. \quad (3.24)$$

Коэффициент влагообмена α_m , отнесенный к разности абсолютного потенциала влажности на поверхности тела и воздушной среды, определяется по формуле:

$$\alpha_m = \beta_m c_m \rho_0. \quad (3.25)$$

Полученные зависимости (3.21), (3.22), (3.24) и (3.25) могут быть использованы для экспериментального определения характеристик влагопереноса.

Автором разработана методика экспериментального определения характеристик переноса влаги. Суть методики заключается в определении нестационарного поля влагосодержания $w(x, \tau)$ в колонке из исследуемого материала путем сушки влажного образца от полного водонасыщения до равновесного влагосодержания с окружающей средой. По известному полю влагосодержания определяют искомые характеристики переноса влаги.

Влагоизолированную с торцов колонку, состоящую из предварительно увлажненных образцов материала, помещают в термостат и под-

вергают двусторонней сушке. В процессе сушки под влиянием перепада влагосодержания по толщине колонки происходит перераспределение влаги. Поле влагосодержания $w(x, \tau)$ в колонке определяют измерением влагосодержания в различных слоях с течением времени. В результате эксперимента определяют характеристики влагопереноса a_m , λ_m , α_m и β_m .

Преимуществом разработанной методики по сравнению с методом В.Д. Ермоленко [153] является то, что искомую разность влагосодержаний внутреннего и поверхностного слоев образца можно определить для любого момента времени в полном диапазоне изменения влажности материалов от полного водонасыщения до равновесного влагосодержания с воздушной средой. Следовательно, из одного опыта можно получить полную картину изменения коэффициента потенцилопроводности влаги от влагосодержания материалов. Кроме того, данная методика позволяет дополнительно определить коэффициент влагопроводности материалов и коэффициент влагообмена с воздушной средой. Данный метод можно считать экспресс-методом, так как в отличие от методов на впитывание, требующих для проведения эксперимента от трех месяцев до полугода, сушка материалов при температуре 20 °С происходит за несколько суток.

По указанной методике проведены экспериментальные исследования характеристик влагопереноса для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$), силикатного кирпича ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$), керамического кирпича ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$) и цементно-песчаного раствора ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$). На рис. 3.1 представлен график распределения влагосодержания $w(x, \tau)$ по толщине колонки в различные моменты времени для газосиликата. Из графика видно, что спустя $\tau = 20 \text{ ч}$ среднее влагосодержание внутреннего слоя образца толщиной $R_1 = 2,5 \text{ мм}$ равно $\bar{w}_1 = 1,63 \text{ кг/кг}$, а среднее влагосодержание внешнего слоя образца толщиной $l = 5,0 \text{ мм}$ равно $\bar{w}_2 = 1,22 \text{ кг/кг}$. Ско-

рость сушки $d\bar{w}/d\tau = -2,14 \cdot 10^{-5}$ кг/(кг·с). По формуле (3.21) получим значение коэффициента потенцилопроводности $a_m = 6,52 \cdot 10^{-10}$ м²/с при среднем влагосодержании всего образца $\bar{w} = 1,38$ кг/кг.

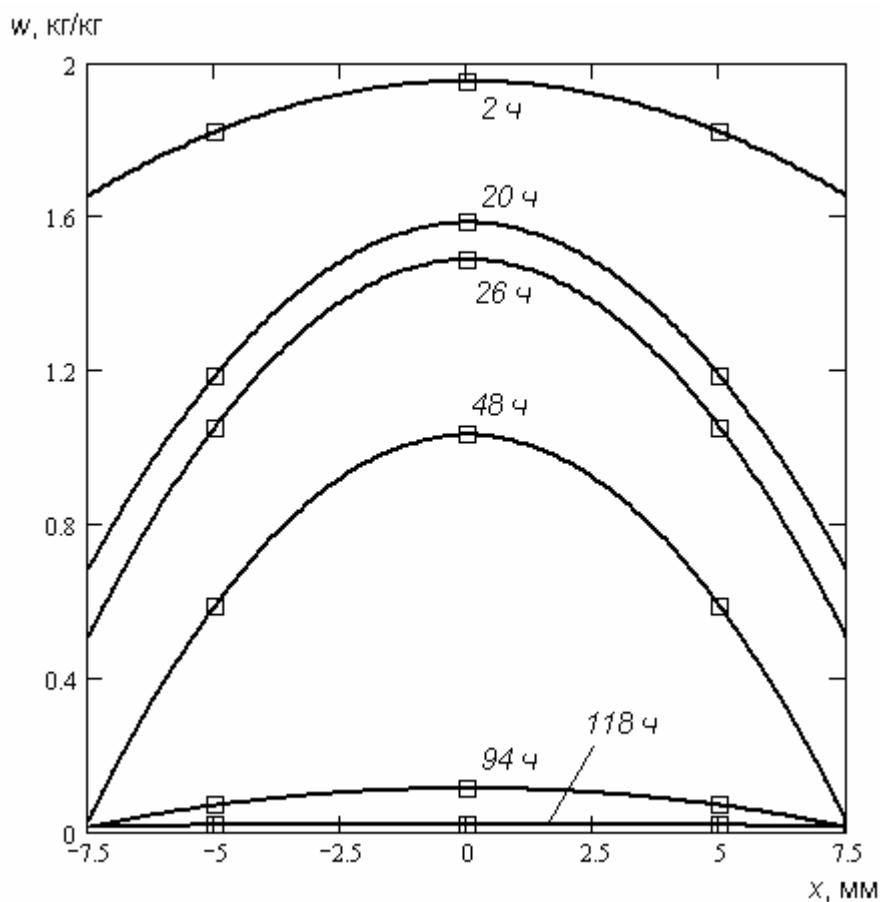


Рис. 3.1. График распределения влагосодержания $w(x, \tau)$ по толщине колонки в различные моменты времени для газосиликата ($\rho_0 = 390$ кг/м³)

Производя исследование влагосодержания от полного водонасыщения до равновесного с окружающей средой, можно получить зависимость коэффициента потенцилопроводности от влагосодержания в полном диапазоне влажности материалов при разных температурах, т. е. $a_m = f(w, t)$.

Статистическая обработка экспериментальных данных для газосиликата (при $t_0 = 20$ °C) по малому объему выборки ($n = 15$) позволила получить математическую модель в виде уравнения регрессии:

$$a'_m(w) = -3,059 \cdot 10^{-10} + 9,027 \cdot 10^{-10} w,$$

которая оказалась адекватной. Полученный коэффициент корреляции $r = 0,901$ свидетельствует о весьма тесной связи между факторной и результативной переменной по шкале Чэддока [159]. Кроме того, методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость:

$$a_m(w) = 5,084 \cdot 10^{-11} \exp(1,837 \cdot w).$$

При этом относительные ошибки на узлах колеблются от 1,1 % до 20,1 %.

Аналогично получены адекватные модели:

для силикатного кирпича —

$$\text{уравнение регрессии } a'_m(w) = -1,257 \cdot 10^{-10} + 9,126 \cdot 10^{-9} w;$$

коэффициент корреляции $r = 0,949$ (весьма тесная связь);

$$\text{эмпирическая формула } a_m(w) = 1,098 \cdot 10^{-10} \exp(17,161 \cdot w);$$

колебания на узлах от 0,7 % до 14,7 %;

для керамического кирпича —

$$\text{уравнение регрессии } a'_m(w) = -4,668 \cdot 10^{-10} + 1,323 \cdot 10^{-8} w;$$

коэффициент корреляции $r = 0,78$ (тесная связь);

$$\text{эмпирическая формула } a_m(w) = 1,341 \cdot 10^{-10} \exp(14,7 \cdot w);$$

колебания на узлах от 2,5 % до 16,8 %;

для цементно-песчаного раствора —

$$\text{уравнение регрессии } a'_m(w) = -8,728 \cdot 10^{-11} + 3,965 \cdot 10^{-9} w;$$

коэффициент корреляции $r = 0,89$ (тесная связь);

эмпирическая формула $a_m(w) = 4,635 \cdot 10^{-12} \exp(62,3 \cdot w)$;

колебания на узлах от 1,6 % до 18,4 %.

Таким образом, построенные математические модели в целом адекватны, и выводы, полученные по результатам малой выборки, можно с вероятностью 0,95 распространить на всю гипотетическую генеральную совокупность.

Полученные эмпирические зависимости между влагосодержанием w и коэффициентом потенцилопроводности a_m могут быть представлены формулой:

$$a_m(w) = a \exp(bw). \quad (3.26)$$

Зависимость, определяемая формулой (3.26), имеет физический смысл. С ростом влагосодержания коэффициент потенцилопроводности увеличивается. При максимальном сорбционном влагосодержании материала $w_{m.s}$ коэффициент a_m равен коэффициенту потенцилопроводности парообразной влаги:

газосиликата $a_m(w_{m.s}) = 7,168 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ при $w_{m.s} = 0,187 \text{ кг/кг}$;

силикатного кирпича $a_m(w_{m.s}) = 1,281 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при $w_{m.s} = 0,009 \text{ кг/кг}$;

керамического кирпича $a_m(w_{m.s}) = 1,45 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при $w_{m.s} = 0,0053 \text{ кг/кг}$;

цементно-песчаного раствора $a_m(w_{m.s}) = 3,622 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ при $w_{m.s} = 0,033 \text{ кг/кг}$.

Показатель b в формуле (3.26) определяет приращение коэффициента потенцилопроводности капиллярно-связанной влаги. При полном водонасыщении материала w_{max} значение a_m близко к значению коэффициента потенцилопроводности свободной влаги.

Графики зависимости $a_m(w)$ при $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ для указанных материалов представлены на рис. 3.2.

На основании полученных значений a_m по формуле (3.22) определен коэффициент влагопроводности λ_m для указанных материалов.

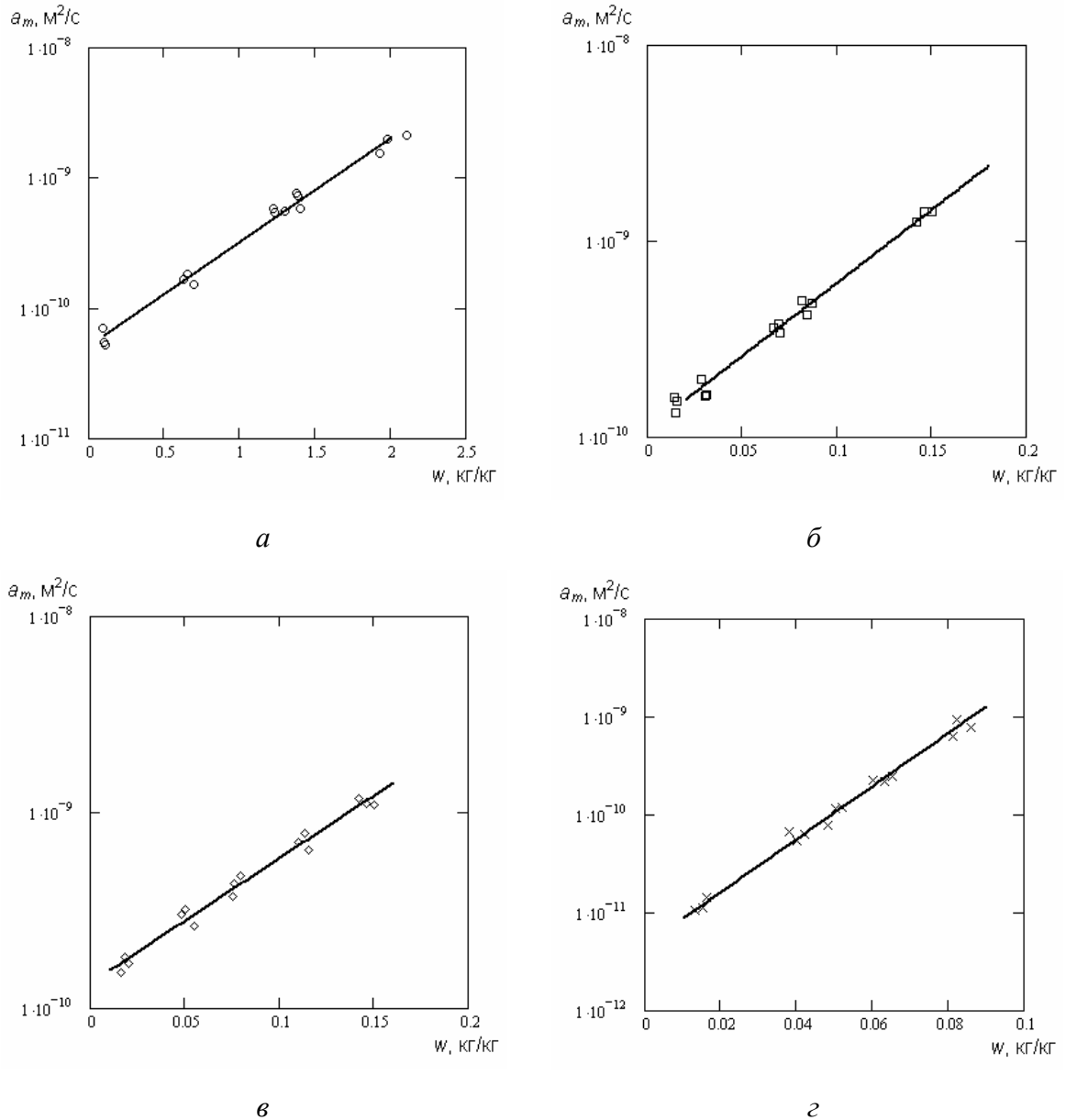


Рис. 3.2. Графики зависимости $a_m(w)$ при $t_0 = 20$ °C для строительных материалов:

a — газосиликат ($\rho_0 = 390$ kg/m^3); *б* — силикатный кирпич ($\rho_0 = 1800$ kg/m^3);

в — керамический кирпич ($\rho_0 = 1700$ kg/m^3); *г* — цементно-песчаный раствор ($\rho_0 = 1800$ kg/m^3)

Из графиков зависимости $\lambda_m(\theta)$ при $t_0 = 20$ °C (рис. 3.3) видно, что в адсорбционно-капиллярной зоне коэффициент влагопроводности λ_m меняется незначительно. Это объясняется тем, что адсорбированная влага прочно связана со скелетом материала и малоподвижна. Рост подвижности капиллярно-связанной влаги приводит к увеличению коэффициента

влажностности. В дальнейшем коэффициент влажностности уменьшается за счет ослабления действия капиллярных сил.

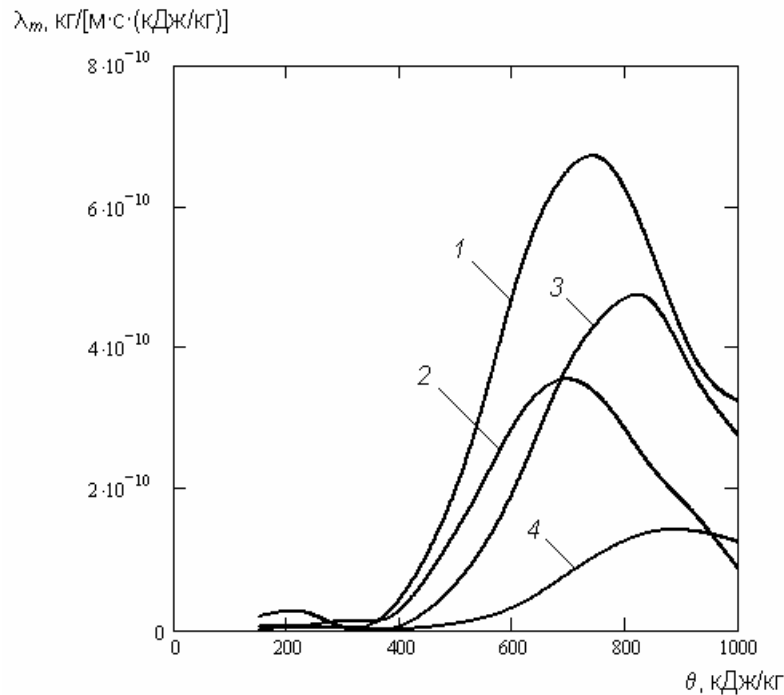


Рис. 3.3. Графики зависимости $\lambda_m(\theta)$ при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ для материалов:

1 — газосиликат ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$); 2 — силикатный кирпич ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$); 3 — керамический кирпич ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$); 4 — цементно-песчаный раствор ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$)

На основании проведенных экспериментальных исследований по формуле (3.24) получены следующие значения коэффициента влажностности: для газосиликата — $\beta_m = 8,69 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$; для силикатного кирпича — $\beta_m = 5,12 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$; для керамического кирпича — $\beta_m = 6,24 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$; для цементно-песчаного раствора — $\beta_m = 7,65 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$.

В условиях помещения можно принять абсолютную объемную влажностность материалов $s_m \rho_0 \approx 75,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/[м}^3 \cdot (\text{кДж/кг})]$. Тогда коэффициент влажностности, отнесенный к разности потенциалов влажности, по формуле (3.25) получим равным $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$. Это значение α_m^{si} можно использовать в практике инженерных расчетов вла-

гообмена в помещении. На наружной поверхности ограждения, основываясь на рекомендациях К.Ф. Фокина [88], можно принять $\alpha_m^{se} \approx 2 \cdot \alpha_m^{si} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг}/[\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж}/\text{кг})]$.

Полученные экспериментальным путем характеристики переноса влаги могут быть использованы для расчетов температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий.

3.3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ МЕТОДИКАМ

Представляет практический интерес провести сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов влагопереноса, полученных по методу сушки и путем впитывания влаги.

В работе [122] коэффициент потенциалопроводности (капиллярной диффузии) при впитывании влаги D_{ws} , $\text{м}^2/\text{с}$, определяется по формуле:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \left(\frac{A}{w_f} \right)^2 1000^{\frac{w}{w_f} - 1}, \quad (3.27)$$

где A — коэффициент капиллярного всасывания, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0,5})$; w_f — свободное водонасыщение, $\text{кг}/\text{м}^3$; w — концентрация влаги, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По формуле (3.27) определен коэффициент потенциалопроводности при температуре около 20°C для ячеистого бетона ($\rho_o = 600 \text{ кг}/\text{м}^3$, пористость 72 %) и силикатного кирпича ($\rho_o = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$, пористость 35 %) при следующих значениях параметров [122]: $A = 0,10$; $w_f = 340 \text{ кг}/\text{м}^3$ (ячеистый бетон); $A = 0,05$; $w_f = 275 \text{ кг}/\text{м}^3$ (силикатный кирпич). В той же работе для указанных материалов приведены значения коэффициента потенциалопроводности $D_{ww}(w)$, полученного экспериментально методом сушки. На рис. 3.4 приведены графики зависимостей коэффициента потенциалопроводности от относительной концентрации влаги

по данным Н.М. Künzel'я [122], полученных путем впитывания влаги $D_{ws}(w/w_f)$ и сушки $D_{ww}(w/w_f)$, а также путем сушки на основе разработанной методики $a_m(w/w_f)$ для ячеистого бетона (рис. 3.4, *а*) и силикатного кирпича (рис. 3.4, *б*).

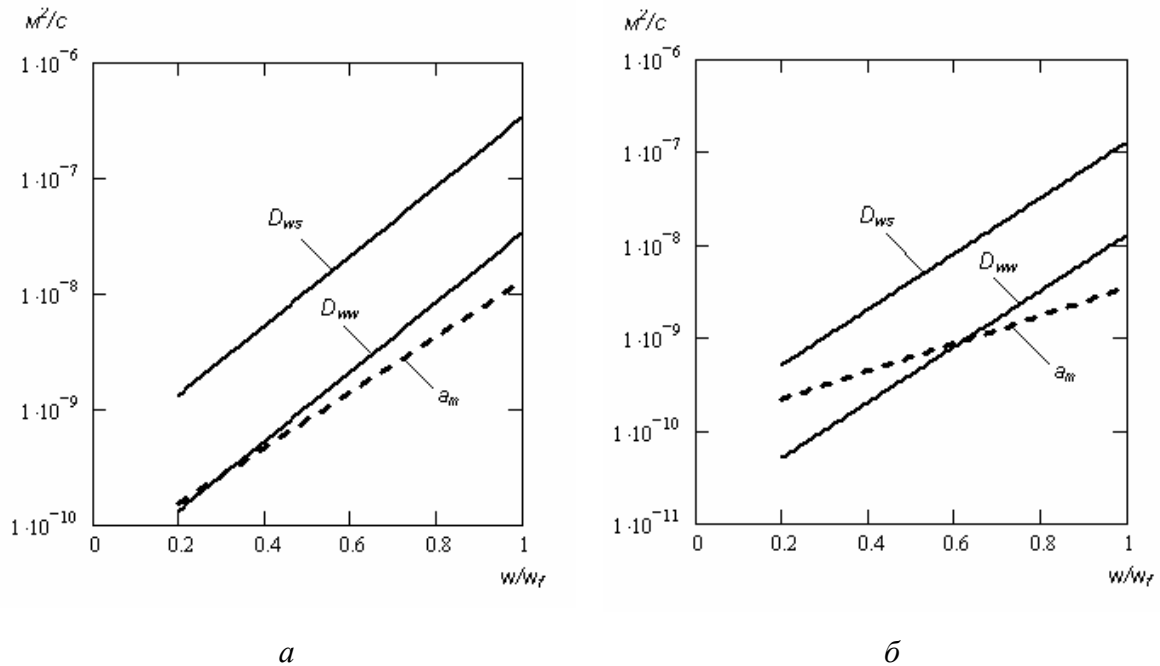


Рис. 3.4. Графики зависимостей $D_{ws}(w/w_f)$, $D_{ww}(w/w_f)$ и $a_m(w/w_f)$ для ячеистого бетона (*а*) и силикатного кирпича (*б*)

Из рисунка видно, что коэффициенты потенцилопроводности, полученные по разработанной методике, согласуются с экспериментальными данными [122] по сушке материалов. Значения коэффициента потенцилопроводности, полученного путем впитывания влаги, примерно на порядок выше значений коэффициента потенцилопроводности по методу сушки.

Сравним результаты экспериментального определения коэффициента влагопроводности, полученные сушкой влажных образцов по разработанной методике, с данными Р.Е. Брилинга на впитывание влаги [88]. Коэффициент влагопроводности β по методу [88] определяется при достижении стационарных условий перемещения влаги в образцах материалов, установленных на впитывание. Сравнение результатов выполнено

при эталонной температуре. Пересчет коэффициента влагопроводности β , кг/[м·с·(кг/кг)], при температуре $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [88], на коэффициент влагопроводности λ_m , кг/[м·с·(кДж/кг)], при $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ производится по формуле:

$$\lambda_m = k_t c_m \beta,$$

где k_t — температурный коэффициент, равный 1,125; c_m — удельная абсолютная влагоемкость материала, (кг/кг)/(кДж/кг), определяемая при $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты сравнения коэффициента влагопроводности для газосиликата, полученные сушкой и впитыванием влаги, в шкале абсолютного потенциала влажности при $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены на рис. 3.5.

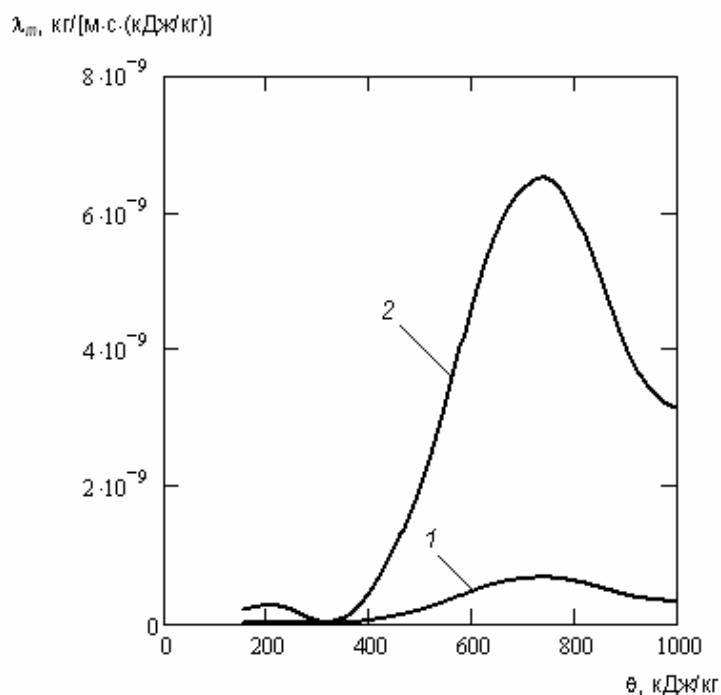


Рис. 3.5. Графики зависимости $\lambda_m(\theta)$ при $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученной сушкой (1) и впитыванием влаги (2) для газосиликата ($\rho_0 = 390\text{ кг/м}^3$)

Как видно из рисунка, характер изменения коэффициента влагопроводности, полученного путем впитывания влаги и сушкой, один и тот

же. Значения коэффициента влагопроводности, полученного путем впитывания влаги, примерно на порядок выше значений коэффициента влагопроводности по методу сушки, что можно объяснить различными механизмами состояния и переноса влаги при впитывании и сушке материала. Выбор коэффициента влагопроводности определяется конкретными условиями задачи.

Таблица 3.1

Значения коэффициента влагопроводности λ_m в шкале абсолютного потенциала влажности θ при эталонной температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$

θ , кДж/кг	Значения λ_m , кг/[м·с·(кДж/кг)], для материалов									
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
87	1,14· 10 ⁻¹¹	4,88· 10 ⁻¹¹	1,60· 10 ⁻¹¹	9,94· 10 ⁻¹¹	1,93· 10 ⁻¹⁰	9,80· 10 ⁻¹²	1,02· 10 ⁻¹⁰	7,12· 10 ⁻¹¹	2,80· 10 ⁻¹⁰	8,91· 10 ⁻¹¹
174	3,33· 10 ⁻¹¹	7,32· 10 ⁻¹¹	1,21· 10 ⁻¹⁰	9,54· 10 ⁻¹¹	1,97· 10 ⁻¹⁰	7,45· 10 ⁻¹¹	1,35· 10 ⁻¹⁰	1,14· 10 ⁻¹⁰	2,88· 10 ⁻¹⁰	3,71· 10 ⁻¹¹
261	2,80· 10 ⁻¹¹	1,60· 10 ⁻¹⁰	1,66· 10 ⁻¹⁰	6,08· 10 ⁻¹¹	2,47· 10 ⁻¹⁰	1,13· 10 ⁻¹⁰	1,77· 10 ⁻¹⁰	1,23· 10 ⁻¹⁰	6,87· 10 ⁻¹⁰	9,23· 10 ⁻¹¹
348	6,08· 10 ⁻¹²	5,91· 10 ⁻¹¹	3,08· 10 ⁻¹¹	7,02· 10 ⁻¹¹	2,72· 10 ⁻¹¹	4,65· 10 ⁻¹¹	4,94· 10 ⁻¹⁰	2,62· 10 ⁻¹⁰	2,62· 10 ⁻⁹	1,19· 10 ⁻¹¹
436	2,57· 10 ⁻¹¹	1,99· 10 ⁻¹⁰	2,31· 10 ⁻¹⁰	8,70· 10 ⁻¹¹	2,88· 10 ⁻¹⁰	9,12· 10 ⁻¹¹	8,13· 10 ⁻¹⁰	4,00· 10 ⁻¹⁰	4,56· 10 ⁻⁹	1,40· 10 ⁻¹¹
523	7,97· 10 ⁻¹¹	1,48· 10 ⁻⁹	1,73· 10 ⁻⁹	2,98· 10 ⁻¹⁰	1,25· 10 ⁻⁹	3,91· 10 ⁻¹⁰	4,04· 10 ⁻⁹	1,80· 10 ⁻⁹	1,23· 10 ⁻⁸	—
610	1,21· 10 ⁻¹⁰	9,53· 10 ⁻⁹	1,01· 10 ⁻⁸	1,01· 10 ⁻¹⁰	2,85· 10 ⁻⁹	1,10· 10 ⁻⁹	9,56· 10 ⁻⁹	3,67· 10 ⁻⁹	3,37· 10 ⁻⁸	—
697	1,33· 10 ⁻¹⁰	4,97· 10 ⁻⁸	4,67· 10 ⁻⁸	6,29· 10 ⁻⁹	4,96· 10 ⁻⁹	2,41· 10 ⁻⁹	1,67· 10 ⁻⁸	5,49· 10 ⁻⁹	—	—
784	1,10· 10 ⁻¹⁰	1,60· 10 ⁻⁷	1,27· 10 ⁻⁷	—	6,26· 10 ⁻⁹	3,68· 10 ⁻⁹	2,08· 10 ⁻⁸	6,11· 10 ⁻⁹	—	—
871	7,95· 10 ⁻¹¹	3,03· 10 ⁻⁷	2,10· 10 ⁻⁷	—	6,40· 10 ⁻⁹	4,27· 10 ⁻⁹	1,96· 10 ⁻⁸	5,34· 10 ⁻⁹	—	—

Продолжение табл. 3.1

958	4,86· 10 ⁻¹¹	3,90· 10 ⁻⁷	2,20· 10 ⁻⁷	—	5,22· 10 ⁻⁹	4,05· 10 ⁻⁹	1,44· 10 ⁻⁸	3,83· 10 ⁻⁹	—	—
1045	2,47· 10 ⁻¹¹	3,82· 10 ⁻⁷	1,47· 10 ⁻⁷	—	3,75· 10 ⁻⁹	3,29· 10 ⁻⁹	9,01· 10 ⁻⁹	2,70· 10 ⁻⁹	—	—
1132	7,83· 10 ⁻¹³	1,41· 10 ⁻⁷	6,95· 10 ⁻⁸	—	3,15· 10 ⁻⁹	2,26· 10 ⁻⁹	3,36· 10 ⁻⁹	1,45· 10 ⁻⁹	—	—
1246	7,83· 10 ⁻¹³	1,72· 10 ⁻⁷	6,96· 10 ⁻⁸	—	3,16· 10 ⁻⁹	1,20· 10 ⁻⁹	2,74· 10 ⁻⁹	3,28· 10 ⁻¹⁰	—	—

Пр и м е ч а н и е. В указанной таблице используются следующие материалы: А — бетон тяжелый ($\rho_0 = 2160 \text{ кг/м}^3$); Б — керамзитобетон ($\rho_0 = 1180 \text{ кг/м}^3$); В — пенобетон ($\rho_0 = 775 \text{ кг/м}^3$); Г — газобетон ($\rho_0 = 700 \text{ кг/м}^3$); Д — газосиликат ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$); Е — раствор цементный ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$); Ж — кирпич керамический ($\rho_0 = 1700 \text{ кг/м}^3$); И — кирпич силикатный ($\rho_0 = 1780 \text{ кг/м}^3$); К — минераловатные плиты ($\rho_0 = 350 \text{ кг/м}^3$); Л — пенополистирол ($\rho_0 = 30 \text{ кг/м}^3$).

На основе экспериментальных данных [88, 106] разработана таблица значений коэффициента влагопроводности в шкале абсолютного потенциала влажности при эталонной температуре для ряда строительных материалов (табл. 3.1).

3.4. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЛАГОПЕРЕНОС В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В 3.2 приведена методика экспериментального исследования характеристик переноса влаги путем сушки влажных материалов от полного водонасыщения до равновесного влагосодержания с воздушной средой. Получены данные по коэффициенту влагопроводности ряда капиллярно-пористых строительных материалов при эталонной температуре $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Возникает необходимость в учете влияния температуры на влагоперенос в материалах ограждающих конструкций. Это может быть выполнено на основе теоретических представлений о движении влаги в капиллярно-пористом материале [151].

Рассмотрим плоскую модель капиллярно-пористого материала в виде системы параллельных цилиндрических капилляров различного радиуса, между которыми имеется сообщение по всей их длине через стенки. Будем считать, что при перемещении жидкости между стенками не возникает никаких сопротивлений. Основной характеристикой рассматриваемой модели капиллярно-пористого материала является дифференциальная функция распределения капилляров по радиусам $f(r)$ следующего вида:

$$f(r) = \frac{dF(r)}{dr}, \quad (3.28)$$

где $F(r)$ — интегральная функция распределения капилляров по радиусам, которая определяется как суммарная площадь поперечного сечения всех капилляров радиуса меньшего r , приходящихся на единицу поверхности сечения модельного тела, перпендикулярного оси капилляров, $\text{м}^2/\text{м}^2$.

Рассмотрим капиллярное всасывание воды модельным телом, предполагая, что тело соприкасается с поверхностью воды под углом ψ наклона капилляров к поверхности воды. Проведем сечение, перпендикулярное оси капилляров, на высоте x от поверхности воды. Обозначим через r_x максимальный радиус заполненного водой капилляра, мениск которого находится в данном сечении. Обозначим через r_{min} минимальный радиус капилляра в том же сечении. Ясно, что в рассматриваемом сечении будут заполнены капилляры всех радиусов от r_{min} до r_x .

Влагосодержание материала w_x , кг/кг, в рассматриваемом сечении x равно:

$$w_x = \frac{\rho_w}{\rho_0} \int_{r_{min}}^{r_x} f(r) dr, \quad (3.29)$$

где ρ_w , ρ_0 — соответственно плотность воды и материала в сухом состоянии, кг/м³.

Напишем уравнение баланса энергии для мениска жидкости в капилляре радиуса r_x для элементарного объема жидкости dV :

$$dG + dP_k dV + dP_R dV = 0. \quad (3.30)$$

В уравнении (3.30) первое слагаемое определяет изменение потенциальной энергии жидкости в капилляре, второе слагаемое — изменение энергии, связанной с изменением капиллярного давления, третье слагаемое — изменение энергии за счет сопротивления трению жидкости о стенки капилляра.

Изменение потенциальной энергии жидкости в капилляре dG , Дж, равно:

$$dG = -\rho_w g \sin \psi dx dV, \quad (3.31)$$

где ρ_w — плотность воды, кг/м³; g — ускорение свободного падения ($g \approx 9,81$ м/с²); ψ — угол наклона капилляра к горизонту, °; dx — приращение высоты подъема жидкости в капилляре, м.

Поскольку все капилляры сообщаются между собой, и жидкость свободно перемещается из одного капилляра в другой, капиллярное давление P_k , Па, во всех капиллярах на высоте x должно быть одинаковым и равным:

$$P_k = \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r_x}, \quad (3.32)$$

где σ — поверхностное натяжение воды, Н/м; ϑ — угол смачивания жидкости стенок капилляра (°); r_x — радиус капилляра на высоте x , м.

Тогда имеем:

$$\frac{dP_k}{dx} = \frac{dP_k}{dr_x} \cdot \frac{dr_x}{dx} = -\frac{2\sigma}{r_x^2} \cdot \frac{dr_x}{dx}. \quad (3.33)$$

Падение капиллярного давления, связанное с преодолением трения, по уравнению Пуазейля выражается следующим образом:

$$\frac{dP_R}{dx} = \frac{8\eta}{r^2} \cdot \frac{dx}{d\tau}, \quad (3.34)$$

где η — динамическая вязкость воды, Па·с; $dx/d\tau$ — средняя линейная скорость движения жидкости по капилляру, м/с.

С учетом (3.31), (3.33) и (3.34) уравнение баланса энергии для мениска жидкости в капилляре радиуса r_x примет вид:

$$-\rho_w g \sin \psi - \frac{2\sigma}{r_x^2} \cdot \frac{dr_x}{dx} - \frac{8\eta}{r^2} \cdot \frac{dx}{d\tau} = 0. \quad (3.35)$$

Из уравнения (3.35) находим среднюю линейную скорость движения жидкости по капилляру:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{r^2}{8\eta} \left(-\rho_w g \sin \psi - \frac{2\sigma}{r_x^2} \cdot \frac{dr_x}{dx} \right). \quad (3.36)$$

Используя (3.29), градиент влагосодержания в материале можно записать в следующем виде:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{\rho_w}{\rho_0} f(r_x) \frac{dr_x}{dx}. \quad (3.37)$$

Плотность потока влаги в материале q_m , кг/(м²·с), определим по формуле:

$$q_m = \rho_w \int_{r_{min}}^{r_x} \frac{dx}{d\tau} f(r) dr. \quad (3.38)$$

Подставляя (3.36) в (3.38), получим следующее выражение для определения q_m :

$$q_m = -\frac{\rho_w}{8\eta} \left(\rho_w g \sin \psi + \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r_x^2} \cdot \frac{dr_x}{dx} \right) \int_{r_{min}}^{r_x} r^2 f(r) dr. \quad (3.39)$$

С другой стороны, плотность потока влаги в материале пропорциональна градиенту абсолютного потенциала влажности $\nabla\theta$:

$$q_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (3.40)$$

где λ_m — коэффициент влагопроводности материала, кг/[м·с·(кДж/кг)].

Приравнивая правые части (3.39) и (3.40), получим выражения для коэффициента влагопроводности материала:

$$\lambda_m = - \frac{\rho_w \left(\rho_w g \sin \psi + \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r_x^2} \cdot \frac{dr_x}{dx} \right) \int_{r_{min}}^{r_x} r^2 f(r) dr}{8\eta \nabla \theta}. \quad (3.41)$$

Если капилляры расположены горизонтально ($\psi = 0$), то выражение для λ_m значительно упрощается:

$$\lambda_m = - \frac{\sigma}{4\eta} \cdot \frac{\rho_w \cos \vartheta}{\nabla \theta} \cdot \frac{dr_x}{dx} \int_{r_{min}}^{r_x} r^2 f(r) dr. \quad (3.42)$$

Из формулы (3.42) видно, что влияние температуры на влагопроводность материала можно учесть за счет изменения теплофизических свойств влаги в порах материала σ и η . Таким образом, если известно значение коэффициента влагопроводности λ_{m0} при эталонной температуре $t_0 = 20$ °С, то значение λ_m при данной температуре t можно определить по формуле:

$$\lambda_m = \frac{\sigma \eta_0}{\sigma_0 \eta} \lambda_{m0}, \quad (3.43)$$

где σ_0, η_0 — теплофизические свойства жидкости при эталонной температуре t_0 ; σ, η — то же, при данной температуре t .

Воспользуемся эмпирическими зависимостями теплофизических свойств воды от температуры, достаточно хорошо изученными в рабочем диапазоне температур от -20 до 30 °С.

В [95] приведена зависимость поверхностного натяжения воды от температуры:

$$\sigma(t) = 75,7 \cdot 10^{-3} (1 - 0,0020t). \quad (3.44)$$

В [160, 161] приведена зависимость коэффициента динамической вязкости воды от температуры:

$$\eta(t) = 10^{-3} \exp \left[\sum_{i=0}^5 a_i \left(\frac{100}{t + 273,15} \right)^i \right], \quad (3.45)$$

где коэффициенты имеют следующие значения:

$$a_0 = -1,1469663 \cdot 10^1; a_1 = 1,43659564 \cdot 10^2; a_2 = -9,97411315 \cdot 10^2; \\ a_3 = 3,74665106 \cdot 10^3; a_4 = -7,02407628 \cdot 10^3; a_5 = 5,39493001 \cdot 10^3.$$

Значения поверхностного натяжения и динамической вязкости воды, определяемые по формулам (3.44) и (3.45) при температурах ниже 0 °С, относятся к переохлажденной воде.

С учетом (3.44) и (3.45) формула (3.43) для коэффициента влагопроводности λ_m в рабочем диапазоне температур $-20 \leq t \leq 30$ °С примет вид:

$$\lambda_m = \frac{1,044 (1 - 0,0020 t)}{\exp \left[\sum_{i=0}^5 a_i \left(\frac{100}{t + 273,15} \right)^i \right]} \lambda_{m0}. \quad (3.46)$$

Формула (3.46) позволяет производить пересчет коэффициента влагопроводности, определенного при эталонной температуре, на коэффициент влагопроводности при произвольной температуре.

На рис. 3.6 представлен график зависимости $\lambda_m(\theta, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390$ кг/м³). Зависимость $\lambda_{m0}(\theta)$ при эталонной температуре построена на основании экспериментальных данных по сушке материала. Кривые $\lambda_m(\theta, t)$ при температурах 0 и -10 °С построены на основании расчета по формуле (3.46). Из графика (рис. 3.6) видно, что характер изменения коэффициента влагопроводности при разных температурах один и тот же. С повышением температуры коэффициент влагопроводности λ_m увеличивается, что можно объяснить уменьшением вязкости воды и ее поверхностного натяжения. Сравнение графиков (рис. 3.6 и 3.5) показы-

вает, что температура оказывает меньшее влияние на изменение коэффициента влагопроводности, чем условия проведения эксперимента.

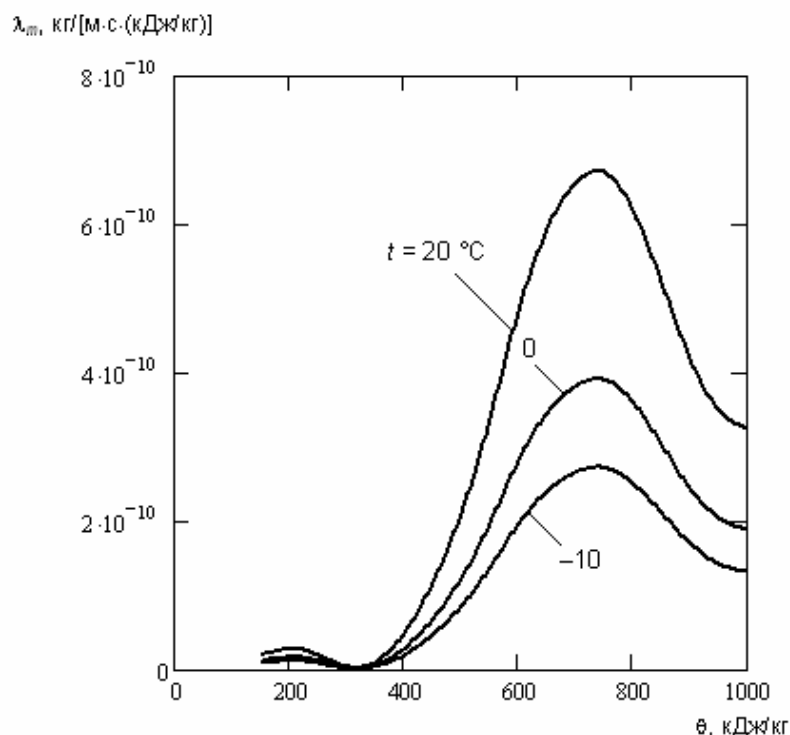


Рис. 3.6. График зависимости $\lambda_m(\theta, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$)

Указанный метод позволяет учесть влияние температуры на влагоперенос в строительных материалах в широком диапазоне значений потенциала влажности и температуры. Полученные данные могут быть использованы для моделирования процессов влагопереноса в материалах ограждающих конструкций на основе потенциала влажности.

Для приближенных инженерных расчетов определение коэффициента влагопроводности материалов можно упростить. Если в сорбционной области в качестве определяющего процесса принять перенос парообразной влаги, а движением жидкой (пленочной) фазы влаги пренебречь, то коэффициент влагопроводности $\lambda_m, \text{ кг/[м·с·(кДж/кг)]}$, можно определить по формуле:

$$\lambda_m = 13,24 \cdot 10^{-10} \mu, \quad (3.47)$$

где $13,24 \cdot 10^{-10}$ — размерный коэффициент, $\text{кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / [\text{мг} \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж} / \text{кг})]$, определенный при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и средней относительной влажности воздуха $p/p_s = 0,8$ [ГОСТ 25898–83]; μ — коэффициент паропроницаемости материала, $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Значения коэффициента паропроницаемости строительных материалов приведены в СП 23–101–2004.

В табл. 3.2 приведены значения коэффициента влагопроводности λ_m , полученного расчетом по формуле (3.47) на основе коэффициента паропроницаемости μ для ряда строительных материалов.

Таблица 3.2

Значения коэффициентов μ и λ_m строительных материалов

Материал	Плотность в сухом состоянии ρ_0 , $\text{кг} / \text{м}^3$	Коэффициент паропроницаемости μ , $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$	Коэффициент влагопроводности λ_m , $\text{кг} / [\text{м} \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж} / \text{кг})]$
Железобетон	2500	0,03	$3,97 \cdot 10^{-11}$
Керамзитобетон	1200	0,11	$1,46 \cdot 10^{-10}$
Пенобетон	800	0,14	$1,85 \cdot 10^{-10}$
Газобетон	700	0,16	$2,12 \cdot 10^{-10}$
Газосиликат	400	0,23	$3,04 \cdot 10^{-10}$
Раствор цементный	1800	0,09	$1,19 \cdot 10^{-10}$
Кирпич керамический (в кладке)	1800	0,11	$1,46 \cdot 10^{-10}$
Кирпич силикатный (в кладке)	1800	0,11	$1,46 \cdot 10^{-10}$
Минераловатные плиты жесткие	350	0,38	$5,03 \cdot 10^{-10}$
Пенополистирол	40	0,05	$6,62 \cdot 10^{-11}$

Полученные данные можно использовать для инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций зданий.

3.5. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ И ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МАТЕРИАЛАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

В 3.4 рассмотрено влияние температуры на влагоперенос в материалах ограждающих конструкций на основе теоретических представлений о движении влаги в капиллярно-пористом материале. Рассмотрим влияние влажности на характеристики состояния и переноса тепла в материалах ограждающих конструкций.

Известно, что *удельная теплоемкость*, являющаяся характеристикой состояния тепла в материале, зависит от его влажности [88]. С повышением влажности материала повышается и его теплоемкость, что объясняется присутствием воды, имеющей теплоемкость, значительно превышающую теплоемкость строительных материалов. Зависимость удельной теплоемкости материала от его влагосодержания при положительных температурах выражается известной формулой:

$$c_h^{(+)}(w) = c_{h0} \left(\frac{1 + \frac{c_{hw}}{c_{h0}} w}{1 + w} \right), \quad (3.48)$$

где $c_h^{(+)}(w)$ — удельная теплоемкость материала при влагосодержании w , кДж/(кг·°C); c_{h0} — удельная теплоемкость того же материала в сухом состоянии, кДж/(кг·°C); c_{hw} — удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°C) [табл. 3.3]; w — влагосодержание материала, кг/кг.

При отрицательных температурах часть влаги, содержащейся в порах материала, замерзает, что приводит к снижению удельной теплоемкости

материала. Зависимость удельной теплоемкости материала от его влаго-содержания при отрицательных температурах можно выразить формулой [162]:

$$c_h^{(-)}(w, t) = c_{h0} \left[\frac{1 + \frac{c_{hw}}{c_{h0}} w_u + \frac{c_{hi}}{c_{h0}} (w - w_u)}{1 + w} \right], \quad (3.49)$$

где $c_h^{(-)}(w)$ — удельная теплоемкость материала при влагосодержании w , кДж/(кг·°C); w_u — количество незамерзшей влаги в материале, кг/кг; c_{hi} — удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·°C) [табл. 3.3].

Таблица 3.3

Теплофизические характеристики воды и льда

Характеристика	Температура, °C	Вода [163]	Лед [162]
Плотность ρ , кг/м ³	0	999,9	917
Удельная теплоемкость c_h , кДж/(кг·°C)	–20	—	2,093
	0	4,212	—
	10	4,191	—
	20	4,183	—
	30	4,174	—
Коэффициент теплопроводности λ_h , Вт/(м·°C)	–20	—	2,21
	0	0,560	1,74
	10	0,580	—
	20	0,597	—
	30	0,612	—

Перейдем от влагосодержания к шкале относительного потенциала влажности. Используя методику определения количества незамерзшей влаги в материале (см. 2.6) и зависимость $w(\theta_\phi)$, установленную в 2.4, получим зависимость удельной теплоемкости материала от относительного потенциала влажности и температуры:

$$c_h(\theta_\varphi, t) = \begin{cases} c_{h0} \left[\frac{1 + \frac{c_{hw}}{c_{h0}} w(\theta_\varphi)}{1 + w(\theta_\varphi)} \right], & t \geq 0^\circ \text{C}; \\ c_{h0} \left[\frac{1 + \left[\frac{c_{hw}}{c_{h0}} k_\theta + \frac{c_{hi}}{c_{h0}} [1 - k_\theta] \right] w(\theta_\varphi)}{1 + w(\theta_\varphi)} \right], & t < 0^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (3.50)$$

В (3.50) коэффициент k_θ определяется по формуле:

$$k_\theta(\Delta T) = \begin{cases} \frac{\theta_\varphi(\Delta T)}{\theta_\varphi^{max}}, & \text{при } t < 0^\circ \text{C}; \\ 1, & \text{при } t \geq 0^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Здесь $\theta_\varphi(\Delta T)$ — относительный потенциал влажности, соответствующий фазовому превращению и определяемый по формуле (2.27); θ_φ^{max} — максимальный относительный потенциал влажности ($\theta_\varphi^{max} = 2,86$).

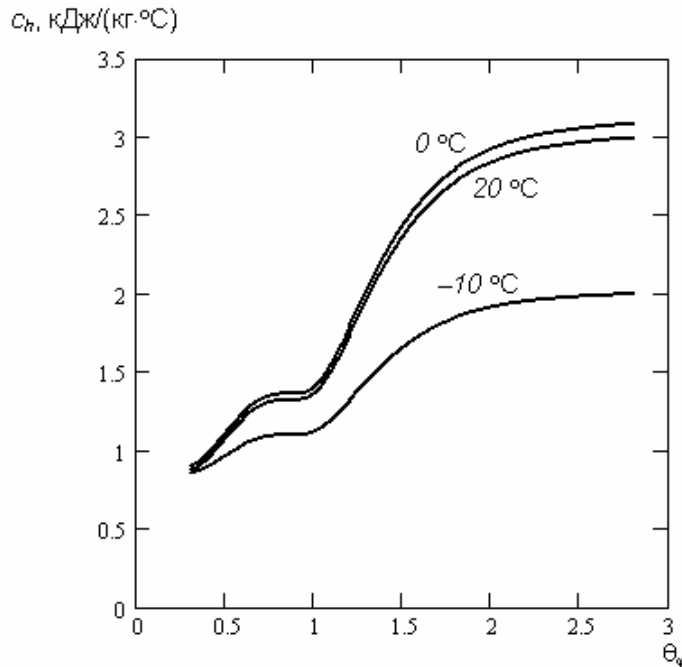


Рис. 3.7. График зависимости $c_h(\theta_\varphi, t)$ для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$)

График зависимости $c_h(\theta_\phi, t)$, построенный на основании (3.50) для газосиликата, представлен на рис. 3.7. Из графика видно, что в сорбционной области ($\theta_\phi < 1$) удельная теплоемкость материала возрастает как при положительных, так и при отрицательных температурах. В зоне массовой капиллярной конденсации ($1 \leq \theta_\phi \leq 1,7$) при положительных температурах отмечается резкий рост удельной теплоемкости, что объясняется увеличением количества воды в материале. В той же области при отрицательных температурах отмечается значительно меньший рост удельной теплоемкости, что связано с образованием льда в материале. В капиллярно-насыщенной области ($\theta_\phi > 1,7$) удельная теплоемкость материала практически постоянна при отрицательных температурах и незначительно возрастает при положительных температурах.

Исследованию *коэффициента теплопроводности* как характеристики переноса тепла в материале посвящено множество работ [92, 125, 162, 164—171]. С повышением влагосодержания материала повышается и его коэффициент теплопроводности, что объясняется значительно большей теплопроводностью воды по сравнению с теплопроводностью воздуха в порах среднего размера [88]. Кроме того, влага в порах материала увеличивает размеры контактных площадок между частицами материала, что также повышает его коэффициент теплопроводности. Еще более резко возрастает коэффициент теплопроводности при замерзании влаги в материале, так как лед имеет теплопроводность большую, чем вода, и тем более воздух (табл. 3.3).

Разные исследователи дают различные эмпирические формулы зависимости коэффициента теплопроводности от влажности материалов. Наиболее простой является линейная зависимость коэффициента теплопроводности от влагосодержания, широко применяемая на практике при положительных температурах:

$$\lambda_h^{(+)}(w) = \lambda_{h0}(1 + k_w w), \quad (3.51)$$

где $\lambda_h^{(+)}(w)$ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С), при влагосодержании w ; λ_{h0} — коэффициент теплопроводности того же материала в сухом состоянии, Вт/(м·°С); k_w — коэффициент, определяющий относительное приращение коэффициента теплопроводности при изменении на единицу влагосодержания, (кг/кг)⁻¹; w — влагосодержание материала, кг/кг.

Для определения параметров k_w и λ_{h0} в формуле (3.51) используем данные СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника». В нем приведены три значения коэффициента теплопроводности для различных значений влагосодержания: λ_h^0 при $w = 0$; λ_h^A при $w = w_A$ по условиям эксплуатации «А» ограждающих конструкций; λ_h^B при $w = w_B$ по условиям эксплуатации «Б». Значения коэффициента теплопроводности приведены при температуре около 0 °С. По указанным узлам после математической обработки получим значения параметров k_w и λ_{h0} для ряда строительных материалов (табл. 3.4).

Зависимость коэффициента теплопроводности материала от его влагосодержания при отрицательных температурах можно выразить формулой [162]:

$$\lambda_h^{(-)}(w) = \lambda_{h0} [1 + k_w w_u + k_i (w - w_u)], \quad (3.52)$$

где $\lambda_h^{(-)}$ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С), при влагосодержании w ; k_i — коэффициент, определяющий относительное приращение коэффициента теплопроводности при изменении на единицу содержания льда, (кг/кг)⁻¹.

Значения коэффициента k_i для ряда строительных материалов, полученные путем обработки экспериментальных данных [43], приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Тепловые характеристики материалов

Материал	Характеристики материала в сухом состоянии			Коэффициенты	
	ρ_0 , кг/м ³	c_{h0} , кДж/(кг·°C)	λ_{h0} , Вт/(м·°C)	k_w , (кг/кг) ⁻¹	k_i , (кг/кг) ⁻¹
Бетон тяжелый	2400	0,84	1,51	7,71	23,13
Керамзитобетон	1200	0,84	0,36	4,44	9,86
Пенобетон	800	0,84	0,213	5,1	9,72
Газобетон	700	0,84	0,182	5,57	10,1
Газосиликат	400	0,84	0,111	3,05	7,12
Раствор цементный	1800	0,84	0,582	15,03	29,9
Кирпич керамический (в кладке)	1800	0,88	0,565	22,12	49,17
Кирпич силикатный (в кладке)	1800	0,88	0,692	6,14	17,7
Минераловатные плиты	100	0,84	0,055	5,16	14,48
Пенополистирол	40	1,34	0,038	3,1	8,11

Используя методику определения количества незамерзшей влаги в материале (см. 2.6) и зависимость $w(\theta_\phi)$, установленную в 2.4, получим искомую зависимость коэффициента теплопроводности материала от относительного потенциала влажности и температуры:

$$\lambda_h(\theta_\phi, t) = \begin{cases} \lambda_{h0} [1 + k_w w(\theta_\phi)], & t \geq 0^\circ \text{C}; \\ \lambda_{h0} [1 + [k_w k_\theta + k_i (1 - k_\theta)] w(\theta_\phi)], & t < 0^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (3.53)$$

График зависимости $\lambda_h(\theta_\phi, t)$, построенный на основании (3.53) для газосиликата, представлен на рис. 3.8, а. Из графика видно, что в сорбционной области ($\theta_\phi < 1$) коэффициент теплопроводности материала незначительно возрастает как при положительных, так и при отрицательных температурах. В зоне массовой капиллярной конденсации ($1 \leq \theta_\phi \leq 1,7$) при отрицательных температурах отмечается резкий рост коэффициента теплопроводности, что объясняется увеличением количества льда в материале, при положительных температурах отмечается меньший рост коэффициента теплопроводности. В капиллярно-насыщенной области ($\theta_\phi > 1,7$) интенсивность роста коэффициента теплопроводности материала снижается.

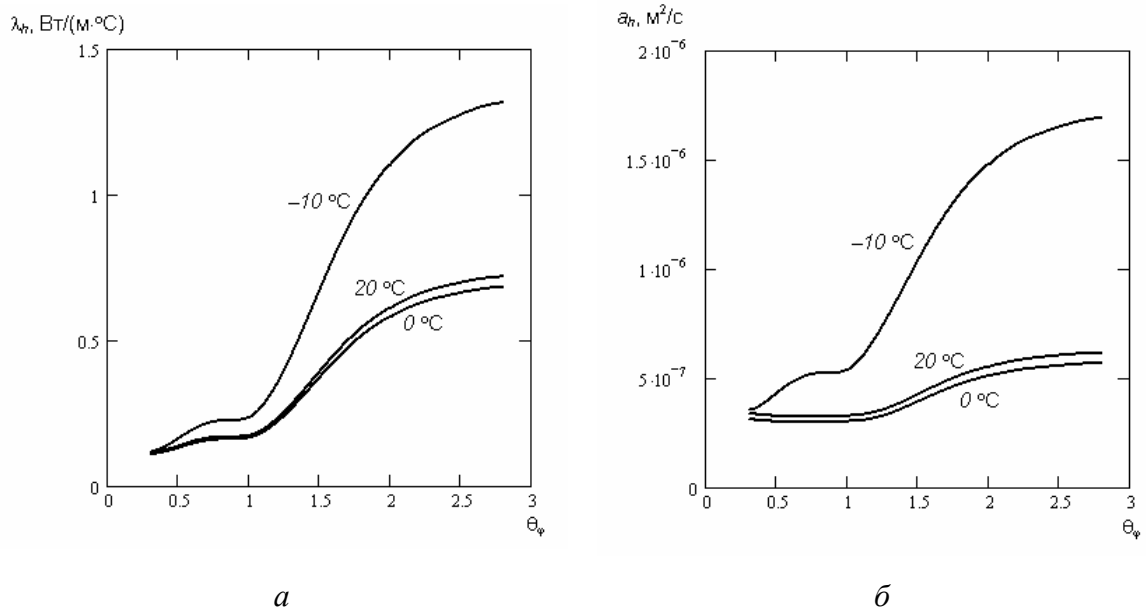


Рис. 3.8. Графики зависимостей $\lambda_h(\theta_\phi, t)$ (а) и $a_h(\theta_\phi, t)$ (б) для газосиликата ($\rho_0 = 390 \text{ кг/м}^3$)

В инженерных расчетах температурно-влажностного режима ограждающих конструкций широко применяется коэффициент температуропроводности $a_h, \text{ м}^2/\text{с}$, определяемый по формуле:

$$a_h = \frac{\lambda_h}{c_h \rho_0}. \quad (3.54)$$

С учетом (3.50) и (3.53) получим зависимость коэффициента температуропроводности материала от относительного потенциала влажности и температуры:

$$a_h(\theta_\varphi, t) = \begin{cases} \frac{\lambda_{h0} [1 + k_w w(\theta_\varphi)] [1 + w(\theta_\varphi)]}{c_{h0} \rho_0 \left[1 + \frac{c_{hw}}{c_{h0}} w(\theta_\varphi) \right]}, & t \geq 0^\circ \text{C}; \\ \frac{\lambda_{h0} [1 + [k_w k_\theta + k_i (1 - k_\theta)] w(\theta_\varphi)] [1 + w(\theta_\varphi)]}{c_{h0} \rho_0 \left[1 + \left[\frac{c_{hw}}{c_{h0}} k_\theta + \frac{c_{hi}}{c_{h0}} [1 - k_\theta] \right] w(\theta_\varphi) \right]}, & t < 0^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (3.55)$$

График зависимости $a_h(\theta_\varphi, t)$, построенный на основании (3.55) для газосиликата, представлен на рис. 3.8, б. Из графика видно, что при положительных температурах коэффициент температуропроводности материала в сорбционной области практически постоянный и незначительно возрастает в зоне массовой капиллярной конденсации, при этом температура оказывает малое влияние на изменение коэффициента a_h . При отрицательных температурах в сорбционной области коэффициент температуропроводности плавно возрастает, в зоне массовой капиллярной конденсации отмечается резкий рост коэффициента a_h . Указанный характер изменения коэффициента температуропроводности можно объяснить совместным влиянием на него коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости материала.

4. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Разработаны методы инженерной оценки температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности.

4.1. РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Разработан метод расчета профиля влагосодержания по толщине ограждающей конструкции, позволяющий произвести общую оценку температурно-влажностного режима. Предлагаемый метод основан на следующих допущениях:

1. Рассматривается одномерный тепло- и влагоперенос в многослойной ограждающей конструкции, состоящей из n слоев различных материалов.
2. Рассматриваются стационарные условия тепло- и влагопереноса в конструкции при фиксированных значениях температуры (t_{int} , t_{ext}) и абсолютного потенциала влажности (θ_{int} , θ_{ext}) внутреннего и наружного воздуха.
3. Теплофизические характеристики отдельных материальных слоев в конструкции (коэффициенты теплопроводности λ_h и влагопроводности λ_m) постоянны в пределах данного слоя и ступенчато изменяются от слоя к слою.
4. На границах конструкции с окружающей средой заданы коэффициенты теплообмена (α_h^{si} , α_h^{se}) и влагообмена (α_m^{si} , α_m^{se}).

Требуется определить распределение влагосодержания по толщине конструкции.

Для решения поставленной задачи введем координатную ось по толщине конструкции от внутренней ее поверхности к наружной. Упорядочим слои конструкции, присвоив первому слою, примыкающему к внутренней поверхности, индекс 1, последнему слою, примыкающему к наружной поверхности, индекс n . При указанных выше допущениях влагоперенос в любом слое конструкции на основе абсолютного потенциала влажности θ описывается уравнением вида:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m(x) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] = 0, \quad (4.1)$$

где $\lambda_m(x)$ — коэффициент влагопроводности в сечении x конструкции.

На границах конструкции с окружающей средой заданы коэффициенты влагообмена α_m^{si} , α_m^{se} и значения абсолютного потенциала влажности внутреннего и наружного воздуха θ_{int} и θ_{ext} (граничные условия третьего рода).

Начальные условия в случае стационарного влагопереноса не требуются.

Интегрирование уравнения (4.1) дает распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ по толщине конструкции:

$$\theta(x) = \theta_{int} - \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_m^{con}} R_m(x), \quad (4.2)$$

где $R_m(x)$ — сопротивление влаготеплопередаче до рассматриваемого сечения x ; R_m^{con} — общее сопротивление влаготеплопередаче, определяемое по формуле:

$$R_m^{con} = \frac{1}{\alpha_m^{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{mi}} + \frac{1}{\alpha_m^{se}}, \quad (4.3)$$

где δ_i — толщина i -го слоя ограждения; λ_{mi} — коэффициент влагопроводности материала i -го слоя.

Распределение температуры $t(x)$ по толщине конструкции описывается аналогично уравнению (4.2):

$$t(x) = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_h^{con}} R_h(x), \quad (4.4)$$

где $R_h(x)$ — сопротивление теплопередаче до рассматриваемого сечения x ; R_h^{con} — общее сопротивление теплопередаче, определяемое по формуле:

$$R_h^{con} = \frac{1}{\alpha_h^{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{hi}} + \frac{1}{\alpha_h^{se}}, \quad (4.5)$$

где λ_{hi} — коэффициент теплопроводности материала i -го слоя.

Полученные результаты позволяют определить распределение влагосодержания $w(x)$ по толщине конструкции.

Порядок расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций следующий:

1. Задаются параметры микроклимата здания: температура t_{int} и абсолютный потенциал влажности θ_{int} внутреннего воздуха.
2. Задаются параметры климата: температура t_{ext} и абсолютный потенциал влажности θ_{ext} наружного воздуха.
3. Задаются расчетные теплофизические характеристики материалов ограждающей конструкции: коэффициенты теплопроводности λ_h и влаготеплопроводности λ_m .
4. Задаются коэффициенты теплообмена (α_h^{si} , α_h^{se}) и влагообмена (α_m^{si} , α_m^{se}) внутренней и наружной поверхностей ограждения с окружающей средой.
5. По формуле (4.4) определяется распределение температуры $t(x)$ по толщине конструкции.
6. Используя распределение $t(x)$, по формуле (2.18) определяются значения максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$.

7. По формуле (4.2) определяется распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ по толщине конструкции.

8. Используя полученные значения $\theta(x)$ и $\theta_{m.s}(x)$, по формуле (2.17) определяется распределение относительного потенциала влажности $\theta_\varphi(x)$.

9. С помощью известной зависимости $w(\theta_\varphi)$ определяется искомое распределение равновесного влагосодержания $w(x)$ по толщине конструкции.

Расчет профиля влагосодержания по толщине ограждающей конструкции иллюстрируется примерами.

Пример 4.1. Требуется построить профиль влагосодержания в стене из пенобетонных блоков ($\rho_0 = 600 \text{ кг/м}^3$) толщиной 0,4 м с наружным защитно-отделочным слоем из кирпичной кладки ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$) толщиной 0,12 м.

Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 96 \text{ кДж/кг}$. Параметры климата: $t_{ext} = -7,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{ext} = 17 \text{ кДж/кг}$.

Расчетные теплофизические характеристики материалов: пенобетон — $\lambda_{h1} = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m1} = 2,25 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; кирпичная кладка — $\lambda_{h2} = 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m2} = 1,46 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

По формуле (4.5) общее сопротивление теплопередаче ограждения $R_h^{con} = 2,15 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$. Распределение температуры по толщине конструкции описывается кусочно-линейной функцией вида:

$$t(x) = \begin{cases} 18,53 - 58,2x, & 0 \leq x \leq 0,4; \\ 2,57 - 18,3x, & 0,4 < x \leq 0,52. \end{cases}$$

Используя полученные значения температуры, по формуле (2.18) определяем значения максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$.

По формуле (4.3) общее сопротивление влагопередаче ограждения $R_m^{con} = 2,89 \cdot 10^9 \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг}) / \text{кг}$. Распределение абсолютного потенциала влажности по толщине конструкции имеет вид:

$$\theta(x) = \begin{cases} 90,8 - 121,5 x, & 0 \leq x \leq 0,4; \\ 116,9 - 186,7 x, & 0,4 < x \leq 0,52. \end{cases}$$

По известным значениям θ и $\theta_{m.s}$ определяем распределение относительного потенциала влажности $\theta_\phi(x)$ в ограждении.

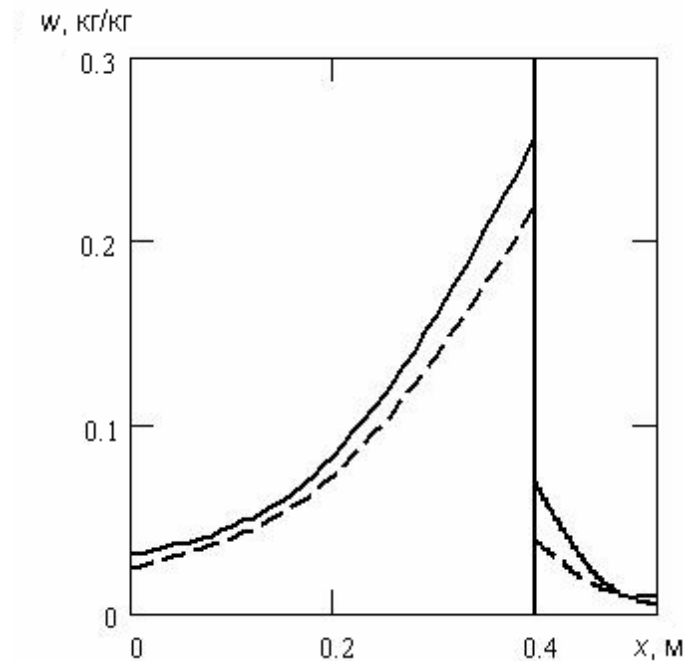


Рис. 4.1. Профиль влагосодержания $w(x)$ в стене из пенобетонных блоков с наружным слоем из кирпичной кладки

С помощью зависимостей $w(\theta_\phi)$ равновесного влагосодержания от относительного потенциала влажности (табл. 2.8) для указанных материалов, строим профиль влагосодержания $w(x)$ по толщине конструкции, представленный на рис. 4.1 (сплошная линия). На том же рисунке пунктиром показаны результаты расчета влажностного режима на основе

теории потенциала влажности В.Н. Богословского [172]. Можно отметить согласование результатов расчета по предлагаемому методу и на основе экспериментального потенциала влажности Θ_B . Анализ результатов расчета показывает, что на стыке пенобетона с кирпичной кладкой образуется зона сверхсорбционной влажности материалов, которая захватывает примерно 150 мм пенобетона и 80 мм кирпичной кладки. Размещение утеплителя изнутри ухудшает влажностный режим ограждающей конструкции.

Пример 4.2. Требуется построить профиль влагосодержания в трехслойной стеновой панели с эффективным утеплителем. Внутренний конструктивный слой панели толщиной 120 мм и наружный защитно-отделочный слой толщиной 80 мм выполнены из железобетона ($\rho_0 = 2500 \text{ кг/м}^3$), в качестве эффективного утеплителя толщиной 120 мм использованы плиты из пенополистирола ($\rho_0 = 40 \text{ кг/м}^3$).

Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$. Параметры климата: $t_{ext} = -7,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{ext} = 19 \text{ кДж/кг}$.

Расчетные теплофизические характеристики материалов: железобетон — $\lambda_{h1} = 1,92 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m1} = 3,97 \cdot 10^{-11} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; пенополистирол — $\lambda_{h2} = 0,041 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m2} = 6,62 \cdot 10^{-11} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

По формуле (4.5) общее сопротивление теплопередаче ограждения $R_h^{con} = 3,19 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$. Распределение температуры по толщине конструкции описывается кусочно-линейной функцией вида:

$$t(x) = \begin{cases} 19 - 4,17x, & 0 \leq x \leq 0,12; \\ 43,85 - 211,25x, & 0,12 < x \leq 0,24; \\ -5,77 - 4,5x, & 0,24 < x \leq 0,32. \end{cases}$$

Используя полученные значения температуры, по формуле (2.18) определяем значения максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$.

По формуле (4.3) общее сопротивление влагопередаче ограждения $R_m^{con} = 7,14 \cdot 10^9 \text{ м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})/\text{кг}$. Распределение абсолютного потенциала влажности по толщине конструкции имеет вид:

$$\theta(x) = \begin{cases} 93 - 268,3x, & 0 \leq x \leq 0,12; \\ 80,1 - 160,8x, & 0,12 < x \leq 0,24; \\ 105,7 - 267,5x, & 0,24 < x \leq 0,32. \end{cases}$$

По известным значениям θ и $\theta_{m.s}$ определяем распределение относительного потенциала влажности $\theta_\phi(x)$ в ограждении.

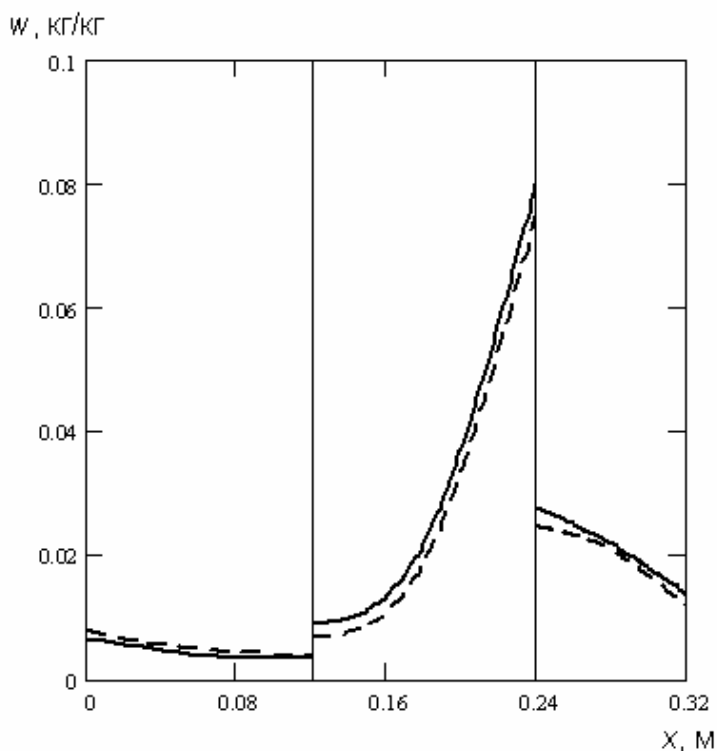


Рис. 4.2. Профиль влагосодержания $w(x)$ в трехслойной стеновой панели с эффективным утеплителем

С помощью зависимостей $w(\theta_\phi)$ равновесного влагосодержания от относительного потенциала влажности, построенных на основании

табл. 2.8, строим профиль влагосодержания $w(x)$ по толщине конструкции, представленный на рис. 4.2 (сплошная линия). На том же рисунке пунктиром показаны результаты расчета влажностного режима на основе потенциала F , предложенного В.Г. Гагариным и В.В. Козловым [74]. Можно отметить согласование результатов расчета по предлагаемому методу и на основе потенциала F .

Анализ результатов расчета показывает, что значительная часть утеплителя и наружного слоя конструкции находится при сверхсорбционной влажности материалов. Максимальное влагосодержание утеплителя, равное 0,08 кг/кг, достигается на стыке утеплителя с наружным слоем. Для обеспечения влажности материалов конструкции, не превышающих максимальную сорбционную, можно применить пароизоляционные слои на стыке утеплителя и наружного защитно-отделочного слоя.

Производя расчеты влажностного режима ограждающих конструкций по месяцам, можно определить годовой баланс влаги и сделать вывод о накоплении влаги в конструкции.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОСКОСТИ НАИБОЛЬШЕГО УВЛАЖНЕНИЯ

Еще на стадии проектирования необходимо знать участки ограждающей конструкции, подвергающиеся наибольшему увлажнению. Знание таких участков позволяет разработать проектные решения, исключающие повышенное увлажнение материалов, и тем самым повысить долговечность и эксплуатационные качества наружных ограждений [76].

Разработан инженерный метод определения плоскости наибольшего увлажнения для ограждающих конструкций, основанный на теории потенциала влажности. Под плоскостью наибольшего увлажнения понимается сечение в ограждении, в котором происходит наибольшее сверхсорбционное увлажнение материалов.

Пользуясь понятием абсолютного потенциала влажности (см. 2.3), условие сверхсорбционного увлажнения материалов ограждающей конструкции можно записать в виде следующего неравенства:

$$\theta > \theta_{m.s}. \quad (4.6)$$

В плоскости наибольшего увлажнения отмечается наибольшее отклонение θ от максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}$.

Рассмотрим одномерный тепло- и влагоперенос в многослойной ограждающей конструкции, состоящей из n слоев различных материалов. Условия тепло- и влагопереноса в конструкции предполагаются стационарными при фиксированных значениях температуры (t_{int} , t_{ext}) и абсолютного потенциала влажности (θ_{int} , θ_{ext}) внутреннего и наружного воздуха. Теплофизические характеристики отдельных материальных слоев в конструкции (коэффициенты теплопроводности λ_h и влагопроводности λ_m) постоянны в пределах данного слоя и ступенчато изменяются от слоя к слою. На границах конструкции с окружающей средой заданы коэффициенты теплообмена (α_h^{si} , α_h^{se}) и влагообмена (α_m^{si} , α_m^{se}).

Требуется определить плоскость наибольшего увлажнения в ограждающей конструкции.

Для решения поставленной задачи введем координатную ось по толщине конструкции от внутренней ее поверхности к наружной. Упорядочим слои конструкции, присвоив первому слою, примыкающему к внутренней поверхности, индекс 1, последнему слою, примыкающему к наружной поверхности, индекс n . Определение плоскости наибольшего увлажнения будем производить послойно, начиная с первого слоя. Пусть рассматриваемая плоскость наибольшего увлажнения лежит в j -м слое ограждения, x_j — расстояние от внутренней поверхности j -го слоя до этой плоскости. При указанных выше допущениях распределение температуры $t(x_j)$ в пределах j -го слоя ограждения имеет вид:

$$t(x_j) = t_{int} - q_h \left(R_{h-j} + \frac{x_j}{\lambda_{hj}} \right), \quad (4.7)$$

где q_h — плотность теплового потока, проходящего через ограждение, определяемая по формуле:

$$q_h = \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_h^{con}}; \quad (4.8)$$

где R_h^{con} — общее сопротивление теплопередаче, определяемое по формуле:

$$R_h^{con} = \frac{1}{\alpha_h^{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{hi}} + \frac{1}{\alpha_h^{se}}; \quad (4.9)$$

где δ_i — толщина i -го слоя ограждения; λ_{hi} — коэффициент теплопроводности материала i -го слоя; R_{h-j} — сопротивление теплопередаче от внутреннего воздуха до внутренней поверхности j -го слоя; λ_{hj} — коэффициент теплопроводности материала j -го слоя.

Распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x_j)$ в пределах j -го слоя ограждения описывается аналогично уравнению (4.7):

$$\theta(x_j) = \theta_{int} - q_m \left(R_{m-j} + \frac{x_j}{\lambda_{mj}} \right), \quad (4.10)$$

где q_m — плотность потока влаги, проходящего через ограждение, определяемая по формуле:

$$q_m = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_m^{con}}; \quad (4.11)$$

где R_m^{con} — общее сопротивление влагопередаче, определяемое по формуле:

$$R_m^{con} = \frac{1}{\alpha_m^{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{mi}} + \frac{1}{\alpha_m^{se}}; \quad (4.12)$$

где λ_{mi} — коэффициент влагопроводности материала i -го слоя; R_{m-j} — сопротивление влагопередаче от внутреннего воздуха до внутренней по-

верхности j -го слоя; λ_{mj} — коэффициент влагопроводности материала j -го слоя.

Используя формулу (4.7) и зависимость $\theta_{m.s}$ от температуры, данную формулой (2.18), получим распределение максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x_j)$ в пределах j -го слоя ограждения:

$$\theta_{m.s}(x_j) = \frac{5,314 \cdot 10^3}{1 + 107,08 \exp \left[-0,106 \left[t_{int} - q_h \left(R_{h-j} + \frac{x_j}{\lambda_{hj}} \right) \right] \right]}. \quad (4.13)$$

Введем функцию $\Phi(x_j) = \theta(x_j) - \theta_{m.s}(x_j)$. Исследуем эту функцию внутри j -го слоя на экстремум, положив

$$\frac{d\Phi(x_j)}{dx_j} = 0. \quad (4.14)$$

После дифференцирования получим трансцендентное уравнение относительно x_j следующего вида:

$$\frac{\left[1 + 107,08 \exp \left[-0,106 \left[t_{int} - q_h \left(R_{h-j} + \frac{x_j}{\lambda_{hj}} \right) \right] \right] \right]^2}{\exp \left[-0,106 \left[t_{int} - q_h \left(R_{h-j} + \frac{x_j}{\lambda_{hj}} \right) \right] \right]} = 6,032 \cdot 10^4 \frac{q_h \lambda_{mj}}{q_m \lambda_{hj}}. \quad (4.15)$$

Уравнение (4.15) удобно решать путем замены переменной x_j на переменную t_j , данную формулой (4.7). Тогда получим

$$F(t_j) = 6,032 \cdot 10^4 \frac{q_h \lambda_{mj}}{q_m \lambda_{hj}}, \quad (4.16)$$

где $F(t_j)$ — комплекс, зависящий только от температуры в плоскости наибольшего увлажнения:

$$F(t_j) = \frac{\left[1 + 107,08 \exp(-0,106 t_j) \right]^2}{\exp(-0,106 t_j)}. \quad (4.17)$$

Для определения значения температуры t_j рекомендуется использовать табл. 4.1.

Таблица 4.1

Зависимость $F(t_j)$

$t_j, ^\circ\text{C}$	$F(t_j)$	$t_j, ^\circ\text{C}$	$F(t_j)$	$t_j, ^\circ\text{C}$	$F(t_j)$	$t_j, ^\circ\text{C}$	$F(t_j)$
-20	$9,57 \cdot 10^4$	-7	$2,43 \cdot 10^4$	6	$6,29 \cdot 10^3$	19	$1,75 \cdot 10^3$
-19	$8,61 \cdot 10^4$	-6	$2,19 \cdot 10^4$	7	$5,68 \cdot 10^3$	20	$1,60 \cdot 10^3$
-18	$7,75 \cdot 10^4$	-5	$1,97 \cdot 10^4$	8	$5,13 \cdot 10^3$	21	$1,46 \cdot 10^3$
-17	$6,97 \cdot 10^4$	-4	$1,77 \cdot 10^4$	9	$4,63 \cdot 10^3$	22	$1,34 \cdot 10^3$
-16	$6,27 \cdot 10^4$	-3	$1,60 \cdot 10^4$	10	$4,19 \cdot 10^3$	23	$1,23 \cdot 10^3$
-15	$5,64 \cdot 10^4$	-2	$1,44 \cdot 10^4$	11	$3,79 \cdot 10^3$	24	$1,13 \cdot 10^3$
-14	$5,08 \cdot 10^4$	-1	$1,30 \cdot 10^4$	12	$3,43 \cdot 10^3$	25	$1,04 \cdot 10^3$
-13	$4,57 \cdot 10^4$	0	$1,17 \cdot 10^4$	13	$3,11 \cdot 10^3$	26	$9,58 \cdot 10^2$
-12	$4,11 \cdot 10^4$	1	$1,05 \cdot 10^4$	14	$2,82 \cdot 10^3$	27	$8,87 \cdot 10^2$
-11	$3,70 \cdot 10^4$	2	$9,49 \cdot 10^3$	15	$2,56 \cdot 10^3$	28	$8,23 \cdot 10^2$
-10	$3,33 \cdot 10^4$	3	$8,56 \cdot 10^3$	16	$2,32 \cdot 10^3$	29	$7,66 \cdot 10^2$
-9	$3,00 \cdot 10^4$	4	$7,72 \cdot 10^3$	17	$2,11 \cdot 10^3$	30	$7,15 \cdot 10^2$
-8	$2,70 \cdot 10^4$	5	$6,96 \cdot 10^3$	18	$1,92 \cdot 10^3$	—	—

Используя формулу (4.7), по значению t_j определяем критическую точку x_j , лежащую внутри j -го слоя ограждения. Если $\Phi(x_j) > 0$, то в сечении x_j происходит сверхсорбционное увлажнение.

Проводя исследование для всех слоев и определяя критические точки, в которых происходит сверхсорбционное увлажнение, вычисляем значения функции Φ на границах ограждающей конструкции с воздухом и на стыках материалов. Выбираем значение x (при $\Phi(x) > 0$), при котором $\Phi(x)$ принимает наибольшее значение. Это и есть плоскость наибольшего увлажнения.

Разработанный метод реализован в компьютерной программе [406].

Пример 4.3. Определить плоскость наибольшего увлажнения в кирпичной стене ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$) толщиной 0,25 м, утепленной изнутри пенобетоном ($\rho_0 = 600 \text{ кг/м}^3$) толщиной 0,2 м.

Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 78 \text{ кДж/кг}$. Параметры климата: $t_{ext} = -9,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{ext} = 12 \text{ кДж/кг}$.

Расчетные теплофизические характеристики материалов ограждения: пенобетон — $\lambda_{h1} = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m1} = 2,25 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; кирпичная кладка — $\lambda_{h2} = 0,70 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m2} = 1,46 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

По формуле (4.9) общее сопротивление теплопередаче ограждения $R_h^{con} = 1,42 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$. По формуле (4.12) общее сопротивление влагопередаче ограждения $R_m^{con} = 2,89 \cdot 10^9 \text{ м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})/\text{кг}$. По формуле (4.8) плотность теплового потока, проходящего через ограждение, $q_h = 20,71 \text{ Вт/м}^2$. По формуле (4.11) плотность потока влаги, проходящего через ограждение, $q_m = 2,28 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$.

Находим критические точки внутри материальных слоев ограждающей конструкции:

1-й слой (пенобетон) — по формуле (4.16) $F(t_1) = 5,59 \cdot 10^4$; из табл. 4.1 $t_1 = -14,9 \text{ }^\circ\text{C}$; на границах слоя $t_1^{si} = 17,61 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_1^{se} = -1,27 \text{ }^\circ\text{C}$; так как t_1 выходит за температурный интервал первого слоя, то критических точек внутри этого слоя нет;

2-й слой (кирпичная кладка) — $F(t_2) = 1,14 \cdot 10^4$; $t_2 = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$; на границах слоя $t_2^{si} = -1,27 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2^{se} = -8,7 \text{ }^\circ\text{C}$; так как t_2 выходит за температурный интервал второго слоя, то критических точек внутри этого слоя нет.

Определяем значения функции Φ на границах конструкции с воздухом и на стыках материалов:

внутренняя поверхность ограждения — $\theta_{si} = 73,6$ кДж/кг; $\theta_{si}^{m.s} = 302,9$ кДж/кг; $\Phi_{si} = -229,3$ кДж/кг; так как $\Phi_{si} < 0$, то сверхсорбционного увлажнения на внутренней поверхности ограждения нет;

стык пенобетона с кирпичной кладкой — $\theta_{12} = 53,3$ кДж/кг; $\theta_{12}^{m.s} = 43,3$ кДж/кг; $\Phi_{12} = 10,0$ кДж/кг; так как $\Phi_{12} > 0$, то на стыке пенобетона с кирпичной кладкой образуется сверхсорбционное увлажнение;

наружная поверхность ограждения — $\theta_{se} = 14,2$ кДж/кг; $\theta_{se}^{m.s} = 19,9$ кДж/кг; $\Phi_{se} = -5,7$ кДж/кг; так как $\Phi_{se} < 0$, то сверхсорбционного увлажнения на наружной поверхности ограждения нет.

Таким образом, плоскость наибольшего увлажнения находится на стыке пенобетона с кирпичной кладкой. Полученный результат согласуется с данными В.В. Козлова [76] по определению плоскости наибольшего увлажнения на основе потенциала F . Предлагаемый метод определения плоскости наибольшего увлажнения позволяет определить наиболее опасное в отношении влажностного режима сечение конструкции.

4.3. РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОМУ СОСТОЯНИЮ УВЛАЖНЕНИЯ

При разработке инженерных методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций возникает необходимость рассмотрения предельно допустимых состояний увлажнения, существенно влияющих на эксплуатационные качества конструкции. Предложенный в [54] метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения при диффузии водяного пара применим только в области сорбционного увлажнения материалов. Нами разработан метод расчета ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения на основе потенциала влажности, применимый в широком диапазоне влажно-

сти материалов. Для материалов наружных ограждений таким предельным состоянием будет переход от сорбционной к области массовой капиллярной конденсации. Пользуясь понятием абсолютного потенциала влажности (см. 2.3), предельно допустимое состояние увлажнения ограждающих конструкций определим условием:

$$\theta = \theta_{m.s}, \quad (4.18)$$

где θ — абсолютный потенциал влажности; $\theta_{m.s}$ — максимальный сорбционный потенциал влажности.

В 4.2 разработан метод определения плоскости наибольшего увлажнения материалов на основе потенциала влажности для однослойных и многослойных ограждающих конструкций. При достижении предельно допустимого состояния увлажнения условие (4.18) выполняется для плоскости наибольшего увлажнения материалов. В ограждающей конструкции выделим увлажняемый слой, примыкающий к плоскости наибольшего увлажнения. Для однослойной конструкции увлажняемый слой ограничен внутренней поверхностью ограждения и плоскостью наибольшего увлажнения, для многослойной — внутренней поверхностью слоя, примыкающего к плоскости наибольшего увлажнения со стороны помещения, и этой плоскостью. Предполагается, что влага распределяется только в увлажняемом слое конструкции. За расчетный период увлажнения принят наиболее холодный месяц года.

Распределение температуры $t(x)$ по толщине увлажняемого слоя δ_m имеет вид:

$$t(x) = t_{int} - q_h \left(R_{hi} + \frac{x}{\lambda_{hm}} \right), \quad (4.19)$$

где $0 \leq x \leq \delta_m$ — координата (отсчет производится от внутренней поверхности увлажняемого слоя); t_{int} — температура внутреннего воздуха; q_h — плотность теплового потока, проходящего через ограждение; R_{hi} —

термическое сопротивление ограждения от внутреннего воздуха до внутренней поверхности увлажняемого слоя; λ_{hm} — расчетный коэффициент теплопроводности материала увлажняемого слоя.

В (4.19) плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q_h = \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_h^{con}}, \quad (4.20)$$

где t_{ext} — температура наружного воздуха; R_h^{con} — сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, определяемое по формуле:

$$R_h^{con} = \frac{1}{\alpha_h^{si}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{hi}} + \frac{1}{\alpha_h^{se}}, \quad (4.21)$$

где α_h^{si} , α_h^{se} — соответственно коэффициент теплообмена внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции; n — число слоев в ограждении; δ_j — толщина j -го слоя ограждения; λ_{hj} — расчетный коэффициент теплопроводности материала j -го слоя ограждения.

Распределение максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$ по толщине увлажняемого слоя с учетом формулы (4.19) имеет вид:

$$\theta_{m.s}(x) = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp \left[-0,106 \left[t_{int} - q_h \left(R_{hi} + \frac{x}{\lambda_{hm}} \right) \right] \right]}. \quad (4.22)$$

Используя условие (4.18) для плоскости наибольшего увлажнения, получим распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ по толщине увлажняемого слоя:

$$\theta(x) = \theta_{m.s}(\delta_m) + \frac{d\theta_{m.s}(\delta_m)}{dx}(x - \delta_m). \quad (4.23)$$

Распределение относительного потенциала влажности $\theta_\phi(x)$ по толщине увлажняемого слоя имеет вид:

$$\theta_{\varphi}(x) = \frac{\theta(x)}{\theta_{m.s}(x)}. \quad (4.24)$$

Интегрируя функцию $\theta_{\varphi}(x)$, определим среднеинтегральное значение относительного потенциала влажности в увлажняемом слое:

$$\theta_{\varphi}^{av} = \frac{1}{\delta_m} \int_0^{\delta_m} \theta_{\varphi}(x) dx, \quad (4.25)$$

Обозначим: $\theta_{\varphi}^{max} = \theta_{\varphi}(\delta_m)$ — максимальное значение относительного потенциала влажности в увлажняемом слое; $\theta_{\varphi 0}$ — относительный потенциал влажности, соответствующий началу периода влагонакопления; $k_{\theta} = (\theta_{\varphi}^{av} - \theta_{\varphi 0}) / (\theta_{\varphi}^{max} - \theta_{\varphi 0})$ — коэффициент влагонакопления в увлажняемом слое.

Для расчета используем уравнение баланса влаги для увлажняемого слоя конструкции за расчетный период.

Плотность потока влаги q_{mi} , входящего в конструкцию (от внутреннего воздуха до плоскости наибольшего увлажнения), определяется по формуле:

$$q_{mi} = \frac{\theta_{int} - \theta_{m.s}}{R_{mi}}, \quad (4.26)$$

где θ_{int} — абсолютный потенциал влажности внутреннего воздуха; $\theta_{m.s} = \theta_{m.s}(\delta_m)$ — максимальный сорбционный потенциал влажности в плоскости наибольшего увлажнения; R_{mi} — сопротивление влагопереносу от внутреннего воздуха до плоскости наибольшего увлажнения.

Плотность потока влаги q_{me} , выходящего из конструкции (от плоскости наибольшего увлажнения до наружного воздуха), определяется по формуле:

$$q_{me} = \frac{\theta_{m.s} - \theta_{ext}}{R_{me}}, \quad (4.27)$$

где θ_{ext} — абсолютный потенциал влажности наружного воздуха; R_{me} — сопротивление влагопереносу от плоскости наибольшего увлажнения до наружного воздуха.

Количество влаги Δq_m в увлажняемом слое конструкции определяется по формуле:

$$\Delta q_m = q_{mi} - q_{me} = m q_{mi}, \quad (4.28)$$

где $m = 1 - q_{me} / q_{mi}$ — коэффициент увлажнения.

Количество влаги Δq_m , накапливающейся в увлажняемом слое конструкции за расчетный период $\Delta\tau$, определяется по формуле:

$$\Delta q_m = \frac{k_{\theta} c_{m\phi} \rho_m \delta_m \Delta\theta_{\phi}^{max}}{86400 \Delta\tau}, \quad (4.29)$$

где $c_{m\phi}$, ρ_m — соответственно удельная относительная влагоемкость и плотность материала увлажняемого слоя; $\Delta\theta_{\phi}^{max} = \theta_{\phi}^{max} - \theta_{\phi 0}$ — приращение относительного потенциала влажности в плоскости наибольшего увлажнения за расчетный период.

На основе (4.28) и (4.29) получим формулу для определения нормируемого сопротивления влагопереносу R_m^{req} по предельно допустимому состоянию увлажнения:

$$R_m^{req} = \frac{86400 m (\theta_{int} - \theta_{m.s}) \Delta\tau}{k_{\theta} c_{m\phi} \rho_m \delta_m \Delta\theta_{\phi}^{max}}. \quad (4.30)$$

Критерием обеспечения влагозащитных свойств ограждающей конструкции является условие:

$$R_{mi}^{des} \geq R_m^{req}, \quad (4.31)$$

где R_m^{des} — расчетное сопротивление влагопереносу от внутреннего воздуха до плоскости наибольшего увлажнения:

$$R_m^{des} = \frac{1}{\alpha_m^{si}} + \sum_{j=1}^p \frac{\delta_j}{\lambda_{mj}}, \quad (4.32)$$

где α_m^{si} — коэффициент влагообмена внутренней поверхности ограждающей конструкции; p — число слоев от внутренней поверхности до плоскости наибольшего увлажнения; λ_{mj} — расчетный коэффициент теплопроводности материала j -го слоя ограждения.

Если условие (4.31) выполняется, то ограждающая конструкция отвечает требованию по предельно допустимому состоянию увлажнения. В противном случае требуется корректировка конструкции.

Пример 4.4. Ограждающая конструкция — трехслойная стеновая панель с эффективным утеплителем. Внутренний конструктивный слой панели толщиной 120 мм и наружный защитно-отделочный слой толщиной 80 мм выполнены из керамзитобетона на керамзитовом песке ($\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$), в качестве утеплителя толщиной 150 мм использованы плиты из пенополистирола ($\rho_0 = 40 \text{ кг/м}^3$).

Параметры внутреннего воздуха: температура $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, абсолютный потенциал влажности $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$. Параметры наружного воздуха (январь): температура $t_{ext} = -7,6 \text{ }^\circ\text{C}$, абсолютный потенциал влажности $\theta_{ext} = 19 \text{ кДж/кг}$.

Расчетные теплофизические характеристики материалов: керамзитобетон — $\lambda_{h1} = 0,67 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m1} = 1,19 \cdot 10^{-10} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; пенополистирол — $\lambda_{h2} = 0,041 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, $\lambda_{m2} = 6,62 \cdot 10^{-11} \text{ кг/[м}\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$.

Выполним расчет ограждающей конструкции по предельно допустимому состоянию увлажнения на основе потенциала влажности.

Расчетом 4.2 установлено, что плоскость наибольшего увлажнения лежит на наружной поверхности утеплителя. За увлажняемый слой принят утеплитель. По формуле (4.22) с учетом (4.20) и (4.21) находим рас-

пределение максимального сорбционного потенциала влажности $\theta_{m.s}(x)$ по толщине увлажняемого слоя ($0 \leq x \leq 0,15$):

$$\theta_{m.s}(x) = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp(-1,91 + 17,34x)}.$$

По формуле (4.23) распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ по толщине увлажняемого слоя имеет вид:

$$\theta(x) = 88,9 - 427,6x.$$

По формуле (4.24) находим распределение относительного потенциала влажности $\theta_{\phi}(x)$ по толщине увлажняемого слоя:

$$\theta_{\phi}(x) = \frac{(88,9 - 427,6x)[1 + 107,08 \exp(-1,91 + 17,34x)]}{5314}.$$

По формуле (4.25) среднеинтегральное значение относительного потенциала влажности в увлажняемом слое $\theta_{\phi}^{av} = 0,644$. Максимальное значение относительного потенциала влажности в плоскости наибольшего увлажнения $\theta_{\phi}^{max} = \theta_{\phi}(0,15) = 1$. Относительный потенциал влажности в начале периода влагонакопления $\theta_{\phi 0} = 0,25$.

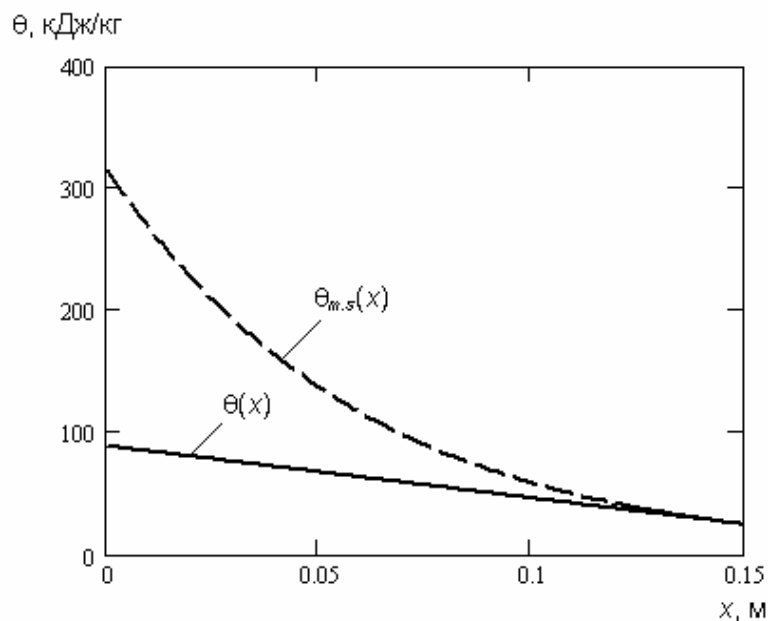


Рис. 4.3. Профили $\theta_{m.s}(x)$ и $\theta(x)$ по толщине увлажняемого слоя

На рис. 4.3 приведены профили $\theta_{m.s}(x)$ и $\theta(x)$ по толщине увлажняемого слоя. Прямая $\theta(x)$ является касательной к профилю $\theta_{m.s}(x)$ в точке $x = 0,15$ м. На рис. 4.4 приведен профиль $\theta_\phi(x)$ и значение $\theta_{\phi 0}$.

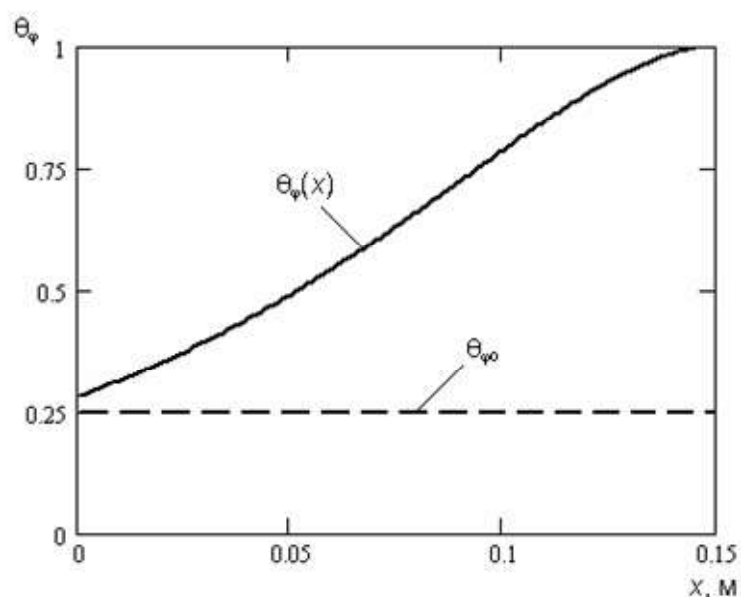


Рис. 4.4. Профиль $\theta_\phi(x)$ и относительный потенциал влажности $\theta_{\phi 0}$, соответствующий началу периода влагонакопления

Коэффициент влагонакопления $k_\theta = 0,526$. Удельная относительная влагоемкость утеплителя $c_{m\phi} = 3,34 \cdot 10^{-2}$ кг/кг. Расчетный период $\Delta\tau = 31$ сут. Приращение относительного потенциала влажности в плоскости наибольшего увлажнения за расчетный период $\Delta\theta_\phi^{max} = 0,75$. Максимальный сорбционный потенциал влажности в плоскости наибольшего увлажнения $\theta_{m.s} = 24,8$ кДж/кг.

По формуле (4.26) плотность потока влаги, входящего в конструкцию, $q_{mi} = 2,03 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с). По формуле (4.27) плотность потока влаги, выходящего из конструкции, $q_{me} = 7,55 \cdot 10^{-9}$ кг/(м²·с). Коэффициент увлажнения ограждающей конструкции $m = 0,627$.

По формуле (4.30) нормируемое сопротивление влагопереносу ограждающей конструкции $R_m^{req} = 1,49 \cdot 10^9$ м²·с·(кДж/кг)/кг. По формуле

(4.32) расчетное сопротивление влагопереносу $R_m^{des} = 3,47 \cdot 10^9$ $\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})/\text{кг}$. Поскольку $R_{mi}^{des} \geq R_m^{req}$, то условие (4.31) выполняется. Следовательно, конструкция отвечает требованию по предельно допустимому состоянию увлажнения.

Разработанный метод расчета ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения может быть использован для анализа накопления влаги в наиболее холодный месяц года.

Достоинством разработанных в диссертации методов инженерной оценки температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности является возможность расчета многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности материалов — как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зоне увлажнения. Наглядность и простота методов делает их доступными широкому кругу специалистов. Это позволяет рекомендовать разработанные методы к внедрению в нормативные документы.

5. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО-И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Разработана математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий на основе температуры и абсолютного потенциала влажности. Приведен численный метод решения задачи, на основе которого разработана компьютерная программа расчета трехмерных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций.

5.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА

При описании физических явлений и процессов широко используются различные математические модели. Являясь всегда лишь определенным приближением к реальным физическим процессам, математические модели обладают большой емкостью информации об этих явлениях и процессах, позволяют глубже их понять и изучить. Как отмечает А.А. Самарский, «математические модели многих задач механики и физики, как правило, очень сложны и не поддаются детальному теоретическому исследованию. Однако ряд их важных свойств можно понять, если разбить исходную задачу на более простые блоки...» [173]. Следуя этому, будем рассматривать совместный нестационарный тепло- и влагоперенос как протекающие совместно процессы теплопроводности и влагопроводности. В основе математической модели тепловлагопереноса лежат дифференциальные уравнения в частных производных.

Вывод дифференциальных уравнений тепло- и влагопроводности основан на применении закона сохранения энергии и массы к бесконечно

малому элементу среды с учетом потоков тепла и влаги через поверхность этого элемента, а также выделения или поглощения тепловой энергии и массы влаги в объеме этого элемента [174].

Рассмотрим некоторый объем V , ограниченный поверхностью A . Уравнение баланса тепла для объема V за время $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \iiint_V c_h \rho_0 [t(P, \tau_2) - t(P, \tau_1)] dV_P = \\ = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau \iint_A q_h^n d\sigma + \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau \left(\iiint_V Q_h(P, \tau) dV_P \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $c_h \rho_0$ — теплоемкость единицы объема (объемная теплоемкость); t — температура; $P = P(\xi, \eta, \zeta)$ — точка интегрирования; τ — время; $dV_P = d\xi d\eta d\zeta$ — элемент объема; q_h^n — нормальная составляющая плотности теплового потока; Q_h — удельная мощность тепловых источников (стоков).

Уравнение (5.1) выражает закон сохранения тепла в объеме V за время $\Delta\tau$: изменение количества тепла в объеме V за время $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ [левая часть в (5.1)] обусловлено потоком тепла через граничную поверхность A [первое слагаемое в правой части (5.1)], а также количеством тепла, выделившимся в объеме V за время $\Delta\tau$ в результате действия тепловых источников (стоков).

Чтобы перейти от интегрального уравнения баланса к дифференциальному уравнению, предположим, что $t(M, \tau) = t(x, y, z, \tau)$ дважды дифференцируема по x, y, z и один раз по τ и что эти производные непрерывны в рассматриваемой области. Тогда можно воспользоваться формулой Остроградского

$$\iint_A q_h^n d\sigma = \iiint_V \operatorname{div} \mathbf{q}_h dV$$

и преобразовать уравнение баланса к виду:

$$\begin{aligned}
& \iiint_V c_h \rho_0 [t(P, \tau_2) - t(P, \tau_1)] dV_P = \\
& = - \int_{\tau_1}^{\tau_2} \iiint_V \operatorname{div} \mathbf{q}_h dV_P d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \iiint_V Q_h(P, \tau) dV_P d\tau.
\end{aligned}$$

(Будем предполагать $Q_h(P, \tau)$ непрерывной функцией своих аргументов).

Применяя теорему о среднем и теорему о конечных приращениях для функций многих переменных, получим:

$$c_h \rho_0 \left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{\substack{\tau=\tau_3 \\ P=P_1}} \Delta \tau \cdot V = - \left. \operatorname{div} \mathbf{q}_h \right|_{\substack{\tau=\tau_4 \\ P=P_2}} \Delta \tau \cdot V + \left. Q_h \right|_{\substack{\tau=\tau_5 \\ P=P_3}} \Delta \tau \cdot V,$$

где τ_3, τ_4, τ_5 — промежуточные точки на интервале $\Delta \tau$, а P_1, P_2, P_3 — точки в объеме V . Фиксируем некоторую точку $M(x, y, z)$ внутри V и будем стягивать V в эту точку, а $\Delta \tau$ стремиться к нулю. После сокращения на $\Delta \tau \cdot V$ и указанного предельного перехода получим:

$$c_h \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau}(x, y, z, \tau) = -\operatorname{div} \mathbf{q}_h(x, y, z, \tau) + Q_h(x, y, z, \tau)$$

или в более компактном виде

$$c_h \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \mathbf{q}_h + Q_h. \quad (5.2)$$

Плотность теплового потока \mathbf{q}_h согласно закону Фурье прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\mathbf{q}_h = -\lambda_h \nabla t, \quad (5.3)$$

где λ_h — коэффициент теплопроводности среды; ∇t — градиент температуры

$$\nabla t = \mathbf{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial t}{\partial z},$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — единичные векторы, направленные по осям прямоугольной декартовой системы координат.

Знак минус в (5.3) соответствует свойству тепла распространяться от более нагретых слоев среды к менее нагретым.

В формуле (5.2) дивергенция плотности теплового потока \mathbf{q}_h определяется следующими дифференциальными операциями:

$$\operatorname{div} \mathbf{q}_h = \frac{\partial q_{hx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{hy}}{\partial y} + \frac{\partial q_{hz}}{\partial z}.$$

Подставляя в (5.2) выражение для плотности теплового потока в форме (5.3), приходим к уравнению теплопроводности в стандартной форме:

$$c_h \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div} (\lambda_h \nabla t) + Q_h. \quad (5.4)$$

Закон сохранения массы приводит к дифференциальному уравнению баланса влаги, которое можно записать в форме, аналогичной (5.2):

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \mathbf{q}_m + Q_m, \quad (5.5)$$

где $c_m \rho_0$ — объемная влагоемкость; θ — абсолютный потенциал влажности; \mathbf{q}_m — плотность потока влаги; Q_m — удельная мощность источников (стоков) влаги.

Плотность потока влаги \mathbf{q}_m прямо пропорциональна градиенту абсолютного потенциала влажности:

$$\mathbf{q}_m = -\lambda_m \nabla \theta, \quad (5.6)$$

где λ_m — коэффициент влагопроводности; $\nabla \theta$ — градиент абсолютного потенциала влажности

$$\nabla \theta = \mathbf{i} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \theta}{\partial z}.$$

В (5.5) дивергенция плотности потока влаги \mathbf{q}_m определяется формулой:

$$\operatorname{div} \mathbf{q}_m = \frac{\partial q_{mx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{my}}{\partial y} + \frac{\partial q_{mz}}{\partial z}.$$

С учетом (5.5) и (5.6) получим уравнение влагопроводности в форме, аналогичной уравнению теплопроводности:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_m \nabla \theta) + Q_m. \quad (5.7)$$

Поскольку абсолютный потенциал влажности θ характеризует влажностное состояние материалов в неизотермических условиях, а влагопередача определяется $\nabla \theta$, то уравнение влагопроводности для ограждающих конструкций можно принять без дополнительных источников (стоков) влаги, т. е. положить в (5.7) $Q_m = 0$. Теплоту фазовых переходов влаги в уравнении теплопроводности (5.2) можно также не учитывать, так как вклад этой теплоты в температурное поле будет сравним с ошибкой за счет осреднения многолетних климатических данных [175].

Процессы тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях протекают совместно и тесно связаны друг с другом. Поэтому математическая модель совместного нестационарного тепловлагопереноса для ограждающих конструкций на основе температуры и абсолютного потенциала влажности может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}[\lambda_h(t, \theta) \nabla t], \\ C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \operatorname{div}[\lambda_m(t, \theta) \nabla \theta]. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Здесь C_h — объемная теплоемкость ($C_h = c_h \rho_0$); C_m — объемная влагоемкость ($C_m = c_m \rho_0$).

Дифференциальные уравнения тепло- и влагопроводности в системе (5.8) устанавливают связь между временными и пространственными изменениями температуры и абсолютного потенциала влажности; они математически описывают перенос тепла и влаги внутри конструкции.

В развернутом виде система дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса (5.8) в прямоугольной декартовой системе координат имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial z} \right], \\ C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Дифференциальные уравнения тепло- и влагопереноса в системе (5.9) имеют бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выбрать единственное решение, описывающее конкретный процесс тепло- и влагопроводности в ограждающей конструкции, необходимо к этой системе присоединить граничные и начальные условия. Граничные условия определяют закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью ограждающей конструкции, а также на стыках различных материалов конструкции. Начальные условия определяют распределение температуры и абсолютного потенциала влажности внутри конструкции в начальный момент времени.

Тепло- и влагообмен на границе поверхности ограждения с окружающей средой описывается граничными условиями третьего рода:

на внутренней поверхности —

$$\begin{aligned} \lambda_h(t, \theta) \nabla t_{si} + \alpha_h^{si} [t_{int}(\tau) - t_{si}(\tau)] &= 0; \\ \lambda_m(t, \theta) \nabla \theta_{si} + \alpha_m^{si} [\theta_{int}(\tau) - \theta_{si}(\tau)] &= 0; \end{aligned} \quad (5.10)$$

на наружной поверхности —

$$\begin{aligned} \lambda_h(t, \theta) \nabla t_{se} + \alpha_h^{se} [t_{se}(\tau) - t_{ext}(\tau)] &= 0; \\ \lambda_m(t, \theta) \nabla \theta_{se} + \alpha_m^{se} [\theta_{se}(\tau) - \theta_{ext}(\tau)] &= 0. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Здесь α_h и α_m — коэффициенты тепло- и влагообмена; индексы «*int*» и «*ext*» означают принадлежность к внутреннему и наружному воздуху;

индексы «*si*» и «*se*» означают принадлежность к внутренней и наружной поверхностям конструкции.

Тепло- и влагообмен на стыках материалов ограждения описывается граничными условиями четвертого рода:

по температуре и тепловому потоку —

$$t_1(\tau) = t_2(\tau), \quad q_{h_1}(\tau) = q_{h_2}(\tau); \quad (5.12)$$

по потенциалу влажности и потоку влаги —

$$\theta_1(\tau) = \theta_2(\tau), \quad q_{m_1}(\tau) = q_{m_2}(\tau). \quad (5.13)$$

Распределение температуры и абсолютного потенциала влажности в начальный момент времени ($\tau = 0$) задается начальными условиями

$$t(x, y, z, 0) = t_0(x, y, z), \quad \theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z). \quad (5.14)$$

Таким образом, автором разработана математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для трехмерных участков ограждающих конструкций зданий в виде системы дифференциальных уравнений (5.8) с краевыми условиями (5.10)—(5.14). Использование шкалы абсолютного потенциала влажности позволяет существенно упростить математическую модель тепловлагопереноса. Решением этой системы являются температурное поле $t(x, y, z, \tau)$ и поле абсолютного потенциала влажности $\theta(x, y, z, \tau)$, по которым с помощью известных зависимостей $w(\theta, t)$ может быть определено поле влагосодержания $w(x, y, z, \tau)$ в ограждающей конструкции в любой момент времени.

5.2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА

В разработанной математической модели совместного нестационарного тепло- и влагопереноса (5.8), (5.10)—(5.14) уравнения тепло- и влагопереноса являются дифференциальными уравнениями с частными

производными второго порядка параболического типа с переменными коэффициентами. Представление решений таких уравнений в аналитической форме возможно только в исключительных случаях. Поэтому будем искать решение данной задачи численными методами.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений (5.8) с краевыми условиями (5.10)—(5.14). В этой системе уравнение влагопроводности идентично по форме уравнению теплопроводности, поэтому каждое из этих уравнений можно записать в обобщенном виде:

$$C \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad (5.15)$$

где C — объемная теплоемкость (влагоемкость); U — потенциал (температура, абсолютный потенциал влажности); x, y, z — координаты; λ — коэффициент теплопроводности (влагопроводности).

Для решения уравнения (5.15) воспользуемся методом конечных разностей (методом сеток) [174, 176—178]. Суть этого метода заключается в следующем. Область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным (дискретным) множеством точек (узлов), называемым сеткой. Вместо функций непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки и называемые сеточными функциями. Производные, входящие в дифференциальное уравнение, заменяются (аппроксимируются) при помощи соответствующих разностных отношений. Дифференциальное уравнение при этом заменяется системой алгебраических уравнений (разностным уравнением). Краевые условия тоже заменяются разностными краевыми условиями для сеточных функций.

Введем прямоугольную декартову систему координат $OXYZ$. Пусть исследуемая область ограждающей конструкции заключена в параллелепипед $\Pi \{0 \leq x \leq \delta_X, 0 \leq y \leq \delta_Y, 0 \leq z \leq \delta_Z\}$. Отрезок $[0, \delta_X]$ разо-

бьем на l частей, отрезок $[0, \delta_Y]$ — на m частей, отрезок $[0, \delta_Z]$ — на p частей, вводя произвольные точки $0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{l-1} < \delta_X$, $0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{m-1} < \delta_Y$, $0 < z_1 < z_2 < \dots < z_{p-1} < \delta_Z$. Множество точек пространства, координаты которых равны выбранным точкам разбиения отрезков $[0, \delta_X]$, $[0, \delta_Y]$, $[0, \delta_Z]$, включая границы этих отрезков, назовем *пространственной сеткой* в параллелепипеде Π . Введем обозначение для пространственной сетки

$$\omega_h = \{x_i, y_j, z_k; i = 0, 1, \dots, l; j = 0, 1, \dots, m; k = 0, 1, \dots, p\}, \text{ с шагом}$$

$$\text{по оси } OX \ h_{X_i} = x_i - x_{i-1}, i = 1, 2, \dots, l;$$

$$\text{по оси } OY \ h_{Y_j} = y_j - y_{j-1}, j = 1, 2, \dots, m;$$

$$\text{по оси } OZ \ h_{Z_k} = z_k - z_{k-1}, k = 1, 2, \dots, p.$$

Целесообразно строить сетку так, чтобы ее узлы находились в однородной области конструкции. На участках ограждающей конструкции с большим градиентом потенциала следует выбирать меньший шаг сетки.

Введем *временную сетку*

$$\omega_\tau = \{\tau_n, n = 0, 1, \dots; \tau_0 = 0\} \text{ с шагом } \Delta\tau_n = \tau^{n+1} - \tau^n.$$

Ясно, что при рассмотрении долговременных процессов тепловлагопереноса в наружных ограждениях шаг временной сетки должен быть больше. При интенсивных процессах (например, при сушке материалов ограждений) следует выбирать меньший шаг сетки.

Множество узлов (x_i, y_j, z_k, τ_n) назовем *пространственно-временной сеткой* $\omega_{h\tau}$.

Естественно при написании разностных уравнений, приближенно описывающих тот или иной процесс, исходить из уравнения баланса. Для каждой элементарной ячейки сетки $\omega_{h\tau}$ пишется уравнение баланса, которое содержит интегралы от функции и ее производных (потoki в

случае уравнения баланса тепла и влаги) вдоль границы ячейки. Заменяя интегралы разностными выражениями (интерполируя их), получают разностную схему, приближенно описывающую физический процесс. В зависимости от выбора локальной интерполяции как по пространству, так и по времени можно получить различные разностные схемы. Вопрос о выборе интерполяций подчинен требованиям устойчивости, точности и простоты реализации (в частности, требованию минимума арифметических операций, которые нужно произвести для получения решения). На этой идее основан интегро-интерполяционный метод (метод баланса) [174], широко применяемый на практике. Этот метод позволяет решать дифференциальные уравнения, описывающие различные процессы, с переменными и даже разрывными коэффициентами, с которыми приходится иметь дело при решении задач тепловлагопереноса для трехмерных неоднородных участков ограждающих конструкций.

Воспользуемся интегро-интерполяционным методом для получения разностного уравнения тепло- и влагопереноса.

Пусть $M(x_i, y_j, z_k)$ — произвольный узел пространственной сетки ω_h . Введем обозначения:

$$M_x^{(+1)} = (x_{i+1}, y_j, z_k); \quad M_x^{(-1)} = (x_{i-1}, y_j, z_k);$$

$$M_y^{(+1)} = (x_i, y_{j+1}, z_k); \quad M_y^{(-1)} = (x_i, y_{j-1}, z_k);$$

$$M_z^{(+1)} = (x_i, y_j, z_{k+1}); \quad M_z^{(-1)} = (x_i, y_j, z_{k-1});$$

$$M_x^{(+0,5)} = (x_{i+0,5}, y_j, z_k); \quad M_x^{(-0,5)} = (x_{i-0,5}, y_j, z_k);$$

$$M_y^{(+0,5)} = (x_i, y_{j+0,5}, z_k); \quad M_y^{(-0,5)} = (x_i, y_{j-0,5}, z_k);$$

$$M_z^{(+0,5)} = (x_i, y_j, z_{k+0,5}); \quad M_z^{(-0,5)} = (x_i, y_j, z_{k-0,5}).$$

Узлы M и $M_x^{(\pm 1)}$ назовем соседними по направлению OX , узлы M и $M_y^{(\pm 1)}$ — соседними по направлению OY , узлы M и $M_z^{(\pm 1)}$ — соседними по направлению OZ . Узлы $M_x^{(\pm 0,5)}$ назовем промежуточными по направлению OX , узлы $M_y^{(\pm 0,5)}$ — промежуточными по направлению OY , узлы $M_z^{(\pm 0,5)}$ — промежуточными по направлению OZ .

Определим шаги сетки ω_h как расстояния между соседними узлами:

$$\begin{aligned} h_x^{(+0,5)} &= x_{i+1} - x_i; & h_x^{(-0,5)} &= x_i - x_{i-1}; \\ h_y^{(+0,5)} &= y_{j+1} - y_j; & h_y^{(-0,5)} &= y_j - y_{j-1}; \\ h_z^{(+0,5)} &= z_{k+1} - z_k; & h_z^{(-0,5)} &= z_k - z_{k-1}. \end{aligned}$$

Определим средние шаги сетки ω_h :

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{h_x^{(+0,5)} + h_x^{(-0,5)}}{2}; \\ h_y &= \frac{h_y^{(+0,5)} + h_y^{(-0,5)}}{2}; \\ h_z &= \frac{h_z^{(+0,5)} + h_z^{(-0,5)}}{2}. \end{aligned}$$

Рассмотрим ячейку

$$\Omega = \left\{ x_i^{(-0,5)} \leq x \leq x_i^{(+0,5)}, y_j^{(-0,5)} \leq y \leq y_j^{(+0,5)}, z_k^{(-0,5)} \leq z \leq z_k^{(+0,5)} \right\}.$$

Пусть $V = h_x h_y h_z$ — объем этой ячейки, ζ — ограничивающая ее поверхность. Напишем для ячейки Ω уравнение баланса тепла (влаги) за промежуток времени $\Delta\tau = \tau^{n+1} - \tau^n$:

$$\iiint_V C \left[U(O, \tau^{n+1}) - U(O, \tau^n) \right] dV_O = - \int_{\tau^n}^{\tau^{n+1}} d\tau \iint_{\zeta} q_N dA, \quad (5.16)$$

где C — объемная теплоемкость (влажность); U — потенциал; O — точка интегрирования; τ — время; q_N — нормальная составляющая плотности теплового потока (потока влаги); dA — площадка с нормалью N , совпадающей с направлением теплового потока (потока влаги); n — индекс временного слоя.

Уравнение (5.16) выражает закон сохранения тепла (влаги) в объеме V за время $\Delta\tau$: изменение количества тепла (влаги) в объеме V за время $\Delta\tau = \tau^{n+1} - \tau^n$ (левая часть уравнения) обусловлено потоком тепла (влаги) через граничную поверхность ζ (правая часть уравнения). Заметим, что при определенных ограничениях на функции, входящие в (5.16), из уравнения баланса следует дифференциальное уравнение тепло- и влажностопроводности. Заменяем интегралы в (5.16) разностными выражениями

$$\iiint_V C \left[U(O, \tau^{n+1}) - U(O, \tau^n) \right] dV_O \approx C_{i,j,k} V \left(U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n \right), \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} - \int_{\tau^n}^{\tau^{n+1}} d\tau \iint_{\zeta} q_N dA \approx \Delta\tau v \left[\left(\hat{q}_x^{(+0,5)} - \hat{q}_x^{(-0,5)} \right) h_y h_z + \right. \\ \left. + \left(\hat{q}_y^{(+0,5)} - \hat{q}_y^{(-0,5)} \right) h_x h_z + \left(\hat{q}_z^{(+0,5)} - \hat{q}_z^{(-0,5)} \right) h_x h_y \right] + \\ + \Delta\tau (1-v) \left[\left(q_x^{(+0,5)} - q_x^{(-0,5)} \right) h_y h_z + \left(q_y^{(+0,5)} - q_y^{(-0,5)} \right) h_x h_z + \right. \\ \left. + \left(q_z^{(+0,5)} - q_z^{(-0,5)} \right) h_x h_y \right], \end{aligned} \quad (5.18)$$

где $C_{i,j,k}$ — объемная теплоемкость (влажность) в узле M ; $U_{i,j,k}^{n+1}$, $U_{i,j,k}^n$ — сеточные функции (температура, абсолютный потенциал влажности) в узле M в моменты времени $\tau = \tau^{n+1}$ и $\tau = \tau^n$ соответственно; v — параметр (вес слоя $n+1$); $\hat{q}_x^{(\pm 0,5)}$, $\hat{q}_y^{(\pm 0,5)}$, $\hat{q}_z^{(\pm 0,5)}$ — плотность теплового потока (потока влаги) на границах ячейки Ω в промежуточных

узлах по направлениям OX , OY , OZ в момент времени $\tau = \tau^{n+1}$; $q_x^{(\pm 0,5)}$, $q_y^{(\pm 0,5)}$, $q_z^{(\pm 0,5)}$ — то же, в момент времени $\tau = \tau^n$.

Плотность теплового потока (потока влаги) на границах ячейки в моменты времени $\tau = \tau^{n+1}$ и $\tau = \tau^n$ определяется по формулам:

$$\hat{q}_x^{(+0,5)} = \lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_x^{(+0,5)}}; \quad q_x^{(+0,5)} = \lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^n - U_{i,j,k}^n}{h_x^{(+0,5)}};$$

$$\hat{q}_x^{(-0,5)} = \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_x^{(-0,5)}}; \quad q_x^{(-0,5)} = \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i-1,j,k}^n}{h_x^{(-0,5)}};$$

$$\hat{q}_y^{(+0,5)} = \lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_y^{(+0,5)}}; \quad q_y^{(+0,5)} = \lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^n - U_{i,j,k}^n}{h_y^{(+0,5)}};$$

$$\hat{q}_y^{(-0,5)} = \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{h_y^{(-0,5)}}; \quad q_y^{(-0,5)} = \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i,j-1,k}^n}{h_y^{(-0,5)}};$$

$$\hat{q}_z^{(+0,5)} = \lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_z^{(+0,5)}}; \quad q_z^{(+0,5)} = \lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^n - U_{i,j,k}^n}{h_z^{(+0,5)}};$$

$$\hat{q}_z^{(-0,5)} = \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{h_z^{(-0,5)}}; \quad q_z^{(-0,5)} = \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i,j,k-1}^n}{h_z^{(-0,5)}}.$$

Здесь $\lambda_x^{(\pm 0,5)}$, $\lambda_y^{(\pm 0,5)}$, $\lambda_z^{(\pm 0,5)}$ — коэффициенты теплопроводности (влажнопроводности) в промежуточных узлах сетки.

Произведя замену (5.17) и (5.18) в (5.16) с учетом выражений для потоков тепла (влаги) получим разностное уравнение тепло- и влагопереноса, аппроксимирующее дифференциальное уравнение (5.15):

$$\begin{aligned}
C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} = & \\
= v & \left[\frac{1}{h_x} \left(\lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_x^{(+0,5)}} - \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_x^{(-0,5)}} \right) + \right. \\
& + \frac{1}{h_y} \left(\lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_y^{(+0,5)}} - \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{h_y^{(-0,5)}} \right) + \\
& \left. + \frac{1}{h_z} \left(\lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_z^{(+0,5)}} - \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{h_z^{(-0,5)}} \right) \right] + \\
+ (1-v) & \left[\frac{1}{h_x} \left(\lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^n - U_{i,j,k}^n}{h_x^{(+0,5)}} - \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i-1,j,k}^n}{h_x^{(-0,5)}} \right) + \right. \\
& + \frac{1}{h_y} \left(\lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^n - U_{i,j,k}^n}{h_y^{(+0,5)}} - \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i,j-1,k}^n}{h_y^{(-0,5)}} \right) + \\
& \left. + \frac{1}{h_z} \left(\lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^n - U_{i,j,k}^n}{h_z^{(+0,5)}} - \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^n - U_{i,j,k-1}^n}{h_z^{(-0,5)}} \right) \right]. \quad (5.19)
\end{aligned}$$

В зависимости от параметра v в уравнении (5.19) можно строить схемы с различными свойствами. Так, при $v = 0$ получим явную схему, при $v = 1$ — неявную, при $v = 0,5$ — явно-неявную (симметричную) схему. Алгоритм решения по явной схеме прост и очевиден: потенциалы на новом временном слое $\tau = \tau^{n+1}$ определяются сразу по известным значениям потенциалов на предыдущем слое $\tau = \tau^n$. Однако, как правило, явные схемы условно устойчивы, т. е. устойчивы при достаточно малых $\Delta\tau$ [179, 180]. При этом объем вычислительных операций намного выше, чем при использовании более сложной неявной схемы. Неявная схема приводит к матричному уравнению, так как все потенциалы должны быть определены *одновременно* на новом временном слое. Однако она устойчива при любом временном шаге.

Сказанное выше остается справедливым и применительно к симметричным схемам [174]. Такие схемы, как правило, имеют более высокий порядок точности, поэтому они чаще используются по сравнению с неявной схемой. Как показали результаты исследований, приведенные в работах [102, 181], а также выполненные автором [120], при использовании симметричной схемы для расчета процессов тепло- и влагопереноса могут возникнуть колебания температуры и влагосодержания в ограждающих конструкциях ввиду нелинейности коэффициентов переноса тепла и влаги. Однако такие колебания могут быть сглажены с помощью различных методов обработки данных. Учитывая сложность проведения расчетов с использованием симметричных схем, для аппроксимации уравнений тепло- и влагопереноса мы используем неявную схему.

Полагая в уравнении (5.19) $\nu = 1$, получим неявную схему для решения дифференциального уравнения (5.15) вида

$$\begin{aligned}
 C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} = & \\
 = \frac{1}{h_x} & \left(\lambda_x^{(+0,5)} \frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_x^{(+0,5)}} - \lambda_x^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_x^{(-0,5)}} \right) + \\
 + \frac{1}{h_y} & \left(\lambda_y^{(+0,5)} \frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_y^{(+0,5)}} - \lambda_y^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{h_y^{(-0,5)}} \right) + \\
 + \frac{1}{h_z} & \left(\lambda_z^{(+0,5)} \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{h_z^{(+0,5)}} - \lambda_z^{(-0,5)} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{h_z^{(-0,5)}} \right). \quad (5.20)
 \end{aligned}$$

Схема сеточного шаблона для конечно-разностной аппроксимации уравнения (5.15) представлена на рис. 5.1. На рис. 5.1, а приведен общий вид сеточного шаблона, на котором показаны рассматриваемый узел и соседние к нему по разным направлениям в пространстве. На рис. 5.1, б представлена проекция того же шаблона на плоскость OXY .

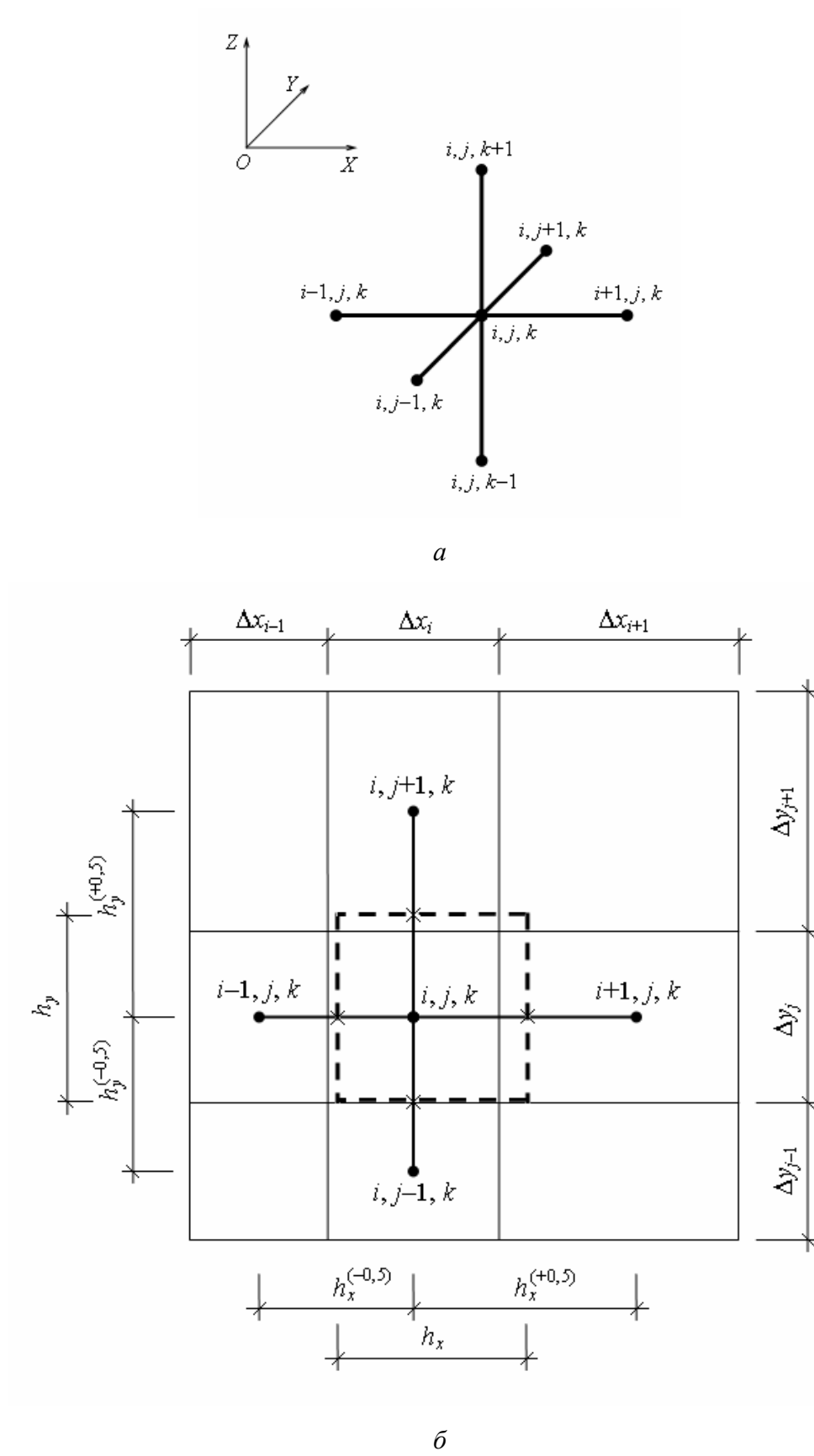


Рис. 5.1. Схема сеточного шаблона для конечно-разностной аппроксимации уравнения (5.15): *a* — общий вид; *б* — проекция на плоскость OXY

На этом рисунке пунктиром показана рассматриваемая ячейка, для которой записано уравнение баланса тепла (влаги), сплошными тонкими линиями — границы между материальными ячейками конструкции; Δx , Δy , Δz — размеры этих ячеек. Сплошными толстыми линиями выделены линии действия потоков тепла (влаги). Крестиками отмечены промежуточные узлы на границах рассматриваемой ячейки, в которых заданы коэффициенты тепло- и влагопроводности. Объемная тепло- и влагоемкость задана в центральном узле.

Отличительной особенностью уравнения (5.20) является то, что при его записи использован сеточный шаблон с узлами, расположенными внутри материальных ячеек конструкции [118, 182]. В этом случае привязка узлов производится не к углам ячеек конструкции, а к геометрическим центрам ячеек, т. е. каждый узел размещается в однородной области. Это позволяет избежать многочисленных интерполяций коэффициентов проводимости тепла и влаги, что существенно упрощает алгоритм решения задачи и снижает объем вычислительной работы.

Добавляя к схеме (5.20) краевые (граничные и начальные) условия на сетке, получим разностную задачу для математической модели (5.9)—(5.14) совместного нестационарного тепло- влагопереноса.

Запишем разностную схему (5.20) на шаблоне сопротивлений тепло- и влагопереносу. Определим термическое сопротивление (сопротивление влагопереносу) между узлами сетки для материальных ячеек:

$$R_x^{(+0,5)} = \frac{h_x^{(+0,5)}}{\lambda_x^{(+0,5)}} = \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta x_{i+1}}{2\lambda_{i+1,j,k}};$$

$$R_x^{(-0,5)} = \frac{h_x^{(-0,5)}}{\lambda_x^{(-0,5)}} = \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta x_{i-1}}{2\lambda_{i-1,j,k}};$$

$$R_y^{(+0,5)} = \frac{h_y^{(+0,5)}}{\lambda_y^{(+0,5)}} = \frac{\Delta y_j}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta y_{j+1}}{2\lambda_{i,j+1,k}};$$

$$R_y^{(-0,5)} = \frac{h_y^{(-0,5)}}{\lambda_y^{(-0,5)}} = \frac{\Delta y_j}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta y_{j-1}}{2\lambda_{i,j-1,k}};$$

$$R_k^{(+0,5)} = \frac{h_k^{(+0,5)}}{\lambda_k^{(+0,5)}} = \frac{\Delta z_k}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta z_{k+1}}{2\lambda_{i,j,k+1}};$$

$$R_k^{(-0,5)} = \frac{h_k^{(-0,5)}}{\lambda_k^{(-0,5)}} = \frac{\Delta z_k}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta z_{k-1}}{2\lambda_{i,j,k-1}}.$$

Для граничных узлов необходимо учитывать условия тепло- и влагообмена на границе с воздухом. В этом случае термическое сопротивление (сопротивление влагопереносу) между узлами сетки определяется по формулам:

$$R_x^{(-0,5)} = \frac{1}{\alpha_{i-1,j,k}} + \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j,k}}; \quad R_x^{(+0,5)} = \frac{\Delta x_i}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\alpha_{i+1,j,k}};$$

$$R_y^{(-0,5)} = \frac{1}{\alpha_{i,j-1,k}} + \frac{\Delta y_j}{2\lambda_{i,j,k}}; \quad R_y^{(+0,5)} = \frac{\Delta y_j}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\alpha_{i,j+1,k}};$$

$$R_z^{(-0,5)} = \frac{1}{\alpha_{i,j,k+1}} + \frac{\Delta z_k}{2\lambda_{i,j,k}}; \quad R_z^{(+0,5)} = \frac{\Delta z_k}{2\lambda_{i,j,k}} + \frac{1}{\alpha_{i,j,k+1}}.$$

С учетом введенных обозначений получим неявную схему для решения дифференциального уравнения (4.15) на шаблоне сопротивлений тепло- и влагопереносу:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta \tau} = & \frac{1}{h_x} \left(\frac{U_{i+1,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_x^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i-1,j,k}^{n+1}}{R_x^{(-0,5)}} \right) + \\ & + \frac{1}{h_y} \left(\frac{U_{i,j+1,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_y^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j-1,k}^{n+1}}{R_y^{(-0,5)}} \right) + \\ & + \frac{1}{h_z} \left(\frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_z^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{R_z^{(-0,5)}} \right). \end{aligned} \quad (5.21)$$

Переход к разностной схеме (5.21) на шаблоне сопротивлений тепло- и влагопереносу позволяет записать разностные уравнения одинаково для всех узлов сетки, включая граничные узлы, что упрощает решение задачи.

Реализация неявной схемы (5.21) связана с необходимостью обращения многомерного сеточного оператора, что является достаточно сложной задачей, так как требуется привлекать те или иные прямые или итерационные методы [183—185]. Для реализации этой схемы воспользуемся методом расщепления, разработанным Н.Н. Яненко [180]. Суть метода заключается в том, что исходная многомерная схема (5.21) заменяется последовательностью одномерных схем по различным направлениям в пространстве. Запишем схему (5.21) в виде последовательности одномерных схем:

$$C_{i,j,k} \frac{\hat{U}_{i,j,k} - U_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_x} \left(\frac{\hat{U}_{i+1,j,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{R_x^{(+0,5)}} - \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i-1,j,k}}{R_x^{(-0,5)}} \right); \quad (5.22)$$

$$C_{i,j,k} \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_y} \left(\frac{\hat{U}_{i,j+1,k} - \hat{U}_{i,j,k}}{R_y^{(+0,5)}} - \frac{\hat{U}_{i,j,k} - \hat{U}_{i,j-1,k}}{R_y^{(-0,5)}} \right); \quad (5.23)$$

$$C_{i,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - \hat{U}_{i,j,k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{h_z} \left(\frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{R_z^{(+0,5)}} - \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k-1}^{n+1}}{R_z^{(-0,5)}} \right). \quad (5.24)$$

Уравнение (5.22) по направлению OX получено из (5.21) фиксированием переменных y и z , уравнение (5.23) по направлению OY — фиксированием переменных x и z , уравнение (5.24) по направлению OZ — фиксированием переменных x и y .

Последовательно решая алгебраические уравнения (5.22)—(5.24) по различным направлениям в пространстве, находим приближенные значения потенциалов (температуры, абсолютного потенциала влажности) на новом временном слое $\tau = \tau^{n+1}$ по известным значениям потенциалов

на предыдущем слое $\tau = \tau^n$. Значения \hat{U} и $\hat{\hat{U}}$, полученные при решении уравнений (5.22) и (5.23) по направлениям OX и OY , являются промежуточными. Полная аппроксимация достигается при решении уравнения (5.24) по направлению OZ . Пересчет характеристик состояния и переноса тепла и влаги производится после решения полного цикла уравнений (5.22)—(5.24). В работе [174] показано, что схема типа (5.22)—(5.24) безусловно устойчива, равномерно сходится и имеет погрешность аппроксимации

$$\max_{\omega_h} |U_{i,j,k}^n - U^n| = O\left[\left(h_x^2 + h_y^2 + h_z^2\right) + \Delta\tau\right].$$

Каждое из алгебраических уравнений (5.22)—(5.24) может быть приведено к каноническому виду:

$$a_x^{(-0,5)} \hat{U}_{i-1,j,k} + a_x \hat{U}_{i,j,k} + a_x^{(+0,5)} \hat{U}_{i+1,j,k} = b_x, \quad (5.25)$$

$$a_y^{(-0,5)} \hat{\hat{U}}_{i,j-1,k} + a_y \hat{\hat{U}}_{i,j,k} + a_y^{(+0,5)} \hat{\hat{U}}_{i,j+1,k} = b_y, \quad (5.26)$$

$$a_z^{(-0,5)} U_{i,j,k-1}^{n+1} + a_z U_{i,j,k}^{n+1} + a_z^{(+0,5)} U_{i,j,k+1}^{n+1} = b_z, \quad (5.27)$$

где a_x , a_y , a_z , $a_x^{(\pm 0,5)}$, $a_y^{(\pm 0,5)}$, $a_z^{(\pm 0,5)}$ — матричные коэффициенты; b_x , b_y , b_z — определяющие векторы.

Матричные коэффициенты в (5.25)—(5.27) определяются по формулам:

$$a_x = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_x} \left(\frac{1}{R_x^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_x^{(-0,5)}} \right);$$

$$a_y = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_y} \left(\frac{1}{R_y^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_y^{(-0,5)}} \right);$$

$$a_z = 1 + \frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k} h_z} \left(\frac{1}{R_z^{(+0,5)}} + \frac{1}{R_z^{(-0,5)}} \right);$$

$$\begin{aligned}
a_x^{(-0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_xR_x^{(-0,5)}}; & a_x^{(+0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_xR_x^{(+0,5)}}; \\
a_y^{(-0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_yR_y^{(-0,5)}}; & a_y^{(+0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_yR_y^{(+0,5)}}; \\
a_z^{(-0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_zR_z^{(-0,5)}}; & a_z^{(+0,5)} &= -\frac{\Delta\tau}{C_{i,j,k}h_zR_z^{(+0,5)}}.
\end{aligned}$$

Матричные коэффициенты характеризуют связь отдельных элементов ограждающей конструкции. В каждом из уравнений (5.25)—(5.27) они образуют трехдиагональную матрицу коэффициентов.

Определяющие векторы в (5.25)—(5.27) вычисляются по формулам:

$$b_x = U_{i,j,k}^n; \quad b_y = \hat{U}_{i,j,k}; \quad b_z = \hat{U}_{i,j,k}.$$

Определяющий вектор b_x по направлению OX в момент времени $\tau = \tau^{n+1}$ представляет собой значения потенциала (температуры, абсолютного потенциала влажности) в предыдущий момент времени $\tau = \tau^n$ (при $\tau = \tau_1$ — начальные условия); определяющий вектор b_y по направлению OY — значения потенциала, полученные в результате решения уравнения (5.25) по направлению OX ; определяющий вектор b_z по направлению OZ — значения потенциала, полученные в результате решения уравнения (5.26) по направлению OY .

Для решения уравнений (5.25)—(5.27) воспользуемся методом прогонки [186]. Перепишем уравнения (5.25)—(5.27) в общем виде

$$a_s^{(-0,5)}U_{s-1} + a_s U_s + a_s^{(+0,5)}U_{s+1} = b_s, \quad (5.28)$$

где $a_s^{(\pm 0,5)}$, a_s — коэффициенты трехдиагональной матрицы; U_{s-1} , U_s , U_{s+1} — искомые функции потенциалов; b_s — определяющий вектор; s — индекс узла по данному направлению.

К уравнению (5.28) добавим граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} a_s^{(-0,5)} = 0, \quad a_s = 1, \quad a_s^{(+0,5)} = 0, \quad b_s = U_1^* \quad \text{при } s = 1; \\ a_s^{(-0,5)} = 0, \quad a_s = 1, \quad a_s^{(+0,5)} = 0, \quad b_s = U_2^*, \quad \text{при } s = \mu, \end{aligned} \right\} \quad (5.29) \text{---} (5.30)$$

где U_1^* , U_2^* — значения потенциала (температуры, абсолютного потенциала влажности) воздушной среды; μ — число узлов по данному направлению.

Будем искать решение задачи (5.28) с граничными условиями (5.29)---(5.30) в виде

$$U_s = \gamma_s - \frac{a_s^{(+0,5)} U_{s+1}}{\eta_s}, \quad (5.31)$$

где γ_s , η_s — прогоночные коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \eta_s = a_s, \quad \gamma_s = \frac{b_s}{\eta_s} \quad \text{при } s = 1; \\ \eta_s = a_s - \frac{a_s^{(-0,5)} a_{s-1}^{(+0,5)}}{\eta_{s-1}}, \quad \gamma_s = \frac{b_s - a_s^{(-0,5)} \gamma_{s-1}}{\eta_s} \quad \text{при } s = 2, \dots, \mu. \end{aligned} \right\} \quad (5.32) \text{---} (5.33)$$

Порядок счета по формулам (5.29)---(5.33) следующий. Сначала по граничному условию (5.29) и рекуррентным формулам (5.32)---(5.33) последовательно определяются прогоночные коэффициенты η_s , γ_s при $s = 1, 2, \dots, \mu$. При этом счет идет слева направо — от s к $s+1$ (прямой ход). Затем из граничного условия (5.30) находится $U_\mu = \gamma_\mu = U_2^*$ и далее по формуле (5.31) последовательно — от $s+1$ к s определяются искомые значения потенциалов $U_{\mu-1}$, $U_{\mu-2}, \dots, U_1$. При этом счет идет справа налево (обратный ход).

Разработанный численный метод может быть использован для решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий.

5.3. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ «СОВТ–3» ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ВЛАЖНОСТНЫХ ПОЛЕЙ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Математическая модель совместного нестационарного тепло- и влаготеплопереноса на основе температуры и абсолютного потенциала влажности реализована в компьютерной программе «Совместный влаготеплоперенос (СОВТ–3)». Программа позволяет производить расчеты трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей в ограждающих конструкциях зданий, что дает возможность прогнозирования и всестороннего анализа температурно-влажностного режима наружных ограждений при их многолетней эксплуатации. Основными достоинствами модели и разработанной на ее основе компьютерной программы являются:

использование шкалы неизотермического абсолютного потенциала влажности, что позволяет предельно упростить математическую модель тепловлагодотеплопереноса и дает возможность производить расчет температурно-влажностного режима ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при сложных граничных условиях;

возможность исследования динамики тепловлажностного состояния ограждающих конструкций сложной геометрической структуры при переменных воздействиях климата и микроклимата помещений;

применимость программы для исследования тепловых и влажностных процессов различной интенсивности;

возможность задания неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса.

Программа написана автором в системе визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 3–7 для WINDOWS®. Минимальные системные требования: ПК модификации Pentium 3 с установленной системой WINDOWS® 98 ОЗУ 125 Мб, свободное место на

жестком диске 2 Мб. Для обработки результатов численного моделирования необходимо иметь компьютерную программу MathCAD.

Программа имеет удобный пользовательский интерфейс, основанный на возможностях Delphi. Подготовка исходных данных для расчета наглядна и удобна в применении. Программа имеет модульную структуру, что обеспечивает возможность ее дальнейшего совершенствования.

Разработанная компьютерная программа зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности и включена в состав программно-вычислительного комплекса «Энергоэффективность и тепловая защита зданий (ЭНТЕЗА)» (прил. 1, 2 диссертации).

На рис. 5.2 приведено главное меню компьютерной программы.

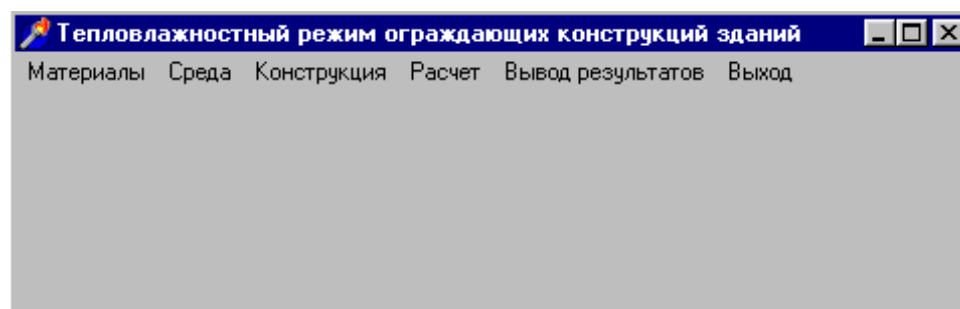


Рис. 5.2. Главное меню компьютерной программы «СОВТ–3»

Пункт меню «Материалы» предназначен для задания тепловых и влажностных характеристик материалов ограждающих конструкций.

Тепловые характеристики включают в себя: плотность ρ_0 , кг/м³; удельную теплоемкость c_{ho} , кДж/(кг·°C), и коэффициент теплопроводности λ_{ho} , Вт/(м·°C) в сухом состоянии при температуре 0 °C; коэффициенты k_w и k_i , учитывающие влияние на эти характеристики влажности и температуры. Влажностные характеристики включают в себя: относительный потенциал влажности θ_ϕ ; влагосодержание w , кг/кг; удельную влагоемкость c_{m0} , кг/[кг·(кДж/кг)], и коэффициент влагопроводности λ_{m0} ,

кг/[м·с·(кДж/кг)], при температуре 20 °С. Для удобства практического применения влажностные характеристики задаются в шкале относительного потенциала влажности. Значения относительного потенциала влажности изменяются от 0,2 до 2,86 с неравномерным шагом, т. е. охватывают практически полный диапазон изменения влажности материалов.

Пункт меню «Среда» предназначен для задания параметров наружного климата и внутреннего микроклимата зданий.

Климатические параметры включают в себя среднемесячные значения температуры t_{ext} , °С, и относительного потенциала влажности θ_{ϕ}^{ext} наружного воздуха. Указанные параметры приведены для различных населенных пунктов согласно СНиП 23–01–99* «Строительная климатология». Значения относительного потенциала влажности определены расчетом по соответствующим значениям относительной влажности воздуха, приведенным в нормах. Параметры микроклимата зданий включают в себя значения температуры t_{int} , °С, и относительного потенциала влажности θ_{ϕ}^{int} внутреннего воздуха. Указанные параметры приведены для различных типов зданий согласно ГОСТ 30494–96. Задание среднемесячных значений параметров наружного климата и микроклимата зданий позволяет производить расчет нестационарных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций в годовом цикле.

Тепловые и влажностные характеристики материалов и воздушной среды содержатся в справочниках базы данных. Предусмотрена стандартная работа со справочниками: ввод, корректировка и удаление данных.

Пункт меню «Конструкция» предназначен для описания геометрии ограждающей конструкции. Этот пункт включает в себя задание пространственной сетки (ПС) и матрицы кодов материалов (МКМ).

Задание ПС производится путем ввода шагов числовой сетки по трем направлениям в пространстве с использованием пользовательской сис-

темы координат $OXYZ$. Все шаги вводятся в метрах. Построение ПС производится так, чтобы всякая ячейка ПС не содержала более одного материала. Максимальное число шагов ПС по каждому направлению в пространстве равно 30, что достаточно для описания конструкций сложной геометрической структуры. Предусмотрена возможность ввода неравномерной сетки для исследования температурно-влажностного режима ограждающей конструкции с разной степенью точности на различных ее участках. Выбор ПС определяется необходимой точностью и скоростью вычислений.

МКМ используется для задания кодов материалов ограждающей конструкции и воздушной среды. Коды вводятся по слоям, число которых соответствует числу шагов по координатной оси OZ . В программе используется следующая система кодов: -3 — наружный воздух; -2 — внутренний воздух; -1 — «обрыв» конструкции; $1, 2, 3, \dots$ — материал. Для всех кодов материалов в МКМ должны быть определены тепловые и влажностные характеристики в справочниках базы данных. С помощью ПС и МКМ могут быть описаны ограждающие конструкции сложной геометрической структуры в декартовой системе координат. Размерность МКМ определяется размерностью ПС. Максимальная размерность МКМ $30 \times 30 \times 30 = 27000$.

Работа с ПС и МКМ осуществляется в режимах ввода и корректировки данных.

Пункт меню «Расчет» предназначен для расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций. Расчет выполняется после задания ПС и МКМ. Исходными данными для расчета являются:

код населенного пункта;

код условий эксплуатации;

коэффициенты теплообмена внутренней α_h^{si} , Вт/(м²·°С), и наружной α_h^{se} , Вт/(м²·°С), поверхностей ограждающей конструкции;

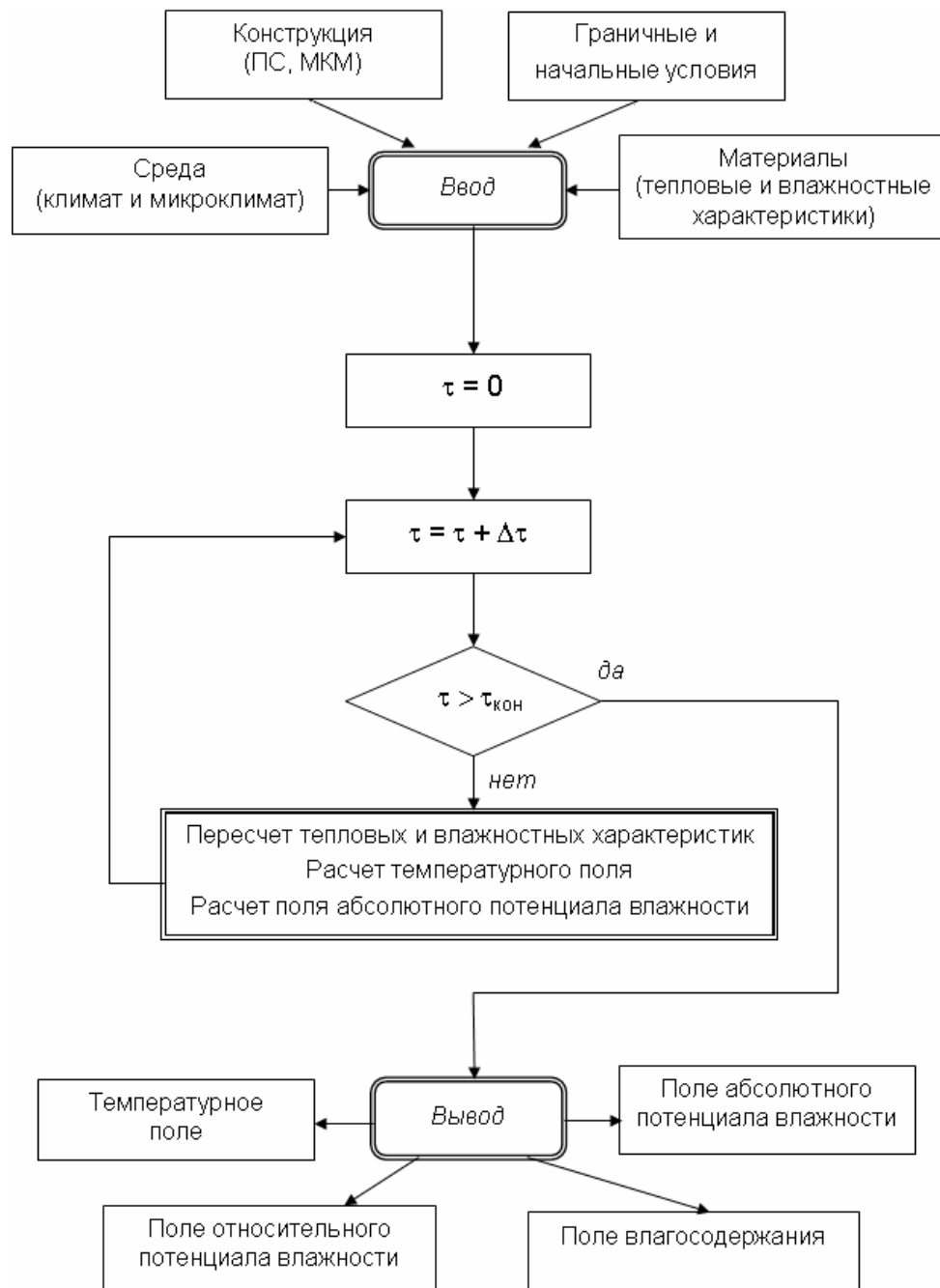


Рис. 5.3. Принципиальная блок-схема алгоритма расчета трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций зданий по программе «COBT-3»

коэффициенты влагообмена внутренней α_m^{si} , кг/[м²·с·(кДж/кг)], и наружной α_m^{se} , кг/[м²·с·(кДж/кг)], поверхностей ограждающей конструкции;

начальные условия: температура t_0 и относительный потенциал влажности $\theta_{\varphi 0}$ в начальный момент времени $\tau = 0$;

временные параметры: дата начала и окончания расчета (день, месяц, год), временной шаг $\Delta\tau$, сут.

Выбор временного шага определяется необходимой точностью и скоростью вычислений, а также динамикой изменения характеристик наружного климата и внутреннего микроклимата здания.

После ввода исходных данных программа производит расчет трехмерных полей температуры и абсолютного потенциала влажности.

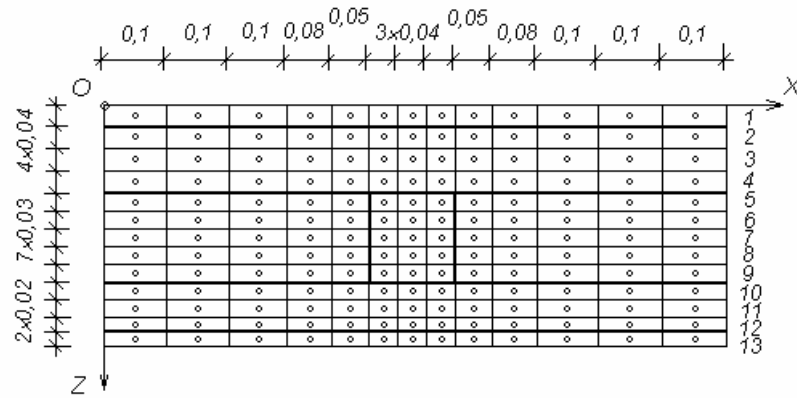
Пункт меню «Вывод результатов» используется для вывода результатов расчета по компьютерной программе в виде полей температуры, абсолютного потенциала влажности, относительного потенциала влажности, влагосодержания по слоям. Полученные числовые данные могут быть визуализированы, например, с помощью компьютерной программы MathCAD.

Принципиальная блок-схема алгоритма расчета трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций зданий по программе «COBT-3» представлена на рис. 5.3.

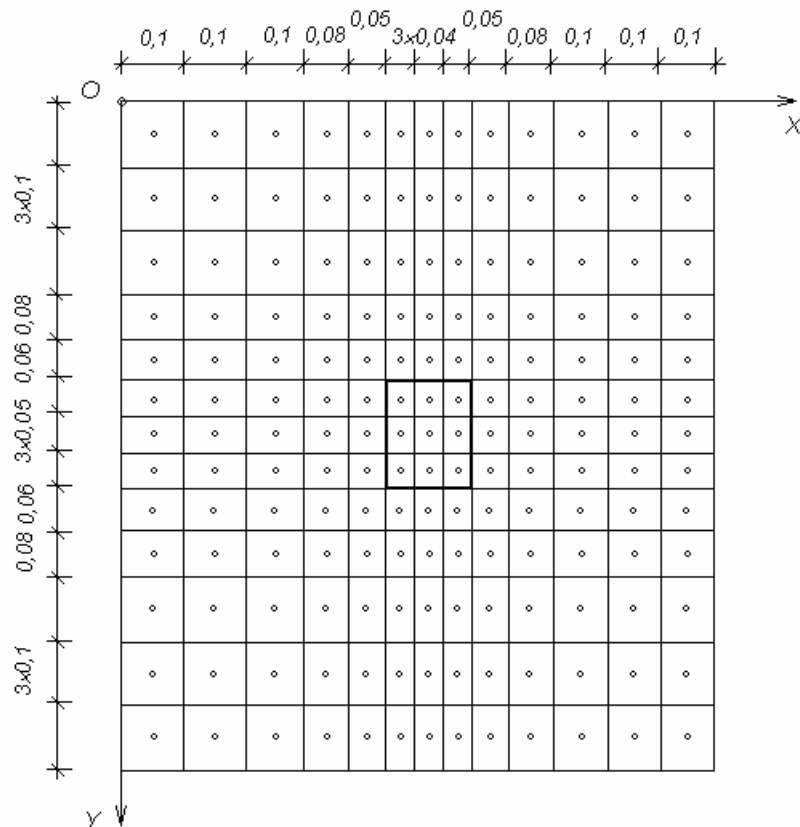
5.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ВЛАЖНОСТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ФРАГМЕНТА ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассматривается фрагмент трехслойной стеновой панели со шпунтовым соединением. Внутренний конструктивный слой панели толщиной 120 мм и наружный защитно-отделочный слой толщиной 80 мм выполнены из керамзитобетона ($\rho_0 = 1600$ кг/м³) и соединены между собой

шпонкой 120×150×150 мм, выполненной из того же материала. В качестве утеплителя использованы пенополистирольные плиты ($\rho_0 = 40 \text{ кг/м}^3$) толщиной 150 мм. Здание жилое, пункт строительства — Волгоград.



а



б

Рис. 5.4. Схема фрагмента ограждающей конструкции:
а — горизонтальное сечение; б — вертикальное сечение

Схема ограждающей конструкции в зоне шпонки приведена на рис. 5.4. На этой схеме показана пользовательская система координат $OXYZ$. Плоскость OXY параллельна внутренней поверхности конструкции, ось OZ перпендикулярна этой плоскости и направлена от внутренней поверхности к наружной. За начало системы координат принята точка O , отстоящая от внутренней поверхности конструкции на 0,04 м в сторону внутренней среды.

Строим ПС (рис. 5.5), задавая шаги по координатным осям OX , OY и OZ в метрах:

0.1	0.1	0.1	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.1	0.1	0.1
0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02

В зоне шпонки приняты более мелкие шаги числовой сетки для детального исследования температурно-влажностного режима в этой зоне. Принятое число шагов ПС достаточно для обеспечения необходимой точности и скорости вычислений.

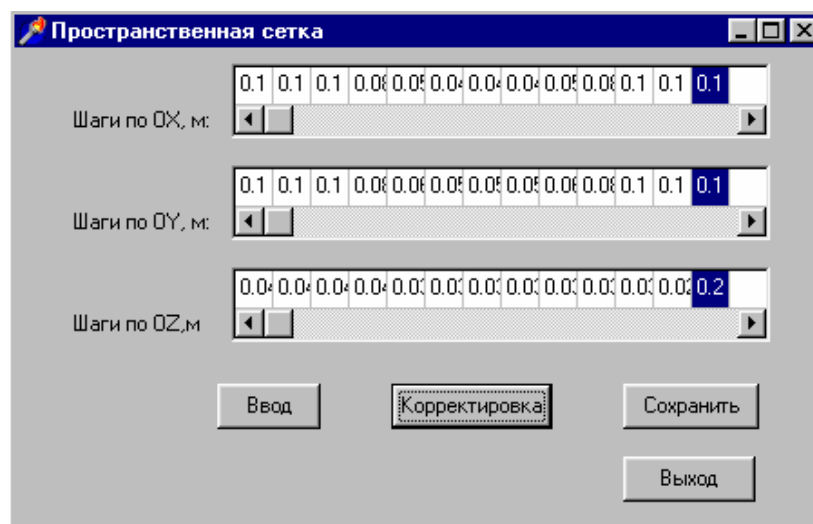


Рис. 5.5. Построение пространственной сетки

Для задания кодов материалов ограждающей конструкции и воздушной среды строим МКМ по слоям в направлении координатной оси OZ :

слой 1 (внутренний воздух)

[illegible]

слои 2—4 (внутренний слой панели)

[illegible]

слои 5—9 (утеплитель)

[illegible]

слои 10—12 (наружный слой панели)

[illegible]

слой 13 (наружный воздух)

[illegible]

При построении МКМ использованы следующие коды: -3 — наружный воздух; -2 — внутренний воздух; -1 — «обрыв» конструкции; 2 — керамзитобетон; 9 — пенополистирол. В качестве примера на рис. 5.6 приведено построение МКМ для 9-го слоя конструкции.

Для кодов материалов и воздушной среды МКМ определены тепловые и влажностные характеристики в справочниках базы данных.

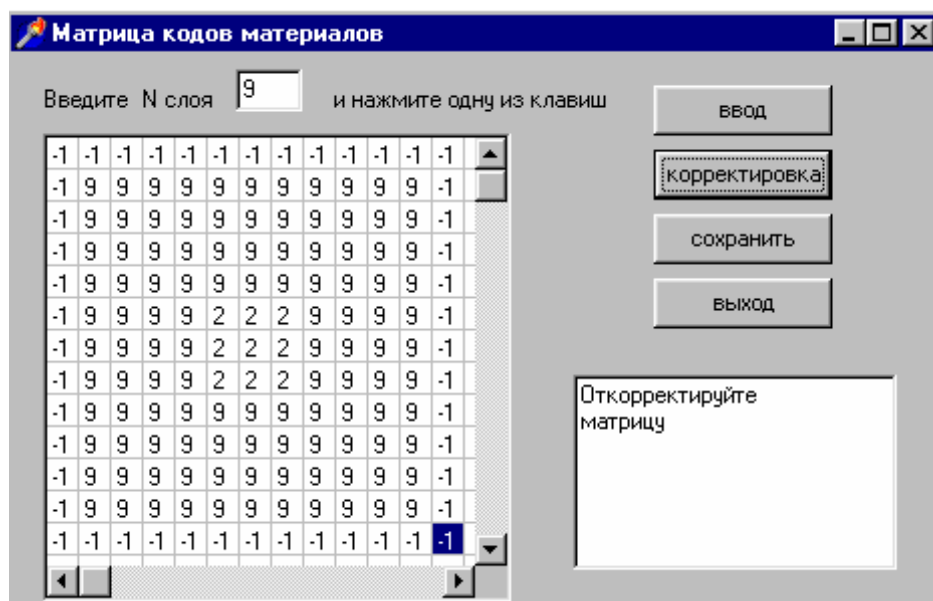


Рис. 5.6. Построение матрицы кодов материалов (фрагмент)

Тепловые характеристики материалов:

керамзитобетон (код материала 2) —

$$\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3; c_{ho} = 0.84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}; \lambda_{ho} = 0.36 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; k_w = 4.44 \text{ (кг/кг)}^{-1}; k_i = 10.6 \text{ (кг/кг)}^{-1};$$

пенополистирол (код материала 9) —

$$\rho_0 = 40 \text{ кг/м}^3; c_{ho} = 1.34 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}; \lambda_{ho} = 0.038 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; k_w = 3.1 \text{ (кг/кг)}^{-1}; k_i = 7.4 \text{ (кг/кг)}^{-1}.$$

Влажностные характеристики материалов:

относительный потенциал влажности Θ_ϕ (общий для всех материалов) —

0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 2.86;

влажность $w \cdot 10^2$, кг/кг:

керамзитобетон —

3.1 4.9 8.9 10.9 11.8 16.1 23.3 31 37.4 42 45 47 48.1 48.6 48.8;

пенополистирол —

1.3 1.8 2.3 2.5 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6;

удельная влагоемкость c_{m0} , кг/[кг·(кДж/кг)], при $t_0 = 20 \text{ °C}$:

керамзитобетон —

2.08e-04 1.72e-04 3.70e-04 1.69e-04 7.81e-05 1.75e-03 8.02e-04 3.67e-04
1.69e-04 7.81e-05 3.64e-05 1.90e-05 1.90e-05 1.90e-05 1.90e-05;

пенополистирол —

9.38e-05 4.17e-05 4.43e-05 1.98e-05 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06
9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06 9.11e-06;

коэффициент теплопроводности λ_{m0} , кг/[м·с·(кДж/кг)], при $t_0 = 20$ °С:

керамзитобетон —

1.60e-10 1.50e-10 1.36e-10 9.73e-11 5.49e-11 1.16e-07 4.30e-07 5.16e-07
3.66e-07 2.06e-07 1.05e-07 5.63e-08 5.50e-08 5.40e-08 5.40e-08;

пенополистирол —

4.10e-11 4.00e-11 3.80e-11 1.71e-11 7.90e-12 8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12
8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12 8.00e-12.

Приведенные выше данные соответствуют формату, принятому в компьютерной программе.

Параметры наружного климата (среднемесячные значения):

температура t_{ext} , °С, —

- 7.6 - 7.0 - 1.0 10.0 16.7 21.3 23.6 22.1 16.0 8.0 - 0.6 - 4.2;

относительный потенциал влажности θ_{ϕ}^{ext} —

0.85 1.0 0.6 0.27 0.23 0.22 0.20 0.20 0.26 0.36 1.0 1.0.

Параметры микроклимата здания (среднемесячные значения):

температура t_{int} , °С, —

20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20;

относительного потенциала влажности θ_{ϕ}^{int} —

0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25.

После задания ПС и МКМ выполняется расчет температурно-влажностного режима ограждающей конструкции.

Выбор временного шага обеспечивает необходимую точность и скорость вычислений. Пример заполнения формы «Расчет температурно-влажностного режима» представлен на рис. 5.7.

The screenshot shows a software window titled "Расчет температурно-влажностного режима". It contains several input fields and buttons:

- Код населенного пункта:** 01
- Код условий эксплуатации:** 01
- Коэффициент теплообмена:**
 - внутренней поверхности: 8.7
 - наружной поверхности: 23
- Коэффициент влагообмена:**
 - внутренней поверхности: 5.2e-09
 - наружной поверхности: 10.4e-09
- Начальная температура:** 8
- Начальный относительный потенциал влажности:** 0.3
- Дата начала расчета (ddmmgggg):** 15102007
- Временной шаг, сут:** 2
- Дата окончания расчета (ddmmgggg):** 15012008
- Buttons:** "расчет" and "Выход"

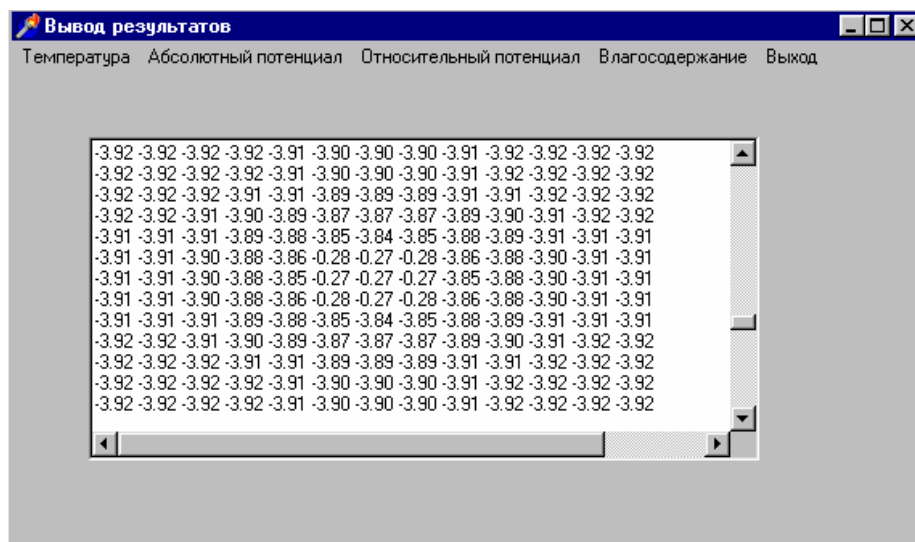
Рис. 5.7. Пример заполнения формы «Расчет температурно-влажностного режима»

После ввода всех исходных данных программа производит расчет трехмерных полей температуры и абсолютного потенциала влажности.

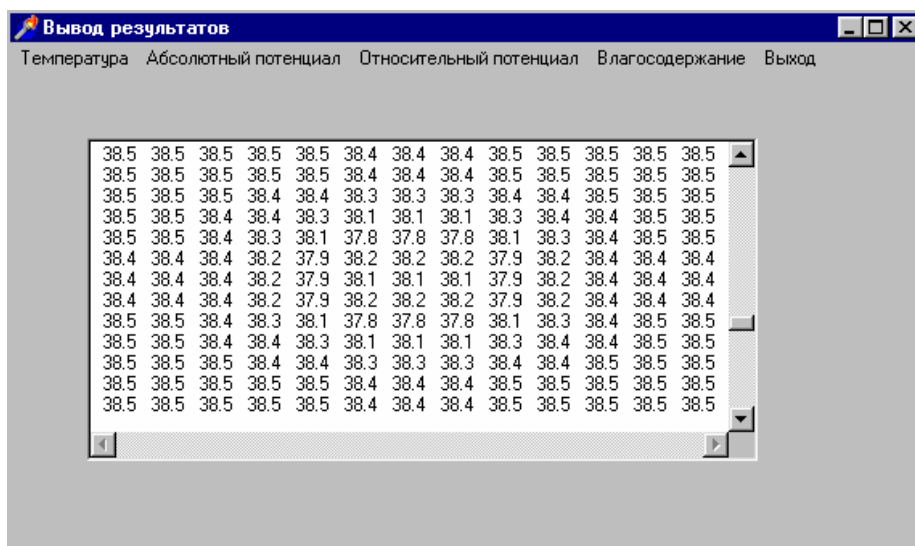
Форма для вывода результатов расчета приведена на рис. 5.8. На рис. 5.8, *а* показан фрагмент температурного поля в рассматриваемый момент времени (середина января) для 9-го сечения панели (стык утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем), на рис. 5.8, *б* — фрагмент поля абсолютного потенциала влажности для того же сечения.

Из рис. 5.8, *а* видно, что в рассматриваемом сечении температура в зоне шпонки ($-0,27^{\circ}\text{C}$) выше температуры по глади стены ($-3,92$). Локальное повышение температуры в зоне шпонки можно объяснить меньшим сопротивлением теплопередаче на этом участке по сравнению с гладью панели. Тепловой поток направлен от шпонки к глади стены. Как показывает рис. 5.8, *б*, в зоне шпонки отмечается незначительное

понижение абсолютного потенциала влажности (по шпонке — 37,8 кДж/кг, по глади стены — 38,5 кДж/кг). Поток влаги направлен от глади стены к шпонке. По результатам расчета полей температуры и абсолютного потенциала влажности получено поле влагосодержания.



а



б

Рис. 5.8. Фрагмент температурного поля (а) и поля абсолютного потенциала влажности (б) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (середина января)

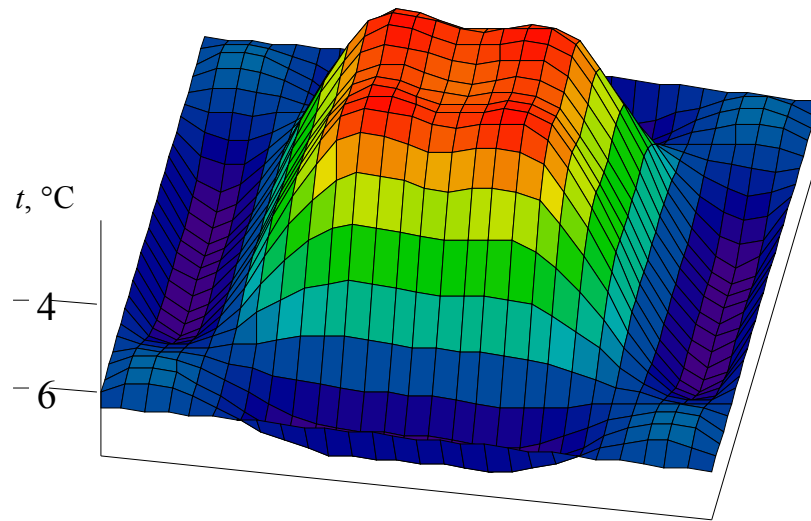
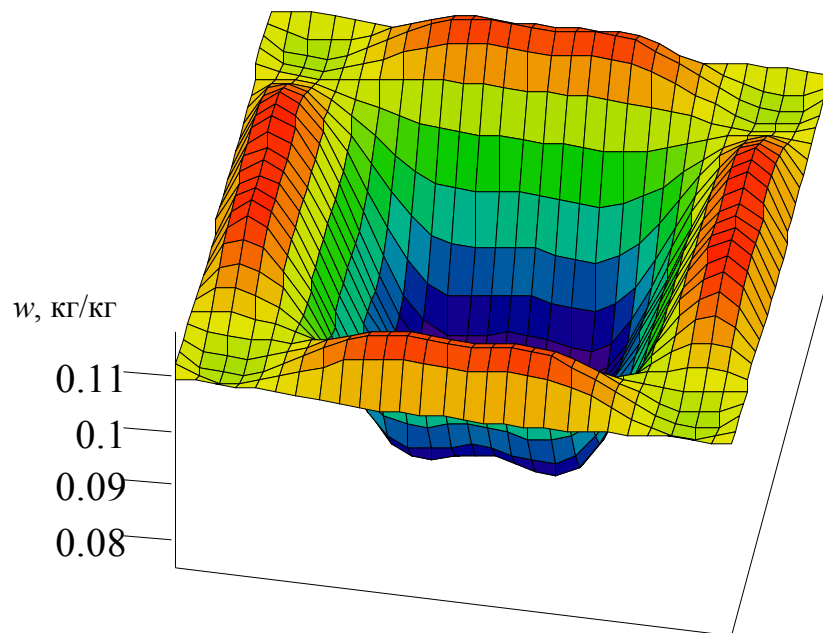
*a**б*

Рис. 5.9. Поля температуры (*a*) и влагосодержания (*б*) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по керамзитобетону) в середине января

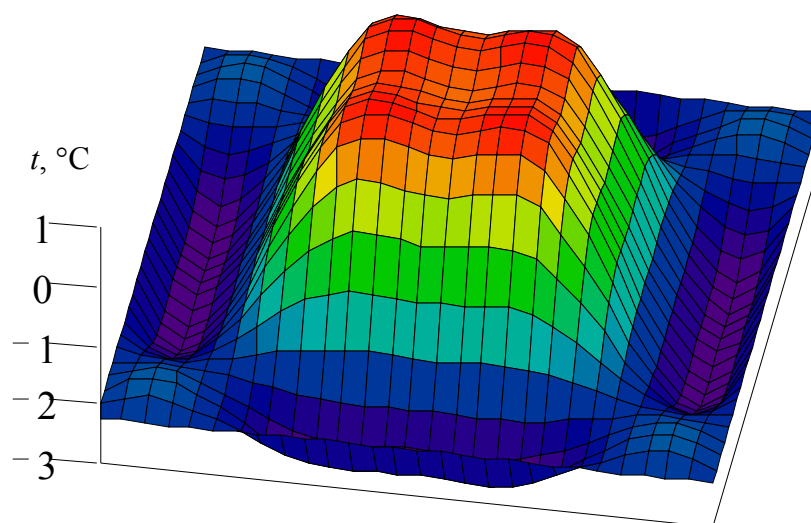
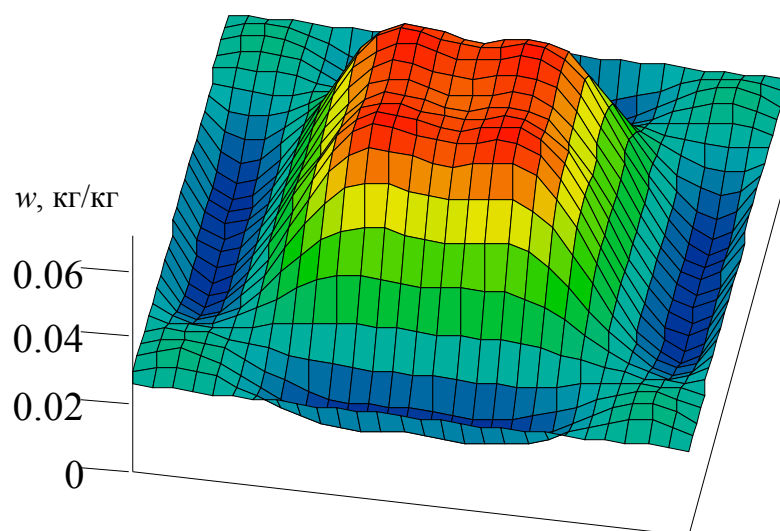
*a**б*

Рис. 5.10. Поля температуры (*a*) и влагосодержания (*б*) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в середине января

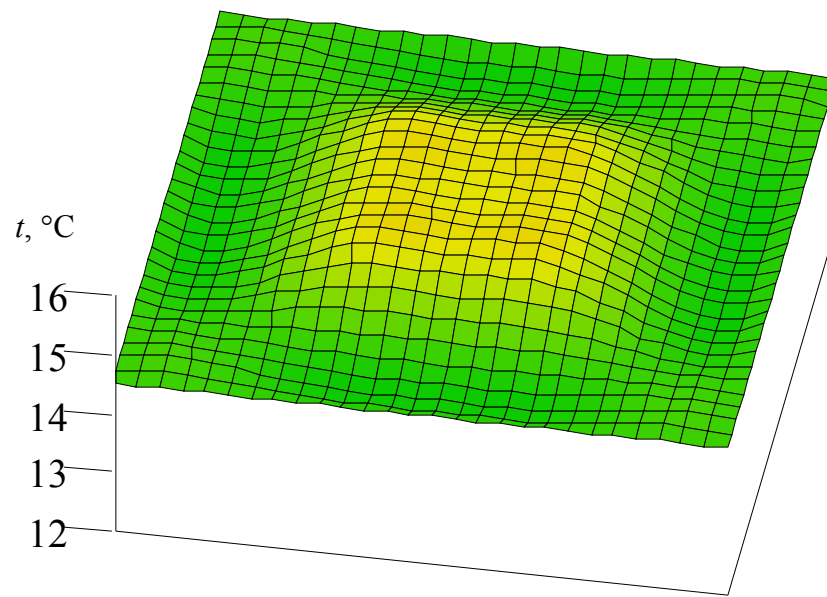
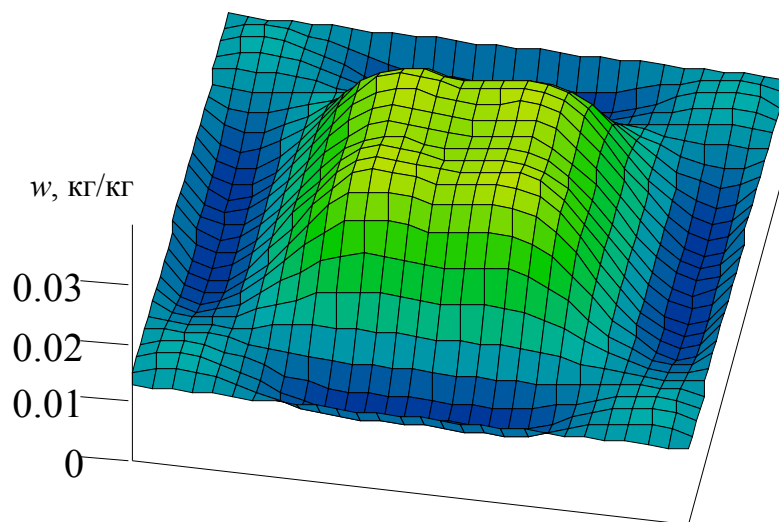
*a**б*

Рис. 5.11. Поля температуры (*a*) и влагосодержания (*б*) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в середине апреля

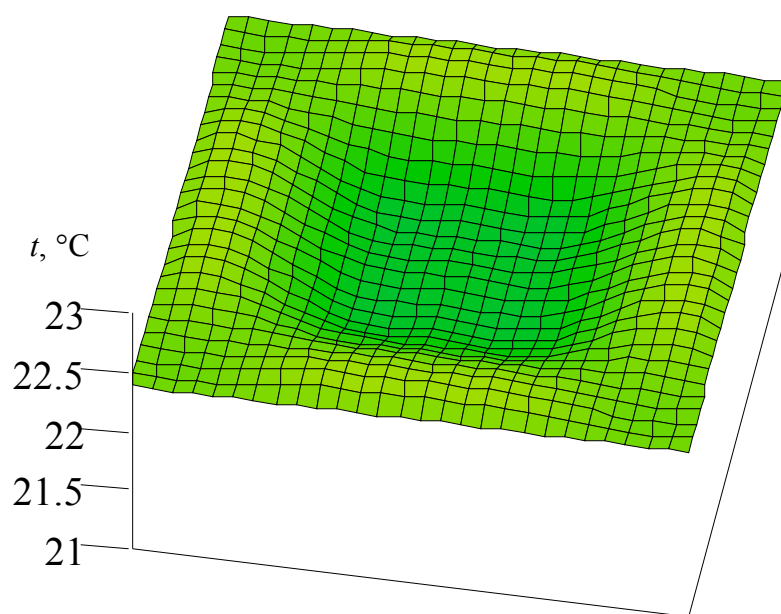
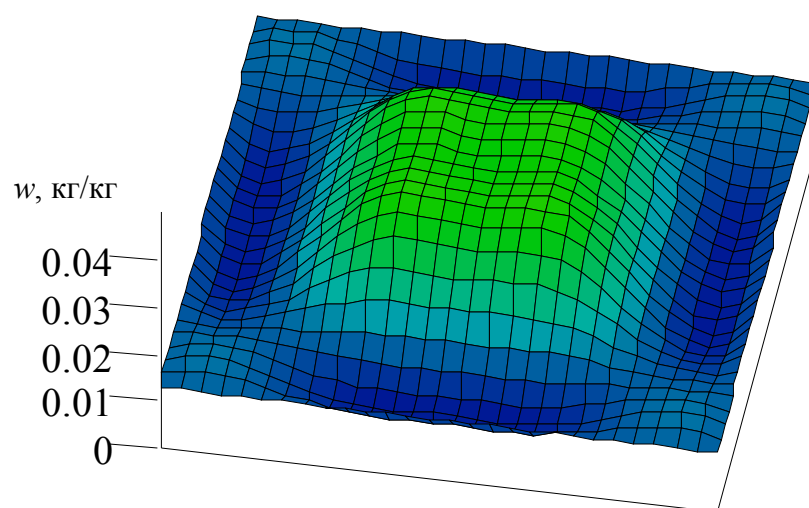
*a**б*

Рис. 5.12. Поля температуры (*a*) и влагосодержания (*б*) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в середине июля

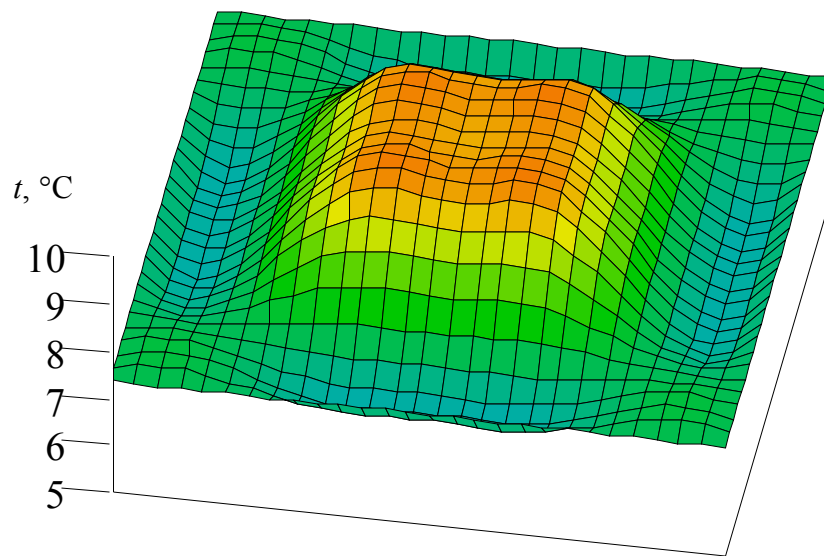
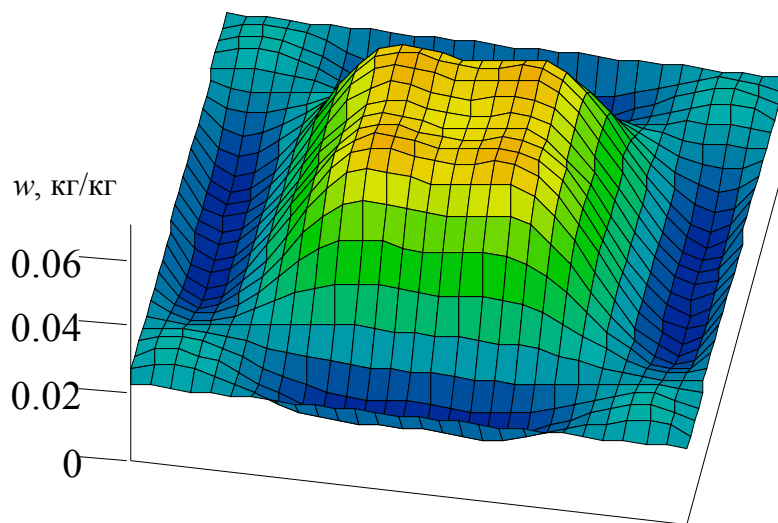
*a**б*

Рис. 5.13. Поля температуры (*a*) и влагосодержания (*б*) на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в середине октября

На рис. 5.9 представлены поля температуры (рис. 5.9, *а*) и влагосодержания (рис. 5.9, *б*) в рассматриваемом сечении конструкции, полученные путем визуализации результатов расчета по компьютерной программе «СОВТ–3». Как видно из рисунка, температура в зоне шпонки повышается, а равновесное влагосодержание снижается. Понижение влагосодержания в зоне шпонки объясняется влиянием более высокой температуры в этой краевой зоне.

Результаты расчета температурно-влажностного режима рассматриваемой конструкции на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем (по утеплителю) в годовом цикле эксплуатации представлены на рис. 5.10—5.13. Начальные условия (середина октября): температура $t_0 = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительный потенциал влажности $\theta_{\phi 0} = 0,3$, для которого равновесное влагосодержание $w_1 = 0,016\text{ кг/кг}$ (пенополистирол) и $w_2 = 0,04\text{ кг/кг}$ (керамзитобетон).

На рис. 5.10 представлены поля температуры и влагосодержания для середины января. Из рис. 5.10, *а* видно, что с понижением температуры наружного воздуха температура в рассматриваемом сечении снижается. В зоне шпонки нарушается однородность температурного поля. Температура по шпонке ($0,63\text{ }^{\circ}\text{C}$) выше температуры по глади сечения ($-2,22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Понижение температуры в указанном сечении приводит к росту влагосодержания (рис. 5.10, *б*). В зоне шпонки нарушается однородность и влажностного поля: равновесное влагосодержание по шпонке ($0,064\text{ кг/кг}$) выше влагосодержания по глади ($0,026\text{ кг/кг}$). На стыке шпонки и утеплителя происходит разрыв влагосодержания.

На рис. 5.11 представлены поля температуры и влагосодержания для середины апреля. Из рис. 5.11, *а* видно, что с ростом температуры наружного воздуха температура в рассматриваемом сечении повышается, а неоднородность температурного поля сглаживается. Температура по шпонке ($15,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) выше температуры по глади сечения ($14,52\text{ }^{\circ}\text{C}$). По-

вышение температуры приводит к сушке материалов конструкции (рис. 5.11, б), при этом влажностное поле несколько выравнивается. Равновесное влагосодержание по шпонке (0,028 кг/кг) выше влагосодержания по глади (0,013 кг/кг).

На рис. 5.12 представлены поля температуры и влагосодержания для середины июля. Как видно из рис. 5.12, а, в рассматриваемом сечении происходит дальнейшее повышение температуры, при этом температурное поле выравнивается. Происходит дальнейшая сушка материалов ограждения (рис. 5.12, б).

На рис. 5.13 представлены поля температуры и влагосодержания для середины октября. Из рис. 5.13, а видно, что с понижением температуры наружного воздуха температура в рассматриваемом сечении снижается. В зоне шпонки нарушается однородность температурного поля. Температура по шпонке (9,23 °С) выше температуры по глади сечения (7,35 °С). Понижение температуры в указанном сечении приводит к росту влагосодержания (рис. 5.13, б), причем неоднородность влажностного поля возрастает. Равновесное влагосодержание по шпонке (0,055 кг/кг) выше влагосодержания по глади (0,023 кг/кг).

Анализ влажностного режима в рассматриваемом сечении конструкции за год показывает, что влагосодержание материалов увеличилось по сравнению с начальным: по шпонке — на 0,015 кг/кг (1,5 мас. %), по утеплителю — на 0,007 кг/кг (0,7 мас. %). Проведенные расчеты показывают, что влажностный режим стабилизируется спустя 2,5—3 года с момента ввода конструкции в эксплуатацию.

Разработанный в диссертации метод численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса позволяет прогнозировать температурно-влажностный режим ограждающих конструкций с целью энергосбережения и повышения надежности и экологической безопасности.

6. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО-И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Выполнено тестирование (верификация) метода численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях различными способами.

6.1. ТЕСТИРОВАНИЕ НА АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ СЕТОК

Цель данного теста — провести проверку разработанного метода и компьютерной программы на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток.

Для проверки метода использовано аналитическое решение, полученное на основе методов инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций, приведенных в п. 4.1 диссертации.

Рассматривается модельная ограждающая конструкция в виде однослойной однородной наружной стены толщиной 0,4 м, выполненной из кладки пенобетонных блоков ($\rho_0 = 600 \text{ кг/м}^3$). Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{int} = 55 \text{ \%}$, $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$. Параметры климата: $t_{ext} = -9,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{ext} = 85 \text{ \%}$, $\theta_{ext} = 11 \text{ кДж/кг}$. Коэффициенты тепло- и влагообмена: внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию: $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 95 \text{ кДж/кг}$.

Аналитическое решение задачи определения влажностного состояния рассматриваемой конструкции в стационарных условиях влагопере-

дачи дает линейное распределение абсолютного потенциала влажности $\theta(x)$ по толщине конструкции:

$$\theta(x) = 87,2 - 180,4x, \quad 0 \leq x \leq 0,4. \quad (6.1)$$

Для численного решения задачи использована равномерная пространственная сетка с шагом $\Delta h = 0,04$ м. Общее число узлов 1728. Временной шаг $\Delta \tau = 2$ сут. Для исключения влияния температуры на влажностное состояние ограждения теплофизические характеристики материала приняты постоянными: $\lambda_h = 0,22$ Вт/(м·°C), $\lambda_m = 2,25 \cdot 10^{-10}$ кг/[м·с·(кДж/кг)]. Расчет выполнен до установления стационарного влажностного режима ограждения.

Результаты расчета влажностного состояния стены, полученные по компьютерной программе, представлены в табл. 6.1 в виде распределения абсолютного потенциала влажности $\theta(x, \tau)$ по координате x с течением времени τ (по двум другим координатам распределение θ равномерное).

Таблица 6.1

**Результаты расчета влажностного режима стены
по компьютерной программе «СОВТ-3»**

τ , мес	Значения абсолютного потенциала влажности θ , кДж/кг, при x , м:									
	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	0,22	0,26	0,3	0,34	0,38
0	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
1	95	95	95	95	95	93,4	89,6	81,4	66,3	42,8
3	95	94,2	92,7	90,1	86,1	80	71,4	60,1	46	29,7
6	91,7	88,5	84,7	79,8	73,7	66,3	57,6	47,5	36,4	24,4
12	87	81,1	75	68,5	61,6	54,2	46,4	38,2	29,6	20,8
18	85,3	78,5	71,6	64,6	57,5	50,2	42,7	35,1	27,4	19,7
24	84,7	77,6	70,5	63,3	56,1	48,8	41,5	34,1	26,7	19,3
30	84,5	77,3	70,1	62,9	55,6	48,3	41,1	33,8	26,5	19,1
36	84,4	77,2	70	62,7	55,5	48,2	40,9	33,6	26,4	19,1

На основании интерполяции табличных данных кубическими сплайн-функциями построен график $\theta(x, \tau)$, приведенный на рис. 6.1.

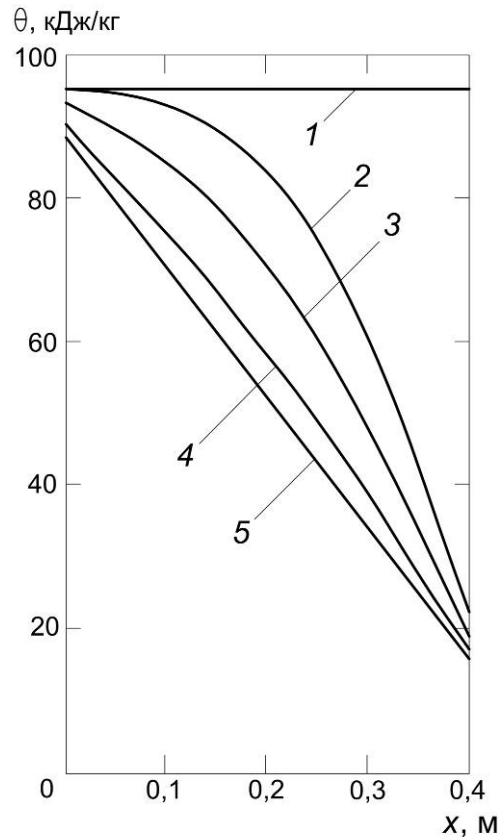


Рис. 6.1. График распределения абсолютного потенциала влажности $\theta(x, \tau)$ по координате x с течением времени τ : 1 — $\tau = 0$; 2 — $\tau = 3$; 3 — $\tau = 6$; 4 — $\tau = 12$; 5 — $\tau = 36$ мес

Из графика видно, что с течением времени происходит сушка ограждения. Сушку можно условно разделить на два этапа. На первом этапе происходит интенсивная сушка наружного поверхностного слоя конструкции за счет разности абсолютного потенциала влажности наружной поверхности и наружного воздуха. При этом абсолютный потенциал влажности внутреннего поверхностного слоя ограждения практически не изменяется. На втором этапе происходит сушка внутреннего поверхностного слоя за счет разности абсолютного потенциала влажности внутреннего и наружного слоев. Кривые $\theta(x, \tau)$ с течением времени приближаются к предельному состоянию, характеризующему стабилизацию

процесса. Установление влажностного состояния происходит спустя 2,5–3 года с момента ввода в эксплуатацию. Дальнейшего изменения θ в конструкции с течением времени не происходит.

Таблица 6.2

**Сравнение результатов численного решения задачи
с аналитическим решением**

x , м	Значения θ , кДж/кг, полученные		Относительная ошибка, %
	аналитическим расчетом	численным расчетом	
0,02	83,6	84,4	0,96
0,06	76,4	77,2	1,05
0,1	69,2	70	1,16
0,14	61,9	62,7	1,29
0,18	54,7	55,5	1,46
0,22	47,5	48,2	1,47
0,26	40,3	40,9	1,49
0,3	33,1	33,6	1,51
0,34	25,9	26,4	1,93
0,38	18,6	19,1	2,42

Сравнение результатов численного решения задачи в установившихся условиях влагопередачи с аналитическим решением (6.1) показывает их хорошее согласование (табл. 6.2). Максимальная относительная ошибка по отношению к аналитическому решению составляет 2,42 % в сечении $x = 0,38$ м.

Для определения погрешности численного решения задачи в зависимости от выбора пространственной и временной сеток проведено тестирование на последовательности сеток для указанной конструкции. За базовый принят вариант с шагом по времени $\Delta\tau = 2$ сут и пространственным шагом $\Delta h = 0,04$ м. Рассмотрена последовательность временных сеток с шагом $\Delta\tau = 1, 2, 4$ сут и фиксированным шагом по пространству

$\Delta h = 0,04$ м. Рассмотрена последовательность пространственных сеток с шагом $\Delta h = 0,02, 0,04, 0,08$ м и фиксированным шагом по времени $\Delta \tau = 2$ сут.

На рис. 6.2, *a* представлен график изменения ошибки O_τ , связанной с различным выбором временного шага $\Delta \tau$. График построен на основании обработки результатов численного решения задачи кубическими сплайн-функциями. Ошибка O_τ вычислена при сравнении варианта $\Delta \tau = 4$ сут с базовым. Из графика (рис. 6.2, *a*) видно, что в любом сечении конструкции ошибка O_τ с течением времени сначала увеличивается до некоторого максимального значения, а затем уменьшается. Значения максимума для различных сечений конструкции не совпадают во времени. Максимальная относительная ошибка $O_\tau^{max} = 19,6\%$ в сечении $x = 0,2$ м. При сравнении варианта $\Delta \tau = 1$ сут с базовым максимальная относительная ошибка $O_\tau^{max} = 1,2\%$.

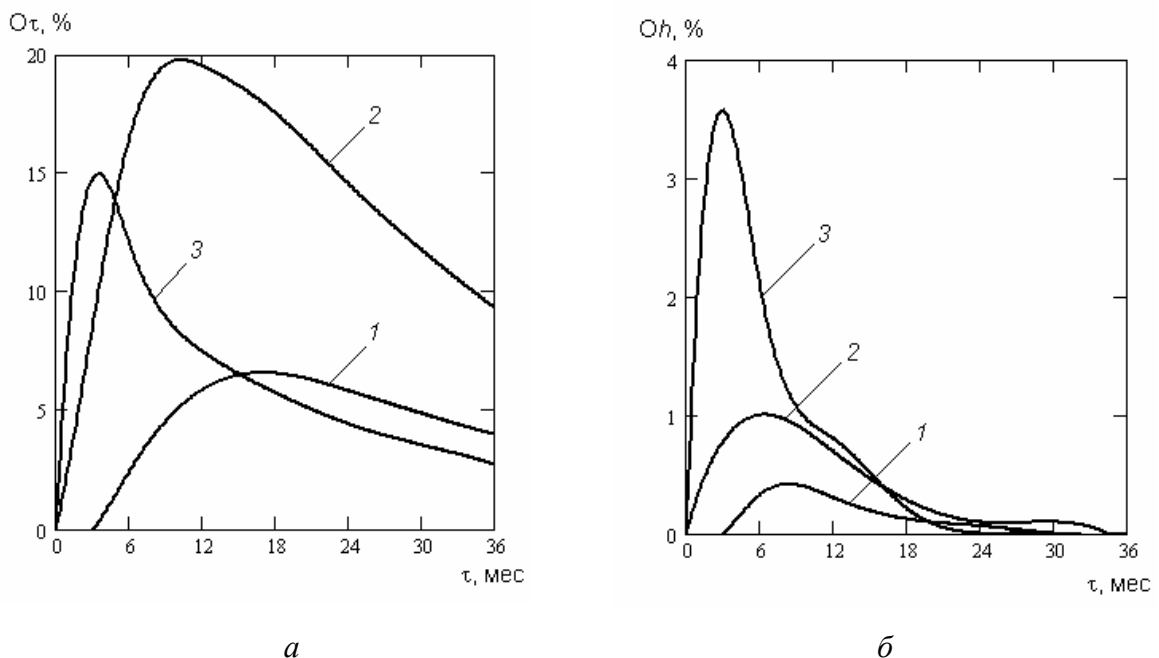


Рис. 6.2. Графики изменения ошибки O_τ (*a*) и O_h (*б*) с течением времени τ для различных координат конструкции: 1 — $x = 0,02$; 2 — $x = 0,2$; 3 — $x = 0,38$ м

На рис. 6.2, б представлен график изменения ошибки O_h , связанной с различным выбором пространственного шага Δh . Ошибка O_h вычислена при сравнении варианта $\Delta h = 0,08$ м с базовым. Из графика (рис. 6.2, б) видно, что в любом сечении конструкции ошибка O_h с течением времени сначала увеличивается до некоторого максимального значения, а затем уменьшается. Максимальная относительная ошибка $O_h^{max} = 3,6 \%$ в сечении $x = 0,38$ м. При сравнении варианта $\Delta h = 0,02$ м с базовым максимальная относительная ошибка $O_h^{max} = -0,26 \%$. Следовательно, выбор пространственного шага оказывает меньшее влияние на точность численного решения задачи, чем выбор временного шага.

Таким образом, для указанной конструкции высокую точность дают пространственная сетка с шагом $\Delta h = 0,02 \dots 0,04$ м и временная сетка с шагом $\Delta t = 1 \dots 2$ сут. Для удобства практического применения достаточно использовать пространственную сетку с шагом $\Delta h = 0,04$ м и временную сетку с шагом $\Delta t = 2$ сут.

6.2. ТЕСТИРОВАНИЕ НА РАЗЛИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ВЛАГОТЕПЛОПЕРЕНОСА

В данном тесте для проверки разработанного метода использованы результаты расчета температурно-влажностного режима, полученные другими методами — на основе математической модели [122] с использованием шкалы относительной влажности воздуха в порах строительных материалов и модели [120] с применением шкалы относительного изотермического потенциала влагопереноса [118].

Математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса на основе шкалы относительной влажности воздуха в порах материалов [122] описывается системой дифференциальных уравнений

$$C_g \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \nabla (\lambda_g \nabla \vartheta) + h_v \nabla [\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})], \quad (6.2)$$

$$C_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \nabla [D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})], \quad (6.3)$$

где C_g — объемная теплоемкость влажного строительного материала, Дж/(м³·К); ϑ — температура, °С; τ — время, с; λ_g — коэффициент теплопроводности влажного строительного материала, Вт/(м·К); h_v — удельная теплота парообразования, Дж/кг; δ_p — коэффициент паропроницаемости строительного материала, кг/(м·с·Па); φ — относительная влажность воздуха в порах материала; C_φ — объемная влагоемкость строительного материала, кг/м³; D_φ — коэффициент переноса жидкой влаги строительного материала, кг/(м·с); p_{sat} — давление насыщенного водяного пара, Па.

Краевые условия для модели (6.2) и (6.3) приведены в [122].

Связь между относительной влажностью воздуха в порах материала и влажностью материала устанавливается по обобщенной изотерме сорбции, включающей зону капиллярного насыщения [122], что позволяет моделировать процессы в широком диапазоне влажности. Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации по неявной схеме [122]. Математическая модель (6.2) и (6.3) реализована в компьютерной программе «WUFIZ» [Warme- und Feuchtetransport instationar zweidimensional], позволяющей производить расчеты двумерных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций.

В работе [122] проведено математическое моделирование экспериментально исследованного влажностного режима фрагмента кирпичной кладки.

Исследуемый фрагмент кирпичной кладки представляет собой колонку размером 110×70×490 мм, выполненную из силикатного кирпича

($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$). Три боковые поверхности колонки (две размером $110 \times 490 \text{ мм}$ и одна размером $70 \times 490 \text{ мм}$) влагоизолированы. В начале эксперимента колонка помещается в контейнер с водой, т. е. устанавливается на впитывание. В процессе эксперимента влага поступает в колонку через нижнюю торцевую поверхность ($110 \times 70 \text{ мм}$), находящуюся в контакте с водой, а испаряется через верхнюю ($110 \times 70 \text{ мм}$) и боковую ($70 \times 490 \text{ мм}$) поверхности, не имеющие влагоизоляции. Общее влагосодержание колонки в различные моменты времени определяется взвешиванием. Исследование проводится на двух одинаковых образцах колонки. Один образец спустя 72 сут разрезается на части для определения влагосодержания в различных сечениях колонки и в дальнейшем не используется. Другой образец сначала остается в контейнере с водой в течение 120 сут, затем удаляется из контейнера и помещается в воздушную среду для сушки.

Для указанного фрагмента кирпичной кладки выполнен расчет температурно-влажностного режима по компьютерной программе «СОВТ–3» применительно к процессу впитывания влаги. Параметры окружающего воздуха: $t_{int} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{int} = 50 \text{ \%}$, $\theta_{int} = 111 \text{ кДж/кг}$. Температура воды в контейнере $t_{ext} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует условию испарительного охлаждения. На поверхности колонки, соприкасающейся с водой, принято $\theta_{ext} = 660 \text{ кДж/кг}$, что соответствует свободному насыщению материала водой при $\varphi_{ext} = 99,6 \text{ \%}$ и данной температуре. Теплофизические характеристики материала колонки приняты в зависимости от абсолютного потенциала влажности и температуры. Начальные условия, соответствующие моменту погружения колонки в контейнер, приняты в соответствии с экспериментальными данными: $t_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 50 \text{ \%}$, $\theta_0 = 111 \text{ кДж/кг}$.

Для определения температурно-влажностного режима конструкции использована неравномерная пространственная сетка с шагом 0,02...0,04 м. Общее число узлов 1080. Меньший шаг сетки принят на участках колонки с ожидаемыми большими градиентами влагосодержания, т. е. на поверхностях, где происходит испарение влаги, а также в зоне контакта колонки с водой. Временной шаг принят равным 1 сут.

Анализ результатов расчета показывает, что температурный режим устанавливается в колонке спустя несколько часов с начала эксперимента. Распределение температуры в колонке близко к равномерному, поэтому влагоперенос происходит в условиях, приближенных к изотермическим. Это позволяет оценить влажностный режим рассматриваемой конструкции, не осложненный переносом тепла.

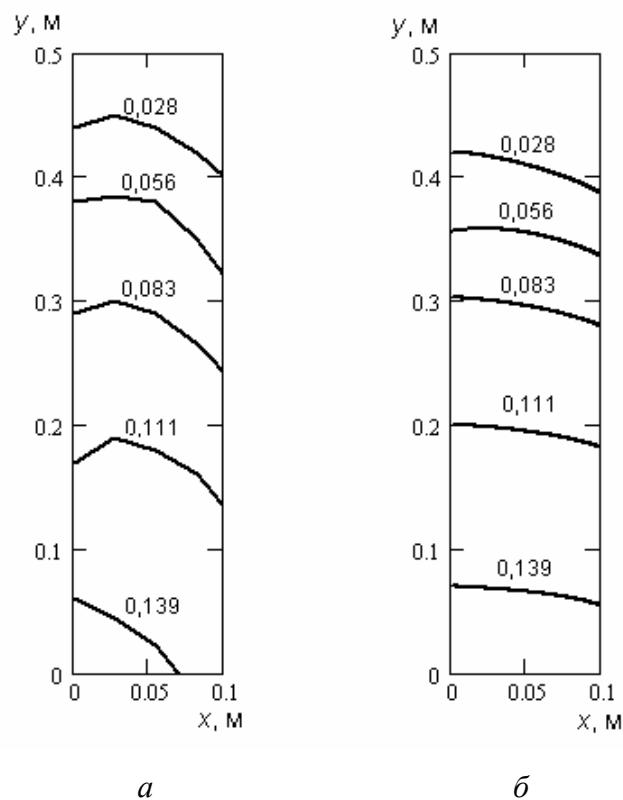


Рис. 6.3. Поля влагосодержания $w(x, y)$ в колонке, полученные расчетом:

а — по компьютерной программе «WUFIZ» [122];

б — по компьютерной программе «COBT-3»

На рис. 6.3 представлены поля влагосодержания $w(x, y)$ в вертикальном сечении колонки в момент времени $\tau = 72$ сут, построенные по результатам расчета Н.М. Künzel'я (рис. 6.3, а) и разработанной компьютерной программе (рис. 6.3, б). Поля показаны в виде линий равных влагосодержаний.

Из рисунка видно, что большая часть колонки в рассматриваемый момент времени находится в зоне сверхсорбционной влажности (для силикатного кирпича $w_{m.s} \approx 0,01$ кг/кг). Более высокие значения влагосодержания отмечаются на поверхности колонки, находящейся в контакте с водой. По мере удаления от поверхности воды влагосодержание в колонке уменьшается. Можно отметить качественное согласование результатов расчета, полученных по компьютерным программам «WUFIZ» и «СОВТ-3».

Ниже приведены результаты проверки разработанного метода на основе математической модели [120].

Математическая модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса на основе шкалы изотермического потенциала влагопереноса [118] описывается системой дифференциальных уравнений

$$C_t \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_t \nabla t), \quad (6.4)$$

$$C_\Theta \frac{\partial \Theta_o}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_\Theta \nabla \Theta_o) + \text{div}(\delta_t \nabla t) \quad (6.5)$$

с краевыми условиями [120]. Здесь C_t , C_Θ — соответственно объемная теплоемкость и влагоемкость материала; t — температура; Θ_o — относительный потенциал влагопереноса; τ — время; λ_t , λ_Θ — соответственно коэффициент теплопроводности и влагопроводности материала; δ_t — коэффициент термовлагопроводности.

Отличительной особенностью этой модели является наличие в уравнении влагопереноса (6.5) члена, учитывающего термовлагопровод-

ность. Переход от относительного потенциала влагопереноса к влагосодержанию материала осуществляется с помощью изотермы капиллярного испарения от полного водонасыщения материала [118]. Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации с использованием симметричной локально-одномерной схемы [120]. Указанная математическая модель реализована в компьютерной программе «WATEC-3» (Water & Temperature Conditions) [120], позволяющей производить расчеты трехмерных температурных и влажностных полей ограждающих конструкций.

Рассматривается фрагмент сопряжения наружных стен с междуэтажным перекрытием. Наружная стена, состоящая из внутреннего и наружного слоев кирпичной кладки толщиной по 120 мм из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе, среднего теплоизоляционного слоя толщиной 240 мм и внутренней штукатурки толщиной 20 мм, поэтажно опирается на монолитное железобетонное перекрытие толщиной 200 мм. Для снижения теплотерь через рассматриваемый фрагмент междуэтажное перекрытие имеет перфорацию с образованием дискретных железобетонных связей–шпонок. Исходные данные и результаты расчета с использованием шкалы относительного изотермического потенциала влагопереноса [118] приведены в работе [120].

Расчет по разработанному методу проведен для климатических условий Волгограда. Для численного моделирования процесса тепловлагопереноса использована неравномерная пространственная сетка с шагом 0,02...0,5 м, временной шаг 1 сут. Тепловлажностные характеристики материалов ограждающей конструкции приняты в зависимости от температуры и влажности. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию (июль).

На рис. 6.4 представлены поля температуры и влагосодержания в вертикальном сечении по оси шпонки (февраль), полученные расчетом с

использованием шкалы относительного потенциала влагопереноса [118] и на основе разработанного метода. Из рисунка видно, что полученные результаты расчетов хорошо согласуются между собой. Максимальное относительное отклонение по температуре составляет 5,94 %, по влажностному содержанию — 12,6 %.

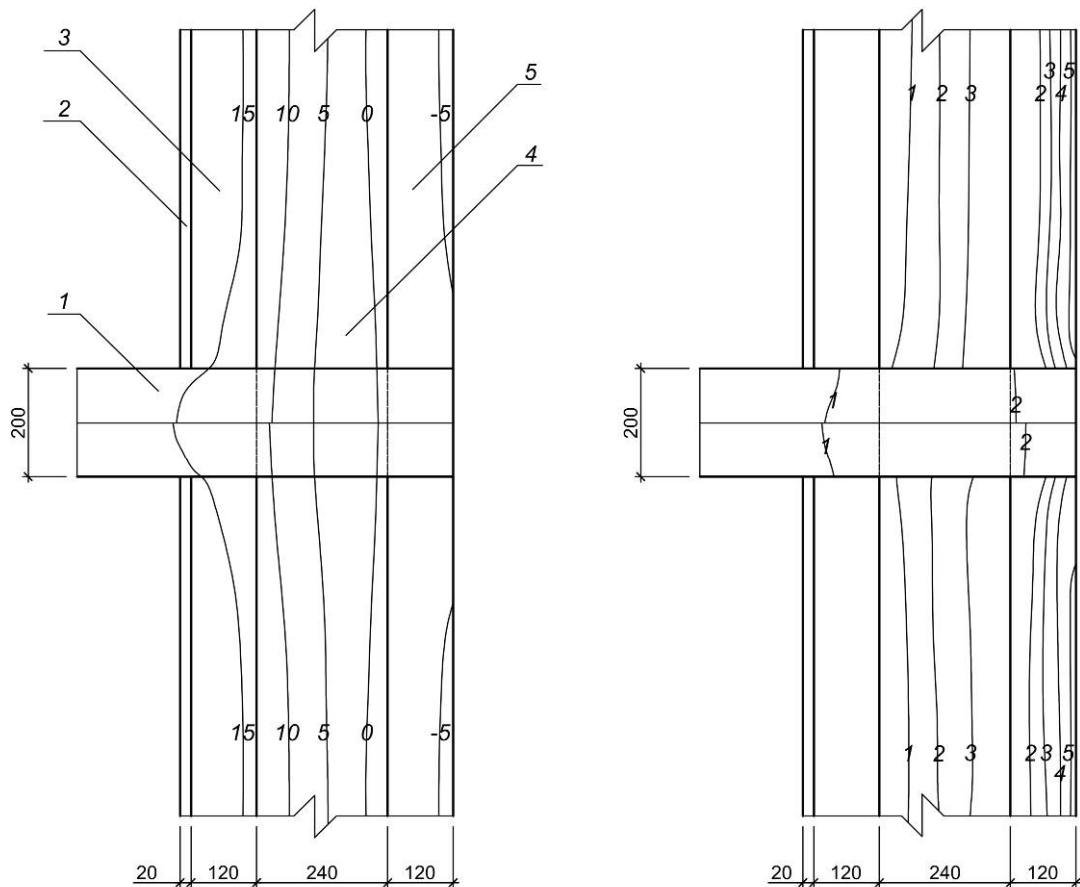


Рис. 6.4. Поля температуры (слева) и влагосодержания (справа) в вертикальном сечении по оси шпонки, полученные расчетом по компьютерной программе «WATEC-3» [120] (сверху) и компьютерной программе «COBT-3» (снизу): 1 — междуэтажное перекрытие; 2 — внутренняя штукатурка; 3 — кирпичная кладка (внутренний слой); 4 — теплоизоляция; 5 — кирпичная кладка (наружный слой)

Таким образом, проведенное тестирование разработанного метода на различных математических моделях влаготеплопереноса является дальнейшим подтверждением его достоверности.

6.3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Нижеприведенные результаты натурных исследований температурно-влажностного режима жилых зданий получены автором на основе экологически безопасного метода неразрушающего контроля и использованы для тестирования разработанного метода расчета тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях.

6.3.1. Тепловизионное обследование жилого здания

Тепловизионное обследование выполнено для 10-этажного 4-секционного жилого здания в г. Волжском Волгоградской области. Здание построено из железобетонных объемных блоков типа «колпак» с толщиной стенок 70 мм. Для утепления наружных стен объемных блоков использованы двухслойные навесные панели, состоящие из наружного защитно-отделочного слоя (керамзитобетон, $\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$) толщиной 70 мм и эффективного утеплителя толщиной 190 мм. Для крепления панели к объемному блоку по контуру панели предусмотрены ребра из керамзитобетона средней толщиной 70 мм, образующие сквозные теплопроводные включения. Проектное значение приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен с учетом теплопроводных включений $R_h^{des} = 2,92 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$, что соответствует требованиям норм по энергосбережению СНиП 23–02–2003. Заполнение световых проемов окон и балконных дверей стеклопакетами в пластиковых переплетах. Крыша здания выполнена с холодным чердаком, кровля плоская с рулонным гидроизоляционным покрытием.

Тепловизионное обследование проведено в марте 2008 года в дневное время при разности температур внутреннего и наружного воздуха

около 20 °С и режиме теплопередачи, близком к стационарному. Обследование производилось при отсутствии ветра, атмосферных осадков, тумана и задымленности. В процессе измерений обследуемые наружные поверхности стен не подвергались воздействию прямого и отраженного солнечного облучения. Тепловизионное обследование выполнено совместно с ООО «СтройПромЭкспертиза» тепловизором марки IR 928 в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора.

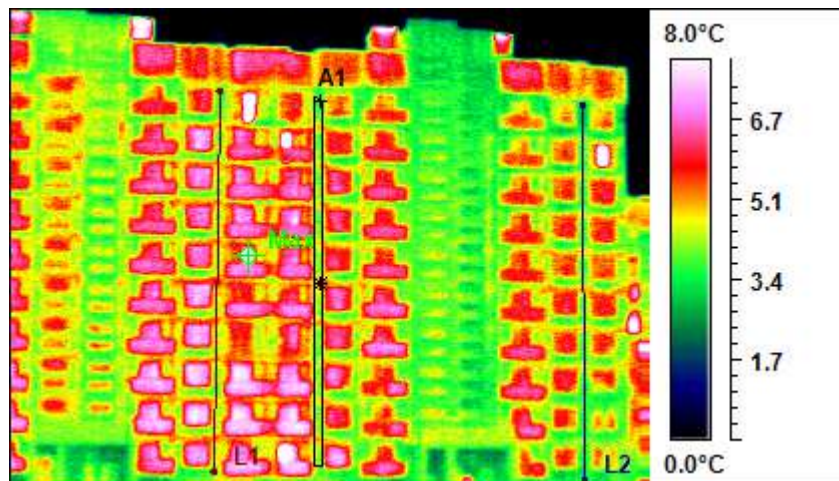
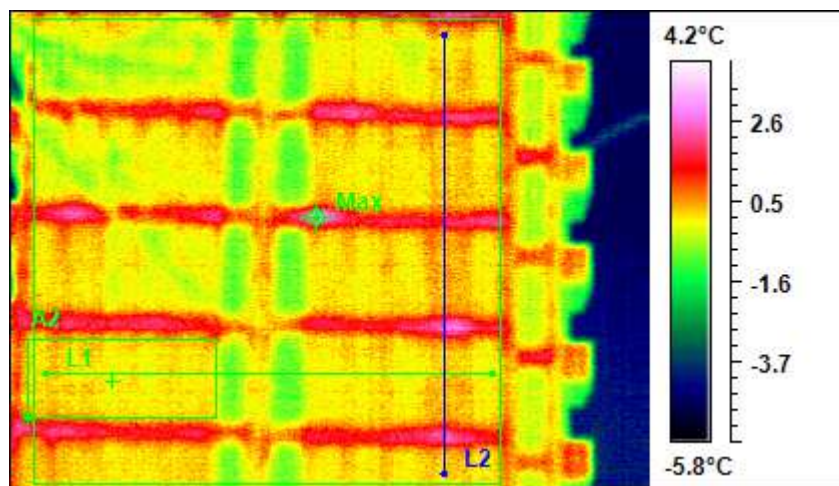
*а**б*

Рис. 6.5. Общий вид (а) и обзорная термограмма (б) фрагмента дворового фасада здания

Тепловизионные измерения выполнены по квадратам. Разбивка на квадраты произведена с захватом в обзорное поле тепловизора тепло-технически неоднородных участков ограждающих конструкций оболочки здания: вертикальных и горизонтальных стыков панелей, оконных откосов, теплопроводных включений. Внутри каждого квадрата выделены реперные (базовые) участки, т.е. зоны без температурных аномалий. На базовых участках проводят контактные измерения температуры и настраивают тепловизор.



а



б

Рис. 6.6. Общий вид (а) и детальная термограмма (б) фрагмента торцевого фасада здания

Результатом тепловизионного обследования является совокупность термограмм ограждающих конструкций, полученная термографированием, расшифровкой и расчетом термоизображений. Термограмма представляет собой температурное поле, рассчитанное с шагом $0,1 \dots 0,2$ °C по поверхности.

На рис. 6.5 представлены общий вид и обзорная термограмма фрагмента дворового фасада здания. Приведенная термограмма позволяет выявить участки, в которых нарушается однородность температурного поля: в зонах окон и балконных дверей, на стыках панелей наружных стен, в ограждениях цокольного этажа и чердака.

На рис. 6.6 представлены общий вид и детальная термограмма фрагмента торцевого фасада здания, включающего стыки панелей наружных стен. Представленная термограмма конкретизирует температурное поле для указанного фрагмента. Как видно по термограмме, в зоне горизонтальных стыков панелей нарушается однородность температурного поля. Максимальная температура наружной поверхности в указанной краевой зоне $2,6$ °C, что выше температуры по глади стены.

Результаты тепловизионного обследования использованы для тестирования разработанного метода. Расчет нестационарного температурно-влажностного режима выполнен по компьютерной программе «СОВТ–3» для наиболее опасной краевой зоны — горизонтального стыка панелей наружных стен. Начальные условия, соответствующие моменту ввода здания в эксплуатацию, приняты на начало отопительного периода.

На рис. 6.7 представлено температурное поле, полученное расчетом спустя 135 суток с момента ввода конструкции в эксплуатацию. Из рисунка видно, что в зоне стыка панелей отмечается локализация температуры. Вдали от стыка панелей изотермы проходят параллельно поверхностям стены. По мере приближения к стыку изотермы изгибаются к

внутренней и наружной поверхностям стены, что указывает на более интенсивный тепловой поток по керамзитобетонным ребрам панелей.

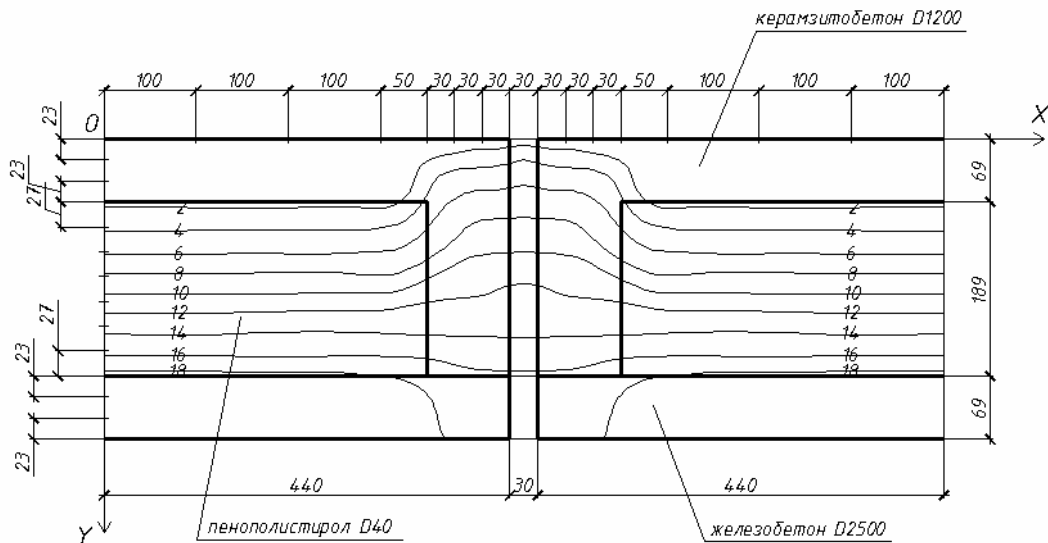


Рис. 6.7. Температурное поле $t(x, y)$ в зоне горизонтального стыка панелей наружных стен

На рис. 6.8 представлен профиль температуры $t(x)$ на наружной поверхности стены в зоне горизонтального стыка панелей. Начало координатной оси совпадает с осью стыка.

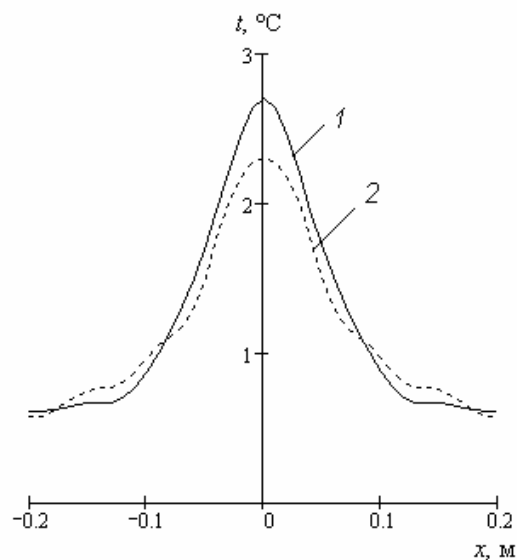


Рис. 6.8. Профиль температуры $t(x)$ на наружной поверхности стены в зоне горизонтального стыка панелей: 1 — расчет по компьютерной программе; 2 — результаты измерений по данным тепловизионного обследования

Из рисунка видно, что в зоне стыка отмечается локальное повышение температуры. Максимальная температура в зоне стыка по результатам расчета 2,6 °С, по данным измерений 2,3 °С при средней температуре по глади стены 0,6 °С.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных показывает их хорошее согласование. Максимальное отклонение рассчитанного значения температуры от измеренного равно 13,1 % в сечении $x = 0$.

6.3.2. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания

Объектом натурного обследования является 5-этажный 90-квартирный жилой дом в г. Волжском Волгоградской области. Дом был введен в эксплуатацию после реконструкции, проведенной в 2009 году. Конструктивная система здания объемно-блочная, с применением объемных блоков типа «колпак». Стены объемных блоков выполнены из тяжелого бетона плотностью 1800 кг/м³ толщиной 70 мм с навесными панелями наружных стен из керамзитобетона плотностью 900 кг/м³ толщиной 250 мм. При реконструкции была применена система дополнительной теплоизоляции наружных стен с вентилируемым фасадом. Заполнение проемов наружных стен выполнено оконными блоками из однокамерных стеклопакетов в ПВХ профилях. Система отопления централизованная однотрубная с нижней разводкой подающей и обратной магистралей. Система вентиляции приточно-вытяжная канальная с естественным притоком воздуха через автономные стеновые воздушные клапаны и удалением воздуха через вытяжные вентиляционные каналы.

Натурные исследования температурно-влажностного режима указанного здания проведены в феврале 2011 года. Число обследованных квартир — 15. Все измерения выполнены методом неразрушающего

контроля с применением современных цифровых измерительных приборов. Измерения температуры внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций выполнены с помощью цифрового контактного термометра ТК–5.05 со сменным зондом ЗПИ 150 (зав. № 429387/429387). Влагосодержание внутреннего поверхностного слоя ограждающих конструкций измерено диэлькометрическим методом по ГОСТ 21718–84 электронным измерителем влажности «Влагомер МГ 4Б» с погрешностью $\pm 0,8$ % (в диапазоне 1...10 %). Измерения температуры и относительной влажности воздуха помещений выполнены с помощью термогигрометра Testo 610 (зав. № 39214931/912). Все измерения выполнены при закрытых окнах и вентиляционных клапанах наружных стен приборами, прошедшими регистрацию и имеющими сертификат.

На момент проведения обследования средняя температура воздуха внутри здания составляла 20,9 °С, средняя температура наружного воздуха равна –15,2 °С.

В ходе проведенного инструментально-визуального обследования выявлены многочисленные участки ограждающих конструкций с образованием плесени (температура ниже точки росы). На рис. 6.9 показано образование плесневелого грибка на внутренней поверхности сопряжения внутренних и наружных стен в жилой комнате. Существуют также участки ограждающих конструкций с температурой на внутренней поверхности ниже 0 °С. При понижении температуры наружного воздуха до расчетной (–25 °С) на этих участках образуется лед. Пересчет температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций, полученной в результате измерений, на расчетные температурные условия производился по методике ГОСТ 26254–84.



Рис. 6.9. Образование плесени на внутренней поверхности сопряжения внутренних и наружных стен в жилой комнате

Результаты инструментально-визуального обследования указанного жилого здания приведены в табл. 6.3.

На основе данных табл. 6.3 построены диаграммы соответствия температурно-влажностного режима помещений и ограждающих конструкций различным условиям комфорта (рис. 6.10).

На рис. 6.10, *а* обозначены зоны комфорта помещений (по данным [187]): *А* — комфортные условия обеспечены; *В* — допустимые условия обеспечены; *С* — допустимые условия не обеспечены. Анализируя температурно-влажностный режим помещений, можно отметить, что 61 % обследованной площади помещений отвечают допустимым и комфортным условиям, 39 % не отвечают допустимым условиям, что связано с пониженной относительной влажностью воздуха в этих помещениях.

На рис. 6.10, *б* обозначены зоны температурно-влажностного режима ограждений: *А* — образование сырости; *В* — образование льда; *С* — отсутствие сырости. Из рис. 6.10, *б* видно, что только 56 % обследованных

участков ограждающих конструкций отвечают требованиям по теплозащите (температура внутренней поверхности выше точки росы). На остальных участках при расчетных условиях возможно образование конденсата (35 %) и льда (9 %).

Таблица 6.3

Результаты инструментально-визуального обследования жилого здания

Наименование показателя	Значение показателя
Число обследованных квартир	15
Площадь обследованных помещений, м ² , в том числе по зонам:	431
комфортные условия обеспечены	57
допустимые условия обеспечены	207
допустимые условия не обеспечены	167
Минимальная температура воздуха в жилой комнате, °С	15,5
Максимальная относительная влажность воздуха в жилой комнате, %	40,4
Число комнат с температурой ниже 18 °С	3
Число комнат с относительной влажностью воздуха более 60 %	нет
Число обследованных участков ограждающих конструкций	66
Число участков ограждающих конструкций с температурой внутренней поверхности ниже точки росы, в том числе:	23
по «глади» наружной стены	1
в углах наружных стен	1
в сопряжениях внутренних стен с наружными	11
в зонах перемычек	2
в ризалитных участках	7
на оконных откосах	1
пол 1-го этажа	нет
потолок 5-го этажа	нет
Число участков ограждающих конструкций с температурой внутренней поверхности ниже 0 °С, в том числе:	6
в сопряжениях внутренних стен с наружными	3
в ризалитных участках	3

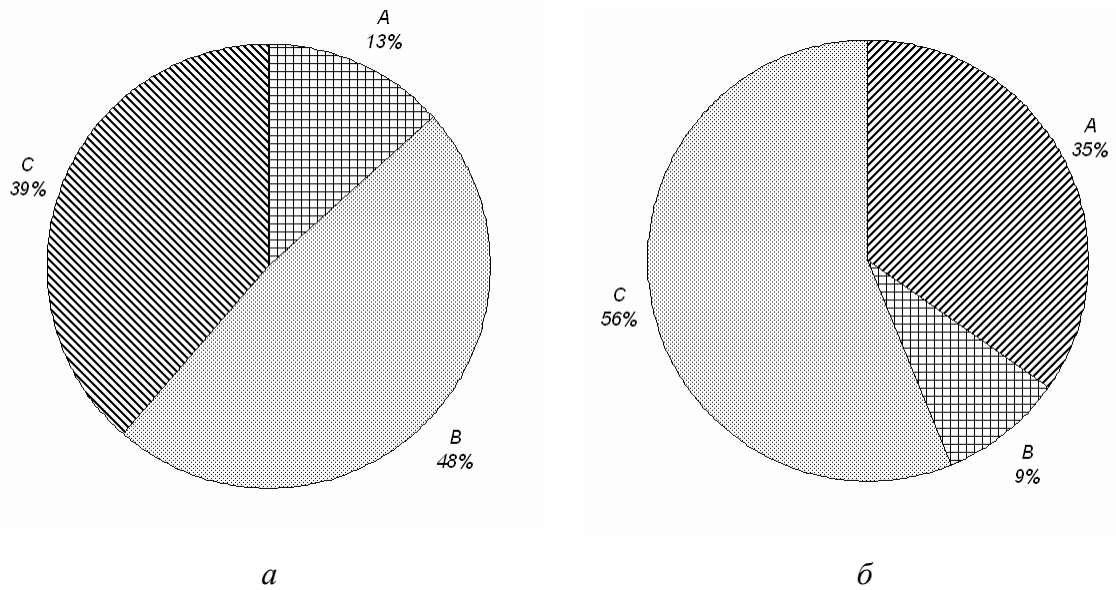


Рис. 6.10. Температурно-влажностный режим помещений (а) и ограждений (б)

Таким образом, по результатам проведенного обследования многоквартирного жилого дома сделан вывод о том, что **безопасные условия для проживания в нем не обеспечены** в соответствии с Федеральным законом № 384-ФЗ.

Главная причина неудовлетворительного температурно-влажностного режима ограждающих конструкций заключается в том, что в процессе строительства и реконструкции указанного здания не была обеспечена равноэффективность теплозащитных свойств оболочки здания. Как показали результаты предварительного тепловизионного обследования, на многих участках оболочки здания нарушена непрерывность слоя дополнительной теплоизоляции. Другой причиной является отсутствие заделки стыков межпанельных швов, что существенно увеличивает теплопотери за счет инфильтрации наружного воздуха через стены.

Используем полученные результаты натурных исследований для верификации разработанного автором метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций.

Выполним расчет температурно-влажностного режима фрагмента теплозащитной оболочки здания — узла сопряжения внутренней и наружной стен (рис. 6.11).

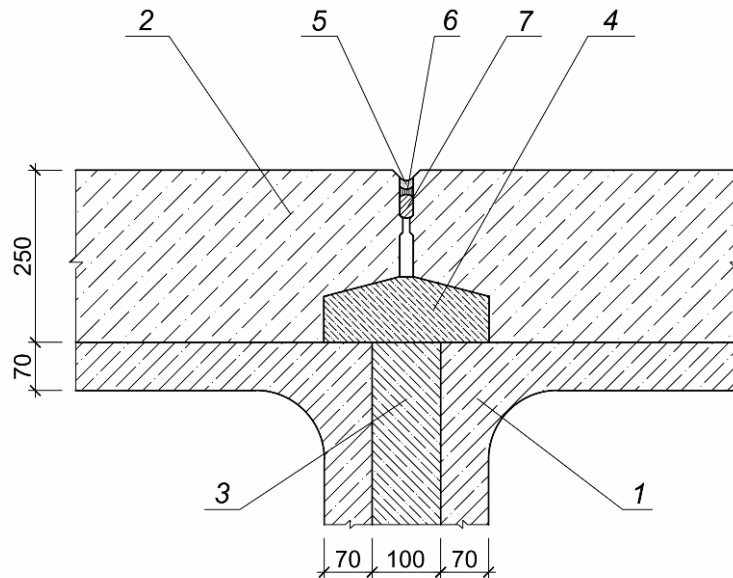


Рис. 6.11. Схема проектного решения сопряжения внутренних и наружных стен (система дополнительного утепления наружных стен с вентилируемым фасадом не показана): 1 — железобетонная конструкция объемного блока; 2 — навесная панель из керамзитобетона; 3 — железобетонная шпонка; 4 — заделка межпанельного шва керамзитобетоном; 5 — защитное покрытие; 6 — герметизирующая мастика; 7 — уплотняющая прокладка

Расчет выполнен по компьютерной программе «СОВТ-3» при указанных ниже исходных данных.

Теплофизические характеристики материалов указанного фрагмента рассчитаны по методике (см. главы диссертации 2 и 3) на основе данных проектной документации.

Параметры микроклимата приняты согласно п. 9.3 СП 54.13330.2011: температура внутреннего воздуха $t_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха $\phi_{int} = 50\text{ }\%$. Параметры наружного климата рассчитаны по данным ближайшей метеостанции (табл. 6.4).

Таблица 6.4

**Среднемесячные значения температуры t_{ext} и относительной влажности ϕ_{ext}
наружного воздуха**

Месяц	$t_{ext}, ^\circ\text{C}$	$\phi_{ext}, \%$	Месяц	$t_{ext}, ^\circ\text{C}$	$\phi_{ext}, \%$
I	-7,5	86	VII	28,3	36
II	-12,3	82	VIII	27,9	29
III	-1,0	82	IX	19,3	51
IV	8,8	64	X	6,4	71
V	18,0	65	XI	6,6	86
VI	25,1	38	XII	0,7	92

При численном моделировании использована неравномерная пространственная сетка с шагом от 0,03 до 0,3 м и числом узлов 1600. Временной шаг 2 сут.

Граничные условия тепловлагообмена поверхностей ограждающих конструкций с окружающей средой заданы в соответствии с положениями главы 3 диссертации.

Начальные условия приняты на сентябрь 2010 г., что соответствует началу периода влагонакопления. Расчет выполнен до момента проведения натурного обследования (февраль 2011 г.).

Таблица 6.5

**Температурно-влажностный режим узла сопряжения
внутренней и наружной стен (в углу)**

Время, сут	Температура, $^\circ\text{C}$	Влагосодержание, кг/кг
0	20	0,033
30	17,83	0,033
60	17,61	0,033
90	16,64	0,035
120	14,89	0,039
150	12,60	0,046

Результаты расчета температурно-влажностного режима рассматриваемого фрагмента приведены в табл. 6.5. В данной таблице время указано в сутках от начала расчета.

Из табл. 6.5 видно, что температура в углу с течением времени понижается, что связано с понижением температуры наружного воздуха. Влагосодержание в той же точке постепенно увеличивается, что свидетельствует о накоплении влаги в углу.

Согласно полученным экспериментальным данным температура и влагосодержание в углу сопряжения внутренней и наружной стен соответственно равны 13,4 °С и 0,042 кг/кг. Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры и влагосодержания показывает их хорошее согласование: отклонение по температуре составляет –5,97 %, по влагосодержанию 9,52 %.

Проведенная верификация разработанного метода расчета влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях на результатах натурных исследований температурно-влажностного режима жилого здания подтверждает его достоверность, что позволяет использовать этот метод в проектной практике.

6.3.3. Натурные измерения параметров микроклимата помещений

Объектом натурального обследования является 3-комнатная квартира, расположенная на 4-м этаже 5-этажного жилого дома в г. Волжском Волгоградской области. Площадь жилых помещений принята по проекту: 1 — 9,2 м²; 2 — 15,6 м²; 3 — 13,4 м². Конструктивная система здания объемно-блочная, с применением объемных блоков типа «колпак». Стены объемных блоков выполнены из тяжелого бетона плотностью 1800 кг/м³ толщиной 70 мм с навесными панелями наружных стен из керамзитобетона плотностью 900 кг/м³ толщиной 210 мм, с эффективным утеплите-

лем и наружной облицовкой из металлосайдинга. Заполнение проемов наружных стен выполнено оконными блоками из однокамерных стеклопакетов в ПВХ профилях. Система отопления централизованная однотрубная, с нижней разводкой подающей и обратной магистралей. В качестве отопительных приборов использованы чугунные радиаторы типа МС–140×108 с ручным регулированием расхода теплоносителя. Система вентиляции приточно-вытяжная канальная, с естественным регулируемым притоком воздуха через вентиляционные клапаны в наружных стенах и удалением воздуха через вытяжные каналы. Проектные параметры систем отопления и вентиляции обеспечивают выполнение санитарно-эпидемиологических требований согласно СП 54.13330.2011 (п. 9) в указанной квартире.

Натурные измерения параметров микроклимата жилых помещений проведены в холодный период года с 10.12.2011 по 17.12.2011 в дневное время суток при пасмурной погоде. Продолжительность натурного обследования соответствует требованию ГОСТ 26254–84 по тепловой инерции наружных стен здания. Параметры наружного климата приняты усредненными за время измерений по данным ближайшей метеостанции:

температура воздуха — минус 4,7 °С;

относительная влажность воздуха — 96 %;

скорость ветра — 4 м/с;

облачность — 9 баллов.

Натурные измерения параметров микроклимата помещений выполнены методом неразрушающего контроля с применением современных цифровых измерительных приборов. Температура и относительная влажность воздуха измерены цифровым термогигрометром «Testo 610» с погрешностью: по температуре $\pm 0,5$ °С, по относительной влажности $\pm 2,5$ %. Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций и отопительных приборов измерена цифровым поверхностным тер-

мометром «Testo 905–Т2» с погрешностью $\pm 1,0$ °С. Для измерения скорости движения воздуха использован цифровой термоанемометр «Testo 405» с погрешностью $\pm(0,1 \text{ м/с} + 5 \% \text{ от измеренного значения})$. Влажность внутреннего поверхностного слоя наружных стен измерено диэлектрическим методом по ГОСТ 21718–84 электронным измерителем влажности «Влагомер МГ 4Б» с погрешностью $\pm 0,8 \%$ (в диапазоне 1...10 %). Все измерения выполнены при закрытых окнах и вентиляционных клапанах наружных стен приборами, прошедшими регистрацию и имеющими сертификат.

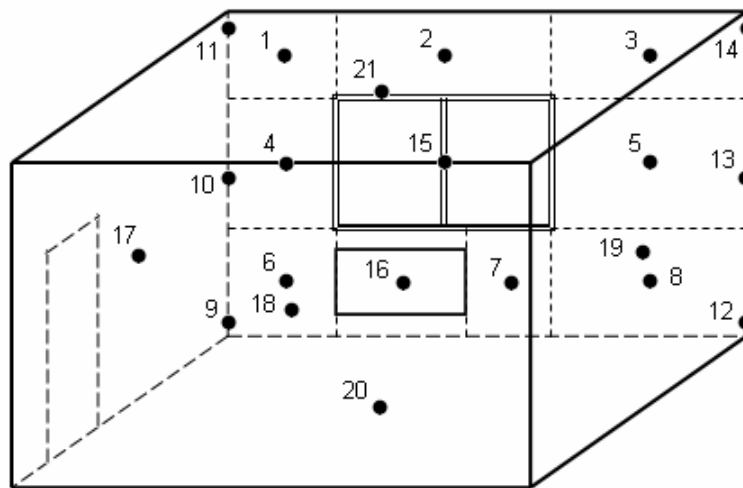


Рис. 6.12. Схема замеров температуры и влагосодержания (стояки отопления условно не показаны)

Измерения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха выполнены в центре жилых помещений, на высоте 1,1...1,5 м от пола. Результирующая температура определена по температуре воздуха в помещении и радиационной температуре согласно ГОСТ 30494–96. Площадь внутренней поверхности ограждающих конструкций и отопительных приборов определена по проекту. Температура поверхностей измерялась в соответствии со схемой (рис. 6.12):

на внутренней поверхности наружной стены — в центре участков, образованных линиями, продолжающими грани откосов светопроема (точки 1–8), и в зоне сопряжений наружной стены с внутренними стенами (точки 9–14);

в центре остекления (точка 15);

в центре отопительного прибора (точка 16);

в центре внутренних стен и перегородок (точки 17–19);

в центре пола (точка 20) и потолка (точка 21).

Таблица 6.6

Результаты измерений температуры и влагосодержания

Ограждающая конструкция, отопительный прибор	Номер точки	Площадь A_i , м ² , температура t_i , °C, внутренней поверхности ограждений и отопительных приборов и влагосодержание w_i , % М, внутреннего поверхностного слоя наружной стены для жилых помещений								
		1			2			3		
		A_i	t_i	w_i	A_i	t_i	w_i	A_i	t_i	w_i
Наружная стена	1	0,185	22,5	1,3	0,135	21,4	1,6	0,2	23,9	1
	2	0,313	21	1,8	0,438	21,4	1,9	0,313	21,2	1,6
	3	0,275	20,6	1,8	0,2	22,4	1,4	0,26	21	2
	4	1,07	22,5	1,4	0,783	21,9	1,4	1,16	23,8	1,2
	5	1,6	21,2	1,4	1,16	23,2	1,3	1,51	22,1	1,3
	6	0,555	21,4	1,6	0,405	21	1,5	0,6	24,1	1,6
	7	0,638	21,8	1,4	1,01	21,6	1,2	0,638	22,4	1,2
	8	0,825	21,1	1,6	0,6	23,7	1,2	0,78	21,8	1,3
	9		20,8			20,3			21,4	
	10		22,1			21,4			23,5	
	11		22,2			21			23,2	
	12		17,9			20,8			19,1	
	13		20			22,6			21,7	
	14		19,8			21,6			19,9	

Продолжение табл. 6.6

Окно	15	1,81	16,5		2,54	16,9		1,81	15,7	
Отопитель- ный прибор	16	0,3	41,5		0,3	42,3		0,3	44,5	
Внутренняя стена	17	7,3	23		12,3	24,2		10,6	24,6	
	18	7,57	24		7,57	24,1		7,57	24,5	
	19	7,3	24		12,3	24		10,6	24,8	
Пол	20	9,2	23,8		15,6	24,5		13,4	24,3	
Потолок	21	9,2	23,9		15,6	24,5		13,4	23,7	

Влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружной стены измерялось в соответствии со схемой рис. 6.12 в точках 1–8.

Результаты измерений указанных параметров приведены в табл. 6.6.

Анализ полученных результатов измерений (табл. 6.6) показывает, что по мере приближения к краевым зонам температура на внутренней поверхности наружных стен снижается по сравнению с гладью ограждений. Минимальная температура на внутренней поверхности стены наблюдается в краевых зонах сопряжений наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями: в помещении 1 — 17,9 °С (точка 12); в помещении 2 — 20,3 °С (точка 9); в помещении 3 — 19,1 °С (точка 12). В зоне размещения отопительных приборов и стояков отопления температура повышается по сравнению с гладью стены. Максимальная температура на внутренней поверхности стены отмечается в зоне размещения стояков отопления: в помещении 1 — 22,5 °С (точки 1, 4); в помещении 2 — 23,7 °С (точка 8); в помещении 3 — 24,1 °С (точка 6). Температура на внутренней поверхности остекления меняется от 15,7 °С (в помещении 3) до 16,9 °С (в помещении 2). Температура на внутренней поверхности отопительного прибора меняется от 41,5 °С (в помещении 1) до 44,5 °С (в помещении 3). Температура на поверхности внутренних стен, пола и потолка близка к температуре воздуха в помещениях.

Таблица 6.7.

**Сравнение измеренных и нормируемых параметров микроклимата
жилых помещений**

Параметр	Фактические значения параметра для жилого помещения			Нормируемые значения параметра
	1	2	3	
1. Температура воздуха, °С	23,7	24,7	24,9	20...22 (18...24)
2. Результирующая температура, °С	23,5	24,3	24,5	19...20 (17...23)
3. Относительная влажность, %	45,8	43,6	39,8	30...45 (не более 60)
4. Скорость движения воздуха, м/с	0,01	0,03	0,04	не более 0,15 (не более 0,2)
5. Приведенный температурный перепад, °С, между температурами внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружной стены	3,46	3,74	3,44	не более 4,0
6. Приведенная минимальная температура наружной стены в краевой зоне, °С	10,8	13,3	11,2	не ниже 9,28
7. Приведенная температура внутренней поверхности окна (в зоне остекления), °С	8,55	8,06	6,01	не ниже 3,0

Примечания:

1. Параметры 5–7 приведены к расчетным условиям согласно ГОСТ 26254–84.
2. В скобках приведены допустимые нормы микроклимата.

Минимальное влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружной стены наблюдается в зоне прохождения стояков отопления: в помещении 1 — 1,3 % (точка 1); в помещении 2 — 1,2 % (точки 7, 8); в помещении 3 — 1 % (точка 1), что полностью согласуется с физикой процесса совместного тепловлагоденоса. Максимальное влагосодержание

отмечается в краевой зоне сопряжения наружной стены с междуэтажным перекрытием (рис. 6.12). Среднее влагосодержание внутреннего поверхностного слоя наружных стен соответствует условиям эксплуатации, принятым в проектной документации.

Результаты сравнения измеренных (фактических) и нормируемых параметров микроклимата жилых помещений приведены в табл. 6.7.

Из табл. 6.7 видно, что параметры микроклимата в жилых комнатах отвечают оптимальным нормам по скорости движения воздуха, а также оптимальным (помещения 2, 3) и допустимым (помещение 1) нормам по относительной влажности воздуха. Вместе с тем следует отметить, что в ряде жилых комнат температура воздуха и результирующая температура выше допустимых значений, что указывает на перегрев. Обеспечение в жилых помещениях температуры воздуха в пределах оптимальных параметров может быть достигнуто за счет регулирования расхода теплоносителя в системе отопления, а также с помощью имеющихся в квартире автономных стеновых воздушных клапанов с регулируемым открыванием. Наружные ограждающие конструкции жилых комнат отвечают требованиям тепловой защиты согласно СНиП 23–02–2003 в части санитарно-гигиенического показателя. Таким образом, в процессе эксплуатации указанной квартиры **обеспечены безопасные условия для проживания** в соответствии с Федеральным законом № 384–ФЗ.

Используем полученные результаты натурных измерений для тестирования метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций.

Выполним расчет температурно-влажностного режима фрагмента теплозащитной оболочки здания — узла сопряжения наружной стены с внутренней. Расчет выполнен по компьютерной программе «СОВТ–3» при фактических параметрах микроклимата помещений и наружного климата. Теплофизические характеристики материалов ограждающих

конструкций рассчитаны по методике глав 2 и 3 диссертации на основе данных проектной документации. Граничные условия тепловлагообмена поверхностей ограждающих конструкций с окружающей средой приняты в соответствии с главой 3. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию.

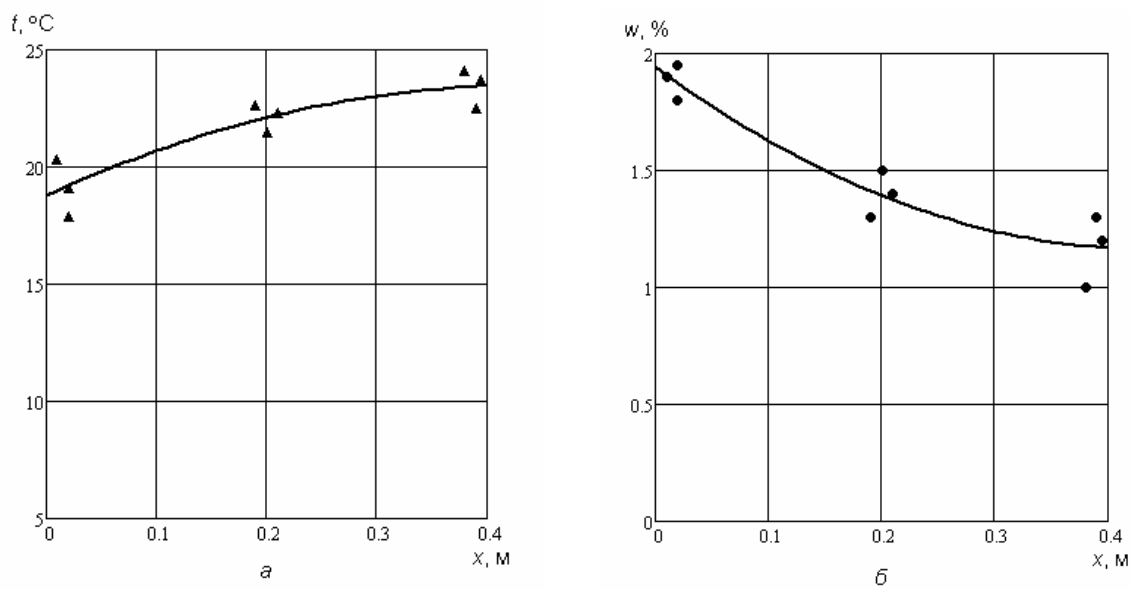


Рис. 6.13. Графики распределения температуры (а) и влагосодержания (б) по внутренней поверхности узла сопряжения наружной стены с внутренней

Результаты расчета температурно-влажностного режима рассматриваемого фрагмента теплозащитной оболочки здания приведены на рис. 6.13 в виде графиков распределения температуры (рис. 6.13, а) и влагосодержания (рис. 6.13, б) по внутренней поверхности краевой зоны, полученных путем обработки данных интерполяцией кубическими сплайнами (сплошные линии). На том же рисунке маркерами показаны результаты натурных измерений. Координатная ось направлена от стыка наружной стены с внутренней к глади наружной стены вдоль внутренней поверхности конструкции. Согласно расчету минимальная температура (18,8 $^\circ\text{C}$) отмечается на стыке ограждений (рис. 6.13, а). По мере удаления от стыка температура повышается, достигая 23,5 $^\circ\text{C}$ по глади

наружной стены. Максимальное влагосодержание (1,9 %) отмечается также на стыке ограждений (рис. 6.13, б). По мере удаления от стыка влагосодержание уменьшается до 1,2 % по глади наружной стены.

Сравнение результатов расчета, полученных по компьютерной программе, с данными натурных измерений показывает их хорошее согласование. Максимальная относительная ошибка функций температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$ на данных узлах составляет соответственно 6,9 и 15 %.

Проведенное тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений подтверждает достоверность метода.

6.3.4. Оценка теплозащиты ограждающих конструкций жилого здания

Объектом натурального обследования является 2-комнатная квартира, расположенная на 1-м этаже 5-этажного эксплуатируемого жилого дома в г. Волжском Волгоградской области. Конструктивная система здания объемно-блочная, с применением объемных блоков типа «колпак». Стены объемных блоков выполнены из тяжелого бетона плотностью 1800 кг/м^3 толщиной 70 мм с навесными панелями наружных стен из керамзитобетона плотностью 900 кг/м^3 толщиной 250 мм. Для повышения теплозащитных качеств наружных стен в 2009 г. произведена реконструкция здания, в результате которой выполнена система с навесным вентилируемым фасадом. Заполнение проемов наружных стен выполнено оконными блоками из однокамерных стеклопакетов в ПВХ профилях. Система отопления централизованная однетрубная, с нижней разводкой подающей и обратной магистралей и ручным регулированием расхода теплоносителя на отопительных приборах. Система вентиляции приточно-вытяжная ка-

нальная, с естественным регулируемым притоком воздуха через вентиляционные клапаны в наружных стенах и удалением воздуха через вытяжные каналы. Проектные параметры систем отопления и вентиляции обеспечивают выполнение санитарно-эпидемиологических требований согласно СП 54.13330.2011 (п. 9) в указанной квартире.

Натурные измерения проведены автором в холодный период года с 24.01.2012 по 27.01.2012 в жилой комнате указанной квартиры. Наружная стена сориентирована на северо-восток, что исключает инсоляцию помещения во время обследования. Продолжительность натурного обследования соответствует требованию ГОСТ 26254–84 по тепловой инерции наружных стен здания. Испытания в натуральных условиях проведены в период, когда разность среднесуточных температур внутреннего и наружного воздуха обеспечивает получение результата с необходимой точностью. Анализ фактических данных, взятых с ближайшей метеостанции, показал, что в предшествующие 3 суток перед началом измерений температура наружного воздуха стабильна (отклонение среднесуточной температуры от средней температуры за указанный период не превышает 1,5 °С). В ходе проведения измерений стабильность температуры наружного воздуха сохранялась и в последующие сутки. Внутри здания температура воздуха практически постоянна, что обусловлено режимом эксплуатации. Таким образом, в целом режим теплопередачи через рассматриваемые ограждения можно считать близким к установившемуся.

Натурные измерения параметров теплозащиты ограждающих конструкций выполнены методом неразрушающего контроля с применением современных цифровых измерительных приборов. Измерение и регистрация плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции, и температур выполнены многоканальным прибором ИТП–МГ4.03–10 «Поток» (зав. № 559, вып. 12.2010). Регистрация теп-

ловых потоков и температур выполнялась в автоматическом режиме с интервалом 5 минут. Для оперативного измерения параметров микроклимата помещения использован электронный контактный термометр ТК 5–06 с комплектом зондов и цифровой термоанемометр Testo 405. Все измерения выполнены при закрытых окнах и вентиляционных клапанах наружных стен приборами, прошедшими регистрацию и имеющими сертификат.

Для измерений выбраны фрагменты ограждающих конструкций в зоне указанной квартиры, характерные для всей теплозащитной оболочки здания. Предварительно методом термографирования внутренней поверхности ограждающих конструкций согласно ГОСТ 26254–84 определены термически однородные зоны. Датчики температуры и теплового потока установлены на внутренней поверхности ограждающих конструкций на высоте около 1,2 м от уровня пола: по глади стены (на расстоянии 0,48 м от вершины угла), в зоне угла (на расстоянии 0,255 м), в центре стеклопакета оконного блока. Для измерения температуры внутреннего и наружного воздуха датчики температуры установлены на той же высоте на расстоянии 100 мм от внутренней и наружной поверхностей стены. Измерения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха выполнены оперативно в центре жилой комнаты, на высоте 1,1...1,5 м от пола. Результирующая температура помещения определена по температуре шарового термометра согласно ГОСТ 30494–96.

Результаты мониторинга температуры и плотности теплового потока представлены в виде графиков на рис. 6.14 и 6.15. Графики зависимости температуры от времени (рис. 6.14) показаны в порядке убывания температуры: внутренний воздух, по глади стены, в зоне угла, в центре стеклопакета, наружный воздух. Графики зависимости плотности тепло-

вого потока от времени (рис. 6.15) показаны в порядке возрастания теплового потока: по глади стены, в зоне угла, в центре стеклопакета.

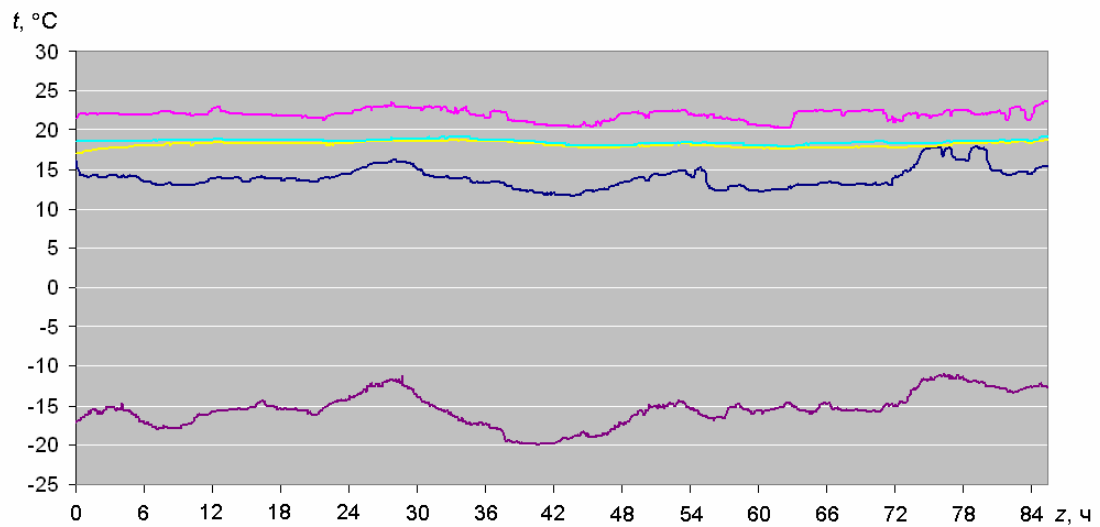


Рис. 6.14. Графики зависимости температуры от времени

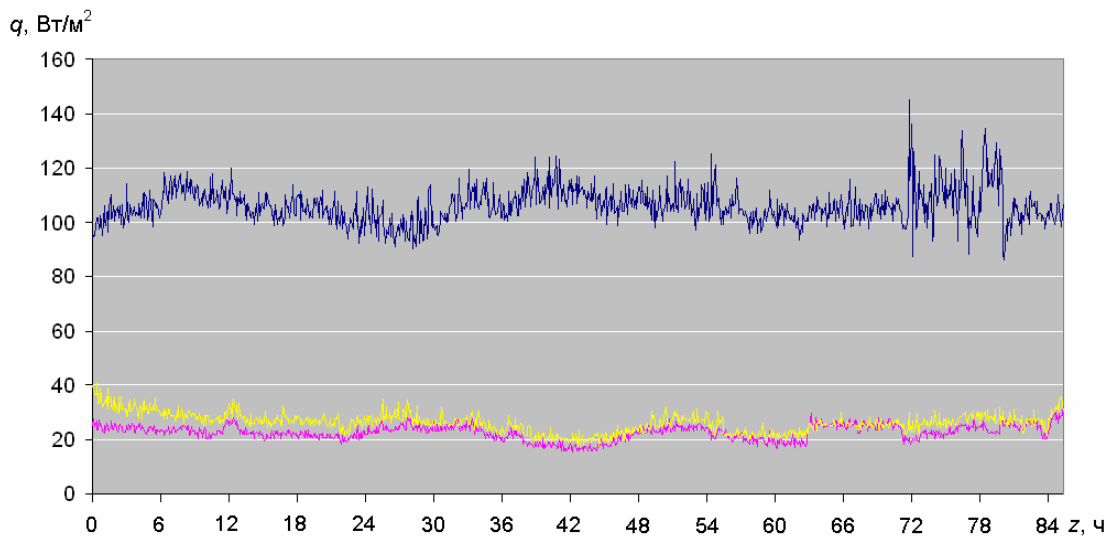


Рис. 6.15. Графики зависимости поверхностной плотности теплового потока от времени

Анализ полученных результатов измерений показывает, что изменение температуры внутреннего воздуха незначительно: минимальная температура 20,2 °С, максимальная — 23,6 °С, средняя — 21,9 °С. Температура наружного воздуха изменяется от -20 °С до -11 °С при сред-

нем значении $-15,5$ °С. Минимальная температура на внутренней поверхности стены отмечалась 26.01.2012 в утренние часы: по глади — $17,9$ °С, в краевой зоне — $17,0$ °С. По мере приближения к углу температура понижается, а плотность теплового потока увеличивается. Минимальная температура на внутренней поверхности стеклопакета равна $11,6$ °С. Плотность теплового потока, проходящего через стеклопакет, значительно выше, чем через наружную стену.

На основе применения вероятностно-статистических методов выполнена обработка результатов измерений, которая включает в себя расшифровку информации с регистраторов температуры и тепловых потоков и определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Расчет сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в указанных точках установки датчиков выполнен по результатам измерения температуры и плотности теплового потока для i -го измерения по формуле:

$$R_{hi} = \frac{t_i^{int} - t_i^{ext}}{q_{hi}}, \quad (6.6)$$

где t_i^{int} , t_i^{ext} — значения температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха; q_{hi} — значение плотности теплового потока на внутренней поверхности ограждений.

За истинное значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в указанных точках принято выборочное среднее значение, определяемое по формуле:

$$R_h^{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{hi}, \quad (6.7)$$

где n — число измерений, полученное после исключения из исходной выборки недостоверных значений сопротивления теплопередаче.

Погрешность определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций вычисляется по формуле:

$$\Delta_{sum} = \sqrt{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + (\Delta_3)^2}, \quad (6.8)$$

где Δ_{sum} — суммарная относительная погрешность; Δ_1 — основная относительная приборная погрешность измерений для температуры; Δ_2 — то же, для плотности теплового потока; Δ_3 — относительная методическая погрешность, обусловленная нестационарностью процесса теплопередачи.

Согласно паспортным данным прибора ИТП–МГ4.03–10 «Поток» основная относительная погрешность измерений составляет: для температуры — не более 1 %, для плотности теплового потока — не более 6 %. Согласно МДС 23–1.2007 относительная методическая погрешность, обусловленная нестационарностью процесса теплопередачи, не превышает 8 %. При указанных данных суммарная относительная погрешность по формуле (6.8) не превышает 10 %, что меньше допустимого значения по ГОСТ 26254–84. Таким образом, в ходе натурных измерений получены достоверные результаты, обеспечивающие заданную точность.

Результаты измерений параметров микроклимата помещения, температурного режима и теплозащитных показателей ограждающих конструкций приведены в табл. 6.8.

Анализ данных табл. 6.8 показывает, что фактические параметры микроклимата в жилой комнате отвечают оптимальным нормам по температуре и скорости движения воздуха, а также допустимым нормам по результирующей температуре и относительной влажности воздуха согласно ГОСТ 30494–96. Однако фактические значения сопротивления теплопередаче наружной стены ниже минимального значения согласно п. 5.13 СНиП 23–02–2003 ($R_{min}^w = 1,76 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$). Приведенное сопротивление теплопередаче окна, рассчитанное на основе полученного экспериментального значения для светопропускающей части (стеклопакета),

составляет $0,393 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, что ниже нормируемого значения по табл. 4 того же СНиП ($R_{req}^F = 0,447 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$).

Таблица 6.8

**Результаты измерений параметров микроклимата, температурного режима
и теплозащитных показателей ограждающих конструкций**

Наименование показателя	Фактическое значение показателя
1. Температура воздуха, °C	21,5
2. Результирующая температура, °C	21,6
3. Относительная влажность, %	51,1
4. Скорость движения воздуха, м/с	0,02...0,05
5. Средняя за период наблюдений температура на внутренней поверхности ограждающей конструкции, °C:	
по глади стены	18,6 (15,9)*
в зоне угла	18,2 (15,4)
в центре стеклопакета	13,9 (10,4)
6. Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$:	
по глади стены	1,69
в зоне угла	1,47
в центре стеклопакета	0,354

*) приведенная к расчетным условиям согласно ГОСТ 26254–84.

Таким образом, указанные фрагменты оболочки здания не отвечают требованиям п. 5.1 а) СНиП 23–02–2003 по приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и на внутренней поверхности наружной стены в жилой комнате обследованной квартиры составляет $4,1...4,6 \text{ °C}$, что выше нормируемого значения $\Delta t_n = 4,0 \text{ °C}$ согласно табл. 5 СНиП 23–02–2003, следовательно, наружные стены не отвечают санитарно-гигиеническому показателю.

Таким образом, проведенная реконструкция здания с целью повышения уровня его теплозащиты не обеспечила безопасные условия для проживания.

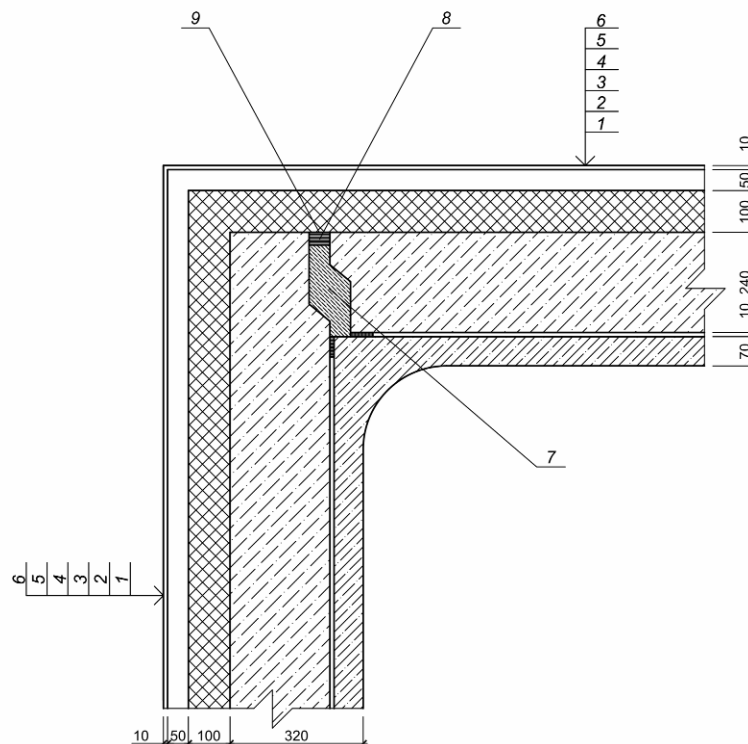


Рис. 6.16. Схема проектного решения угла наружных стен (крепление облицовки фасада условно не показано): 1 — наружная облицовка; 2 — вентилируемая воздушная прослойка; 3 — утеплитель из минераловатных плит; 4 — навесная панель из керамзитобетона; 5 — монтажный шов; 6 — железобетонная конструкция объемного блока; 7 — заделка межпанельного шва керамзитобетоном; 8 — мастика строительная; 9 — защитное покрытие

Представляет практический интерес установить причину низкого уровня теплозащиты ограждающих конструкций. Провести комплекс вскрышных работ на исследуемых участках оболочки здания и выполнить измерение теплопроводности и влажности материалов, используемых в конструкции, на момент проведения обследования не представилось возможным в связи с аномально низкой температурой наружного воздуха и отказом со стороны жильцов дома. Поэтому возможные при-

чины низкой теплозащиты могут быть установлены путем анализа проектной документации и численным моделированием процесса теплопередачи при реальных температурных условиях с учетом влажностного режима наружных ограждений. Выполним этот расчет для угла наружных стен по двум вариантам: 1 — при фактическом значении коэффициента теплопроводности утеплителя; 2 — при его проектном значении. Схема проектного решения узла приведена на рис. 6.16.

Фактический коэффициент теплопроводности утеплителя наружных стен определяются на основе измеренного сопротивление теплопередаче по глади наружной стены по формуле:

$$\lambda_{hm}^{ins} = \frac{\delta_{ins}}{R_{hw}^{av} - \left(\frac{1}{\alpha_h^{si}} + \frac{1}{\alpha_h^{se}} + \frac{\delta_1}{\lambda_{h1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{h2}} \right)}, \quad (6.9)$$

где δ_{ins} — толщина утеплителя, принимаемая по проекту ($\delta_{ins} = 0,1$ м); R_{hw}^{av} — фактическое (измеренное) сопротивление теплопередаче по глади наружной стены; α_h^{si} — коэффициент теплообмена у внутренней поверхности наружной стены в эксперименте, определенный согласно ГОСТ 26254–84 на основе измеренных параметров [$\alpha_h^{si} = 7,3$ Вт/(м²·°C)]; α_h^{se} — коэффициент теплообмена у наружной поверхности стены, принятый с учетом влияния вентилируемой воздушной прослойки согласно СП 23–101–2003 [$\alpha_h^{se} = 10,8$ Вт/(м²·°C)]; δ_1 — толщина стенки «колпака» объемного блока, принятая по проекту ($\delta_1 = 0,07$ м); λ_{h1} — расчетный коэффициент теплопроводности стенки «колпака» объемного блока [$\lambda_{h1} = 0,80$ Вт/(м·°C)]; δ_2 — толщина навесной панели объемного блока, принятая по проекту ($\delta_2 = 0,25$ м); λ_{h2} — расчетный коэффициент теплопроводности навесной панели объемного блока [$\lambda_{h2} = 0,28$ Вт/(м·°C)].

По формуле (6.9) $\lambda_{hm}^{ins} = 0,208$ Вт/(м·°C), по проекту $\lambda_{hd}^{ins} = 0,041$ Вт/(м·°C).

Численное моделирование процесса теплопередачи для указанного фрагмента выполнено по компьютерной программе «СОВТ–3» при фактических параметрах микроклимата помещения и наружного климата, усредненных за время измерений. Геометрические характеристики конструкции определены в соответствии с проектной документацией.

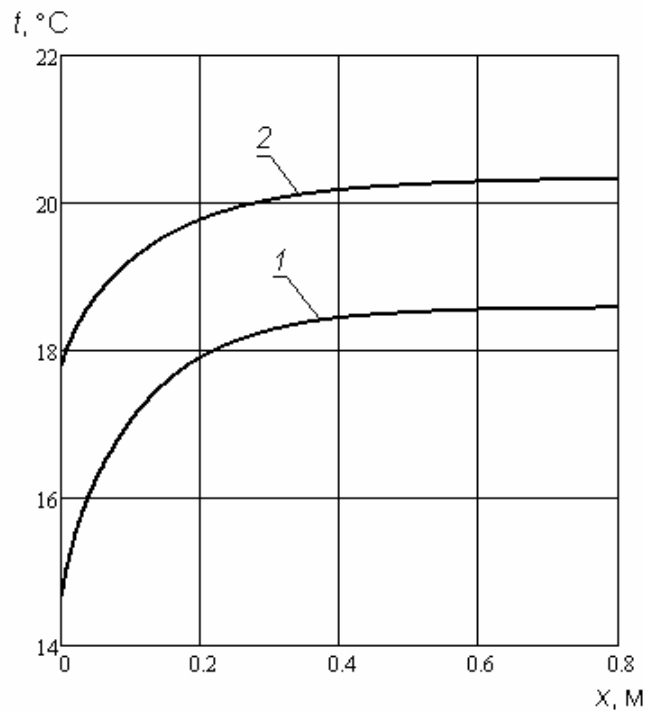


Рис. 6.17. Графики зависимости температуры от координаты на внутренней поверхности угла наружных стен:

1 — при $\lambda_{hm}^{ins} = 0,208$ Вт/(м·°C); 2 — при $\lambda_{hd}^{ins} = 0,041$ Вт/(м·°C)

На рис. 6.17 показаны графики зависимости температуры от координаты на внутренней поверхности угла по двум вариантам расчета. Графики получены путем обработки результатов численного моделирования интерполяцией кубическими сплайнами.

Как видно из рис. 6.17 минимальная температура по обоим вариантам расчета отмечается в углу. По мере удаления от угла температура повышается. При фактическом значении коэффициента теплопроводности утеплителя (вариант 1) температура ниже, чем при проектном значе-

нии (вариант 2), причем максимальное отклонение температуры отмечается в углу.

На основе значений температуры в точках измерений наружной стены определяем расчетное сопротивление теплопередаче по формуле:

$$R_h = \frac{t_{int} - t_{ext}}{\alpha_h^{si} (t_{int} - t_{si})}, \quad (6.10)$$

где t_{int} , t_{ext} — соответственно температура внутреннего и наружного воздуха; t_{si} — температура в точках измерений, полученная по результатам численного моделирования.

Сравнение расчетных и фактических (измеренных) значений сопротивления теплопередаче наружной стены для указанных точек представлено в табл. 6.9.

Таблица 6.9

Сравнение расчетных и фактических значений сопротивления теплопередаче наружной стены

Фрагмент наружной стены	Сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$		Отклонение расчетного значения сопротивления теплопередаче от фактического, %
	фактическое	расчетное	
По глади ($x_1 = 0,48$ м)	1,69	1,55	–8,28
В зоне угла ($x_2 = 0,255$ м)	1,47	1,38	–6,12

Из табл. 6.9 видно, что расчетные и фактические значения сопротивления теплопередаче хорошо согласуются между собой. Максимальное отклонение (–8,28 %) отмечается по глади стены.

По результатам численного моделирования установлено, что проектное решение наружных стен соответствует нормативным требованиям по теплозащите.

Ухудшение фактического температурного режима наружных стен и снижение их теплозащитных качеств по сравнению с проектным решением может быть вызвано нарушениями, допущенными в ходе строи-

тельства и реконструкции здания: некачественной заделкой стыков межпанельных швов, наличием в теплозащитной оболочке здания многочисленных теплопроводных включений, обусловленных некачественным выполнением работ, отсутствием в наружной облицовке вентиляционных отверстий. Устранение допущенных в ходе строительства и реконструкции недостатков позволит повысить уровень тепловой защиты здания.

В работах [393, 396, 401, 402, 409, 410] автором проведено тестирование разработанного метода на результатах натурных исследований для других объектов.

Проведенное тестирование разработанного метода расчета на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток, на различных математических моделях влаготеплопереноса, на результатах натурных исследований температурно-влажностного режима жилых зданий подтверждает его достоверность, что позволяет использовать этот метод в проектной практике.

7. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В КРАЕВЫХ ЗОНАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТЕПЛОЗАЩИТУ ЗДАНИЙ

Приведены результаты расчета температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций, широко применяемых в практике строительства. Выполнена оценка влияния краевых зон на теплозащиту зданий.

7.1. РАСЧЕТ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В КРАЕВЫХ ЗОНАХ

В ограждающих конструкциях современных зданий трудно выделить участок, в пределах которого перенос тепла и влаги происходит по одномерной схеме [2]. Наличие в ограждениях краевых зон приводит к образованию в них сложных трехмерных температурных и влажностных полей. В краевых зонах обычно отмечается ухудшение температурно-влажностного режима, что приводит к снижению теплозащиты всего здания.

В реальном проектировании влияние краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций, как правило, не учитывается. Отсутствуют также методики оценки теплозащиты всего здания с учетом краевых зон. Разработанный в диссертации метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий позволяет учесть влияние краевых зон на теплозащиту ограждающих конструкций и оболочки здания.

Разработана методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах.

Для ограждающей конструкции приведенное сопротивление теплопередаче R_h^{des} определяется по формуле:

$$R_h^{des} = \frac{(t_{int} - t_{ext})A}{Q_h^{des}}, \quad (7.1)$$

где t_{int} , t_{ext} — соответственно температура внутреннего и наружного воздуха; A — площадь внутренней поверхности ограждающей конструкции; Q_h^{des} — тепловой поток, проходящий через ограждающую конструкцию.

Тепловой поток Q_h^{des} складывается из основного по глади конструкции и добавочного через все краевые зоны:

$$Q_h^{des} = Q_h^{con} + \sum_{i=1}^l (Q_{hi}^{des} - Q_{hi}^{con}), \quad (7.2)$$

где Q_h^{con} — основной тепловой поток, определяемый по формуле:

$$Q_h^{con} = \frac{(t_{int} - t_{ext})A}{R_h^{con}}, \quad (7.3)$$

где R_h^{con} — сопротивление теплопередаче по глади ограждающей конструкции; l — число краевых зон; Q_{hi}^{des} — тепловой поток через i -ю краевую зону; Q_{hi}^{con} — тепловой поток, проходящий по глади i -й краевой зоны.

В формуле (7.2) использовано свойство аддитивности теплового потока.

Тепловой поток Q_{hi}^{con} определяется по формуле (7.3) с заменой в ней площади A на площадь A_i^{ez} зоны влияния i -й краевой зоны. Под зоной влияния краевой зоны понимается область локального нарушения однородности температурного поля конструкции, вызванного этой краевой зоной. Тепловой поток Q_{hi}^{des} и площадь зоны влияния A_i^{ez} для i -й краевой

зоны определяются на основе расчета температурно-влажностного режима по температурному полю.

Для определения теплового потока Q_{hi}^{des} зона влияния разбивается на термически однородные области. Тепловой поток Q_{hi}^{des} определяется по формуле:

$$Q_{hi}^{des} = \sum_{j=1}^{m_i} Q_{hij}^{des}, \quad (7.4)$$

где m_i — число термически однородных областей i -й краевой зоны; Q_{hij}^{des} — тепловой поток, проходящий через j -ю термически однородную область i -й краевой зоны, определяемый по формуле:

$$Q_{hij}^{des} = \alpha_{hi}^{si} A_{ij}^{ez} (t_{int} - t_{ij}^{si}), \quad (7.5)$$

где α_{hi}^{si} — коэффициент теплообмена у внутренней поверхности i -й краевой зоны; A_{ij}^{ez} , t_{ij}^{si} — соответственно площадь и средняя температура j -й термически однородной области i -й краевой зоны.

Определим коэффициент влияния k_i^{ez} для i -й краевой зоны по формуле:

$$k_i^{ez} = \frac{Q_{hi}^{des} - Q_{hi}^{con}}{Q_{hi}^{con}}. \quad (7.6)$$

Коэффициент влияния k_i^{ez} является величиной, определяющей относительное отклонение теплового потока через краевую зону, от теплового потока по глади краевой зоны. По физическому смыслу коэффициент влияния характеризует добавочный тепловой поток через краевую зону конструкции, отнесенный к тепловому потоку по глади в пределах площади зоны влияния краевой зоны. Очевидно, чем выше коэффициент влияния, тем ниже уровень теплозащиты краевой зоны.

С учетом (7.2), (7.3) и (7.6) получим формулу для расчета общего теплового потока через ограждение:

$$Q_h^{des} = \frac{(t_{int} - t_{ext})A}{R_h^{con}} \left[1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^l k_i^{ez} A_i^{ez} \right]. \quad (7.7)$$

После подстановки (7.7) в (7.1) получим формулу для определения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции:

$$R_h^{des} = \frac{R_h^{con}}{1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^l k_i^{ez} A_i^{ez}}. \quad (7.8)$$

Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций производится путем сравнения приведенного сопротивления теплопередаче, определяемого по формуле (7.8), с нормируемым.

Разработанная методика позволяет оценить влияние краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций.

7.2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В КРАЕВЫХ ЗОНАХ НА ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрим широко применяемые в практике строительства ограждающие конструкции, содержащие краевые зоны: угол наружных стен, оконный откос, фрагмент трехслойной стеновой панели в зоне шпонки. Для указанных конструкций выполнен расчет температурно-влажностного режима с помощью компьютерной программы, разработанной на основе метода решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагоденоса (см. главу 5 диссертации). На основании результатов расчета выполнена оценка влияния краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций.

7.2.1. Угол наружных стен

Наружная стена выполнена в виде кладки толщиной 400 мм из пенобетонных блоков ($\rho_o = 600 \text{ кг/м}^3$) на теплоизоляционном цементном растворе с пористыми наполнителями ($\rho_o = 1200 \text{ кг/м}^3$). Рассмотрены следующие варианты конструктивного решения наружного угла: 1 — без теплоизоляционного вкладыша; 2 — с теплоизоляционным вкладышем из пенополистирола ($\rho_o = 40 \text{ кг/м}^3$), расположенным у внутренней поверхности угла; 3 — то же, у наружной поверхности угла. Здание жилое, пункт строительства — г. Волгоград. Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$ (табл. 2.6). Параметры климата (t_{ext} , θ_{ext}) приняты по соответствующим среднемесячным значениям (табл. 2.7). Теплофизические характеристики материалов (C_h , C_m , λ_h , λ_m) приняты в зависимости от абсолютного потенциала влажности и температуры. Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности угла — $\alpha_h^{si} = 5,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$ [88], $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности угла — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2\cdot\text{с}\cdot(\text{кДж/кг})]$. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию (октябрь): $t_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 34 \text{ кДж/кг}$.

Для решения задачи использована неравномерная пространственная сетка с шагом 0,05...0,1 м. Общее число узлов 1620. Временной шаг принят равным 2 сут. Указанные параметры обеспечивают необходимую точность и скорость вычислений (см. п. 6.1 диссертации).

Результаты расчета тепловлажностного состояния по глади стены представлены на рис. 7.1 в виде профилей температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$. Анализ результатов показывает, что плоскость наибольшего увлажнения лежит в сечении $x = 0,33 \text{ м}$. Температура в этой плоскости $-2,8 \text{ }^\circ\text{C}$, равновесное влагосодержание пенобетонных блоков $0,103 \text{ кг/кг}$ (10,3 % М) при максимальном сорбционном влагосодержа-

нии $w_{m.s} = 0,1$ кг/кг. Некоторое превышение равновесного влагосодержания материала над максимальным сорбционным в плоскости наибольшего увлажнения создает возможность накопления влаги в этой зоне в наиболее холодный месяц года.

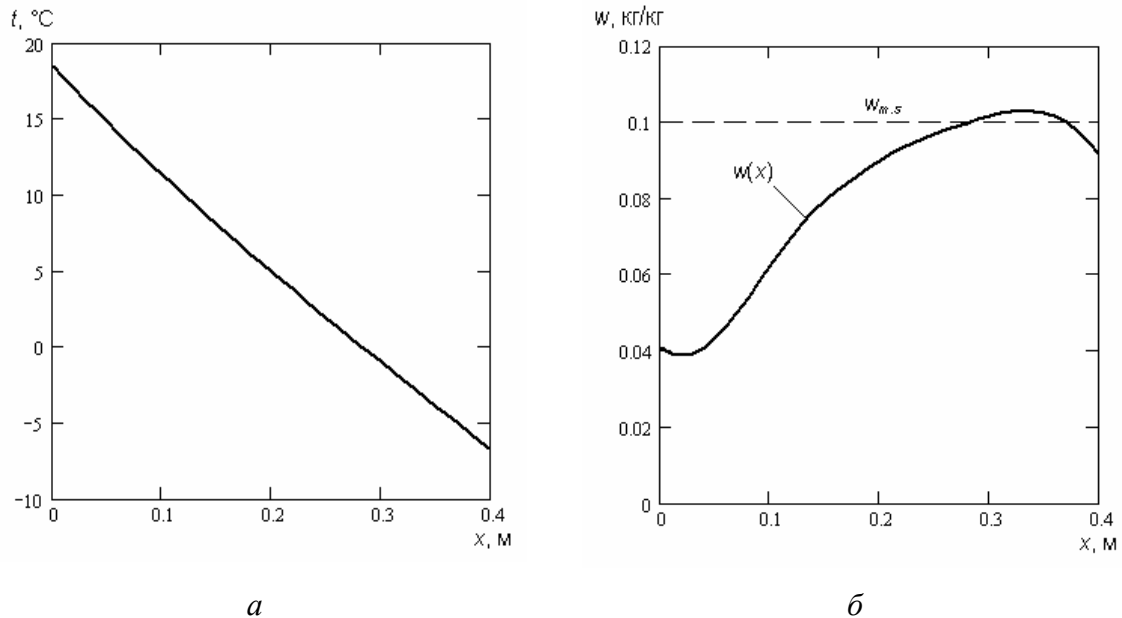


Рис. 7.1. Профили температуры (а) и влагосодержания (б) по глади стены

На рис. 7.2 приведены поля температуры и влагосодержания в наружном углу без теплоизоляционного вкладыша (вариант 1). Вдали от угла рассматриваемая конструкция является теплофизически однородной (рис. 7.2, а). Изотермы в ней расположены параллельно поверхностям стен, образующим угол, а тепловой поток направлен перпендикулярно изотермам изнутри помещения наружу.

По мере приближения к углу изотермы изгибаются к его внутренней поверхности, при этом большая часть угла лежит в зоне отрицательных температур. Искривление изотерм в углу и понижение температуры на его внутренней поверхности вызывает более интенсивный тепловой поток в углу по сравнению с гладью стены.

Анализ влажностного поля показывает, что в углу в зоне отрицательных температур отмечается локализация влагосодержания

(рис. 7.2, б). Максимальное влагосодержание в этой зоне 0,196 кг/кг, что больше влагосодержания в плоскости наибольшего увлажнения по глади стены. Таким образом, понижение температуры в наружном углу приводит к ухудшению влажностного режима и создает опасность влагонакопления в этой краевой зоне.

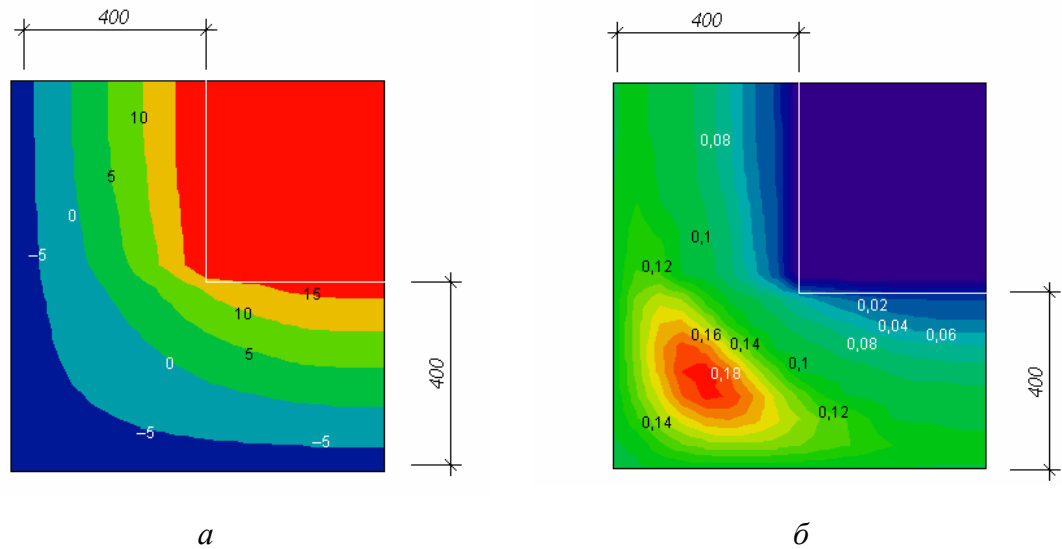


Рис. 7.2. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в наружном углу (вариант 1)

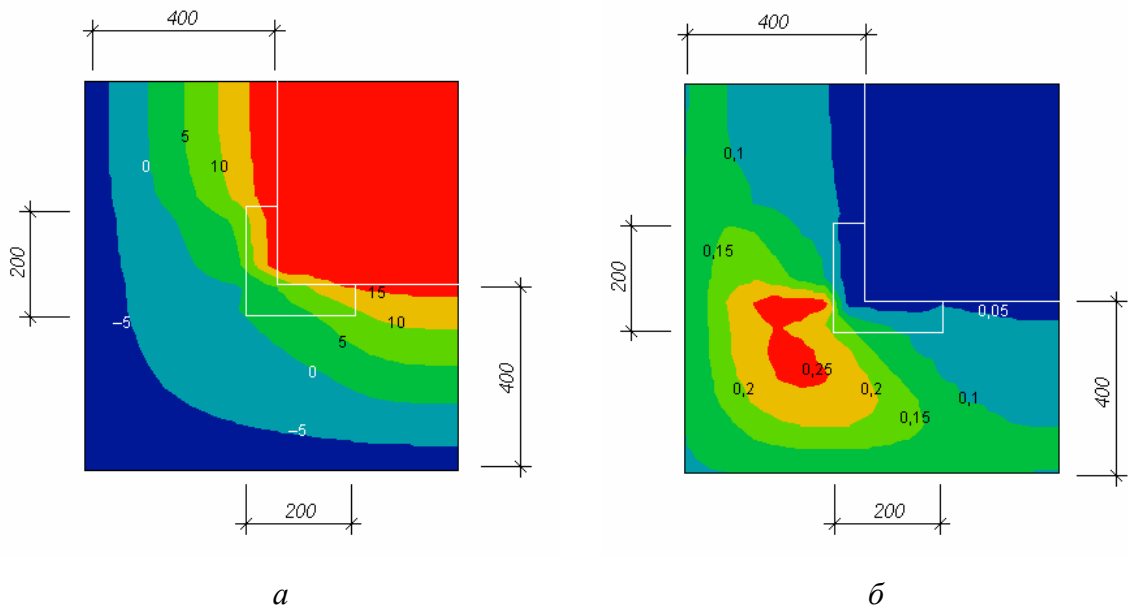


Рис. 7.3. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в наружном углу (вариант 2)

Размещение теплоизоляционного вкладыша у внутренней поверхности угла (вариант 2) приводит к еще большему смещению изотерм к внутренней поверхности, при этом почти весь угол оказывается в зоне отрицательных температур (рис. 7.3, *а*). Локализация влагосодержания в углу усиливается (рис. 7.3, *б*), максимальное влагосодержание увеличивается до 0,276 кг/кг, при этом зона локализации влагосодержания охватывает практически весь угол. Таким образом, размещение теплоизоляционного вкладыша у внутренней поверхности угла, часто используемое в практике, резко ухудшает температурно-влажностный режим угла.

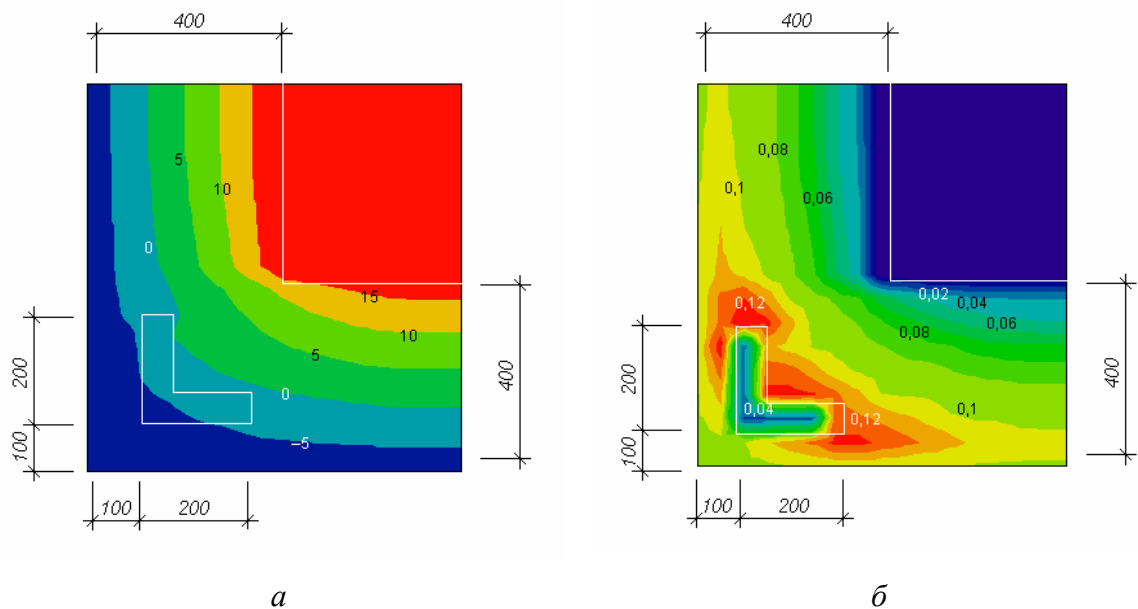


Рис. 7.4. Поля температуры (*а*) и влагосодержания (*б*) в наружном углу (вариант 3)

Смещение теплоизоляционного вкладыша к наружной поверхности угла (вариант 3) приводит к некоторому выравниванию температурного поля, что указывает на более благоприятный температурный режим угла (рис. 7.4, *а*). Поле влагосодержания также выравнивается (рис. 7.4, *б*), максимальное влагосодержание в углу снижается до 0,138 кг/кг. Температурно-влажностный режим угла оказывается более благоприятным даже по сравнению с конструкцией без теплоизоляционного вкладыша. Размещение теплоизоляционного вкладыша ближе к наружной поверх-

ности, т. е. в холодной зоне, улучшает температурно-влажностный режим угла.

Анализ влажностного режима конструкции в течение отопительного периода показывает, что при переходе к холодному периоду года происходит накопление влаги в углу. Среднее влагосодержание кладки пенобетонных блоков: к началу периода влагонакопления 0,036 кг/кг; к концу периода влагонакопления 0,073 кг/кг; приращение за период влагонакопления 0,037 кг/кг. Максимальное локальное влагосодержание к концу периода влагонакопления 0,117 кг/кг.

Поскольку среднее влагосодержание увлажняемого материала к концу периода влагонакопления меньше максимального сорбционного, то переувлажнения наружного угла в целом не происходит. Однако превышение максимального влагосодержания к концу периода влагонакопления над максимальным сорбционным создает опасность локального переувлажнения угла.

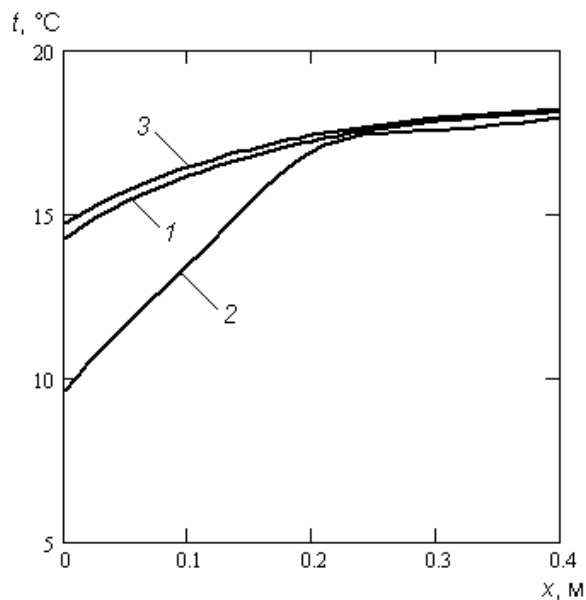


Рис 7.5. Графики распределения температуры по внутренней поверхности угла при различных вариантах его конструктивного решения

Для оценки влияния температурно-влажностного режима на теплозащитные свойства конструкции используем температурное поле по внутренней поверхности угла, полученное на основании результатов расчета. На рис. 7.5 приведены графики распределения температуры по внутренней поверхности угла при различных вариантах его конструктивного решения. Координатная ось направлена от угла к глади стены вдоль внутренней поверхности конструкции. Из рис. 7.5 видно, что минимальная температура отмечается в углу: для первого варианта — $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; второго — $9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; третьего — $14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере удаления от угла температура повышается, достигая $18,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ по глади стены. Площадь зоны влияния угла составляет $0,4\text{ м}^2/(\text{ед. изм.})$. Графики распределения температуры по внутренней поверхности угла в вариантах 1 и 3 почти совпадают на всем рассматриваемом участке, следовательно, размещение вкладыша у наружной поверхности угла не оказывает существенного влияния на распределение температуры. Во втором варианте на участке от 0 до 0,2 м температура ниже, чем в первом и третьем вариантах, причем на участке от 0 до 0,03 м выпадает конденсат.

Для определения теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность угла, разобьем зону влияния угла на четыре равные термически однородные области и определим тепловой поток, проходящий через каждую из этих областей. Результаты расчета для рассматриваемых вариантов конструктивного решения угла при $t_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{ext} = -7,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 7.1. Из таблицы видно, что максимальные значения теплового потока для всех вариантов конструктивного решения угла отмечаются в первой зоне, т.е. в области, примыкающей к углу. Размещение теплоизоляционного вкладыша у внутренней поверхности угла приводит к наибольшему тепловому потоку в каждой термически однородной зоне угла.

Таблица 7.1

**Результаты расчета теплового потока,
проходящего через термически однородные зоны угла**

№ области	№ варианта	Средняя температура t_{1j}^{si} , °С, внутренней поверхности j -й области	Тепловой поток Q_{h1j}^{des} , Вт, через j -ю область	Тепловой поток Q_{h1j}^{con} , Вт, по глади площадью A_{1j}^{ez}	$Q_{h1j}^{des}/Q_{h1j}^{con}$
I	1	15,3	2,72	1,38	2,0
	2	11,6	4,87	1,38	3,5
	3	15,7	2,52	1,38	1,83
II	1	16,7	1,89	1,38	1,4
	2	15,3	2,72	1,38	2,0
	3	17,0	1,77	1,38	1,3
III	1	17,6	1,42	1,38	1,0
	2	17,4	1,53	1,38	1,1
	3	17,7	1,34	1,38	1,0
IV	1	18,0	1,17	1,38	0,8
	2	17,7	1,32	1,38	1,0
	3	18,1	1,13	1,38	0,8

Суммируя значения теплового потока по всем термически однородным зонам по формуле (7.4), получим значения теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность угла. По формуле (7.6) получим значения коэффициента влияния краевой зоны: по первому варианту — 0,309; по второму — 0,881; по третьему — 0,221. Сопротивление теплопередаче по глади конструкции $R_h^{con} = 1,98 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. На основе полученных данных определим значения приведенного сопротивления теплопередаче R_h^{des} , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$: по первому варианту — 1,51; по второму — 1,05; по третьему — 1,62.

Таким образом, в углу наружных стен теплозащитные свойства снижаются: по первому варианту на 23,7 %; по второму — на 47 %; по третьему — на 18,2 %. Размещение теплоизоляционного вкладыша у внутренней поверхности угла приводит к ухудшению теплозащитных свойств конструкции. Наилучшим с точки зрения теплозащиты является размещение теплоизоляционного вкладыша у наружной поверхности угла.

7.2.2. Оконный откос

Наружная стена выполнена в виде кладки толщиной 510 мм из керамического крупноформатного пустотелого поризованного камня ($\rho_0 = 900 \text{ кг/м}^3$) на теплоизоляционном цементном растворе с пористыми наполнителями ($\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$) [18]. Заполнение светового проема рассматривается в двух вариантах: 1 — однокамерный стеклопакет 4M₁–16–K4 в деревянных переплетах и узкой коробке усредненной толщиной 80 мм; 2 — обычное стекло и однокамерный стеклопакет 4M₁ + (4M₁–16–4M₁) в отдельных деревянных переплетах и широкой коробке усредненной толщиной 160 мм. Приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока принято согласно СП 23–101–2004: с узкой коробкой — $0,56 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$; с широкой коробкой — $0,59 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$. Оконный блок расположен в стене на глубину четверти 130 мм. Здание жилое, пункт строительства — г. Волгоград. Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$ (табл. 2.6). Параметры климата (t_{ext} , θ_{ext}) приняты по соответствующим среднемесячным значениям (табл. 2.7). Теплофизические характеристики материалов (C_h , C_m , λ_h , λ_m) приняты в зависимости от абсолютного потенциала влажности и температуры. Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$; у наружной

поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг}/[\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж}/\text{кг})]$. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию (октябрь): $t_0 = 8 \text{ } ^\circ\text{С}$, $\theta_0 = 34 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Для решения задачи использована неравномерная пространственная сетка с шагом $0,02 \dots 0,2 \text{ м}$. Общее число узлов 1280. Временной шаг принят равным 2 сут.

Результаты расчета тепловлажностного состояния по глади стены представлены на рис. 7.6 в виде профилей температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$. Анализ результатов показывает, что плоскость наибольшего увлажнения лежит в сечении $x = 0,42 \text{ м}$. Температура в этой плоскости $-2,04 \text{ } ^\circ\text{С}$, равновесное влагосодержание керамического камня $0,02 \text{ кг}/\text{кг}$ при максимальном сорбционном влагосодержании $w_{m.s} = 0,015 \text{ кг}/\text{кг}$. Небольшое превышение равновесного влагосодержания материала над максимальным сорбционным в плоскости наибольшего увлажнения создает возможность накопления влаги в этой зоне в наиболее холодный месяц года.

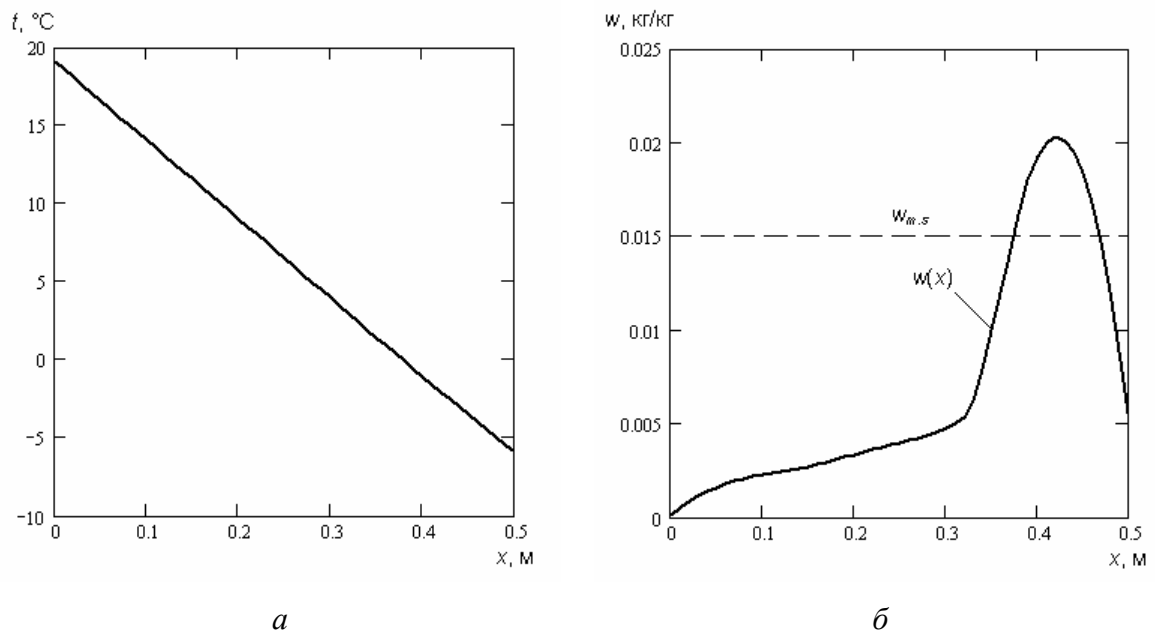


Рис. 7.6. Профили температуры (а) и влагосодержания (б) по глади стены

На рис. 7.7 приведены поля температуры и влагосодержания по оконному откосу для оконного блока с узкой коробкой (вариант 1). Из рис. 7.7, *а* видно, что вдали от откоса конструкция наружной стены является теплофизически однородной. По мере приближения к окну изотермы изгибаются в сторону наружной поверхности, что указывает на более интенсивный тепловой поток по стене в обход оконной коробки. По направлению к внутренней поверхности стены температура откоса быстро повышается. Следовательно, наряду с дополнительными тепловыми потерями через откосы можно отметить некоторое снижение теплопотерь на поверхности стены около оконного проема.

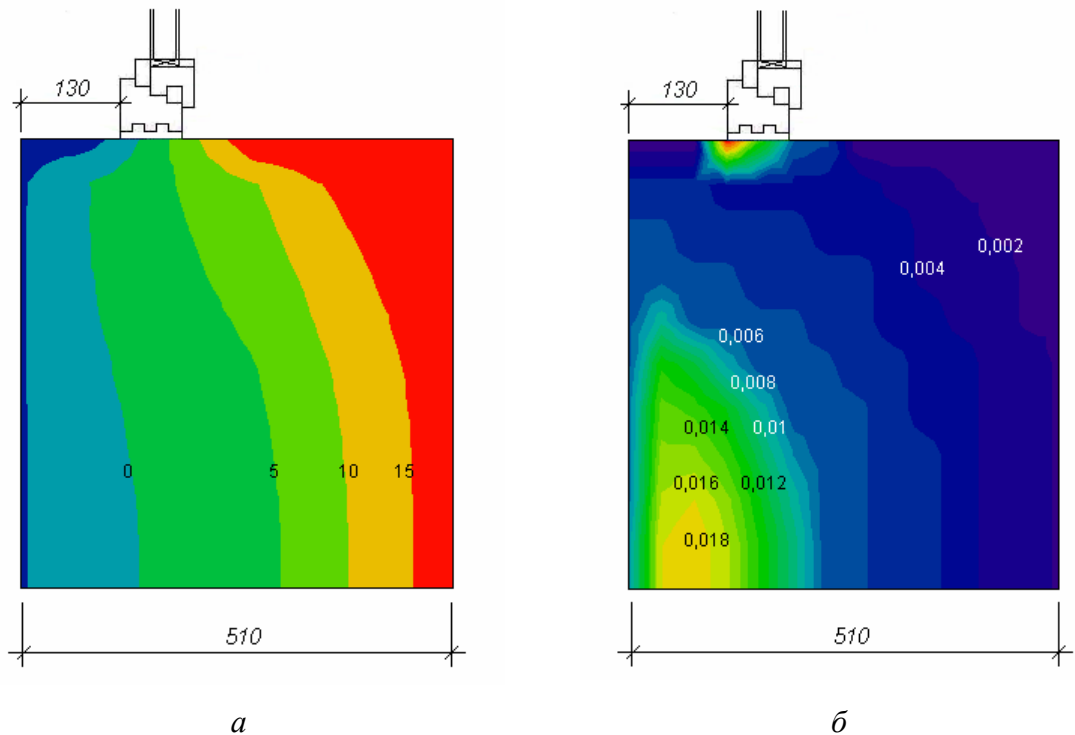


Рис. 7.7. Поля температуры (*а*) и влагосодержания (*б*) по оконному откосу (вариант 1)

Как видно из рис. 7.7, *б*, в зоне коробки отмечается локализация влагосодержания, что указывает на ухудшение влажностного режима в этой краевой зоне. Кроме того, некоторая локализация влагосодержания происходит в плоскости наибольшего увлажнения стены. Повышение тем-

пературы откоса по направлению к внутренней поверхности стены улучшает влажностный режим в этой краевой зоне по сравнению с гладью стены.

Устройство широкой коробки (вариант 2) выравнивает температурное поле, при этом большая часть коробки оказывается в зоне положительных температур (рис. 7.8, *а*). Локализация влагосодержания в стене в зоне размещения широкой коробки уменьшается (рис. 7.8, *б*). Следовательно, заполнение светового проема оконным блоком с широкой коробкой улучшает тепловлажностный режим оконного откоса.

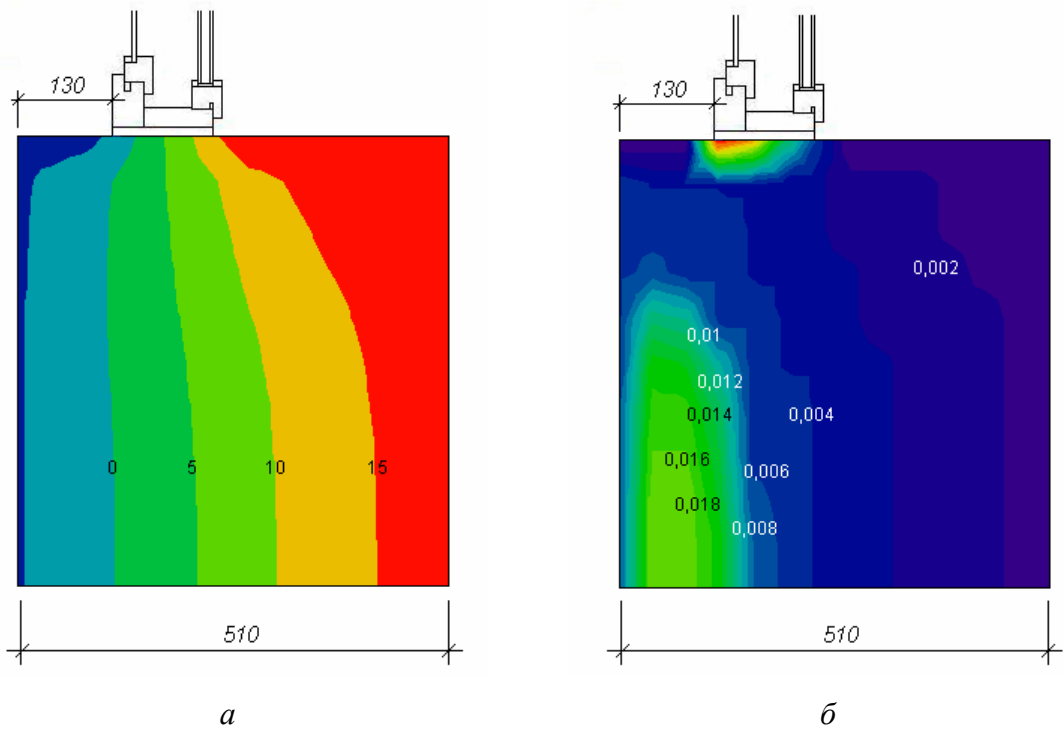


Рис. 7.8. Поля температуры (*а*) и влагосодержания (*б*) по оконному откосу (вариант 2)

Анализируя влажностный режим конструкции в течение отопительного периода, можно отметить, что при переходе к холодному периоду года происходит накопление влаги в стене в зоне оконного откоса. Среднее влагосодержание кладки керамического камня: к началу периода влагонакопления $1,6 \cdot 10^{-3}$ кг/кг; к концу периода влагонакопления $3,91 \cdot 10^{-3}$

кг/кг; приращение за период влагонакопления $2,31 \cdot 10^{-3}$ кг/кг. Максимальное локальное влагосодержание к концу периода влагонакопления $2,0 \cdot 10^{-2}$ кг/кг.

Поскольку среднее влагосодержание увлажняемого материала к концу периода влагонакопления меньше максимального сорбционного $w_{m.s.}$, то переувлажнения оконного откоса в целом не происходит. Однако превышение максимального влагосодержания к концу периода влагонакопления над максимальным сорбционным создает опасность локального переувлажнения откоса в зоне коробки.

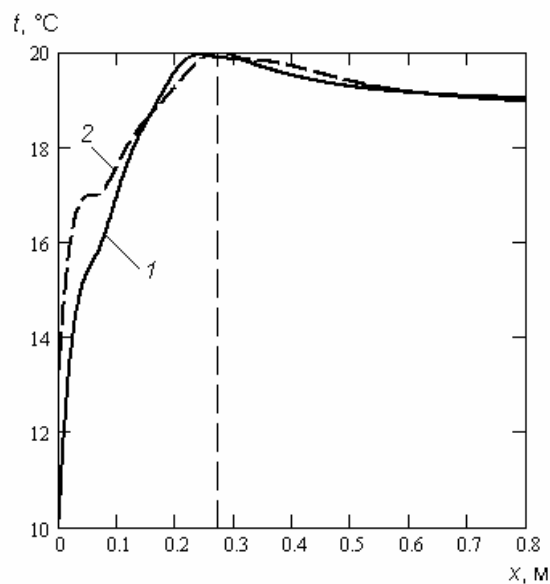


Рис. 7.9. Графики распределения температуры по внутренней поверхности откоса при различных вариантах заполнения светового проема: 1 — оконный блок с узкой коробкой; 2 — оконный блок с широкой коробкой

Для оценки влияния температурно-влажностного режима на теплозащитные свойства оконных откосов используем температурное поле по внутренней поверхности откоса, полученное расчетом.

На рис. 7.9 приведены графики распределения температуры по внутренней поверхности откоса при различных вариантах заполнения светового проема. Координатная ось направлена от внутренней поверхности

коробки к глади стены вдоль внутренней поверхности откоса. Из рисунка видно, что минимальная температура отмечается в зоне сопряжения коробки со стеной: для узкой коробки — 10,2 °С; для широкой коробки — 13,3 °С. По мере удаления от коробки температура сначала резко повышается, достигая максимального значения около 20 °С на ребре откоса, затем плавно снижается до 19,0 °С по глади стены. Площадь зоны влияния оконного откоса составляет 0,8 м²/(ед. изм.).

Таблица 7.2

**Результаты расчета теплового потока,
проходящего через термически однородные зоны области откоса**

№ области	№ варианта	Средняя температура t_{1j}^{si} , °С, внутренней поверхности j -й области	Тепловой поток Q_{hlj}^{des} , Вт, через j -ю область	Тепловой поток Q_{hlj}^{con} , Вт, по глади площадью A_{1j}^{ez}	$Q_{hlj}^{des}/Q_{hlj}^{con}$
I	1	14,9	4,43	0,913	4,9
	2	16,6	2,98	0,913	3,3
II	1	18,5	1,32	0,913	1,4
	2	18,6	1,26	0,913	1,4
III	1	19,9	0,109	0,913	0,12
	2	19,8	0,170	0,913	0,19
IV	1	19,8	0,172	0,913	0,19
	2	19,7	0,271	0,913	0,30
V	1	19,5	0,399	0,913	0,44
	2	19,4	0,54	0,913	0,59
VI	1	19,3	0,643	0,913	0,70
	2	19,2	0,692	0,913	0,76
VII	1	19,1	0,788	0,913	0,86
	2	19,1	0,774	0,913	0,85
VIII	1	19,0	0,871	0,913	0,95
	2	19,1	0,822	0,913	0,90

Устройство широкой коробки повышает температуру на поверхности откоса, на участке от ребра откоса до глади стены заполнение светового проема практически не влияет на температурный режим стены. Температура в зоне сопряжения узкой коробки и откоса близка к точке росы внутреннего воздуха.

Для определения теплового потока, проходящего через поверхность откоса, разобьем зону влияния откоса на восемь равных термически однородных областей и определим тепловой поток, проходящий через каждую из этих областей. Результаты расчета для рассматриваемых вариантов заполнения светового проема при $t_{int} = 20\text{ °C}$ и $t_{ext} = -7,31\text{ °C}$ представлены в табл. 7.2. Из таблицы видно, что максимальные значения теплового потока для рассматриваемых вариантов заполнения светового проема отмечаются в первой зоне, т.е. в области, примыкающей к коробке, минимальные значения теплового потока — в зоне ребра откоса. Вдали от ребра откоса (восьмая зона) тепловой поток практически равен тепловому потоку по глади стены.

Суммируя значения теплового потока по всем термически однородным зонам, получим значения теплового потока через поверхность откоса. По формуле (7.6) получим значения коэффициента влияния краевой зоны: по первому варианту — 0,196; по второму — 0,03. Сопротивление теплопередаче по глади конструкции $R_h^{con} = 2,99\text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$. На основе полученных данных определим значения приведенного сопротивления теплопередаче R_h^{des} , $\text{м}^2\cdot\text{°C/Вт}$, для вариантов расчета: с узкой коробкой — 2,5; с широкой коробкой — 2,9.

Таким образом, в зоне оконного откоса теплозащитные свойства снижаются: при устройстве узкой коробки на 16,4 %, широкой коробки на 3 %. Лучшим с точки зрения теплозащиты является заполнение светового проема оконным блоком с широкой коробкой, при этом теплозащитные свойства откоса приближаются к глади стены.

7.2.3. Фрагмент трехслойной стеновой панели в зоне шпонки

Рассмотрим фрагмент трехслойной стеновой панели со шпоночным соединением. Внутренний конструктивный слой панели толщиной 120 мм и наружный защитно-отделочный слой толщиной 80 мм выполнены из керамзитобетона ($\rho_o = 1600 \text{ кг/м}^3$) и соединены между собой шпонкой $150 \times 150 \times 150 \text{ мм}$ из того же материала. В качестве утеплителя используются пенополистирольные плиты ($\rho_o = 40 \text{ кг/м}^3$) толщиной 150 мм. Здание жилое, пункт строительства — г. Волгоград. Параметры микроклимата здания: $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_{int} = 95 \text{ кДж/кг}$ (табл. 2.6). Параметры климата (t_{ext} , θ_{ext}) приняты по соответствующим среднемесячным значениям (табл. 2.7). Теплофизические характеристики материалов (C_h , C_m , λ_h , λ_m) приняты в зависимости от абсолютного потенциала влажности и температуры. Коэффициенты тепло- и влагообмена: у внутренней поверхности — $\alpha_h^{si} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{si} = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$; у наружной поверхности — $\alpha_h^{se} = 23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, $\alpha_m^{se} = 10,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг/[м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кДж/кг})]$. Начальные условия соответствуют моменту ввода конструкции в эксплуатацию (октябрь): $t_0 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 34 \text{ кДж/кг}$.

Для решения задачи использована неравномерная пространственная сетка с шагом $0,03 \dots 0,05 \text{ м}$. Общее число узлов 2197. Временной шаг принят равным 2 сут.

Результаты расчета тепловлажностного состояния по глади стены представлены на рис. 7.10 в виде профилей температуры $t(x)$ и влагосодержания $w(x)$. Можно отметить разрыв влагосодержания на стыках различных материалов (рис. 7.10, б). Плоскость наибольшего увлажнения лежит на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем. Температура в этой плоскости $-6,5 \text{ }^\circ\text{C}$, равновесное влагосодержание пенополистирола $0,025 \text{ кг/кг}$, керамзитобетона $0,12 \text{ кг/кг}$ при макси-

мальном сорбционном влагосодержании пенополистирола 0,026 кг/кг, керамзитобетона 0,122 кг/кг. Приближение равновесного влагосодержания материалов к максимальному сорбционному в плоскости наибольшего увлажнения создает возможность накопления влаги в этой зоне в наиболее холодный месяц года.

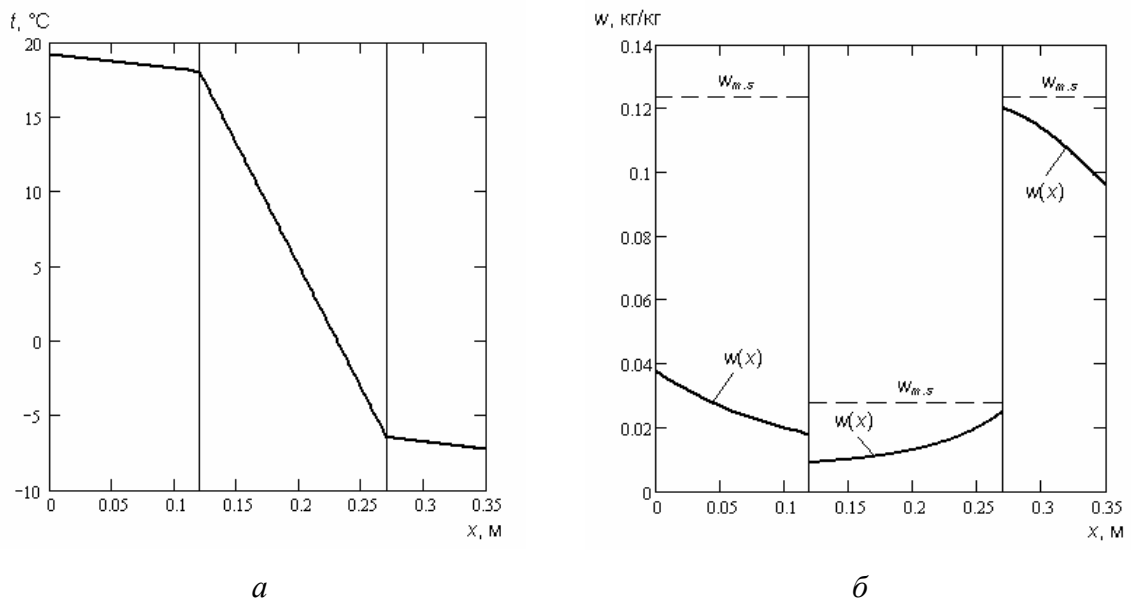


Рис. 7.10. Профили температуры (а) и влагосодержания (б) по глади стены

На рис. 7.11 приведены поля температуры и влагосодержания в сечении по стволу шпонки. Из рисунка видно, что вдали от шпонки конструкция наружной стены является теплофизически однородной. Изотермы в ней расположены параллельно поверхности стены, а тепловой поток направлен перпендикулярно изотермам изнутри помещения наружу. По мере приближения к шпонке изотермы изгибаются к внутренней и наружной поверхностям конструкции, что указывает на более интенсивный тепловой поток по шпонке. При этом шпонка оказывается преимущественно в зоне положительных температур (рис. 7.11, а).

Как и в случае температурного поля, в зоне шпонки отмечается локализация влагосодержания (рис. 7.11, б). Преобладающий изгиб изопотенциальных поверхностей влагосодержания по шпонке в сторону внутренней поверхности конструкции указывает на большее увлажнение

шпонки изнутри. Понижение температуры в зоне шпонки, примыкающей к внутренней поверхности конструкции, приводит к некоторому накоплению влаги в этой краевой зоне.

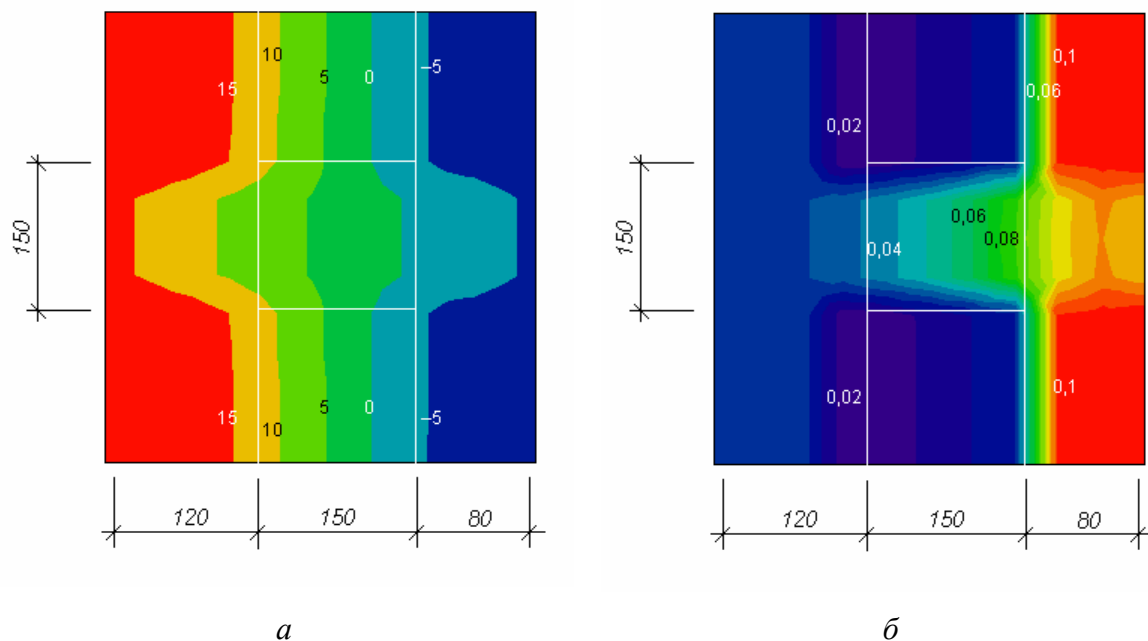


Рис. 7.11. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в сечении по стволу шпонки

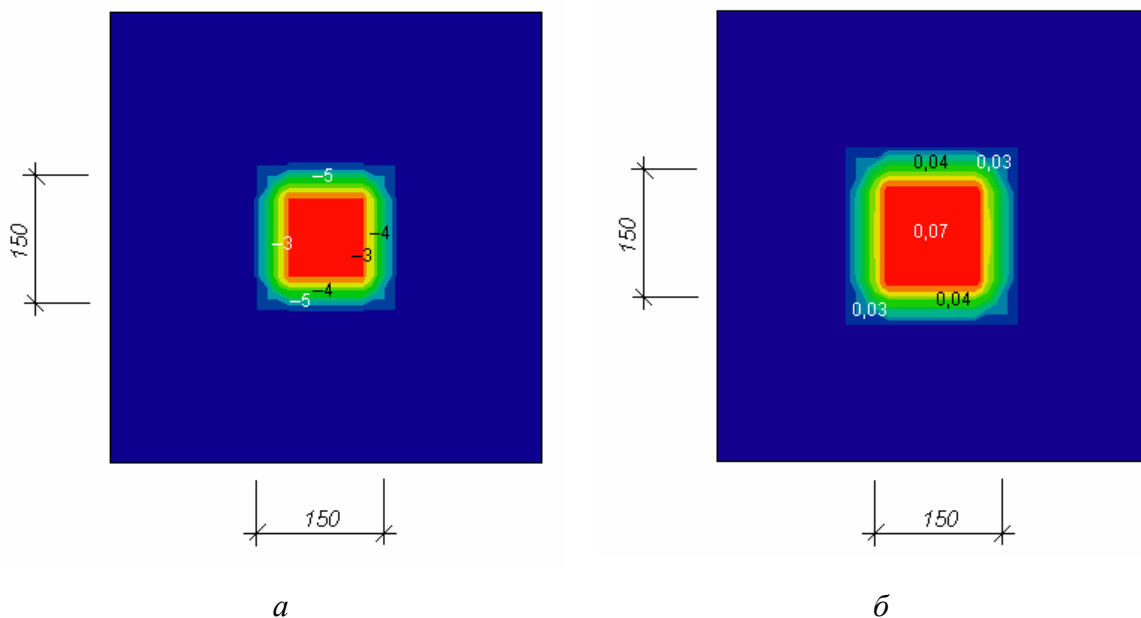


Рис. 7.12. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) в сечении на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем

На рис. 7.12 приведены поля температуры и влагосодержания в сечении на стыке утеплителя с наружным защитно-отделочным слоем. Из рис. 7.12, *а* видно, что в области шпонки однородность температурного поля нарушается. В этой области температура выше, чем по глади сечения. Вокруг шпонки образуется переходная зона. Из рис. 7.12, *б* видно, что в зоне шпонки отмечается и локализация влагосодержания. Влагосодержание утеплителя вокруг шпонки ($0,03 \text{ кг/кг}$) больше максимального сорбционного, что указывает на опасность накопления влаги в утеплителе вокруг шпонки.

Анализ влажностного режима конструкции в течение отопительного периода показывает, что при переходе к холодному периоду года происходит накопление влаги в утеплителе. Среднее влагосодержание пенополистирольных плит составляет: к началу периода влагонакопления $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$; к концу периода влагонакопления $1,68 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$; приращение за период влагонакопления $0,28 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$. Максимальное локальное влагосодержание к концу периода влагонакопления $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$.

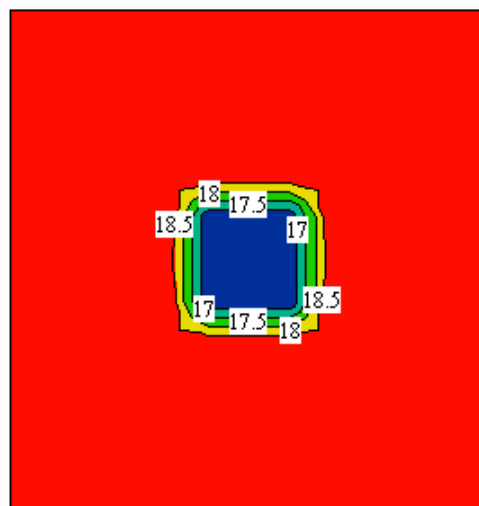


Рис. 7.13. Температурное поле по внутренней поверхности панели в зоне шпонки

Поскольку среднее влагосодержание увлажняемого материала к концу периода влагонакопления меньше максимального сорбционного, то переувлажнения утеплителя в целом не происходит. Однако приближение максимального влагосодержания к концу периода влагонакопления к максимальному сорбционному создает возможность локального увлажнения утеплителя.

Для оценки влияния температурно-влажностного режима на теплозащитные свойства конструкции используем температурное поле по внутренней поверхности панели в зоне шпонки (рис. 7.13). Из рисунка видно, что минимальная температура, равная 16,5 °С, отмечается в зоне шпонки. Вокруг шпонки образуется переходная зона с температурой от 16,6 °С до 18,5 °С. По мере удаления от шпонки температура повышается до 19,2 °С по глади стены. Площадь зоны влияния шпонки составляет 0,72 м²/(ед. изм.).

Таблица 7.3

**Результаты расчета теплового потока, проходящего
через термически однородные зоны в области шпонки**

№ об- ласти	Средняя температу- ра t_{1j}^{si} , °С, внутрен- ней поверхности j -й области	Тепловой поток Q_{h1j}^{des} , Вт, через j -ю область	Тепловой поток Q_{h1j}^{con} , Вт, по глади площадью A_{1j}^{ez}	$Q_{h1j}^{des} / Q_{h1j}^{con}$
I	16,6	0,666	0,157	4,2
II	18,8	2,11	1,41	1,5
III	19,1	3,88	3,45	1,12

Для определения теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность стены в области шпонки, разобьем зону влияния шпонки на три термически однородных области: I — область шпонки площадью 0,0225 м²; II — переходная область (0,2025 м²); III — остальная часть зоны влияния шпонки (0,495 м²). Определим тепловой поток, проходя-

щий через каждую из этих областей. Результаты расчета для рассматриваемой конструкции при $t_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{ext} = -7,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 7.3. Из таблицы видно, что максимальное значение теплового потока, отнесенного к тепловому потоку по глади, отмечается в области шпонки. Вдали от шпонки (третья область) тепловой поток приближается к тепловому потоку по глади. Суммируя значения теплового потока по всем термически однородным зонам по формуле (7.4), получим значение теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность стены в области шпонки. По формуле (7.6) получим значение коэффициента влияния краевой зоны, равное 0,4. Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента конструкции $R_h^{des} = 2,95\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$ при сопротивлении теплопередаче по глади $R_h^{con} = 4,12\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$. Таким образом, в области шпонки теплозащитные свойства снижаются на 28,4 %.

7.3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ ЗОН ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЯ

В п. 7.2 проведена расчетная оценка влияния температурно-влажностного режима на теплозащитные свойства ограждающих конструкций для характерных краевых зон. Показано, что в краевых зонах теплозащитные свойства снижаются от 3 до 47 % в зависимости от вида краевой зоны.

Оценим влияние краевых зон ограждающих конструкций на теплозащитные свойства оболочки здания.

Пусть оболочка здания состоит из m ограждающих конструкций ($m \geq 1$). Приведенное сопротивление теплопередаче оболочки здания R_{he}^{des} определяется по формуле:

$$R_{he}^{des} = \frac{(t_{int} - t_{ext}) A_e^{sum}}{Q_{he}^{sum}}, \quad (7.9)$$

где t_{int} , t_{ext} — соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, граничащего с оболочкой здания; A_e^{sum} — площадь внутренней поверхности оболочки здания; Q_{he}^{sum} — суммарный тепловой поток, проходящий через оболочку здания, определяемый по формуле:

$$Q_{he}^{sum} = \sum_{i=1}^m Q_{hi}^{des}, \quad (7.10)$$

где Q_{hi}^{des} — тепловой поток, проходящий через i -ю ограждающую конструкцию оболочки здания.

Тепловой поток Q_{hi}^{des} определяется по формуле:

$$Q_{hi}^{des} = \frac{n_i (t_{int} - t_{ext}) A_i}{R_{hi}^{des}}, \quad (7.11)$$

где $n_i = (t_{int}^i - t_{ext}^i) / (t_{int} - t_{ext})$ — коэффициент, учитывающий положение ограждающей конструкции относительно внутреннего и наружного воздуха; t_{int}^i , t_{ext}^i — соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, граничащего с i -й ограждающей конструкцией оболочки здания; A_i — площадь i -й ограждающей конструкции; R_{hi}^{des} — приведенное сопротивление теплопередаче i -й ограждающей конструкции.

После подстановок (7.11) в (7.10) и (7.10) в (7.9) получим формулу для определения приведенного сопротивления теплопередаче оболочки здания:

$$R_{he}^{des} = \frac{A_e^{sum}}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i A_i}{R_{hi}^{des}}}. \quad (7.12)$$

Формула (7.12) позволяет оценить теплозащитные свойства оболочки здания с учетом краевых зон ограждающих конструкций. Коэффици-

енты влияния и площади зоны влияния, необходимые для расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, получены автором на основе расчета температурно-влажностного режима для краевых зон, широко применяемых в практике строительства, и приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

**Коэффициент влияния k_i^{ez} и площадь зоны влияния A_i^{ez}
краевых зон ограждений**

Краевая зона ограждения	k_i^{ez}	A_i^{ez} , м ² /(ед. изм.)
Угол наружных стен:		
без теплоизоляционного вкладыша	0,309	0,4
с теплоизоляционным вкладышем у внутренней поверхности	0,881	0,4
с теплоизоляционным вкладышем у наружной поверхности	0,221	0,4
Оконный откос:		
с узкой коробкой	0,196	0,8
с широкой коробкой	0,030	0,8
Сопряжение наружных стен с междуэтажным перекрытием (с теплоизоляционными вкладышами)	0,420	1,48
Теплопроводное включение (линейное) в виде вертикального кирпичного ребра или горизонтального прокладного ряда без армирующей сетки в трехслойной кирпичной стене колодцевой кладки с утеплением:		
минераловатными плитами	0,528	0,42
монолитным полистиролбетоном	0,148	0,42
Теплопроводное включение (линейное) в виде горизонтального кирпичного прокладного ряда с металлической армирующей сеткой в трехслойной кирпичной стене колодцевой кладки с уте- плением:		
минераловатными плитами	0,581	0,42
монолитным полистиролбетоном	0,163	0,42

Продолжение табл. 7.4

Теплопроводные включения (точечные):		
шпонка в трехслойной стеновой панели	0,400	0,72
кронштейн в наружной стене с вентилируемым фасадом	0,118	0,578

Примечание. Для сопряжения наружных стен с внутренними коэффициент влияния следует принимать как для сопряжения наружных стен с междуэтажным перекрытием с коэффициентом 0,8.

В качестве примера рассмотрим 17-этажное жилое здание, имеющее квадратную в плане форму с размерами в осях 27,6×27,6 м. Конструктивная схема здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены трехслойные кирпичные колодцевой кладки с эффективным утеплителем. Окна и балконные двери в виде двухкамерных стеклопакетов в пластиковых переплетах. Покрытие, перекрытия теплового чердака и над техподпольем имеют эффективный утеплитель.

Рассмотрены следующие варианты расчета: 1 — без учета краевых зон (базовый); 2 — с учетом краевых зон.

Расчетные параметры: температура внутреннего воздуха $t_{int} = 20$ °С, температура наружного воздуха $t_{ext} = -25$ °С.

Разобьем оболочку здания на шесть ограждающих конструкций: наружные стены, окна и балконные двери, входные двери, совмещенное покрытие, перекрытие теплового чердака, перекрытие над техподпольем. Определим приведенное сопротивление теплопередаче указанных ограждающих конструкций.

В качестве характерного многократно повторяющегося фрагмента здания выделим типовой этаж и определим приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен в пределах выделенного фрагмента. Проектное значение сопротивления теплопередаче по глади наружной стены

$$R_{h1}^{con} = 4,06 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

Таблица 7.5.

**Коэффициенты влияния и площади зоны влияния
для краевых зон наружной стены**

Краевая зона	Коэффициент влияния	Площадь зоны влияния, м ²	
		для единичного включения	для всего выделенного фрагмента
Угол наружных стен (12 шт.)	0,309	1,43	17,2
Сопряжение наружных стен с внутренними стенами (28 шт.)	0,336	1,43	40
Сопряжение наружных стен с междуэтажным перекрытием (220 м)	0,42	0,51	112
Оконный откос (31 окно)	0,196	4,18	130
Теплопроводные включения (122 шт.)	0,336	3,19	389

Для расчета по второму варианту в наружной стене выделим следующие краевые зоны: углы наружных стен, сопряжения наружных стен с внутренними, сопряжения наружных стен с междуэтажными перекрытиями, оконные откосы, теплопроводные включения в виде ребер жесткости колодцевой кладки. Коэффициенты влияния и площади зоны влияния для указанных краевых зон наружной стены определены на основе расчета температурно-влажностного режима по температурному полю и приведены в таблице 7.5.

По проекту площадь наружных стен $A_1 = 253 \text{ м}^2$. На основе указанных данных по формуле (7.8) определим приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены с учетом краевых зон $R_{hl}^{des} = 2,16 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Аналогично рассчитаны значения приведенного сопротивления теплопередаче других ограждающих конструкций оболочки здания. Результаты расчета приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

**Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций
оболочки здания**

Ограждающая конструкция	Площадь, м ²	Сопротивление теплопередаче, м ² ·°C/Вт	
		по базовому варианту	с учетом краевых зон
Наружные стены	4494	4,06	2,16
Окна, балконные двери	1576	0,68	0,59
Входные двери	55	0,78	0,78
Покрытие совмещенное	412	4,22	3,38
Перекрытие теплого чердака	381	3,68	2,94
Перекрытие над техподпольем	793	3,68	2,94

По формуле (7.12) на основе данных табл. 7.6 определим сопротивление теплопередаче оболочки здания R_{he}^{des} , м²·°C/Вт: по базовому варианту — 1,97; с учетом краевых зон — 1,44. Снижение приведенного сопротивления теплопередаче оболочки здания по сравнению с базовым вариантом составляет 26,9 %. Таким образом, учет краевых зон в ограждающих конструкциях позволяет более точно оценить теплозащитные свойства оболочки здания.

8. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЕЕ ПОВЫШЕНИЕ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПOTЕРЬ В КРАЕВЫХ ЗОНАХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЯ

Показаны пути повышения энергоэффективности за счет снижения теплопотерь через оболочку здания.

8.1. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Для оценки энергоэффективности здания удобно использовать комплексный показатель — удельный расход энергии q , МДж/(м³·год), на эксплуатацию здания за отопительный период, определяемый на основе отапливаемого объема по формуле:

$$q = q_h + q_{hw} + q_e, \quad (8.1)$$

где q_h — удельный расход тепловой энергии на отопление; q_{hw} — удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение; q_e — удельный расход электрической энергии.

Обоснование определения удельного расхода тепловой энергии на отопление здания для оценки его энергоэффективности на основе отапливаемого объема приведено в прил. 3 диссертации.

Ниже приведена методика расчета составляющих энергетического баланса здания.

8.1.1. Энергозатраты на отопление

Удельный расход тепловой энергии на отопление q_h определяют на основе теплового баланса здания за отопительный период по формуле:

$$q_h = q_{tr} + q_a - \eta(q_{int} + q_s), \quad (8.2)$$

где q_{tr} — удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания; q_a — удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации

воздуха; q_{int} — удельные внутренние бытовые тепловыделения; q_s — удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации; $\eta \leq 1$ — коэффициент использования суммарных тепlopоступлений в здание.

8.1.1.1. Трансмиссионные тепlopотери через оболочку здания

Рассмотрим произвольную ограждающую конструкцию наружной оболочки здания. Пусть эта конструкция содержит l краевых зон ($l \geq 1$). Общие трансмиссионные тепlopотери Q_T через рассматриваемую конструкцию за отопительный период складываются из основных тепlopотерь Q_T^{bas} по глади и добавочных тепlopотерь через все краевые зоны ограждения:

$$Q_T = Q_T^{bas} + \sum_{j=1}^l Q_{Tj}^{ad}, \quad (8.3)$$

где Q_{Tj}^{ad} — добавочные тепlopотери через j -ю краевую зону ограждения.

Из формулы (8.3) следует, что общие трансмиссионные тепlopотери можно снизить за счет уменьшения как основных тепlopотерь по глади, так и добавочных тепlopотерь через краевые зоны ограждения.

Основные тепlopотери по глади конструкции определяются по формуле:

$$Q_T^{bas} = \frac{0,0864 M_{ht} A}{R_h^{con}}, \quad (8.4)$$

где 0,0864 — размерный коэффициент, МДж/(Вт·сут); M_{ht} — градусо-сутки отопительного периода, определяемые по формуле:

$$M_{ht} = (t_{int} - t_{ht}) z_{ht}, \quad (8.5)$$

где t_{int} — температура внутреннего воздуха; t_{ht} — средняя температура наружного воздуха за отопительный период; z_{ht} — продолжительность отопительного периода; A — площадь ограждения по внутренним раз-

мерам; R_h^{con} — сопротивление теплопередаче по глади конструкции (с учетом положения конструкции относительно наружного воздуха).

Для расчета добавочных теплопотерь через j -ю краевую зону ограждения используем площадь зоны влияния A_j^{ez} и коэффициент влияния k_j^{ez} краевой зоны (п. 7.1 диссертации), определяемые по температурному полю. Температурное поле, необходимое для определения этих параметров, может быть получено на основе решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагопереноса (глава 5 диссертации).

С учетом определения параметров A_j^{ez} и k_j^{ez} добавочные теплопотери через j -ю краевую зону конструкции определяются по формуле:

$$Q_{Tj}^{ad} = \frac{0,0864 M_{ht} k_j^{ez} A_j^{ez}}{R_h^{con}}. \quad (8.6)$$

Для практических расчетов целесообразно использовать формулу:

$$Q_{Tj}^{ad} = \frac{0,0864 M_{ht} \psi_j A}{R_h^{con}}, \quad (8.7)$$

где $\psi_j = k_j^{ez} A_j^{ez} / A$ — коэффициент добавочных теплопотерь через j -ю краевую зону.

После подстановки (8.4) и (8.7) в (8.3) получим формулу для расчета общих трансмиссионных теплопотерь через ограждающую конструкцию за отопительный период:

$$Q_T = \frac{0,0864 M_{ht} A}{R_h^{con}} \left(1 + \sum_{j=1}^l \psi_j \right). \quad (8.8)$$

Формула (8.8) позволяет рассчитать общие теплопотери ограждения с учетом краевых зон и оценить вклад каждой краевой зоны в теплопотери.

Для оболочки здания, состоящей из m ограждающих конструкций ($m \geq 1$), удельные трансмиссионные теплопотери q_{tr} определяют по формуле:

$$q_{tr} = \frac{1}{V_h} \sum_{i=1}^m Q_{Ti}, \quad (8.9)$$

где V_h — отапливаемый объем здания; Q_{Ti} — общие трансмиссионные теплотери через i -ю конструкцию.

Расчет трансмиссионных теплотерь через ограждающие конструкции оболочки здания иллюстрируется примером.

Жилое многоквартирное здание имеет квадратную форму в плане с размерами в осях $27,6 \times 27,6$ м. Количество этажей 17. Пункт строительства — Волгоград. Конструктивная схема здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены кирпичные трехслойные с эффективным утеплителем и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери — в виде двухкамерных стеклопакетов в деревянных переплетах. Покрытие и перекрытие над техподпольем имеют эффективный утеплитель.

В качестве характерного многократно повторяющегося фрагмента здания выделим типовой этаж и определим трансмиссионные теплотери через наружную стену выделенного фрагмента с учетом краевых зон. Расчет выполнен при следующих исходных данных: $t_{int} = 20$ °C; $t_{ht} = -2,4$ °C; $z_{ht} = 177$ сут/год; $R_h^{con} = 4,06$ м²·°C/Вт; $A = 253$ м². По формуле (8.5) $M_{ht} = 3965$ °C·сут/год.

В наружной стене выделим следующие краевые зоны: углы; сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями; оконные откосы; теплопроводные включения. Рассмотрим различные варианты конструктивного решения краевых зон.

Первый вариант: углы, сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями без теплоизоляционных вкладышей; оконные откосы с узкой коробкой; теплопроводные включения в виде ребер жесткости колодцевой кладки.

Второй вариант: углы, сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями с теплоизоляционными вкладышами; оконные откосы с широкой коробкой; теплопроводные включения в виде пластмассовых малотеплопроводных коннекторов.

Площадь зоны влияния A_j^{ez} и коэффициент влияния k_j^{ez} для указанных вариантов краевых зон определим по температурному полю на основе расчета температурно-влажностного режима. Результаты расчета представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Значения k_j^{ez} , A_j^{ez} и ψ_j для краевых зон наружной стены

Краевая зона	Значения k_j^{ez} , A_j^{ez} и ψ_j по вариантам					
	1			2		
	k_j^{ez}	A_j^{ez} , м ²	ψ_j	k_j^{ez}	A_j^{ez} , м ²	ψ_j
Углы наружной стены	0,309	17,2	0,021	0,221	17,2	0,015
Сопряжения наружной стены с внутренними стенами	0,336	40	0,0531	0,1	40	0,0158
Сопряжения наружной стены с междуэтажными перекрытиями	0,42	112	0,186	0,336	112	0,149
Оконные откосы	0,196	130	0,101	0,03	130	0,0154
Теплопроводные включения	0,336	389	0,517	0,05	263	0,052

Из таблицы видно, что значения ψ_j по второму варианту меньше по сравнению с первым для всех краевых зон. Наибольший вклад в добавочные теплотери по первому варианту дают теплопроводные включения ($\psi_j = 0,517$).

Полученные данные использованы для расчета трансмиссионных теплотерь через наружную стену за отопительный период (табл. 8.2).

Таблица 8.2

**Общие трансмиссионные теплопотери, МДж/год, через наружную стену
за отопительный период**

Наименование показателя	Значение показателя по вариантам	
	1	2
Основные теплопотери	21337	21337
Добавочные теплопотери	18754	5268
в том числе через:		
углы наружной стены	449	320
сопряжения наружной стены с внутренними стенами	1133	338
сопряжения наружной стены с междуэтажными перекрытиями	3973	3173
оконные откосы	2157	328
теплопроводные включения	11042	1109
Общие теплопотери	40091	26605

Общие трансмиссионные теплопотери, отнесенные к 1 м² наружной стены, равны: по первому варианту — 158 МДж/(м²·год); по второму варианту — 105 МДж/(м²·год).

На основании данных табл. 8.2 определена структура теплопотерь через наружную стену для рассматриваемых вариантов краевых зон (рис. 8.1).

Из рис. 8.1 видно, что краевые зоны оказывают существенное влияние на теплопотери наружной стены (47 % общих теплопотерь по первому варианту) и, следовательно, должны учитываться при проектировании. При этом максимальный вклад в добавочные теплопотери по первому варианту дают теплопроводные включения (59 %), а значит, снизить общие теплопотери в первую очередь можно за счет совершенствования конструктивного решения теплопроводных включений, например, путем замены ребер жесткости колодцевой кладки на малотеп-

лопроводные коннекторы. Дальнейшее снижение теплопотерь достигается применением теплоизоляционных вкладышей в углах, сопряжениях наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями, а также заменой оконных откосов с узкой коробкой на широкую (второй вариант). Указанные мероприятия позволяют снизить общие трансмиссионные теплопотери через наружную стену на 34 % и повысить энергоэффективность здания.

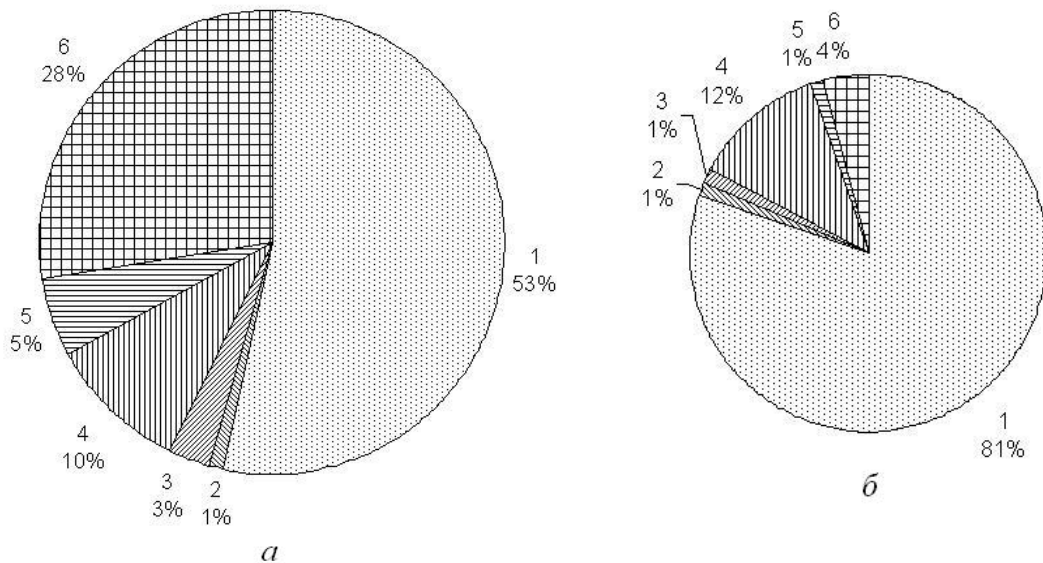


Рис. 8.1. Теплопотери через наружную стену за отопительный период (*а* — по первому варианту, *б* — по второму варианту): 1 — основные; 2 — через углы; 3 — через сопряжения наружной стены с внутренними стенами; 4 — через сопряжения наружной стены с междуэтажными перекрытиями; 5 — через оконные откосы; 6 — через теплопроводные включения

В качестве характерного элемента светопрозрачного ограждения, широко применяемого в практике строительства, рассмотрим оконный блок. Выделим в оконном блоке термически однородные части — светопропускающую (стеклопакеты) и непрозрачную (коробка и створки в сборе). Основные теплопотери по глади оконного блока складываются из теплопотерь через светопропускающую и непрозрачную части, определяемых по формуле (8.4). Для определения добавочных теплопотерь в

оконном блоке выделим следующие краевые зоны: сопряжение стеклопакета со створкой (с учетом дистанционной рамки стеклопакета — спейсера); сопряжение коробки с наружной стеной.

Результаты расчета представлены в табл. 8.3. Данные таблицы получены при следующих условиях: расстояние между стеклами стеклопакета 16 мм; стеклопакет заполнен воздухом; в стеклопакетах использованы металлические дистанционные рамки; коробка и створки оконного блока выполнены из деревянных профилей, толщина узкой коробки 80 мм, широкой — 160 мм; наружная стена — в виде кладки керамического пустотелого камня.

Таблица 8.3

Значения k_j^{ez} и A_j^{ez} для краевых зон различных вариантов конструктивного решения элементов оконного блока

Наименование краевой зоны	Варианты конструктивного решения элементов оконного блока	k_j^{ez}	A_j^{ez}
Сопряжение стеклопакета со створкой	Однокамерный стеклопакет из обычного стекла	0,7	0,024
	То же, из стекла с селективным покрытием	0,75	0,024
	Двухкамерный стеклопакет из обычного стекла	0,45	0,044
	То же, из стекла с селективным покрытием	0,5	0,044
Сопряжение коробки с наружной стеной	Оконный блок с узкой коробкой	0,3	0,08
	То же, с широкой коробкой	0,07	0,16

Пр и м е ч а н и е. В таблице значения A_j^{ez} отнесены к длине профиля ($\text{м}^2/\text{м}$).

Светопропускающая часть оконного блока размером $2,25 \times 1,5$ м выполнена в виде двухкамерных стеклопакетов из стекла с селективным покрытием, непрозрачная часть — в виде коробки и створок в сборе из деревянных профилей. Площадь оконного блока $3,38 \text{ м}^2$, коэффициент остекления 0,75.

Рассмотрим следующие варианты конструктивного решения оконного блока: 1 — с узкой коробкой; 2 — с широкой коробкой. Сопротивление теплопередаче по глади светопропускающей части ($0,71 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$) принято по данным измерений в климатической камере [188]. Сопротивление теплопередаче непрозрачной части ($0,6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ по первому варианту и $1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ по второму варианту) принято по справочным данным. При указанных выше значениях рассчитаны основные теплопотери через оконный блок. Используя данные табл. 8.3, определим коэффициент добавочных теплопотерь для рассматриваемых вариантов конструктивного решения оконного блока: для сопряжения стеклопакета со створкой $\psi_1 = 0,098$ по обоим вариантам; для сопряжения коробки с наружной стеной $\psi_2 = 0,053$ (по первому варианту) и $\psi_2 = 0,025$ (по второму варианту). На основе полученных данных рассчитаны добавочные теплопотери через оконный блок. Результаты расчета теплопотерь через оконный блок приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

**Общие трансмиссионные теплопотери, МДж/год,
за отопительный период для различных вариантов оконного блока**

Наименование показателя	Значение показателя по вариантам	
	1	2
Основные теплопотери	1707	1514
в том числе через:		
светопропускающую часть	1224	1225
непрозрачную часть	483	289
Добавочные теплопотери	257	186
в том числе через:		
сопряжение стеклопакета со створкой	167	148
сопряжение коробки с наружной стеной	90	38
Общие теплопотери	1964	1700

Общие трансмиссионные теплопотери, отнесенные к 1 м^2 оконного блока, равны: по первому варианту — $581 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; по второму варианту — $503 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

На основании данных табл. 8.4 определена структура теплопотерь для рассматриваемых вариантов конструктивного решения оконного блока (рис. 8.2).

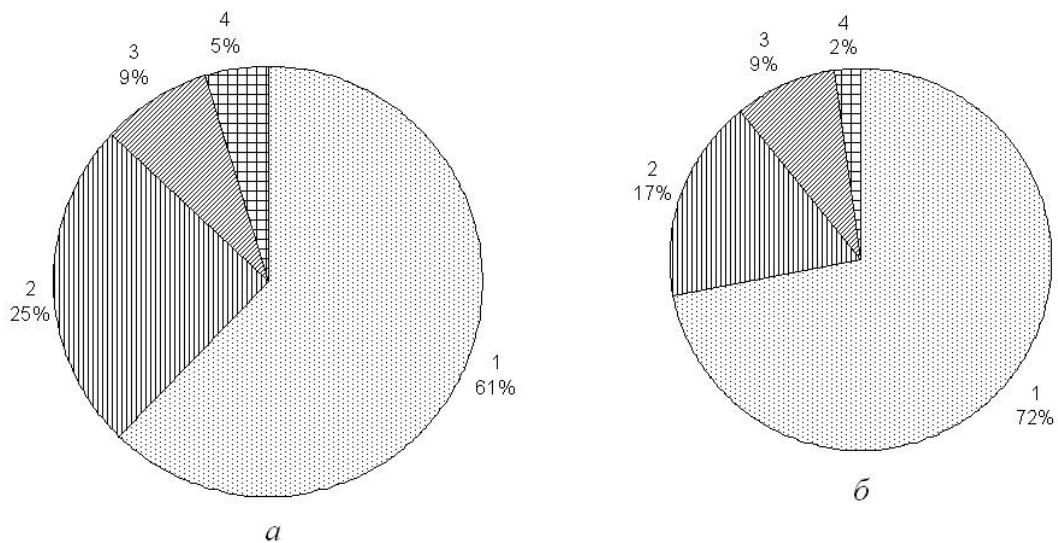


Рис. 8.2. Теплопотери через оконный блок за отопительный период (*а* — по первому варианту, *б* — по второму варианту): 1 — светопропускающая часть; 2 — непрозрачная часть; 3 — сопряжение стеклопакета со створкой; 4 — сопряжение коробки с наружной стеной

Из рисунка видно, что краевые зоны оказывают существенное влияние на общие теплопотери оконного блока (14 % по первому варианту и 11 % по второму) и, следовательно, должны учитываться при проектировании. Совершенствование конструктивного решения оконного блока путем замены узкой коробки на широкую позволяет снизить как основные, так и добавочные теплопотери. При этом общие трансмиссионные теплопотери через оконный блок за отопительный период снижаются на 13 %. Кроме того, применение оконного блока с широкой коробкой позволяет

улучшить температурно-влажностный режим наружной стены в зоне сопряжения с оконным блоком (п. 7.2.2 диссертации).

Сравнивая удельные трансмиссионные теплопотери через вышерассмотренные ограждающие конструкции, можно отметить значительно большие теплопотери через оконный блок. Это определяет повышенное внимание к проектированию светопрозрачных ограждающих конструкций оболочки здания.

8.1.1.2. Теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха q_a определяют по формуле:

$$q_a = 0,024 c_a \rho_a u_{ht} k_V M_{ht}, \quad (8.10)$$

где c_a — удельная теплоемкость воздуха [$c_a = 1$ кДж/(кг·°C)]; ρ_a — плотность воздуха ($\rho_a = 1,3$ кг/м³); u_{ht} — средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, определяемая по формуле:

$$u_{ht} = k_R k_{ven} u_{ven} + (1 - k_{ven}) u_{inf}, \quad (8.11)$$

где $k_R \leq 1$ — коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла; k_{ven} — коэффициент использования вентиляции; u_{ven} — средняя кратность воздухообмена в рабочее время; u_{inf} — средняя кратность воздухообмена в нерабочее время; k_V — коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций ($k_V = 0,85$); M_{ht} — градусосутки отопительного периода, определяемые по формуле (8.5).

В формуле (8.11) средняя кратность воздухообмена u_{ven} в рабочее время определяется по формуле:

$$u_{ven} = \frac{g_a A_f}{k_V V_h}, \quad (8.12)$$

где g_a — удельный расход воздуха при вентиляции; A_f — площадь (для жилых зданий — площадь жилых помещений, для общественных зданий — расчетная площадь).

Значения удельного расхода воздуха при вентиляции для зданий различного функционального назначения приведены в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Удельный расход воздуха при вентиляции (по СНиП 23–02–2003)

Здания	Удельный расход воздуха g_a , м ³ /(ч·м ²)
Жилые	3
Общественные и административные:	
офисы и объекты сервисного обслуживания	4
учреждения здравоохранения и образования	5
спортивные, зрелищные и детские дошкольные учреждения	6

Среднюю кратность воздухообмена u_{inf} в нерабочее время допускается принимать 0,2 ч⁻¹.

8.1.1.3. Внутренние бытовые тепловыделения

Удельные внутренние бытовые тепловыделения q_{int} определяют по формуле:

$$q_{int} = \frac{0,0864 q_{int}^f A_f z_{ht}}{V_h}, \quad (8.13)$$

где q_{int}^f — удельная мощность бытовых тепловыделений, определяемая по формуле:

$$q_{int}^f = \frac{1}{A_f} \sum_{i=1}^n k_i^{int} Q_i^{int}, \quad (8.14)$$

где n — число источников тепловыделений; k_i^{int} — коэффициент использования тепловыделений i -го источника; Q_i^{int} — мощность тепловыделений i -го источника.

Бытовые тепловыделения ряда источников приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Бытовые тепловыделения источников

Источник	Ед. изм.	Значение показателя
Человек в покое [172]:		
лежа	Вт/чел	80
сидя	то же	85...90
стоя	«	100
Условное деление степени тяжести работы [189]:		
незначительная	Вт/чел	100
легкая	то же	150
средней тяжести	«	200
тяжелая	«	более 250
Искусственное освещение	Вт/м ²	по установочной мощности (СНиП 23–05–95*)
Оргтехника	то же	10 (СНиП 23–02–2003)

Для жилых зданий согласно СНиП 23–02–2003 можно принять $q_{int}^f = 10...17$ Вт/м². Для общественных и административных зданий бытовые тепловыделения определяются по расчетному числу людей в здании, установочной мощности искусственного освещения и оргтехники.

8.1.1.4. Теплопоступления за счет солнечной радиации

Удельные теплопоступления за счет солнечной радиации определяются по формуле:

$$q_s = \frac{Q_s}{V_h}, \quad (8.15)$$

где Q_s — общие тепlopоступления от солнечной радиации, определяемые по формуле:

$$Q_s = \sum_{i=1}^g \tau_i^{ver} I_i^{ver} A_i^{ver} + \tau^{hor} I^{hor} A^{hor}, \quad (8.16)$$

где g — число вертикальных поверхностей различной ориентации; τ_i^{ver} , τ^{hor} — соответственно общий коэффициент пропускания солнечной радиации вертикальной и горизонтальной светопрозрачными конструкциями (СП 23–101–2004); I_i^{ver} , I^{hor} — соответственно суммарная солнечная радиация при средних условиях облачности за отопительный период на вертикальную и горизонтальную поверхности; A_i^{ver} , A^{hor} — соответственно площадь вертикальной и горизонтальной поверхностей.

Методика расчета суммарной солнечной радиации при средних условиях облачности за отопительный период на вертикальную и горизонтальную поверхности, разработанная автором, приведена в прил. 4 диссертации. Результаты расчета солнечной радиации для Волгограда при различной продолжительности отопительного периода приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Суммарная солнечная радиация за отопительный период для Волгограда

Базовая температура $t_{bas}, ^\circ\text{C}$	Суммарная солнечная радиация, МДж/м ² , за отопительный период на поверхности								
	горизонтальную	вертикальные с ориентацией на							
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
8	1087	509	542	758	1101	1311	1122	775	544
10	1241	560	604	850	1223	1445	1243	867	606
12	1422	618	677	958	1360	1593	1377	972	678

8.1.2. Энергозатраты на горячее водоснабжение

Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение здания q_{hw} определяют по формуле:

$$q_{hw} = \frac{10^{-3} k_{hw} c_w \rho_w q_{hwo} N_{hw} (t_{hw} - t_{cw}) z_{ht}}{V_h}, \quad (8.17)$$

где $k_{hw} \leq 1$ — коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения; c_w — удельная теплоемкость воды [$c_w = 4,17$ кДж/(кг·°C)]; ρ_w — плотность воды ($\rho_w = 1$ кг/л); q_{hwo} — норма расхода горячей воды в средние сутки (СНиП 2.04.01–85*); N_{hw} — число потребителей горячей воды; t_{hw} , t_{cw} — соответственно температура горячей и холодной воды в отопительный период ($t_{hw} = 55$ °C, $t_{cw} = 5$ °C).

8.1.3. Энергозатраты на электроснабжение

Удельный расход электрической энергии q_e определяют по формуле:

$$q_e = \frac{86,4 k_e q_{eo} N_e z_{ht}}{V_h}, \quad (8.18)$$

где $k_e \leq 1$ — коэффициент использования расчетной электрической нагрузки; q_{eo} — удельная расчетная электрическая нагрузка, принимаемая согласно СП 31–110–2003; N_e — число потребителей электрической энергии.

8.2. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА

«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ (ЭНПАС)»

8.2.1. Описание компьютерной программы «ЭНПАС»

Разработанная в п. 8.1 методика расчета энергетических показателей по зданию за отопительный период реализована в компьютерной программе «Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)». Программа позво-

ляет производить расчет энергозатрат на эксплуатацию здания за отопительный период, включая затраты на отопление, горячее водоснабжение, электроснабжение. Энергозатраты на отопление включают:

- трансмиссионные теплопотери через оболочку здания;
- теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха;
- внутренние бытовые тепловыделения;
- теплопоступления за счет солнечной радиации.

Трансмиссионные теплопотери через оболочку здания определяются с учетом краевых зон в ограждающих конструкциях.

Основными достоинствами разработанной компьютерной программы являются:

- расчет энергопотребления здания с учетом всех его составляющих, включая расходы тепловой и электрической энергии;
- определение структуры трансмиссионных теплопотерь через краевые зоны ограждений, что позволяет совершенствовать проектные решения;
- возможность оценки энергоэффективности здания на стадии проектирования.

Программа написана в системе визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 3–7 для WINDOWS®. Минимальные системные требования: ПК модификации Pentium 3 с установленной системой WINDOWS® 98 ОЗУ 125 Мб, свободное место на жестком диске 2 Мб.

Программа имеет удобный пользовательский интерфейс, основанный на возможностях Delphi. Подготовка исходных данных для расчета наглядна и удобна в применении. Программа имеет модульную структуру, что обеспечивает возможность ее дальнейшего совершенствования.

Разработанная компьютерная программа зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности и включена в состав программно-вычислительного комплекса

«Энергоэффективность и тепловая защита зданий (ЭНТЕЗА)» (прил. 1 диссертации), использованного при проектировании жилых и общественных зданий в Волгограде и Волгоградской области (прил. 2).

Ниже приведены основные экранные формы компьютерной программы «ЭНПАС».

На рис. 8.3 представлено главное меню компьютерной программы.

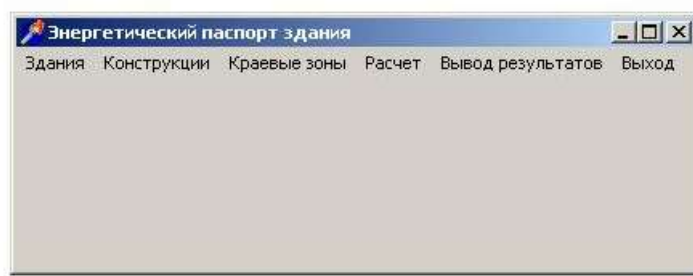


Рис. 8.3. Главное меню компьютерной программы «ЭНПАС»

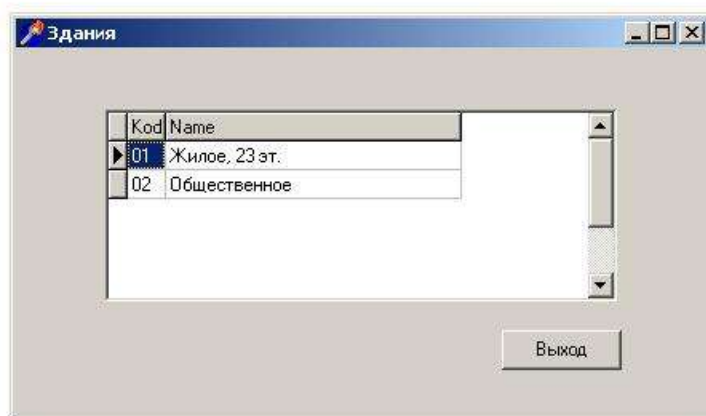


Рис. 8.4. Справочник «Здания»

Пункт главного меню «Здания» предназначен для работы со справочником «Здания» (рис. 8.4), в котором содержится информация о проектируемых объектах. Предусмотрена возможность работы со зданиями различного функционального назначения.

Пункт главного меню «Конструкции» предназначен для работы со справочником «Конструкции» (рис. 8.5). В справочнике содержится информация об ограждающих конструкциях оболочки здания.

Пункт главного меню «Краевые зоны» предназначен для работы со справочником «Краевые зоны» (рис. 8.6), содержащим информацию о краевых зонах ограждающих конструкций.

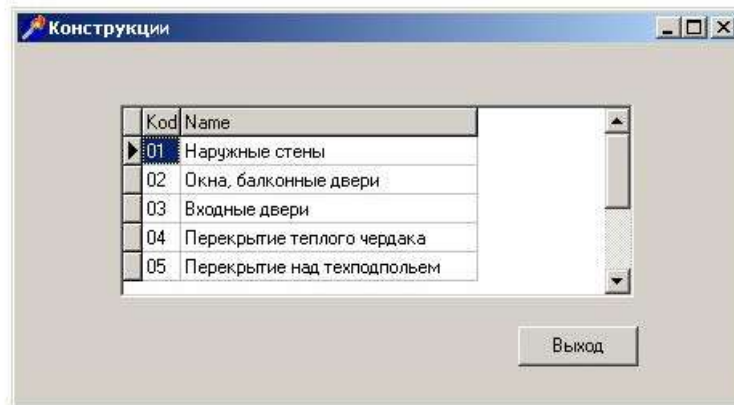


Рис. 8.5. Справочник «Конструкции»

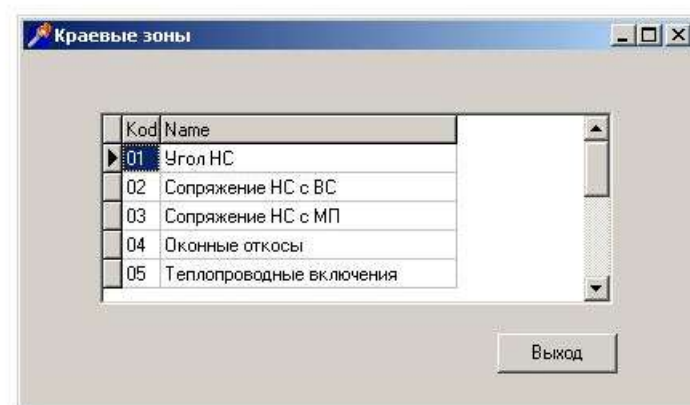


Рис. 8.6. Справочник «Краевые зоны»

Указанные справочники входят в базу данных и используются в расчетах. Предусмотрена стандартная работа со справочниками — ввод, корректировка и удаление данных.

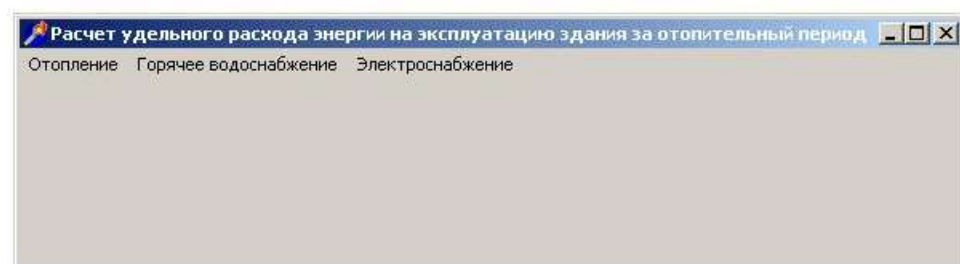


Рис. 8.7. Форма «Расчет»

Пункт главного меню «Расчет» предназначен для расчета удельного расхода энергии на эксплуатацию здания за отопительный период, включая энергозатраты на отопление, горячее водоснабжение и электро-снабжение (рис. 8.7).

Для расчета энергетических показателей используются следующие параметры: расчетная температура внутреннего воздуха; средняя температура наружного воздуха за отопительный период; продолжительность отопительного периода (форма «Характеристики микроклимата здания и отопительного периода»). На основе этих параметров по формуле (8.5) вычисляются градусосутки отопительного периода.

Пункт меню «Отопление» предназначен для расчета удельных затрат тепловой энергии на отопление здания за отопительный период (рис. 8.8). В этой форме задаются различные составляющие теплового баланса здания.

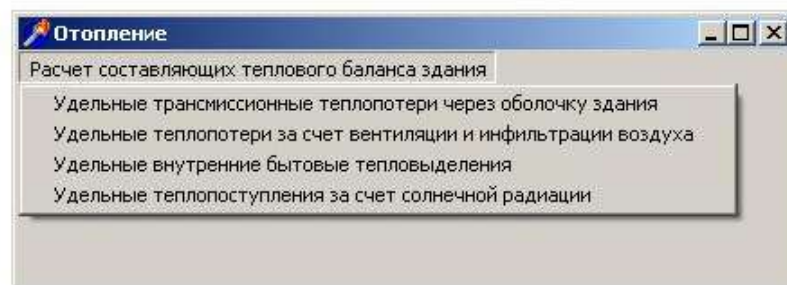


Рис. 8.8. Форма «Отопление»

Для расчета трансмиссионных теплопотерь используются формы «Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания», «Удельные трансмиссионные теплопотери через краевые зоны ограждающих конструкций» и справочники «Здания», «Конструкции», «Краевые зоны».

На основе справочника «Здания» задается проектируемый объект, для которого указывается отапливаемый объем. По справочнику «Конструкции» задаются все ограждающие конструкции оболочки здания. Для каж-

дой конструкции задаются площадь, сопротивление теплопередаче и краевые зоны в этой конструкции (справочник «Краевые зоны»). Для каждой краевой зоны вводится коэффициент добавочных теплопотерь.

Результатом расчета являются: добавочные теплопотери через краевые зоны; основные, добавочные и общие трансмиссионные теплопотери для ограждающих конструкций и оболочки здания.

Для расчета энергозатрат на вентиляцию и инфильтрацию воздуха (форма «Удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха») используются следующие исходные данные: удельная теплоемкость и плотность воздуха; коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла; коэффициент использования вентиляции; средняя кратность воздухообмена в рабочее и нерабочее время; коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций; градусосутки отопительного периода. На основании этих данных по формуле (8.10) рассчитываются удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха.

Расчет внутренних бытовых тепловыделений (форма «Удельные внутренние бытовые тепловыделения») производится по формуле (8.13) при следующих исходных данных: удельная мощность бытовых тепловыделений; площадь пола (площадь жилых помещений или расчетная площадь); продолжительность отопительного периода; отапливаемый объем здания.

Для расчета тепlopоступлений от солнечной радиации (форма «Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации») используются следующие исходные данные: общий коэффициент теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ограждающей конструкции; средняя за отопительный период солнечная радиация при действительных условиях облачности; площадь светопрозрачной ограждающей конструк-

ции; отопливаемый объем. Указанные параметры, за исключением отопливаемого объема, вводятся для горизонтальной и вертикальных (в зависимости от ориентации по сторонам горизонта) светопрозрачных ограждающих конструкций. На основании исходных данных определяются удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации (см. п. 8.1.1.4).

Пункт меню «Горячее водоснабжение» используется для расчета затрат тепловой энергии на горячее водоснабжение здания за отопительный период (форма «Горячее водоснабжение») при следующих исходных данных: коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения; удельная теплоемкость и плотность воды; норма расхода горячей воды в средние сутки; число потребителей горячей воды; температура горячей и холодной воды в отопительный период; продолжительность отопительного периода; отопливаемый объем здания. На основании исходных данных по формуле (8.17) определяется удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение.

Пункт меню «Электроснабжение» используется для расчета затрат энергии на электроснабжение здания за отопительный период (форма «Электроснабжение») при следующих исходных данных: коэффициент использования расчетной электрической нагрузки; удельная расчетная электрическая нагрузка; число потребителей электрической энергии; продолжительность отопительного периода; отопливаемый объем здания. По этим данным определяется удельный расход электрической энергии [формула (8.18)].

Пункт меню «Вывод результатов» используется для вывода результатов расчета на экран или принтер.

Пример заполнения форм приведен в п. 8.2.2.

Принципиальная блок-схема алгоритма расчета энергетических показателей по компьютерной программе «ЭНПАС» представлена на рис. 8.9.



Рис. 8.9. Принципиальная блок-схема алгоритма расчета энергетических показателей по компьютерной программе «ЭНПАС»

8.2.2. Пример расчета по компьютерной программе «ЭНПАС»

Жилое 23-этажное здание имеет круглую форму в плане с силуэтным завершением фасада. Пункт строительства Волгоград. Конструктивная

схема здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены кирпичные трехслойные с эффективным утеплителем и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери — в виде двухкамерных стеклопакетов в деревянных переплетах. Покрытие, перекрытия теплого чердака и над техподпольем имеют эффективный утеплитель. Здание имеет автономное теплоснабжение и естественную вентиляцию.

Требуется определить удельный расход энергии на эксплуатацию здания за отопительный период.

Условно разобьем оболочку здания на ограждающие конструкции: наружные стены, окна и балконные двери, входные двери, перекрытия теплого чердака и над техподпольем.

В указанных ограждающих конструкциях выделим следующие краевые зоны: в наружных стенах — углы, сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями, оконные откосы, теплопроводные включения; в окнах, балконных и входных дверях — сопряжение стеклопакета со створкой (с учетом дистанционной рамки стеклопакета), сопряжение коробки оконного (дверного) блока с наружной стеной; в перекрытиях теплого чердака и над техподпольем — сопряжения перекрытий с наружными стенами.

Параметр	Значение
Расчетная температура внутреннего воздуха t_{int} , °C	21
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период t_{ht} , °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода z_{ht} , сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП) M_{ht} , °C*сут/год	3965


Расчет Далее Выход




Рис. 8.10. Форма «Характеристики микроклимата здания и отопительного периода»

Код		Наименование	Отапливаемый объем V _н , м³	GСOP Min, оC°·сут/год
Здание	01	Жилое, 23 эт.	69221	3965

	Код	Наименование	Площадь A, м²	Сопротивление теплопередаче R _{hcon} , м²·oC/Вт	Удельные трансмис. теплопотери, МДж/(м³·год)		
					основные	дополнительные	общие
Ограждающие конструкции	01	Наружные стены	7300	4.06	8.90	7.82	16.72
	02	Окна, балконные двери	2276	0.68	16.56	2.50	19.06
	03	Входные двери	48	0.78	0.30	0.05	0.35
	04	Перекрытие теплого чердака	912	3.68	1.23	0.31	1.54
	05	Перекрытие над техподпольем	912	3.68	1.23	0.31	1.54
ИТОГО			11448		28.22	10.99	39.21

Рис. 8.11. Форма «Удельные трансмиссионные теплотери через оболочку здания»


Удельные трансмиссионные теплопотери через краевые зоны ограждения

Ограждающая конструкция

Код

Наименование

№ конструкции

Коэффициент добавочных теплопотерь

Добавочные теплопотери

Краевые зоны

Код

Наименование

01	Наружные стены	1	
01	Угол НС	0.021	0.19
02	Сопряжение НС с ВС	0.0531	0.47
03	Сопряжение НС с МП	0.186	1.66
04	Оконные откосы	0.101	0.90
05	Теплопроводные включения	0.517	4.60

Удельные трансмиссионные теплопотери через ограждающую конструкцию, МДж/(м³·год):

основные

8.90

добавочные

7.82

общие

16.72

Расчет

Далее

Рис. 8.12. Форма «Удельные трансмиссионные теплотери через краевые зоны ограждения»

По проекту отапливаемый объем здания $V_h = 69221 \text{ м}^3$, площадь жилых помещений $A_f = 6035 \text{ м}^2$.

Характеристики микроклимата здания и отопительного периода приведены в форме на рис. 8.10.

Расчет энергозатрат на отопление здания выполнен по методике п. 8.1.1.

Для расчета основных трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания (рис. 8.11) приняты значения площади и сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций (по глади) в соответствии с проектом.

Для расчета добавочных трансмиссионных теплопотерь (рис. 8.12) определены коэффициенты добавочных теплопотерь через краевые зоны:

наружных стен (углы — $\psi_{11} = 0,021$; сопряжения наружных стен с внутренними стенами — $\psi_{12} = 0,0531$; сопряжения наружных стен с междуэтажными перекрытиями — $\psi_{13} = 0,186$; оконные откосы — $\psi_{14} = 0,101$; теплопроводные включения — $\psi_{15} = 0,517$);

окон, балконных дверей (сопряжения стеклопакета со створкой — $\psi_{21} = 0,098$; сопряжения коробки с наружной стеной — $\psi_{22} = 0,053$);

входных дверей (сопряжения стеклопакета со створкой — $\psi_{31} = 0,098$; сопряжения коробки с наружной стеной — $\psi_{32} = 0,053$);

перекрытий теплого чердака (сопряжения перекрытий с наружными стенами — $\psi_{41} = 0,252$);

перекрытий над техподпольем (сопряжения перекрытий с наружными стенами — $\psi_{51} = 0,252$).

Расчет энергозатрат на вентиляцию и инфильтрацию воздуха выполнен при исходных данных, представленных в форме на рис 8.13.

Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Удельная теплоемкость воздуха c_a , кДж/(кг·°C)

Плотность воздуха ρ_a , кг/м³

Коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла, k_R

Коэффициент использования вентиляции k_{ven}

Средняя кратность воздухообмена в рабочее время n_{ven} , 1/ч

Средняя кратность воздухообмена в нерабочее время n_{inf} , 1/ч

Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций, k_v

Градусосутки отопительного периода Mht , °C·сут/год

Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха q_a , МДж/(м³·год)

Рис. 8.13. Форма «Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха»

Удельные внутренние бытовые тепловыделения

Удельная мощность бытовых тепловыделений q_{int} , Вт/м²

Площадь пола A , м²

Продолжительность отопительного периода zht , сут/год

Отапливаемый объем здания V_h , м³

Удельные внутренние бытовые тепловыделения q_{int} , МДж/(м³·год)

Рис. 8.14. Форма «Удельные внутренние бытовые тепловыделения»

Удельные теплопоступления за счет солнечной радиации

Ориентация светопрозрачной ограждающей конструкции по сторонам горизонта

	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Гор.
Общий коэффициент теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ограждающей конструкции k_F	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>	<input type="text" value="0.54"/>
Средняя за отопительный период солнечная радиация I , МДж/(м ² ·год), при действительных условиях облачности	<input type="text" value="509"/>	<input type="text" value="542"/>	<input type="text" value="758"/>	<input type="text" value="1101"/>	<input type="text" value="1311"/>	<input type="text" value="1122"/>	<input type="text" value="775"/>	<input type="text" value="544"/>	<input type="text" value="1087"/>
Площадь светопрозрачной ограждающей конструкции A_F , м ²	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="288"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="284"/>	<input type="text" value="0"/>
Отапливаемый объем V_h , м ³	<input type="text" value="69221"/>								
Удельные теплопоступления за счет солнечной радиации q_s , МДж/(м ³ ·год)	<input type="text" value="14.8"/>								

Рис. 8.15. Форма «Удельные теплопоступления за счет солнечной радиации»

Расчет внутренних бытовых тепловыделений выполнен при исходных данных, представленных в форме на рис. 8.14.

Расчет тепlopоступлений за счет солнечной радиации выполнен при исходных данных, представленных в форме на рис. 8.15.

Для расчета энергозатрат на горячее водоснабжение использованы исходные данные, приведенные в форме на рис. 8.16.

Параметр	Значение
Коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения k_{hw}	1
Удельная теплоемкость воды c_w , кДж/(кг·°C)	4.17
Плотность воды ρ_w , кг/л	1
Норма расхода горячей воды в средние сутки q_{hw0} , л/(сут·ед. изм.)	115
Число потребителей горячей воды N_{hw} , ед. изм.	240
Температура горячей воды в отопительный период t_{hw} , °C	55
Температура холодной воды в отопительный период t_{cw} , °C	5
Продолжительность отопительного периода z_{ht} , сут/год	177
Отапливаемый объем здания V_h , м³	69221
Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение q_{hw} , МДж/(м³·год)	14.7

Кнопки: Расчет, Выход

Рис. 8.16. Форма «Горячее водоснабжение»

Параметр	Значение
Коэффициент использования расчетной электрической нагрузки k_e	0.7
Удельная расчетная электрическая нагрузка q_{eo} , кВт/(ед. изм.)	1
Число потребителей электрической энергии N_e , ед. изм.	240
Продолжительность отопительного периода z_{ht} , сут/год	177
Отапливаемый объем здания V_h , м³	69221
Удельный расход электрической энергии q_e , МДж/(м³·год)	37.1

Кнопки: Расчет, Выход

Рис. 8.17. Форма «Электроснабжение»

Для расчета энергозатрат на электроснабжение использованы исходные данные, представленные на рис. 8.17.

Результаты расчета энергетических показателей по зданию за отопительный период, полученные по компьютерной программе «ЭНПАС» на основании указанных данных, представлены ниже в виде фрагмента выходной формы, выведенной на экран (рис. 8.18), и полной выходной формы.

Вывод результатов

Вывод на экран Вывод на печать Выход

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ

Здание Жилое, 23 эт.
Отапливаемый объем V_h , м³ 69221

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Расчетная температура внутреннего воздуха	tint, °C	20
Средняя температура наружного воздуха за отопит. период	tht, °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода	zht, сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП)	Mht, °C*сут/год	3965

Рис. 8.18. Фрагмент выходной формы «Вывод результатов»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ

Здание Жилое, 23 эт.
Отапливаемый объем V_h , м³ 69221

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Расчетная температура внутреннего воздуха	tint, °C	20
Средняя температура наружного воздуха за отопит. период	tht, °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода	zht, сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП)	Mht, °C*сут/год	3965

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД
ОТОПЛЕНИЕ

Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания, МДж/(м³*год)

Ограждающие конструкции	Площадь А, м ²	Сопротивление теплопередаче R _{hcon} , м ² *°C/Вт	Удельные трансмиссионные теплопотери		
			основные	добавочные	общие
Наружные стены	7300	4.06	8.90	7.82	16.72
Окна, балконные двери	2276	0.68	16.56	2.50	19.06
Входные двери	48	0.78	0.30	0.05	0.35
Перекрытие теплого чердака	912	3.68	1.23	0.31	1.54
Перекрытие над техподпольем	912	3.68	1.23	0.31	1.54
Итого	11448		28.22	10.99	39.21
Добавочные теплопотери по краевым зонам, МДж/(м ³ *год)					

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент доб.теплопотерь	Добавочные теплопотери
Наружные стены	Угол НС	0.021	0.19
Наружные стены	Сопряжение НС с ВС	0.0531	0.47
Наружные стены	Сопряжение НС с МП	0.186	1.66
Наружные стены	Оконные откосы	0.101	0.90
Наружные стены	Теплопроводные включения	0.517	4.60
Окна, балконные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.098	1.62
Окна, балконные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.053	0.88
Входные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.098	0.03
Входные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.053	0.02
Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с НС	0.252	0.31
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с НС	0.252	0.31

Удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная теплоемкость воздуха	са, кДж/(кг*°C)	1
Плотность воздуха	га, кг/м ³	1.3
Коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла	kR	1
Коэффициент использования вентиляции	kven	1
Средняя кратность воздухообмена в рабочее время	uven, 1/ч	0.308
Средняя кратность воздухообмена в нерабочее время	uinf, 1/ч	0.2
Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций	kv	0.85
Удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	qa, МДж/(м ³ *год)	32.4

Удельные внутренние бытовые тепловыделения

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная мощность бытовых тепловыделений	q _{int} , Вт/м ²	10
Площадь пола	A, м ²	6035
Удельные внутренние бытовые тепловыделения	q _{int} , МДж/(м ³ *год)	13.3

Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя									
		C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Гор.	
Общий коэф. теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ОК	tF	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Средняя за отопительный период солнечная радиация при действительных условиях облачности	I, МДж/(м ² *год)	509	542	758	1101	1311	1122	775	544	1087	
Площадь светопрозрачной ОК	AF, м ²	284	284	284	284	288	284	284	284	0	
Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации	q _s , МДж/(м ³ *год)					14.8					

Удельный расход тепловой энергии на отопление q_h, МДж/(м³*год) 43.51

ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения	k _{hw}	1
Удельная теплоемкость воды	c _w , кДж/(кг*oC)	4.17
Плотность воды	ρ _w , кг/л	1
Норма расхода горячей воды в средние сутки	q _{hwo} , л/(сут*ед.изм.)	115
Число потребителей горячей воды	N _{hw} , ед.изм.	240
Температура горячей воды в отопительный период	t _{hw} , oC	55
Температура холодной воды в отопительный период	t _{cw} , oC	5
Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	q _{hw} , МДж/(м ³ *год)	14.7

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной электрической нагрузки	k _e	0.7
Удельная расчетная электрическая нагрузка	q _{eo} , кВт/(ед. изм.)	1

Число потребителей электрической энергии	Ne, ед. изм.	240
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м ³ *год)	37.1

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ
ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельный расход тепловой энергии, в том числе:	qhe, МДж/(м ³ *год)	58.21
на отопление	qh, МДж/(м ³ *год)	43.51
на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м ³ *год)	14.70
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м ³ *год)	37.10
Удельный расход энергии на эксплуатацию здания	q, МДж/(м ³ *год)	95.31

Структура трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания приведена на рис. 8.19. Из рисунка видно, что в основном теплопотери происходят через ограждения фасадов зданий (91 % общих трансмиссионных теплопотерь), при этом большую часть составляют теплопотери через окна и балконные двери (48 %). Теплопотери через наружные стены сопоставимы с теплопотерями через светопрозрачные ограждения (43 %). Следовательно, в первую очередь необходимо снижать трансмиссионные теплопотери через фасады здания.

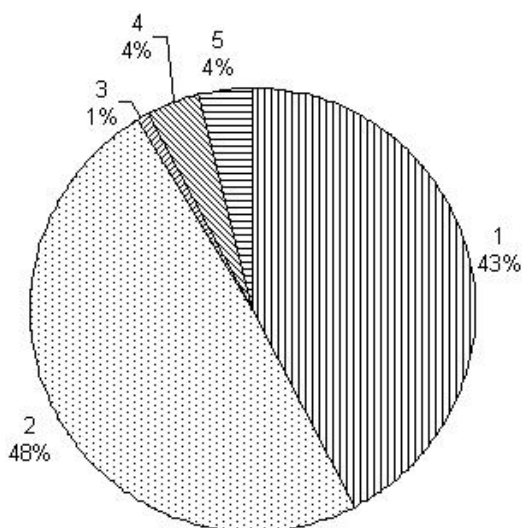


Рис. 8.19. Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания: 1 — наружные стены; 2 — окна, балконные двери; 3 — входные двери; 4 — перекрытие теплого чердака; 5 — перекрытие над техподпольем

Структура теплопотерь через ограждающие конструкции оболочки здания приведена на рис. 8.20—8.22.

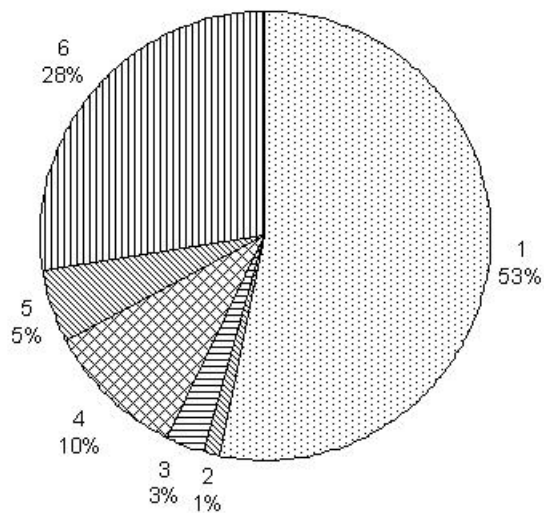


Рис. 8.20. Удельные трансмиссионные теплотери через наружные стены: 1 — основные; 2 — через углы; 3 — через сопряжения наружной стены с внутренними стенами; 4 — через сопряжения наружной стены с междуэтажными перекрытиями; 5 — через оконные откосы; 6 — через теплопроводные включения

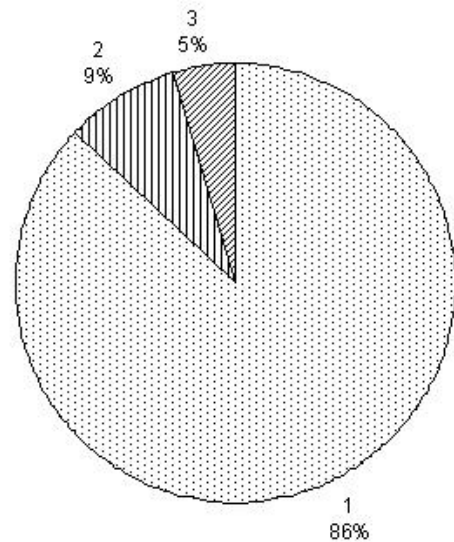


Рис. 8.21. Удельные трансмиссионные теплотери через окна и балконные двери: 1 — основные; 2 — через сопряжения стеклопакета со створкой; 3 — через сопряжения коробки с наружной стеной

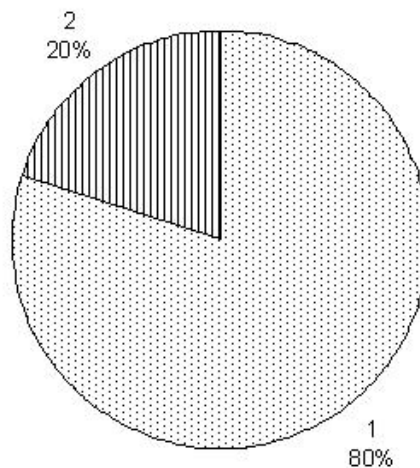


Рис. 8.22. Удельные трансмиссионные теплотери через перекрытия теплого чердака и над техподпольем: 1 — основные; 2 — через сопряжения перекрытия с наружной стеной

Из рис. 8.20 видно, что краевые зоны оказывают существенное влияние на общие трансмиссионные теплопотери наружных стен (47 %), причем наибольший вклад в теплопотери через краевые зоны вносят теплопроводные включения (28 %). Меньшее влияние оказывают краевые зоны окон и балконных дверей (13 %), перекрытий теплого чердака и над техподпольем (20 %) [рис. 21—22].

Анализ структуры теплового баланса здания за отопительный период (рис. 8.23) показывает, что существенный вклад в общие теплопотери вносят трансмиссионные теплопотери (55 %). Учет общих теплопоступлений в здание (бытовых и от солнечной радиации) снижает общие теплопотери на 39 %. Таким образом, удельный расход тепловой энергии на отопление рассматриваемого здания оказывается сопоставимым с удельными трансмиссионными теплопотерями.

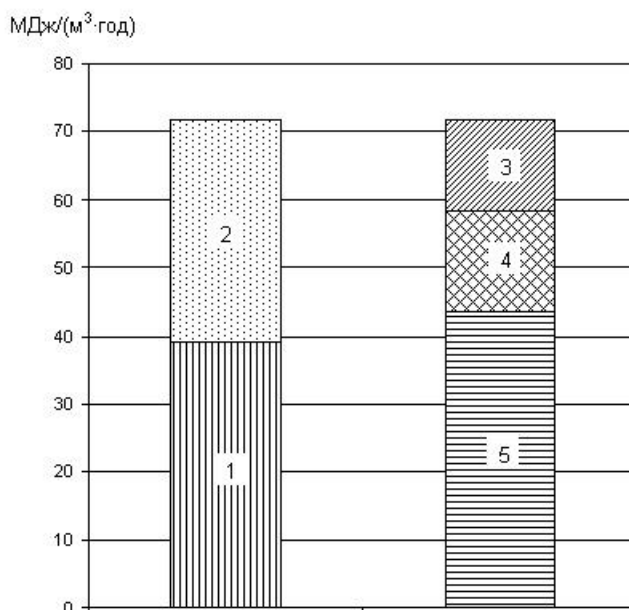


Рис. 8.23. Структура теплового баланса здания за отопительный период: 1 — удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания; 2 — удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха; 3 — удельные внутренние бытовые тепловыделения; 4 — удельные теплопоступления за счет солнечной радиации; 5 — удельный расход тепловой энергии на отопление здания

Структура энергозатрат на эксплуатацию здания за отопительный период приведена на рис. 8.24.

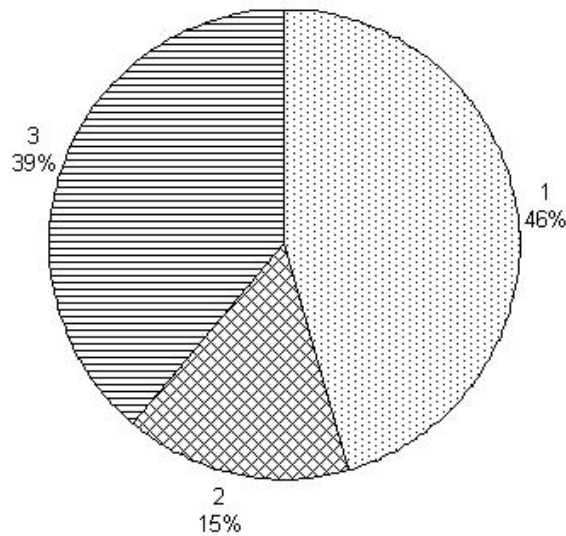


Рис. 8.24. Удельный расход энергии на эксплуатацию здания за отопительный период: 1 — на отопление; 2 — на горячее водоснабжение; 3 — на электроснабжение

Из рисунка видно, что большую часть общих энергозатрат составляют затраты тепловой энергии (на отопление — 46 %, горячее водоснабжение — 15 %). Следовательно, снизить общие энергозатраты можно, прежде всего за счет уменьшения расхода тепловой энергии на отопление.

Приведенные энергозатраты отражают расход энергии в границах энергобаланса отапливаемого объема (конечной энергии). Для пересчета на расход первичной энергии используем следующие коэффициенты первичной энергии [38]: для электроэнергии — 2,7; для тепловой энергии — 0,8. С учетом этого получим структуру расхода первичной энергии на эксплуатацию здания за отопительный период: на отопление — 24 %; на горячее водоснабжение — 8 %; на электроснабжение — 68 %.

Проведенный анализ энергозатрат за отопительный период позволяет наметить пути повышения энергоэффективности здания.

8.3. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КРАЕВЫХ ЗОН НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Рассмотрим жилое многоквартирное здание, имеющее квадратную форму в плане с размерами в осях 27,6×27,6 м. Количество этажей 17. Пункт строительства Волгоград. Конструктивная схема здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены кирпичные трехслойные с эффективным утеплителем и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери — в виде двухкамерных стеклопакетов в деревянных переплетах. Покрытие, перекрытия теплого чердака и над техподпольем имеют эффективный утеплитель. Здание имеет автономное теплоснабжение и естественную вентиляцию.

Выполним расчет энергетических показателей здания за отопительный период по методике п. 8.1 при следующих исходных данных: $t_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{ht} = -2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; $z_{ht} = 177\text{ сут/год}$; $A_f = 4379\text{ м}^2$; $V_h = 38785\text{ м}^3$; $u_{ven} = 0,4\text{ ч}^{-1}$; $q_{int}^f = 10\text{ Вт/м}^2$; $q_s = 19,6\text{ МДж/(м}^3\cdot\text{год)}$; $q_{hwo} = 115\text{ л/(сут}\cdot\text{ед. изм.)}$; $q_{eo} = 1,0\text{ кВт/(ед. изм.)}$; $N_{hw} = N_e = 140\text{ ед. изм.}$; $k_R = k_{ven} = k_{hw} = 1$; $k_e = 0,75$.

Условно разобьем оболочку здания на ограждающие конструкции ($m = 6$): наружные стены ($A_1 = 4494\text{ м}^2$), окна и балконные двери ($A_2 = 1576\text{ м}^2$), входные двери ($A_3 = 55\text{ м}^2$), совмещенное покрытие ($A_4 = 412\text{ м}^2$), перекрытие теплого чердака ($A_5 = 381\text{ м}^2$), перекрытие над техподпольем ($A_6 = 793\text{ м}^2$). Суммарная площадь оболочки здания $A_e^{sum} = 7711\text{ м}^2$.

Рассмотрим следующие варианты расчета: 0 (базовый) — без учета краевых зон; 1 и 2 — с различным конструктивным решением краевых зон.

В наружной стене выделим краевые зоны: углы; сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями; оконные откосы; теплопроводные включения.

В оконном блоке выделим краевые зоны: сопряжение стеклопакета со створкой; сопряжение коробки с наружной стеной.

Рассмотрим различные варианты конструктивного решения краевых зон.

Первый вариант: углы, сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями без теплоизоляционных вкладышей; теплопроводные включения в виде ребер жесткости колодцевой кладки; оконный блок с узкой коробкой.

Второй вариант: углы, сопряжения наружной стены с внутренними стенами и междуэтажными перекрытиями с теплоизоляционными вкладышами; теплопроводные включения в виде пластмассовых малотеплопроводных коннекторов; оконный блок с широкой коробкой.

Краевые зоны покрытия, перекрытий теплого чердака и над техподпольем в обоих вариантах определены по проекту.

Коэффициенты добавочных теплопотерь ψ_{ij} для указанных вариантов краевых зон наружной стены и окна определены по методике п. 8.1.1.1 диссертации.

На основе полученных данных определены удельные трансмиссионные теплопотери через ограждающие конструкции оболочки здания для указанных вариантов расчета (табл. 8.8).

Используя данные табл. 8.8, определим удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания.

Результаты расчета удельных энергетических показателей здания за отопительный период, МДж/(м³·год), представлены в табл. 8.9.

Таблица 8.8

**Удельные трансмиссионные теплотери через ограждающие конструкции
оболочки здания**

Ограждающая конструкция	Удельные трансмиссионные теплотери, МДж/(м ³ ·год), по вариантам		
	0	1	2
Наружные стены	9,78	18,4	12,2
Окна, балконные двери	20,5	23,6	20,5
Входные двери	0,623	0,623	0,623
Покрытие совмещенное	0,862	1,18	0,958
Перекрытие теплого чердака	0,914	1,14	1,02
Перекрытие над техподпольем	1,90	2,38	2,12

Таблица 8.9

**Результаты расчета удельных энергетических показателей здания
за отопительный период**

Наименование показателя	Значение показателя по вариантам расчета		
	0	1	2
Теплотери через оболочку здания	34,6	47,3	37,4
Теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	42,1	42,1	42,1
Внутренние бытовые теплопоступления	17,3	17,3	17,3
Теплопоступления за счет солнечной радиации	19,6	19,6	19,6
Расход тепловой энергии на отопление здания	39,8	52,5	42,6
Расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	15,3	15,3	15,3
Расход электрической энергии	41,4	41,4	41,4
Расход тепловой и электрической энергии	96,5	109	99,3

По результатам расчета разработан энергетический паспорт здания для рассматриваемых вариантов (прил. 5 диссертации).

Анализ полученных результатов показывает, что учет краевых зон по варианту 1 повышает удельные трансмиссионные теплотери через оболочку здания на 37 %. При этом удельный расход тепловой энергии на

отопление здания повышается на 32 %, а удельный расход энергии на эксплуатацию здания за отопительный период на 13 %. Таким образом, температурно-влажностный режим в краевых зонах ограждений оказывает существенное влияние на удельный расход энергии. Поэтому в реальном проектировании необходимо учитывать это влияние.

Энергоэффективность здания можно повысить за счет уменьшения влияния краевых зон на удельный расход энергии. Совершенствование конструктивного решения наружных ограждений (вариант 2) приводит к снижению удельных трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания на 29 %, удельного расхода тепловой энергии на отопление здания на 25 %, удельного расхода энергии на эксплуатацию здания за отопительный период на 10 %.

Сравнивая полученные результаты с другими мероприятиями по повышению энергоэффективности зданий, приведенными в СТО 17532043–001–2005, можно отметить, что совершенствование краевых зон ограждающих конструкций оболочки здания имеет высокий потенциал энергоэффективности. Повышение энергоэффективности здания в этом случае достигается без ощутимого увеличения конечной стоимости строительства, что делает этот путь доступным для внедрения в повседневную жизнь.

8.4. ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭНЕРГОАУДИТА

Энергоаудит относится к важнейшим экологически безопасным методам неразрушающего контроля, позволяющим экспериментально определить энергетические показатели и оценить энергоэффективность эксплуатируемых зданий. Из числа последних публикаций, посвященных оценке энергоэффективности зданий, можно отметить работы [190, 34, 191, 39, 40, 41].

Выполним оценку энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита.

Объектом исследования является жилое многоквартирное здание, расположенное в Волгограде. Здание имеет Г-образную форму в плане. Количество этажей 21—23. Количество секций 3. Количество квартир 234. Здание имеет отапливаемый подвал, в котором размещаются автостоянка (паркинг) и помещения инженерно-технического назначения. На первом этаже здания находятся офисные помещения, на чердаке — инженерные коммуникации. Общая площадь здания — 25776 м^2 , отапливаемый объем — 87000 м^3 .

Конструктивная система здания каркасная, с монолитным железобетонным каркасом. Наружные стены выполнены из газобетонных блоков с облицовкой кирпичной кладкой и поэтажным опиранием на перекрытия. Окна и балконные двери выполнены из однокамерных стеклопакетов (с низкоэмиссионным покрытием стекла) в ПВХ переплетах. Покрытие, перекрытия над подвалом и под эркерами имеют эффективный утеплитель.

Теплоснабжение здания осуществляется от централизованного источника тепла (тепловых сетей). Система отопления двухтрубная с поквартирной горизонтальной разводкой, отопительные приборы (конвекторы) имеют встроенные терморегуляторы. Система вентиляции квартир естественная, с притоком воздуха через регулируемые оконные створки и удалением воздуха из кухонь, уборных, ванных комнат и совмещенных санузлов через вытяжные каналы. Инженерные системы здания оснащены приборами учета тепловой энергии, холодной и горячей воды, а также электрической энергии. На момент проведения энергоаудита продолжительность эксплуатации здания составила около 5 лет.

В ходе проведенного обследования установлено, что наружные ограждающие конструкции здания находятся в состоянии, обеспечиваю-

щем в целом нормальную эксплуатацию объекта в отопительный период. Окна, балконные и входные двери имеют уплотняющие прокладки в притворах. Требуемые по ГОСТ 30494–96 параметры микроклимата в помещениях здания обеспечены. Вместе с тем, в ряде квартир зафиксировано неплотное примыкание притворов светопрозрачных ограждающих конструкций окон и балконных дверей, а также наружных дверей в лестнично-лифтовых узлах, что может привести к избыточным тепловым потерям вследствие инфильтрации воздуха через теплозащитную оболочку здания и снижению его энергоэффективности.



Рис. 8.25. Общий вид теплового пункта обследованного здания

Измерение и регистрация параметров энергопотребления здания выполнены экспресс-методом в течение двух недель с 22.12.2011 по 04.01.2012. Мониторинг расходов тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение производился в автоматическом режиме один раз в сутки по общедомовому теплосчетчику (рис. 8.25). Измерение расхода электроэнергии производилось поквартирно, с учетом показаний общедомового счетчика. Результаты измерений расхода тепловой энергии здания приведены в табл. 8.10.

Таблица 8.10

Результаты измерений расхода тепловой энергии здания

№ п.п.	Календарная дата	Температура наружного воздуха, °С	Фактический расход тепловой энергии, ×10 ⁷ кДж/сут		
			на отопле- ние	на горячее водоснабже- ние	общий
1	22.12.2011	+1,2	4,402	1,416	5,818
2	23.12.2011	−1,6	4,761	1,42	6,181
3	24.12.2011	−0,8	4,889	1,445	6,334
4	25.12.2011	−2,9	5,51	1,506	7,016
5	26.12.2011	−3,8	5,776	1,46	7,236
6	27.12.2011	+0,8	4,355	1,363	5,718
7	28.12.2011	+2,5	3,841	1,461	5,302
8	29.12.2011	−1,6	5,052	1,493	6,545
9	30.12.2011	−2,6	5,278	1,437	6,714
10	31.12.2011	−0,1	4,394	1,613	6,008
11	01.01.2012	−1,2	5,087	1,38	6,467
12	02.01.2012	−1,1	5,225	1,323	6,548
13	03.01.2012	−4,6	5,965	1,46	7,426
14	04.01.2012	−2,2	5,476	1,308	6,784

На основе данных табл. 8.10 построена диаграмма фактического расхода тепловой энергии (рис. 8.26). На диаграмме сплошной линией показан график суточного хода температуры наружного воздуха.

Анализ полученных результатов показывает, что расход тепловой энергии на отопление здания изменяется от $3,841 \cdot 10^7$ кДж/сут 28.12.2011 до $5,965 \cdot 10^7$ кДж/сут 03.01.2012, что связано с колебаниями температуры наружного воздуха. Колебания расхода тепловой энергии на горячее водоснабжение незначительны и определяются, главным образом, привычками и бытом жильцов.

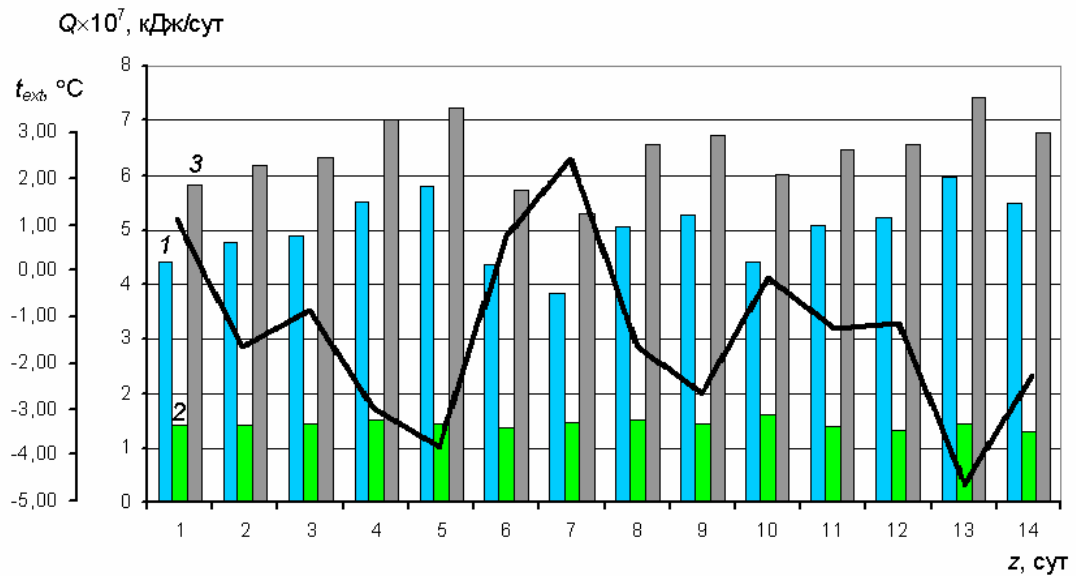


Рис. 8.26. Фактический расход тепловой энергии: 1 — на отопление;
2 — на горячее водоснабжение; 3 — общий

Результаты измерений расхода электрической энергии здания приведены в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Результаты измерений расхода электрической энергии здания

Потребитель электрической энергии	Фактический расход электрической энергии, кВт·ч/мес			
	по секциям			общий
	1	2	3	
Квартиры	21396	25698	26568	73662
Лифты	3156	3249	3096	9501
Искусственное освещение в местах общего пользования	632	490	65	1187
Паркинг				3540
Подвал				842
Насосная				594
Индивидуальный тепловой пункт (ИТП)				4545
Потери				100
Итого				93971

На основе данных табл. 8.11 определена структура расхода электрической энергии (рис. 8.27).

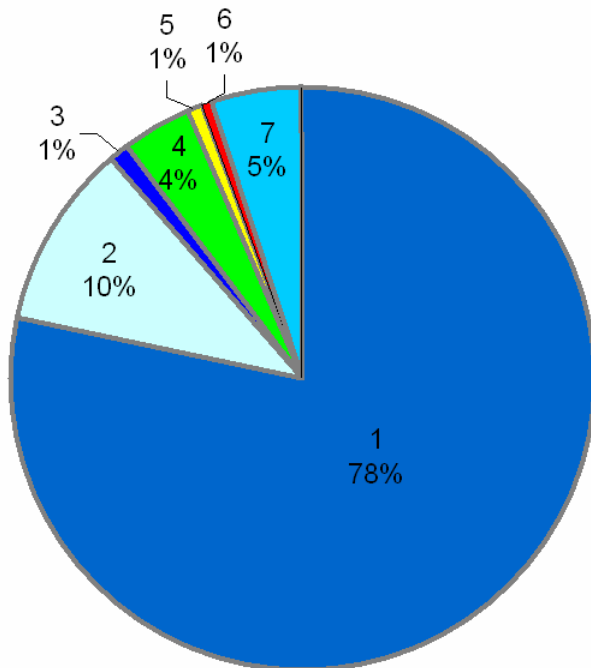


Рис. 8.27. Структура расхода электрической энергии: 1 — квартиры; 2 — лифты; 3 — искусственное освещение в местах общего пользования; 4 — паркинг; 5 — подвал; 6 — насосная; 7 — ИТП

Из рис. 8.27 видно, что большая часть потребления электроэнергии (78 %) приходится на квартиры.

Используем полученные данные для расчета энергопотребления здания за отопительный период.

Удельное потребление тепловой энергии на отопление здания определяем на основе ГОСТ 31168–2003 при температуре внутреннего воздуха $t_{int} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, принятой согласно ГОСТ 30494–96 по верхней границе комфортных условий.

Общие теплопотери через наружные ограждающие конструкции оболочки здания за i -е сутки Q_h^i , Вт, определяются на основе теплового баланса здания по формуле:

$$Q_h^i = \frac{0,278[Q_{ht}^i + v\zeta(Q_{int} + Q_s)]}{\Delta\tau}, \quad (8.19)$$

где Q_{ht}^i — средний за i -е сутки расход тепловой энергии на отопление здания, кДж/сут (табл. 8.10); v — коэффициент, учитывающий способ-

ность ограждающих конструкций аккумулировать или отдавать теплоту (по СНиП 23–02–2003 $\nu = 0,8$); ζ — коэффициент эффективности авто-регулирования подачи теплоты в системах отопления, принимаемый согласно СНиП 23–02–2003 ($\zeta = 1$); Q_{int} — средние бытовые тепловыделения, кДж/сут; Q_s — средние теплопоступления в здание от солнечной радиации, кДж/сут; $\Delta\tau = 24$ ч/сут.

В формуле (8.19) средние бытовые тепловыделения складываются из тепловыделений от бытовых приборов квартир и тепловыделений от людей, одновременно находящихся в здании ($Q_{int} = 1,161 \cdot 10^7$ кДж/сут). Тепловыделения от бытовых приборов квартир $Q_{int1} = 8,554 \cdot 10^6$ кДж/сут определены на основании фактического расхода электрической энергии (табл. 8.11) с пересчетом в кДж/сут. Тепловыделения от людей $Q_{int2} = 3,059 \cdot 10^6$ кДж/сут определены из расчета фактического заселения квартир $\eta_f = 0,65$, тепловыделений одного взрослого человека $Q_{m1} = 419$ кДж/(ч·чел), среднего числа людей, проживающих в одной квартире, $N_m = 2$ (согласно экспертной оценке), общего числа квартир в доме $N_f = 234$.

Средние теплопоступления в здание от солнечной радиации $Q_s = 7,948 \cdot 10^6$ кДж/сут определены по методике прил. 4 диссертации на основе статистической обработки многолетних климатических данных по суммарной солнечной радиации при средних условиях облачности методом наименьших квадратов конечными рядами Фурье.

Принимая за факторную переменную $\Delta t_i = t_{int} - t_{ext}^i$ и за результативную переменную Q_h^i , на основе статистической обработки данных по малому объему выборки ($N = 14$) получим математическую модель $Q_h(\Delta t)$ в виде уравнения линейной регрессии:

$$Q_h = a(t_{int} - t_{ext}), \quad (8.20)$$

где $a = 3,265 \cdot 10^4$ Вт/°С.

Полученный коэффициент корреляции $r = 0,962$ свидетельствует о весьма тесной связи между факторной и результативной переменной по шкале Чэддока. При этом относительные ошибки на узлах колеблются от $-4,9$ до $4,3$ % при допустимом значении ± 10 %. Таким образом, построенная математическая модель в целом адекватна, и выводы, полученные по результатам малой выборки, можно с вероятностью $0,95$ распространить на всю гипотетическую генеральную совокупность.

График зависимости $Q_h(\Delta t)$ приведен на рис. 8.28.

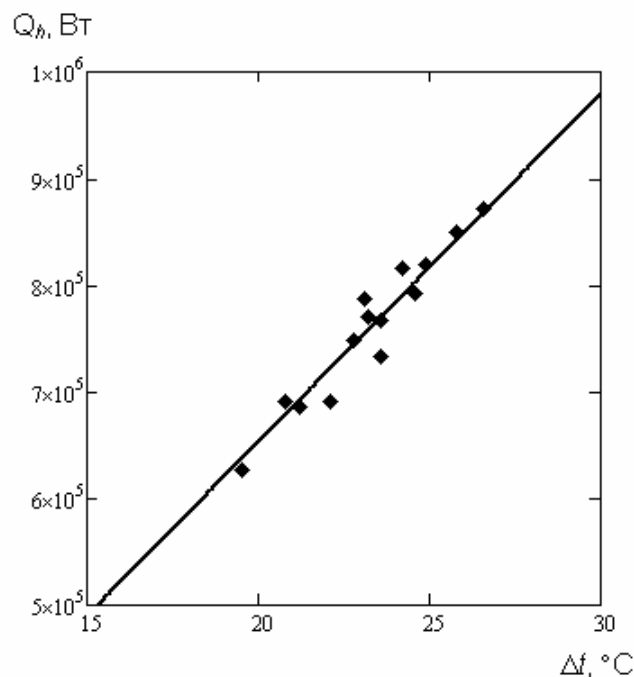


Рис. 8.28. График зависимости $Q_h(\Delta t)$

Расход тепловой энергии на отопление здания за расчетный отопительный период Q_h^y , кДж/год, определяется по формуле:

$$Q_h^y = 86,4aM_{ht} - \beta_h v \zeta (Q_{int} + Q_s) z_{ht}, \quad (8.21)$$

где M_{ht} — градусосутки отопительного периода, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}/\text{год}$, определяемые по формуле (8.5) при t_{int} равной расчетной температуре внутреннего воздуха 20 $^{\circ}\text{C}$; β_h — коэффициент, учитывающий дополнительное теплотребление системы отопления (по СНиП 23–02–2003 $\beta_h = 1,07$).

Расчет по формуле (8.21) дает $Q_h^y = 8,22 \cdot 10^9$ кДж/год.

Фактический удельный расход тепловой энергии q_h^* , МДж/(м³·год), на отопление здания за расчетный отопительный период определяется по формуле:

$$q_h^* = \frac{10^{-3} Q_h^y}{V_h}, \quad (8.22)$$

где V_h — отапливаемый объем здания по проекту.

Фактический удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение за расчетный отопительный период q_{hw}^* , МДж/(м³·год), определяется по формуле:

$$q_{hw}^* = \frac{10^{-3} Q_{hw}^m z_{ht}}{V_h}, \quad (8.23)$$

где Q_{hw}^m — средний суточный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение, определяемый по результатам измерений (табл. 8.10).

Фактический удельный расход электрической энергии за расчетный отопительный период q_e^* , МДж/(м³·год), определяется по формуле:

$$q_e^* = \frac{10^{-3} Q_e^m z_{ht}}{V_h}, \quad (8.24)$$

где Q_e^m — средний суточный расход электрической энергии, кДж/сут, определяемый по результатам измерений (табл. 8.11).

Результаты определения фактических удельных энергетических показателей здания за расчетный отопительный период приведены в табл. 8.12. На основе данных таблицы определена структура энергозатрат здания за отопительный период (рис. 8.29).

Анализ полученных результатов показывает, что наибольший «вес» в энергопотреблении здания имеет отопление. По мере заселения дома следует ожидать рост энергопотребления на горячее водоснабжение и электроснабжение.

Таблица 8.12

Фактические удельные энергетические показатели здания

Показатель	Обозначение показателя	Значение показателя	
		МДж/(м ³ ·год)	%
Расход тепловой энергии на отопление здания	q_h^*	94,5	64,8
Расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	q_{hw}^*	29,2	20
Расход электрической энергии	q_e^*	22,2	15,2
Итого	q^*	146	100

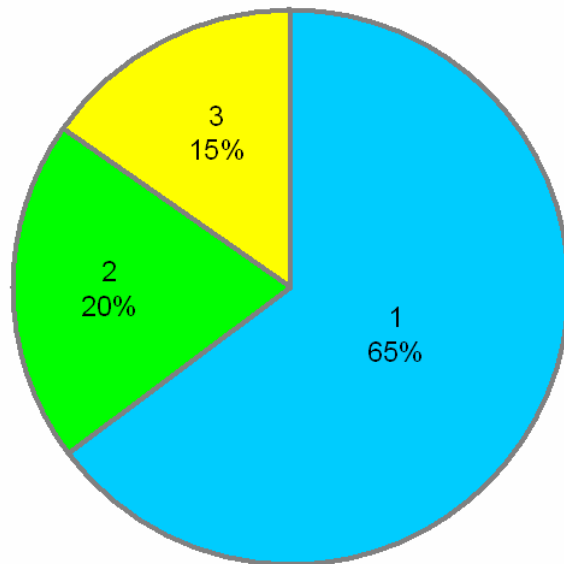


Рис. 8.29. Структура энергозатрат здания за отопительный период: 1 — расход тепловой энергии на отопление; 2 — расход тепловой энергии на горячее водоснабжение; 3 — расход электрической энергии

В нормативных документах оценка энергоэффективности зданий производится по величине отклонения фактического значения удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормируемого. Согласно табл. 9 СНиП 23–02–2003 нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление здания $q_h^{req} = 25$ кДж/(м³·°С·сут), что в пересчете на заданные климатические условия (при $M_{ht} = 3965$ °С·сут/год) дает $q_h^{req} = 99,1$ МДж/(м³·год). Отклонение фактического значения

удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормируемого $-4,7\%$. Согласно п. 4.5 СНиП 23–02–2003 **класс энергоэффективности здания — С (нормальный)**. Таким образом, по результатам энергоаудита установлено, что обследованное здание соответствует нормативному требованию.

Полученные результаты измерений использованы для тестирования методики расчета энергетических показателей здания. Расчет выполнен по компьютерной программе «ЭНПАС» при следующих исходных данных:

расчетная температура внутреннего воздуха $t_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{ht} = -2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$;

продолжительность отопительного периода $z_{ht} = 177\text{ сут/год}$;

градусосутки отопительного периода $M_{ht} = 3965\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут/год}$;

отапливаемый объем здания $V_h = 87000\text{ м}^3$;

средняя кратность воздухообмена в рабочее время $u_{ven} = 0,7\text{ ч}^{-1}$;

удельные внутренние бытовые тепловыделения в здании $q_{int} = 23,6\text{ МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{год})$;

удельные тепlopоступления в здание за счет солнечной радиации $q_s = 16,2\text{ МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{год})$;

норма расхода горячей воды в средние сутки $q_{hwo} = 115\text{ л}/(\text{сут}\cdot\text{ед. изм.})$;

удельная расчетная электрическая нагрузка $q_{eo} = 0,7\text{ кВт}/(\text{ед. изм.})$;

число потребителей горячей воды $N_{hw} = 560\text{ ед. изм.}$;

число потребителей электрической энергии $N_e = 560\text{ ед. изм.}$;

коэффициенты $k_R = k_{ven} = k_{hw} = 1$; $k_e = 0,35$; $\eta = 0,8$.

В расчете использованы проектные значения площади A_i , м^2 , и приведенного сопротивления теплопередаче R_{hi}^{des} , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ для наружных ограждающих конструкций:

наружных стен — $A_1 = 14274$; $R_{h1}^{des} = 2,36$;

окон и балконных дверей — $A_2 = 2979$; $R_{h2}^{des} = 0,51$;

наружных дверей в лестнично-лифтовых узлах — $A_3 = 26,6$;
 $R_{h3}^{des} = 0,54$;

покрытия — $A_4 = 1093$; $R_{h4}^{des} = 3,61$;

перекрытия над подвалом — $A_5 = 940$; $R_{h5}^{des} = 1,55$;

перекрытий под эркерами — $A_6 = 32$; $R_{h6}^{des} = 3,37$.

На основании указанных данных определено приведенное сопротивление теплопередаче оболочки здания $R_{he}^{des} = 1,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Результаты сравнения расчетных и фактических значений энергетических показателей здания за отопительный период приведены в табл. 8.13.

Таблица 8.13

Сравнение расчетных и фактических удельных энергетических показателей здания

Показатель	Значение показателя, МДж/($\text{м}^3 \cdot \text{год}$)		Отклонение расчетного значения показателя от фактического, %
	фактическое	расчетное	
Расход тепловой энергии на отопление здания	94,5	92,4	–2,2
Расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	29,2	27,3	–6,5
Расход электрической энергии	22,2	24,1	+8,6
Итого	146	144	–1,4

Анализ полученных результатов энергоаудита показывает (табл. 8.13), что расчетные значения энергетических показателей, полученных по методике, разработанной автором, хорошо согласуются с фактическими (максимальное отклонение +8,6 % для расхода электрической энергии).

Полученные результаты энергоаудита включены в энергетический паспорт здания и использованы для обоснования его энергетической эффективности.

В прил. 6 диссертации приведены результаты экономической оптимизации тепловой защиты наружных стен здания, выполненной по методике В.Г. Гагарина и В.В. Козлова. Сравниваются два альтернативных варианта стены: навесная фасадная система с вентилируемой воздушной прослойкой с основанием из кирпичной кладки и кладка из ячеистобетонных блоков с облицовкой кирпичной кладкой. Расчет, проведенный для климатических условий г. Волгограда, показывает, что структура удельных теплотерь по обоим вариантам согласуется с результатами, полученными по методике, разработанной автором. Сравнение указанных вариантов стены по удельным приведенным затратам на строительство и эксплуатацию показывает преимущество кладки из ячеистобетонных блоков с наружной облицовкой кирпичной кладкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором исследований в диссертации решена крупная научная проблема *повышения теплозащиты и энергоэффективности зданий разработкой научно-методического аппарата по формированию требований к ограждающим конструкциям с учетом особенностей температурно-влажностного режима в крайних зонах ограждений*, имеющая важное хозяйственное значение.

Диссертация соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года № 899, п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Основные выводы по работе:

1. Разработаны теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при неизотермических условиях увлажнения. На основе термодинамического анализа процессов переноса влажного пара в материалах ограждающих конструкций предложена энергетическая шкала абсолютного потенциала влажности. На основе установленной связи между различными шкалами потенциала влажности показано, что абсолютный потенциал влажности является характеристикой влажностного состояния материалов в неизотермических условиях. Разработана экспресс-методика экспериментального определения характеристик переноса влаги (потенциалопроводности, влагопроводности и коэффициента влагообмена) путем сушки разрезных образцов влажных материалов от полного водонасыщения, позволяющая определить из одного опыта все искомые характеристики влагопереноса. На основе теоретических представлений о движении влаги в материалах получена формула, учитывающая влияние

температуры на теплопроводность материалов. Получены аналитические зависимости теплофизических характеристик влажных материалов от относительного потенциала влажности и температуры, которые позволяют учесть влияние влажности на теплозащитные свойства ограждающих конструкций.

2. Разработаны методы инженерной оценки температурно-влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в широком диапазоне влажности при стационарных граничных условиях: расчет профиля влагосодержания для общей оценки влажностного режима, определение плоскости наибольшего увлажнения для выявления наиболее опасного, с точки зрения влажностного режима, сечения конструкции, расчет ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения для анализа накопления влаги в наиболее холодный месяц года. Достоинством методов является возможность расчета в широком диапазоне влажности материалов, включая сверхсорбционную зону увлажнения, а также применимость к конструкциям с мультizonальной конденсацией влаги. Наглядность и простота методов делает их доступными широкому кругу специалистов.

3. Разработан метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного тепло-влажностного переноса в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка параболического типа с краевыми условиями. Использование шкалы абсолютного потенциала влажности позволяет упростить модель тепло-влажностного переноса. Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений с применением неявной разностной схемы. Разработанная математическая модель реализована в компьютерной программе, которая позволяет производить расчет нестационарных температурных и

влажностных полей в трехмерных областях ограждающих конструкций в годовом цикле в широком диапазоне влажности материалов. На основе математического моделирования нестационарного тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях показано, что в краевых зонах ограждений происходит локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных краевых эффектов, обусловленных совместным влиянием процессов тепло- и влагоденоса. Проведена верификация указанного метода расчета различными способами: на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток, на различных математических моделях влаготеплоденоса, на результатах проведенных автором натурных исследований температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Верификация метода подтверждает его достоверность, что позволяет использовать этот метод в проектной практике.

4. Выполнена оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащитные и энергетические характеристики здания за отопительный период. Разработана методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и оболочки здания в целом с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждений. Показано, что в краевых зонах ограждений теплозащитные свойства снижаются, приводя к ухудшению теплозащиты всего здания. Предложены практические рекомендации по проектированию ограждающих конструкций современных зданий с учетом температурно-влажностного режима. Разработана методика расчета энергетических показателей по зданию за отопительный период. При определении трансмиссионных теплопотерь через оболочку здания учитываются добавочные потери теплоты в краевых зонах ограждающих конструкций. На основе этой методики показано, что температурно-влажностный режим в краевых зонах ограждений ока-

зывает существенное влияние на энергетические характеристики здания. Совершенствование конструктивного решения наружных ограждений приводит к снижению расхода энергии на эксплуатацию здания на 10%. Таким образом, снижение потерь теплоты в краевых зонах ограждающих конструкций имеет высокий потенциал энергосбережения.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Краткое описание программно-вычислительного комплекса
«Энергоэффективность и тепловая защита зданий (ЭНТЕЗА)»**

Программа	Электронная версия СНиП–II—79* (WTCODE 1.0)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
Аннотация	Программа «WTCODE 1.0» предназначена для автоматизированного теплотехнического проектирования ограждающих конструкций зданий в соответствии с нормами СНиП II–3—79* (с учетом изменений №№ 3, 4). Используется для поиска рациональных конструктивных решений наружных ограждений. Позволяет проводить расчеты сопротивлений теплопередаче, воздухо- и паропроницанию ограждающих конструкций, теплоустойчивости, теплоусвоения поверхности полов. Область применения — проектные работы в строительстве
Тип ЭВМ	ПК класса IBM PC 486 / Pentium I и выше
Язык	Delphi 3(5) Borland
ОС	WINDOWS 95 / 98 / NT 3.51 и выше
Объем программы	25,5 Мб
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2001610954 от 01.08.2001
Программа	Теплоэнергетический паспорт здания (TEPAS 1.0)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Корниенко С.В.
Аннотация	Программа «TEPAS 1.0» предназначена для автоматизации работы по составлению теплоэнергетического паспорта здания. Производятся расчеты геометрических, теплотехнических и теплоэнергетических показателей здания согласно СП 23–101—2000(2004) «Проектирование тепловой защиты зданий». Используется для контроля энергетического качества новых, реконструируемых, капитально ремонтируемых и эксплуатируемых жилых и общественных зданий
Тип ЭВМ	Pentium I и выше
Язык	Delphi 3(5) Borland
ОС	Windows 95/98/NT и выше
Объем программы	702 Кбайт
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2002610358 от 18.03.2002 г.

Программа	Нестационарное температурное поле (НТП)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Корниенко С.В.
Аннотация	Программа «НТП» предназначена для расчета нестационарного температурного поля неоднородных участков ограждающих конструкций, имеющих произвольную конфигурацию с сочетанием любых строительных материалов, в том числе с металлическими элементами и высокоэффективными утеплителями, и может быть использована при проектировании тепловой защиты зданий. В результате расчетов получают распределение температуры в ограждающей конструкции и среднюю температуру материалов конструкции. Программа «НТП» обеспечивает выполнение следующих функций: расчет одно-, дву- и трехмерных нестационарных температурных полей; задание неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса; автоматический выбор временного шага, обеспечивающий заданную точность вычислений; многофакторный расчет нелинейных тепловых процессов различной интенсивности
Тип ЭВМ	Pentium I и выше
Язык	Turbo Basic
ОС	MS-DOS 3.3 и выше
Объем программы	1710 Кбайт
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2004610522 от 24.02.2004 г.
Программа	Совместный влаготеплоперенос (СОВТ)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Корниенко С.В.
Аннотация	Программа «СОВТ» предназначена для расчета процесса совместного влаготеплопереноса в трехмерных областях ограждающих конструкций зданий. Программа «СОВТ» обеспечивает выполнение следующих функций: расчет трехмерных нестационарных температурных и влажностных полей в крайних зонах ограждающих конструкций; расчет тепловлажностного состояния ограждающих конструкций в полном диапазоне влажности и температуры при сложных граничных условиях; исследование динамики тепловлажностного состояния ограждающих конструкций сложной геометрической структуры при переменных воздействиях климата и микроклимата помещений в условиях многолетней эксплуатации; многофакторный расчет тепловых и влажностных процессов различной интенсивности; задание неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса
Тип ЭВМ	Pentium 3
Язык	Delphi 3(7) Borland
ОС	WINDOWS 95 / 98 / NT и выше
Объем программы	2 Мб
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611175 от 04.02.2011 г.

Программа	Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Корниенко С.В.
Аннотация	Программа «ЭНПАС» позволяет производить расчет энергозатрат на эксплуатацию здания за отопительный период, включая затраты на отопление, горячее водоснабжение, электроснабжение. Энергозатраты на отопление включают трансмиссионные теплопотери через оболочку здания; теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха; внутренние бытовые тепловыделения; теплопоступления за счет солнечной радиации. Трансмиссионные теплопотери через оболочку здания определяются с учетом краевых зон в ограждающих конструкциях здания. Основными достоинствами разработанной компьютерной программы являются: более полный учет энергопотребления здания, включая расходы тепловой и электрической энергии; определение структуры трансмиссионных теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций, что позволяет совершенствовать проектные решения; возможность оценки энергоэффективности здания на стадии проектирования; удобный пользовательский интерфейс
Тип ЭВМ	Pentium 3
Язык	Delphi 3(7) Borland
ОС	WINDOWS 95 / 98 / NT и выше
Объем программы	1 Мб
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610351 от 10.01.2012
Программа	Наибольшее увлажнение конструкций (НУК)
Автор	Корниенко С.В.
Правообладатель	Корниенко С.В.
Аннотация	Программа «НУК» предназначена для определения плоскости наибольшего увлажнения ограждающих конструкций зданий. Она позволяет определить наиболее опасное, с точки зрения влажностного режима, сечение конструкции. Программа реализует метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности, разработанный автором для многослойных ограждающих конструкций при одномерном влагопереносе. Использование теории потенциала влажности позволяет рассматривать процесс влагообмена в широком диапазоне влажности строительных материалов. Программа имеет удобный пользовательский интерфейс, основанный на возможностях системы визуального объектно-ориентированного программирования Delphi
Тип ЭВМ	Pentium 3
Язык	Delphi 3(7) Borland
ОС	WINDOWS 95 / 98 / NT и выше
Объем программы	500 Кб
Сведения о регистрации	Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619917 от 25.09.2014



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ
И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ
(РОСПАТЕНТ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2001610954

На основании Закона Российской Федерации "О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных", введенного в действие 20 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдано настоящее свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

Электронная версия СНиП II-3-79*
"Строительная теплотехника" (WTCODE 1.0)

Правообладатель(ли):

*Вологодская государственная
архитектурно-строительная академия (RU)*

Автор(ы):

Корниенко Сергей Валерьевич (RU)

Страна: Российская Федерация

по заявке № 2001610515, дата поступления: 26 апреля 2001 г.

Зарегистрировано в
Реестре программ для ЭВМ

г. Москва, 1 августа 2001 г.



Генеральный директор

А.Д. Корниенко



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ
И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ
(РОСПАТЕНТ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО

Об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2002610358

На основании Закона Российской Федерации "О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных", введенного в действие 20 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдано настоящее свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

Теплоэнергетический паспорт здания (ТЕPAS 1.0)

Правообладатель(ли):

Корниенко Сергей Валерьевич (RU)

Автор(ы):

Корниенко Сергей Валерьевич (RU)

Страна: Российская Федерация

по заявке № 2002610081, дата поступления: 21 января 2002 г.

Зарегистрировано в
 Реестре программ для ЭВМ
 г. Москва, 18 марта 2002 г.



Генеральный директор

А.Д. Корниенко



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ
И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ
(РОСПАТЕНТ)

СВИДЕТЕЛЬСТВО
Об официальной регистрации программы для ЭВМ
№ 2004610522

На основании Закона Российской Федерации "О правовой охране программ для электронных вычислительных машин и баз данных", введенного в действие 20 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдано настоящее свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

Нестационарное температурное поле (НТП)

Правообладатель(ли):
Корниенко Сергей Валерьевич (RU)

Автор(ы):
Корниенко Сергей Валерьевич (RU)

Страна: Российская Федерация
по заявке № 2003612754, дата поступления: 25 декабря 2003 г.

Зарегистрировано в
Реестре программ для ЭВМ
г. Москва, **24 февраля 2004 г.**

Генеральный директор
 *А.Д. Короткий*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011611175

Совместный влаготеплоперенос (COBT)

Правообладатель(ли): *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Заявка № 2010617847

Дата поступления 13 декабря 2010 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

4 февраля 2011 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012610351

Энергетический паспорт здания (ЭНПАС)

Правообладатель(ли): *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Автор(ы): *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Заявка № 2011618144

Дата поступления 31 октября 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

10 января 2012 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014619917

Наибольшее увлажнение конструкций (НУК)

Правообладатель: *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Автор: *Корниенко Сергей Валерьевич (RU)*

Заявка № **2014618080**

Дата поступления **12 августа 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **25 сентября 2014 г.**



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

**Перечень основных объектов, при проектировании которых использован
программно-вычислительный комплекс «ЭНТЕЗА»**

№ п.п.	Наименование объекта	Вид работы	Год
1	Реконструкция Самотлорского месторождения	Технический отчет по материалам экспертизы технического состояния фундаментов под РВС-5000 и РВС-10000 (х.т. 409/2000, раздел «Оценка температурного режима»)	2000
2	2-этажный 18-квартирный 3-секционный жилой дом с 2–3-комнатными квартирами в Волгоградской обл.	Инженерно-энергетический паспорт проекта (шифр 114-112-133.2)	2001
3	Производственные объекты ОАО «Самотлорнефтегаз»	Технический отчет по материалам экспертизы технического состояния свайных фундаментов под РВС (раздел «Оценка температурного режима»)	2001
4	9-этажное 4-секционное жилое здание серии «Дом–2000 КП» в г. Волгограде	Оценка теплозащитных качеств трехслойных стеновых панелей со шпоночным соединением по результатам расчета трехмерных температурных полей	2001
5	9-этажное 4-секционное жилое здание серии «Дом–2000 КП» по ул. 39-я Гвардейская в мкр. 303 Краснооктябрьского р-на г. Волгограда	Составление теплоэнергетического паспорта здания (отчет по х.т. № 496/02)	2002
6	16-этажный жилой дом на базе серии 134В-002/1.2 в Волгограде	Научно-техническое заключение о соответствии нормативным требованиям в части сопротивления теплопередаче наружных стен с вентилируемым фасадом по системе «Диат»	2002
7	3-зальный кинотеатр «Кино-макс» в Ворошиловском р-не г. Волгограда	Теплотехнический расчет покрытия	2002
8	Производственные объекты ОАО «Самотлорнефтегаз»	Технический отчет по материалам экспертизы технического состояния свайных оснований резервуаров и оборудования (раздел «Оценка температурного режима»)	2002
9	15-этажный жилой дом по ул. 7-я Гвардейская Центрального р-на г. Волгограда	Техническое заключение по материалам экспертизы проектного решения тепловой защиты наружных стен	2003
10	15-этажный жилой дом по ул. 7-я Гвардейская Центрального р-на г. Волгограда	Рекомендации по тепловой защите наружных стен (шифр проекта 897.98-001-AP2)	2003

11	9-этажное 2-секционное жилое здание № 112 в мкр. 201 Советского р-на г. Волгограда	Техническое заключение по материалам экспертизы воздухообмена помещений	2003
12	7–14-этажный жилой дом по ул. Ангарская жилого комплекса «Царицыно» Дзержинского р-на г. Волгограда	Энергетический паспорт (шифр проекта 22466398.0174-П)	2004
13	19-этажный жилой дом по ул. Комсомольская в квартале 29 Центрального р-на г. Волгограда	Техническое заключение по материалам экспертизы проектного решения тепловой защиты наружных стен с вентилируемым фасадом	2004
14	10–14-этажный жилой дом в квартале 81 Ворошиловского р-на г. Волгограда	Энергетический паспорт (шифр проекта 23-05-АР)	2005
15	Крытый плавательный бассейн на территории физкультурного комплекса ВГПУ в Центральном р-не г. Волгограда	Раздел «Энергоэффективность» (шифр проекта 114/1-2005-АР)	2005
16	17-этажный жилой дом по ул. Цимлянская в мкр. 228 Советского р-на г. Волгограда	Раздел «Энергоэффективность» (шифр проекта 91188-1-АР)	2006
17	23-этажный жилой дом по ул. Новороссийская в мкр. 102 Центрального р-на г. Волгограда	Раздел «Энергоэффективность» (шифр проекта 100226-7-АР)	2006
18	Торгово-сервисный центр по ул. Маршала Еременко Краснооктябрьского р-на г. Волгограда	Раздел «Энергоэффективность» (шифр проекта 166-2005-АР)	2006
19	Общественное здание по ул. Электроресовская, 70д, Советского р-на г. Волгограда	Техническое заключение по результатам проверки теплозащитных показателей узла крепления портала эвакуационных лестниц к существующему зданию	2006
20	Пристройка к зданию НВЭМ по ул. Волгодонская в Центральном р-не г. Волгограда	Энергетический паспорт (шифр проекта 80/1-2004)	2006
21	25-этажное здание административного комплекса «Волгоград-Сити» в мкр. 104 Центрального р-на г. Волгограда	Раздел «Энергоэффективность»	2006
22	Одноквартирный жилой дом в п. Сахарный Среднеахтубинского р-на Волгоградской обл.	Раздел «Энергоэффективность» (05.00.0220-ЭП)	2006
23	Многоквартирное жилое здание по ул. Комсомольская, 6, в Центральном р-не г. Волгограда	Экспертное заключение о причинах снижения параметров эксплуатационных качеств наружных ограждающих конструкций в зоне квартиры № 17 (отчет по х.т. № 31/07)	2007

24	10-этажный 4-секционный жилой дом в г. Волжском Волгоградской обл.	Комплексное обследование наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники	2007
25	Многофункциональный энергоэффективный жилой комплекс в г. Волгограде	Диплом за первое место в смотре-конкурсе инженерно-архитектурных школ России (МГСУ)	2009
26	Магазин по бульвару им. 30-летия Победы, 58а, в г. Волгограде	Раздел «Энергоэффективность» (шифр проекта 161-2008-АР, т. 13)	2010
27	5-этажный 6-секционный жилой дом по проспекту им. Ленина, 110, в г. Волжском Волгоградской обл.	Комплексная судебная строительно-техническая экспертиза (раздел «Оценка температурно-влажностного режима помещений и ограждающих конструкций по результатам натурного обследования»)	2011
28	Многоквартирный жилой дом № 16 по ул. Пугачевская в Ворошиловском р-не г. Волгограда	Техническое заключение по результатам проверки теплозащитных показателей на основе расчета температурных полей узлов сопряжений наружных стен с междуэтажным перекрытием	2011
29	23-этажный жилой дом по ул. Циолковского в квартале 110 Ворошиловского р-на г. Волгограда	Оценка энергоэффективности здания по результатам энергоаудита	2012
30	10-этажный 4-секционный жилой дом по ул. им. Канунникова, 9, в г. Волгограде	Комплексная судебная строительно-техническая экспертиза (раздел «Оценка температурно-влажностного режима помещений и ограждающих конструкций квартиры по результатам натурного обследования»)	2012

О необходимости корректировки методики оценки энергоэффективности жилых зданий при актуализации СНиП 23–02–2003

Одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в России, утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г., является энергоэффективность и энергосбережение. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» определяет основные направления повышения энергоэффективности зданий, требования к энергетической паспортизации зданий, требования к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергоэффективности, требования к проведению обязательного энергетического обследования и учету используемых энергоресурсов. Решение задачи энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий связано с необходимостью обновления существующей нормативной базы с учетом мировых достижений в этой области, в частности с актуализацией СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий».

Проблеме актуализации СНиП 23–02–2003 посвящены работы В.Г. Гагарина и В.В. Козлова [16], А.Г. Перехоженцева [192], О.Д. Самарина [193] и других ученых.

Ниже приведено обоснование необходимости корректировки методики оценки энергоэффективности жилых зданий, принятой в действующей редакции СНиП 23–02–2003.

В СНиП приведена классификация зданий по энергоэффективности. Класс энергоэффективности зданий определяется по величине отклонения расчетного (фактического) значения удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормируемого (табл. 3 СНиП 23–02–2003). При этом для жилых зданий этажностью четыре этажа и выше предусмотрен *альтернативный подход* к определению удельного расхода тепловой энергии на отопление. Удельный расход тепловой энергии определяется общим расходом, отнесенным к площади квартир или к отапливаемому объему.

Для проверки правомерности такого подхода выполнена оценка энергоэффективности жилых зданий в Волгограде на основании данных энергетических паспортов, составленных автором для проектов указанных зданий (табл. 1). Рассмотрены пять зданий, имеющих различную форму в плане: 1 — квадратная; 2 — круглая; 3 и 4 — прямоугольная; 5 — сложная. Эффективность архитектурно-планировочных решений подтверждается низкими значениями показателя компактности зданий. Уровень теплозащиты несветопрозрачных ограждающих конструкций, определяемый их приведенным сопротивлением теплопередаче, соответствует нормативному требованию (табл. 4 СНиП 23–02–2003) при градусосутках отопительного периода $D_d = 3965$ °С·сут/год. Уровень теплозащиты светопрозрачных ограждающих конструкций (окон, балконных дверей) принят исходя из конструктивных соображений и выше нормативных требований, установленных табл. 4 СНиП. В зданиях предусмотрена система естественной вентиляции с регулируемым притоком и удалением воздуха, что позволяет обеспечить среднюю кратность воздухообмена здания за отопительный период в соответствии с санитарно-гигиеническими нормами (табл. 1). Системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения имеют автоматическое или ручное регулирование. Инженерные системы зданий оснащены приборами учета тепловой энергии, холодной и горячей воды, электроэнергии и газа при централизованном снабжении. Таким образом, требования норм по энергосбережению, оцениваемые по теплофизическим характеристикам ограждающих конструкций оболочки здания и инженерных систем выполнены для всех зданий согласно п. 11.3

СП 54.13330.2011 «Здания жилые многоквартирные», то есть все рассмотренные здания являются энергоэффективными.

Таблица 1

Архитектурно-планировочные, теплофизические и энергетические характеристики зданий

Показатель	Значение показателя для зданий				
	1	2	3	4	5
Этажность	17	23	10–14	9	7–14
Число секций	1	1	4	4	5
Показатель компактности здания k_e^{des} , м ⁻¹	0,199	0,165	0,272	0,256	0,243
Площадь квартир A_h , м ²	8933	12872	9546	8890	20818
Отапливаемая площадь A_h^{sum} , м ²	12928	20976	13090	10714	25274
Отапливаемый объем V_h , м ³	38785	69221	39269	29998	75821
Приведенное сопротивление теплопередаче оболочки здания R_{he}^r , м ² ·°С/Вт	1,67	1,66	1,81	1,38	2,06
Средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период n_a , ч ⁻¹	0,481	0,506	0,581	0,713	0,474
Общий расход тепловой энергии на отопление здания Q_h , МДж/год	245314 6	461007 0	2606356	2830864	415116 2
Расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление здания: на 1 м ² площади квартир q_{hA}^{des} , МДж/(м ² ·год)	275	358	273	318	199
на 1 м ³ отапливаемого объема q_{hV}^{des} , МДж/(м ³ ·год)	63,2	66,6	66,4	94,4	54,7
Нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление здания: на 1 м ² площади квартир q_{hA}^{req} , МДж/(м ² ·год)	278	278	282	301	285
на 1 м ³ отапливаемого объема q_{hV}^{req} , МДж/(м ³ ·год)	99,1	99,1	101	109	103
Отклонение расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормируемого: отнесенного к площади квартир O_A , %	–1,08	+28,8	–3,19	+5,65	–30,2
отнесенного к отапливаемому объему O_V , %	–36,2	–32,8	–34,3	–13,4	–46,9
Класс энергоэффективности здания: при отнесении к площади квартир	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>B</i>
при отнесении к отапливаемому объему	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>

Анализ данных табл. 1 показывает, что при отнесении общего расхода тепловой энергии к площади квартир и к отапливаемому объему получаются различные классы энергоэффективности. Поэтому альтернативный подход к определению удельного расхода тепловой энергии на отопление жилых зданий, указанный в СНиП 23–02–2003, неправилен. Вместе с тем следует отметить, что при отнесении общего расхода тепловой энергии к площади квартир для ряда жилых зданий (здания 2 и 4 в табл. 1) получается низкий класс по энергоэффективности (класс *D*). Следовательно, согласно СНиП проекты таких зданий непригодны для реализации. Этот результат противоречит ранее установленному на основе поэлементной оценки теплозащиты выводу о том, что все рассмотренные здания являются энергоэффективными. Таким образом, при определении класса энергоэффективности зданий расчетный и нормируемый расходы тепловой энергии на отопление должны относиться только к отапливаемому объему. Именно такой подход использован автором при оценке энергоэффективности проектируемых и эксплуатируемых жилых зданий.

Установим причины расхождения классов зданий по энергоэффективности.

Согласно СНиП расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление здания определяется на основе площади квартир или отапливаемого объема по формулам:

на 1 м² площади квартир

$$q_{hA}^{des} = \frac{Q_h}{A_h},$$

на 1 м³ отапливаемого объема

$$q_{hV}^{des} = \frac{Q_h}{V_h},$$

где Q_h — общий расход тепловой энергии на отопление здания; A_h — площадь квартир; V_h — отапливаемый объем.

Нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление здания q_{hA}^{req} [q_{hV}^{req}] определяется на основе табл. 9 СНиП 23–02–2003.

Отклонение расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от нормируемого определяется по формулам:

на 1 м² площади квартир

$$O_A = \left(\frac{q_{hA}^{des}}{q_{hA}^{req}} - 1 \right) 100, \quad (1)$$

на 1 м³ отапливаемого объема

$$O_V = \left(\frac{q_{hV}^{des}}{q_{hV}^{req}} - 1 \right) 100. \quad (2)$$

Поскольку в СНиП 23–02–2003 (табл. 3) при определении класса энергоэффективности жилых зданий не делается различия между удельным расходом на 1 м² площади квартир и на 1 м³ отапливаемого объема, то $O_A = O_V$. Приравнивая правые части (1) и (2), после преобразований имеем:

$$\frac{q_{hA}^{des}}{q_{hV}^{des}} = \frac{q_{hA}^{req}}{q_{hV}^{req}}. \quad (3)$$

Преобразуем левую часть выражения (3) к следующему виду:

$$\frac{q_{hA}^{des}}{q_{hV}^{des}} = \frac{V_h}{A_h} = \frac{h_{st}}{k_f}, \quad (4)$$

где $h_{st} = V_h/A_h^{sum}$ — высота этажа; $k_f = A_h/A_h^{sum}$ — коэффициент использования площади квартир; A_h^{sum} — отапливаемая площадь.

Назовем величину $h_{st}^r = h_{st}/k_f$ **приведенной высотой этажа**. В отличие от высоты этажа h_{st} приведенная высота этажа учитывает долю площади квартир в отапливаемой площади. Поскольку в здании кроме площади квартир есть и другие отапливаемые помещения, то $k_f < 1$, а значит $h_{st}^r > h_{st}$. С учетом этого формулу (4) запишем в виде:

$$h_{st}^r = \frac{q_{hA}^{req}}{q_{hV}^{req}}. \quad (5)$$

Анализ данных СНиП 23–02–2003 (табл. 9) показывает, что для жилых зданий этажностью четыре этажа и выше $q_{hA}^{req}/q_{hV}^{req}$ близко к значению 2,8 м.

В табл. 2 представлены расчетные значения высоты этажа и приведенной высоты этажа указанных зданий с учетом коэффициента использования площади квартир, определенные на основе проектной документации.

Таблица 2

**Расчетные значения высоты этажа и приведенной высоты этажа зданий
с учетом коэффициента использования площади квартир**

№ здания	Этажность	Высота этажа h_{st} , м	Коэффициент использования площади квартир k_f	Приведенная высота этажа h_{st}^r , м
1	17	3,0	0,691	4,34
2	23	3,3	0,614	5,37
3	10–14	3,0	0,729	4,12
4	9	2,8	0,83	3,37
5	7–14	3,0	0,824	3,64

Из табл. 2 видно, что приведенная высота этажа указанных зданий изменяется вместе с высотой этажа с поправкой на использование площади квартир. Максимальное значение приведенной высоты этажа имеет 23-этажное здание. Это здание имеет минимальный коэффициент использования площади квартир, что объясняется, главным образом, более жесткими требованиями по инсоляции для зданий круглой формы.

Таким образом, формула (5) не верна, а значит, исходное положение СНиП том, что при определении класса энергоэффективности жилых зданий не следует делать различия между удельным расходом на 1 м² площади квартир и на 1 м³ отапливаемого объема ошибочно. Эта ошибка обусловлена тем, что в СНиП для жилых зданий различной этажности принята постоянная высота этажа, а площадь квартир приравнена к отапливаемой площади зданий.

Представляет практический интерес оценить влияние уровня теплозащиты наружных стен на удельный расход тепловой энергии на отопление зданий.

В качестве базового показателя примем расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление q_{hv}^{des} на 1 м³ отапливаемого объема, определяемый на основе теплового баланса здания за отопительный период по формуле:

$$q_{hv}^{des} = q_{tr} + q_a - \eta(q_{int} + q_s), \quad (6)$$

где q_{tr} — удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания; q_a — удельные теплопотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха; q_{int} — удельные внутренние бытовые тепловыделения; q_s — удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации; $\eta \leq 1$ — коэффициент использования суммарных тепlopоступлений в здание.

Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания определяются по формуле:

$$q_{tr} = \frac{0,0864 D_d A_e^{sum}}{V_h R_{he}^r}, \quad (7)$$

где D_d — градусосутки отопительного периода, определяемые по формуле (2) СНиП 23–02–2003; A_e^{sum} — суммарная площадь оболочки здания; R_{he}^r — приведенное сопротивление теплопередаче оболочки здания, определяемое по формуле:

$$R_{he}^r = \frac{A_e^{sum}}{\frac{A_w}{R_{hw}^r} + \sum_{i=2}^n \frac{A_i}{R_{hi}^r}}, \quad (8)$$

где A_w , R_{hw}^r — соответственно площадь и приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен; n — общее число ограждающих конструкций оболочки здания; A_i , R_{hi}^r — соответственно площадь и приведенное сопротивление теплопередаче i -й конструкции; $i = 1$ для наружных стен.

После подстановки (7) в (6) с учетом (8) получим зависимость расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от приведенного сопротивления наружных стен в виде:

$$q_{hV}^{des} = \frac{a}{R_{hw}^r} + b, \quad (9)$$

где a , b — коэффициенты, определяемые по формулам:

$$a = \frac{0,0864 D_d A_w}{V_h}, \quad (10)$$

$$b = \frac{0,0864 D_d}{V_h} \sum_{i=2}^n \frac{A_i}{R_{hi}^r} + q_a - \eta(q_{int} + q_s). \quad (11)$$

Значения коэффициентов a и b для указанных зданий, вычисленные по формулам (10), (11) на основе проектных данных, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов a и b

№ здания	Коэффициенты	
	a , [МДж/(м ³ ·год)](м ² ·°С/Вт)	b , МДж/(м ³ ·год)
1	39,7	48,3
2	36,1	49,8
3	60,6	38,8
4	44,3	62,6
5	52	33,5

Расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление q_{hA}^{des} на 1 м² площади квартир может быть получен на основе значений q_{hV}^{des} пересчетом по формуле (4).

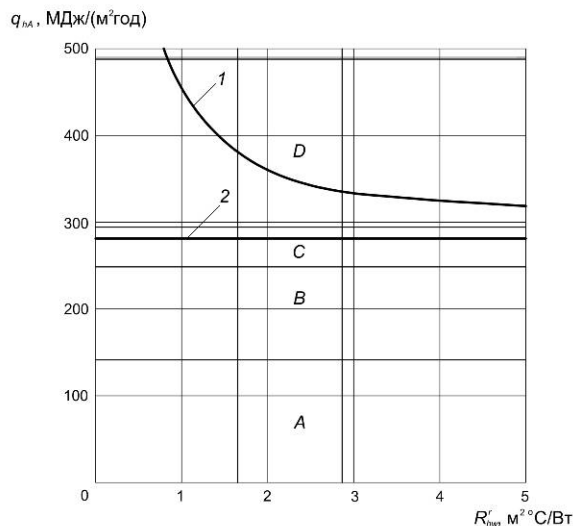


Рис. 1. Зависимость удельного расхода тепловой энергии на отопление, отнесенного к площади квартир, от приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен: 1 — график зависимости $q_{hA}^{des}(R_{hw}^r)$; 2 — нормируемое значение $q_{hA}^{req} = 278$ МДж/(м²·год)

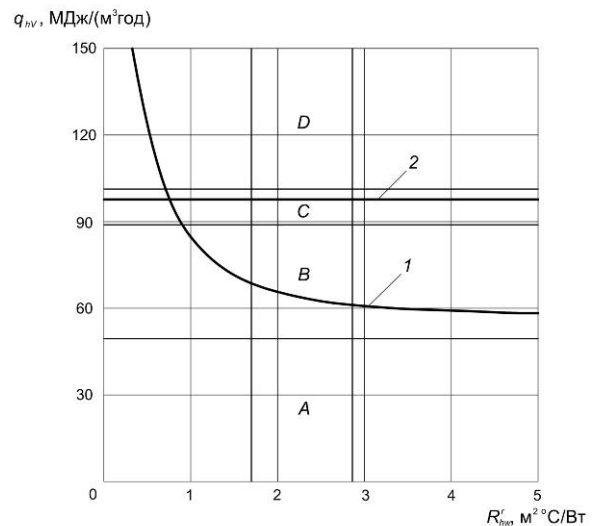


Рис. 2. Зависимость удельного расхода тепловой энергии на отопление, отнесенного к отапливаемому объему, от приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен: 1 — график зависимости $q_{hV}^{des}(R_{hw}^r)$; 2 — нормируемое значение $q_{hV}^{req} = 99,1$ МДж/(м³·год)

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимостей $q_{hA}^{des}(R_{hw}^r)$ и $q_{hV}^{des}(R_{hw}^r)$, построенные для 23-этажного жилого здания (табл. 1). На тех же рисунках показаны: нормируемые значения удельного расхода тепловой энергии на отопление здания

$q_{hA}^{req} = 278 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [$q_{hV}^{req} = 99,1 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$]; классы энергоэффективности; диапазон изменения приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен — от минимально допустимого $R_{hwmin}^{req} = 1,76 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ($0,63 R_{hw}^{req}$) до нормируемого $R_{hw}^{req} = 2,79 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ по табл. 4 СНиП 23–02–2003.

Из рис. 1 видно, что в указанном диапазоне теплозащиты наружных стен график $q_{hA}^{des}(R_{hw}^r)$ лежит в классе *D*. Переход в более высокий класс энергоэффективности путем увеличения приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен невозможен.

Из рис. 2 видно, что при определении расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания на основе отапливаемого объема имеется резерв энергосбережения: снижение приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен до минимально допустимого значения не приводит к изменению класса энергоэффективности здания.

Таким образом, показана необходимость корректировки методики оценки энергоэффективности жилых зданий при актуализации СНиП 23–02–2003.

**Методика расчета теплоступлений от солнечной радиации
при средних условиях облачности за отопительный период
на вертикальную и горизонтальную поверхности**

Для определения расхода тепловой энергии на отопление зданий необходим расчет теплоступлений от солнечной радиации за отопительный период. Такой расчет требует данные по суммарной солнечной радиации на вертикальные поверхности различной ориентации при средних условиях облачности. Приведенные в СНиП 23–01–99* данные при безоблачном небе характеризуют максимальный приход солнечной радиации и не могут быть использованы в расчете теплоступлений за отопительный период. В [194] приведены параметры по солнечной радиации при средних условиях облачности на нормальную к лучу и горизонтальную поверхности. Отсутствие в нормах необходимых данных затрудняет расчет теплоступлений от солнечной радиации за отопительный период и оценку энергоэффективности зданий на стадии проектирования.

Известно, что теплоступления от солнечной радиации за отопительный период Q_s определяют по формуле:

$$Q_s = \sum_{i=1}^g \tau_i^{ver} I_i^{ver} A_i^{ver} + \tau^{hor} I^{hor} A^{hor}, \quad (12)$$

где g — число вертикальных поверхностей различной ориентации; τ_i^{ver} , τ^{hor} — соответственно общий коэффициент пропускания солнечной радиации вертикальной и горизонтальной светопрозрачными конструкциями (СП 23–101–2004); I_i^{ver} , I^{hor} — соответственно суммарная солнечная радиация при средних условиях облачности за отопительный период на вертикальную и горизонтальную поверхности; A_i^{ver} , A^{hor} — соответственно площадь вертикальной и горизонтальной поверхностей.

Суммарную солнечную радиацию Q_{ij}^{ver} на вертикальную поверхность i -й ориентации в j -м месяце определяют по формуле:

$$Q_{ij}^{ver} = S_{ij}^{ver} + D_{ij}^{ver}, \quad (13)$$

где S_{ij}^{ver} — прямая солнечная радиация; D_{ij}^{ver} — рассеянная солнечная радиация с учетом отражения от деательной поверхности.

Прямую солнечную радиацию S_{ij}^{ver} на вертикальную поверхность i -й ориентации в j -м месяце определяют по формуле:

$$S_{ij}^{ver} = \sum_{k=1}^p S_{jk} \cos \theta_{ijk} z_j, \quad (14)$$

где p — число часовых интервалов; S_{jk} — прямая солнечная радиация на нормальную к лучу поверхность в j -м месяце за k -й часовой интервал в средние сутки [194]; θ_{ijk} — угол между направлением солнечного луча и нормалью к поверхности i -й ориентации в j -м месяце за k -й часовой интервал; z_j — число суток в j -м месяце.

В (14) $\cos \theta_{ijk}$ определяют из формулы:

$$\cos \theta_{ijk} = \cos \alpha_i (\cos \delta_j \cos \gamma_k \sin \varphi - \sin \delta_j \cos \varphi) + \sin \alpha_i \cos \delta_j \sin \gamma_k \quad (15)$$

где α_i — азимут поверхности i -й ориентации, отсчитываемый от юга; δ_j — солнечное склонение в середине j -го месяца; γ_k — солнечный часовой угол в середине k -го часового интервала, отсчитываемый от истинного полудня; φ — географическая широта местности.

Рассеянную солнечную радиацию D_{ij}^{ver} на вертикальную поверхность i -й ориентации в j -м месяце определяют по формуле:

$$D_{ij}^{ver} = [\psi_{i-scy} K_D + (1 - \psi_{i-scy}) K_R] D_j^{hor}, \quad (16)$$

где ψ_{i-scy} — коэффициент облученности с вертикальной поверхности i -й ориентации в сторону небосвода; K_D — коэффициент, учитывающий изменение рассеянной солнечной радиации небосвода; K_R — коэффициент, учитывающий отражение от деятельной поверхности, определяемый по формуле:

$$K_R = \frac{Q_j^{hor} A_j^{sw}}{100 D_j^{hor}}, \quad (17)$$

где Q_j^{hor} — суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация на горизонтальную поверхность; A_j^{sw} — альбедо деятельной поверхности для коротковолновой радиации; D_j^{hor} — рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность. Значения Q_j^{hor} , A_j^{sw} , D_j^{hor} приведены в [194].

При средних условиях облачности для вертикальных поверхностей различной ориентации можно принять $K_D = 1$, $\psi_{i-scy} = 0,5$. С учетом этого формула (13) примет следующий вид:

$$Q_{ij}^{ver} = \sum_{k=1}^m S_{jk} \cos \theta_{ijk} z_j + 0,5(1 + K_R) D_j^{hor}. \quad (18)$$

Результаты расчета солнечной радиации при средних условиях облачности для Волгограда приведены в табл. 4.

Таблица 4

Суммарная солнечная радиация по месяцам для Волгограда

Месяцы	Суммарная солнечная радиация, МДж/м ² , на поверхности								
	горизонтальную	вертикальные с ориентацией на							
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
I	110	69	69	92	147	181	151	95	69
II	193	111	115	156	224	266	226	158	115
III	337	150	164	222	290	335	301	230	166
IV	482	158	200	276	324	329	315	268	197
V	661	213	291	383	397	357	377	360	279
VI	710	236	321	405	393	336	375	383	307
VII	698	222	310	402	399	345	378	375	294
VIII	603	179	255	361	404	384	381	335	241
IX	432	129	170	273	356	384	342	260	167
X	256	87	97	161	248	302	252	165	98
XI	108	44	45	73	127	161	128	74	45
XII	73	43	43	56	92	112	93	57	43

Для практического применения табл. 4 выполним статистическую обработку полученных данных методом наименьших квадратов конечными рядами Фурье. Установлено, что наилучший конечный ряд Фурье для каждого столбца таблицы состоит из пяти гармоник:

$$U(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^5 [a_l \cos(\omega_l t) + b_l \sin(\omega_l t)], \quad (19)$$

где a_l , b_l — коэффициенты Фурье; ω_l — круговая частота l -й гармоники ($\omega_l = 2\pi l / T$); T — период.

Коэффициенты Фурье в (19) определяются по формуле прямоугольников:

$$a_l = \frac{2h}{T} \sum_{p=0}^{N-1} Y_p \cos(\omega_l X_p), \quad b_l = \frac{2h}{T} \sum_{p=0}^{N-1} Y_p \sin(\omega_l X_p),$$

где h — шаг разбиения ($h = T / N$); N — число элементов в выборке; (X_p, Y_p) — узлы.

При этом максимальная относительная ошибка на узлах равна 4,46 % для вертикальной поверхности восточной ориентации.

Графики зависимостей $U(t)$ для горизонтальной и ряда вертикальных поверхностей приведены на рис. 3. Маркерами обозначены узлы, взятые из табл. 4.

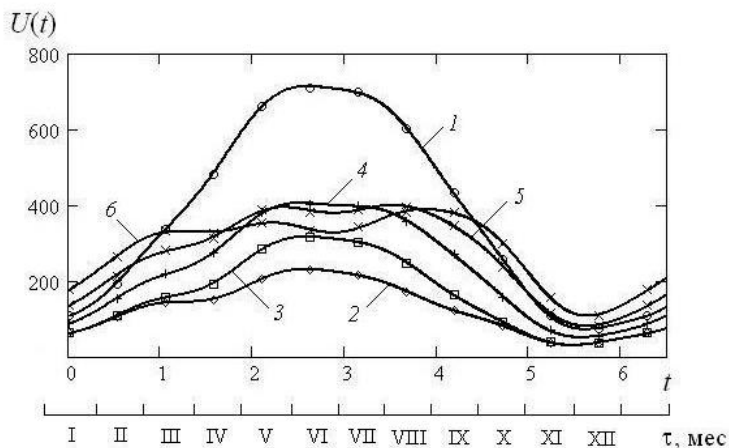


Рис. 3. Графики зависимостей $U(t)$ для горизонтальной (1) и вертикальных поверхностей различной ориентации: 2 — север; 3 — северо-восток; 4 — восток; 5 — юго-восток; 6 — юг

Для горизонтальной поверхности солнечная радиация возрастает от 110 МДж/м² в январе до 710 МДж/м² в июне, а затем убывает до 73 МДж/м² в декабре. Для вертикальных поверхностей северной (С), северо-восточной (СВ) и восточной (В) ориентации годовой ход солнечной радиации аналогичный с минимальными значениями в декабре и максимальными в июне. Для вертикальных поверхностей юго-восточной (ЮВ) и южной ориентации (Ю) ориентации поведение функции $U(t)$ более сложное и характеризуется образованием нескольких локальных максимумов за счет прямой солнечной радиации. Сравнение приведенных на рис. 3 результатов с данными для вертикальных поверхностей другой ориентации (3, СЗ, ЮЗ) показывает некоторую асимметрию, что вполне закономерно и объясняется местными климатическими особенностями пункта.

Разработанная методика позволяет определить суммарную солнечную радиацию на горизонтальную и вертикальные поверхности различной ориентации при средних условиях облачности для различных пунктов.

Сравнение полученных результатов с данными [195] по суммарной солнечной радиации для вертикальных поверхностей показывает их хорошее согласование: максимальная относительная ошибка –10,1 % для вертикальной поверхности северной ориентации в апреле.

Определим теперь суммарную солнечную радиацию за отопительный период по формуле:

$$I = K \int_{\tau_1}^{\tau_2} U(t) dt, \quad (20)$$

где K — размерный коэффициент; τ_1, τ_2 — границы отопительного периода.

На основе статистической обработки данных СНиП 23–01–99* по средним месячным значениям температуры наружного воздуха получена функция $V(t)$ (рис. 4), по которой определены границы отопительного периода при различных значениях базовой температуры.

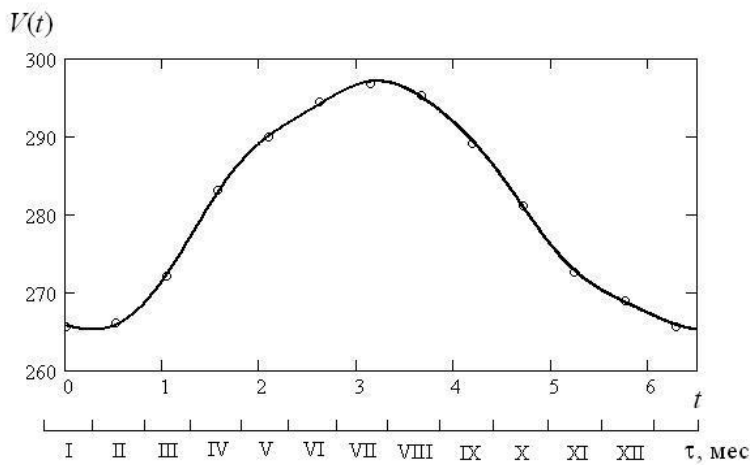


Рис. 4. График зависимости $V(t)$

Результаты расчета солнечной радиации при средних условиях облачности за отопительный период для Волгограда приведены в табл. 5.

Таблица 5

Суммарная солнечная радиация за отопительный период для Волгограда

Базовая температура $t_{bas}, ^\circ\text{C}$	Суммарная солнечная радиация, МДж/м ² , за отопительный период на поверхности								
	горизонтальную	вертикальные с ориентацией на							
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
8	1087	509	542	758	1101	1311	1122	775	544
10	1241	560	604	850	1223	1445	1243	867	606
12	1422	618	677	958	1360	1593	1377	972	678

Из табл. 5 видно, что минимальные значения солнечной радиации отмечаются для поверхности северной ориентации, максимальные — для южной. Следовательно, увеличение площади остекления в наружных стенах южной ориентации (при обеспечении требований по солнцезащите в теплый период года) увеличивает теплопоступления от солнечной радиации за отопительный период. Следует отметить, что выбор базовой температуры оказывает существенное влияние на величину солнечной радиации за отопительный период.

Полученные результаты позволяют определить теплопоступления от солнечной радиации при различной продолжительности отопительного периода.

Энергетический паспорт здания по вариантам расчета

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ

Здание Жилое, 17 эт. (вариант 0)
 Отапливаемый объем V_h , м³ 38785

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Расчетная температура внутреннего воздуха	t _{int} , °C	20
Средняя температура наружного воздуха за отопит. период	t _{ht} , °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода	z _{ht} , сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП)	M _{ht} , °C*сут/год	3965

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

ОТОПЛЕНИЕ

Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания, МДж/(м³*год)

Ограждающие конструкции	Площадь A, м ²	Сопротивление теплопередаче R _{hcon} , м ² *°C/Вт	Удельные трансмиссионные теплопотери		
			основные	добавочные	общие
Наружные стены	4494	4.06	9.78	0.00	9.78
Окна, балконные двери	1576	0.68	20.47	0.00	20.47
Входные двери	55	0.78	0.62	0.00	0.62
Покрытие совмещенное	412	4.22	0.86	0.00	0.86
Перекрытие теплого чердака	381	3.68	0.91	0.00	0.91
Перекрытие над техподпольем	793	3.68	1.90	0.00	1.90
Итого	7711		34.55	0.00	34.55

Добавочные теплопотери по краевым зонам, МДж/(м³*год)

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент доб.теплопотерь	Добавочные теплопотери
Наружные стены	Угол НС	0	
Наружные стены	Сопряжение НС с ВС	0	
Наружные стены	Сопряжение НС с МП	0	
Наружные стены	Оконные откосы	0	
Наружные стены	Теплопроводные включения	0	
Окна, балконные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0	
Окна, балконные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0	
Входные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0	
Входные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0	
Покрытие совмещенное	Сопряжение покрытия с НС	0	

Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с НС	0
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с НС	0

Удельные теплототери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная теплоемкость воздуха	ca, кДж/(кг*°C)	1
Плотность воздуха	ρa, кг/м³	1.3
Коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла	kR	1
Коэффициент использования вентиляции	kven	1
Средняя кратность воздухообмена в рабочее время	uven, 1/ч	0.4
Средняя кратность воздухообмена в нерабочее время	uinf, 1/ч	0.2
Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций	kv	0.85
Удельные теплототери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	qa, МДж/(м³*год)	42.1

Удельные внутренние бытовые тепловыделения

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная мощность бытовых тепловыделений	qaint, Вт/м²	10
Площадь пола	A, м²	4379
Удельные внутренние бытовые тепловыделения	qint, МДж/(м³*год)	17.3

Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя								
		C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Гор.
Общий коэф. теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ОК	tF	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Средняя за отопительный период солнечная радиация при действительных условиях облачности	I, МДж/(м2*год)	509	542	758	1101	1311	1122	775	544	1087
Площадь светопрозрачной ОК	AF, м2	290	0	394	0	498	0	394	0	0
Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации	qs, МДж/(м3*год)					19.6				

Удельный расход тепловой энергии на отопление qh, МДж/(м³*год) 39.75

ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения	khw	1
Удельная теплоемкость воды	cw, кДж/(кг*oC)	4.17
Плотность воды	rw, кг/л	1
Норма расхода горячей воды в средние сутки	qhwo, л/(сут*ед.изм.)	115
Число потребителей горячей воды	Nhw, ед.изм.	140
Температура горячей воды в отопительный период	thw, oC	55
Температура холодной воды в отопительный период	tcw, oC	5
Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м3*год)	15.3

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной электрической нагрузки	ke	0.75
Удельная расчетная электрическая нагрузка	qeo, кВт/(ед. изм.)	1
Число потребителей электрической энергии	Ne, ед. изм.	140
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м3*год)	41.4

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ
ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельный расход тепловой энергии, в том числе:		
на отопление	qhe, МДж/(м3*год)	55.05
на горячее водоснабжение	qh, МДж/(м3*год)	39.75
Удельный расход электрической энергии	qhw, МДж/(м3*год)	15.30
Удельный расход энергии на эксплуатацию здания	qe, МДж/(м3*год)	41.40
	q, МДж/(м3*год)	96.45

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ

Здание Жилое, 17 эт. (вариант 1)
 Отапливаемый объем V_h , м³ 38785

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Расчетная температура внутреннего воздуха	t _{int} , °C	20
Средняя температура наружного воздуха за отопит. период	t _{ht} , °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода	z _{ht} , сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП)	M _{ht} , °C*сут/год	3965

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД
 ОТОПЛЕНИЕ

Удельные трансмиссионные теплопотери через оболочку здания, МДж/(м³*год)

Ограждающие конструкции	Площадь A, м ²	Сопротивление теплопередаче R _{hcon} , м ² *°C/Вт	Удельные трансмиссионные теплопотери		
			основные	добавочные	общие
Наружные стены	4494	4.06	9.78	8.59	18.37
Окна, балконные двери	1576	0.68	20.47	3.09	23.56
Входные двери	55	0.78	0.62	0.09	0.71
Покрытие совмещенное	412	4.22	0.86	0.22	1.08
Перекрытие теплого чердака	381	3.68	0.91	0.23	1.14
Перекрытие над техподпольем	793	3.68	1.90	0.48	2.38
Итого	7711		34.55	12.70	47.25

Добавочные теплопотери по краевым зонам, МДж/(м³*год)

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент доб.теплопотерь	Добавочные теплопотери
Наружные стены	Угол НС	0.021	0.21
Наружные стены	Сопряжение НС с ВС	0.0531	0.52
Наружные стены	Сопряжение НС с МП	0.186	1.82
Наружные стены	Оконные откосы	0.101	0.99
Наружные стены	Теплопроводные включения	0.517	5.06
Окна, балконные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.098	2.01
Окна, балконные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.053	1.08
Входные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.098	0.06
Входные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.053	0.03
Покрытие совмещенное	Сопряжение покрытия с НС	0.252	0.22
Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с НС	0.252	0.23
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с НС	0.252	0.48

Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная теплоемкость воздуха	са, кДж/(кг*°C)	1
Плотность воздуха	га, кг/м³	1.3
Коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла	kR	1
Коэффициент использования вентиляции	kven	1
Средняя кратность воздухообмена в рабочее время	uven, 1/ч	0.4
Средняя кратность воздухообмена в нерабочее время	uinf, 1/ч	0.2
Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций	kv	0.85
Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	qa, МДж/(м³*год)	42.1

Удельные внутренние бытовые тепловыделения

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная мощность бытовых тепловыделений	qaint, Вт/м²	10
Площадь пола	A, м²	4379
Удельные внутренние бытовые тепловыделения	qint, МДж/(м³*год)	17.3

Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя								
		C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	CЗ	Гор.
Общий коэф. теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ОК	tF	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Средняя за отопительный период солнечная радиация при действительных условиях облачности	I, МДж/(м2*год)	509	542	758	1101	1311	1122	775	544	1087
Площадь светопрозрачной ОК	AF, м2	290	0	394	0	498	0	394	0	0
Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации	qs, МДж/(м3*год)						19.6			

Удельный расход тепловой энергии на отопление qh, МДж/(м³*год) 52.45

ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения	khw	1
Удельная теплоемкость воды	cw, кДж/(кг*oC)	4.17
Плотность воды	rw, кг/л	1
Норма расхода горячей воды в средние сутки	qhwo, л/(сут*ед.изм.)	115
Число потребителей горячей воды	Nhw, ед.изм.	140
Температура горячей воды в отопительный период	thw, oC	55
Температура холодной воды в отопительный период	tcw, oC	5
Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м3*год)	15.3

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной электрической нагрузки	ke	0.75
Удельная расчетная электрическая нагрузка	qeo, кВт/(ед. изм.)	1
Число потребителей электрической энергии	Ne, ед. изм.	140
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м3*год)	41.4

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ
ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельный расход тепловой энергии, в том числе:	qhe, МДж/(м3*год)	67.75
на отопление	qh, МДж/(м3*год)	52.45
на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м3*год)	15.30
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м3*год)	41.40
Удельный расход энергии на эксплуатацию здания	q, МДж/(м3*год)	109.15

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ

Здание Жилое, 17 эт. (вариант 2)
 Отапливаемый объем V_h , м³ 38785

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ЗДАНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Расчетная температура внутреннего воздуха	t _{int} , °C	20
Средняя температура наружного воздуха за отопит. период	t _{ht} , °C	-2.4
Продолжительность отопительного периода	z _{ht} , сут/год	177
Градусосутки отопительного периода (ГСОП)	M _{ht} , °C*сут/год	3965

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД
 ОТОПЛЕНИЕ

Удельные трансмиссионные теплотери через оболочку здания, МДж/(м³*год)

Ограждающие конструкции	Площадь A, м ²	Сопротивление теплопередаче R _{hcon} , м ² *°C/Вт	Удельные трансмиссионные теплотери		
			основные	добавочные	общие
Наружные стены	4494	4.06	9.78	2.42	12.20
Окна, балконные двери	1576	0.68	20.47	0.00	20.47
Входные двери	55	0.78	0.62	0.00	0.62
Покрытие совмещенное	412	4.22	0.86	0.11	0.97
Перекрытие теплого чердака	381	3.68	0.91	0.12	1.03
Перекрытие над техподпольем	793	3.68	1.90	0.24	2.14
Итого	7711		34.55	2.89	37.44

Добавочные теплотери по краевым зонам, МДж/(м³*год)

Ограждающая конструкция	Краевая зона	Коэффициент доб.теплотерья	Добавочные теплотери
Наружные стены	Угол НС	0.015	0.15
Наружные стены	Сопряжение НС с ВС	0.0158	0.15
Наружные стены	Сопряжение НС с МП	0.149	1.46
Наружные стены	Оконные откосы	0.0154	0.15
Наружные стены	Теплопроводные включения	0.052	0.51
Окна, балконные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.0	
Окна, балконные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.0	
Входные двери	Сопр. стеклопакета со створкой	0.0	
Входные двери	Сопряжение коробки ОБ с НС	0.0	
Покрытие совмещенное	Сопряжение покрытия с НС	0.127	0.11
Перекрытие теплого чердака	Сопряжение перекрытия с НС	0.127	0.12
Перекрытие над техподпольем	Сопряжение перекрытия с НС	0.127	0.24

Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная теплоемкость воздуха	ca, кДж/(кг*oC)	1
Плотность воздуха	ga, кг/м3	1.3
Коэффициент, учитывающий снижение расхода вентиляционного воздуха при рекуперации и регенерации тепла	kR	1
Коэффициент использования вентиляции	kven	1
Средняя кратность воздухообмена в рабочее время	uven, 1/ч	0.4
Средняя кратность воздухообмена в нерабочее время	uinf, 1/ч	0.2
Коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций	kv	0.85
Удельные теплотери за счет вентиляции и инфильтрации воздуха	qa, МДж/(м3*год)	42.1

Удельные внутренние бытовые тепловыделения

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельная мощность бытовых тепловыделений	qaint, Вт/м2	10
Площадь пола	A, м2	4379
Удельные внутренние бытовые тепловыделения	qint, МДж/(м3*год)	17.3

Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя									
		C	CB	B	ЮB	Ю	ЮЗ	З	CЗ	Гор.	
Общий коэф. теплопропускания солнечной радиации светопрозрачной ОК	tF	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	
Средняя за отопительный период солнечная радиация при действительных условиях облачности	I, МДж/(м2*год)	509	542	758	1101	1311	1122	775	544	1087	
Площадь светопрозрачной ОК	AF, м2	290	0	394	0	498	0	394	0	0	
Удельные тепlopоступления за счет солнечной радиации	qs, МДж/(м3*год)						19.6				

Удельный расход тепловой энергии на отопление qh, МДж/(м3*год) 42.64

ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной нагрузки горячего водоснабжения	khw	1
Удельная теплоемкость воды	cw, кДж/(кг*оС)	4.17
Плотность воды	rw, кг/л	1
Норма расхода горячей воды в средние сутки	qhwo, л/(сут*ед.изм.)	115
Число потребителей горячей воды	Nhw, ед.изм.	140
Температура горячей воды в отопительный период	thw, оС	55
Температура холодной воды в отопительный период	tcw, оС	5
Удельный расход тепловой энергии на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м3*год)	15.3

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Коэффициент использования расчетной электрической нагрузки	ke	0.75
Удельная расчетная электрическая нагрузка	qeo, кВт/(ед. изм.)	1
Число потребителей электрической энергии	Ne, ед. изм.	140
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м3*год)	41.4

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ЗДАНИЮ
ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Показатель	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя
Удельный расход тепловой энергии, в том числе:	qhe, МДж/(м3*год)	57.94
на отопление	qh, МДж/(м3*год)	42.64
на горячее водоснабжение	qhw, МДж/(м3*год)	15.30
Удельный расход электрической энергии	qe, МДж/(м3*год)	41.40
Удельный расход энергии на эксплуатацию здания	q, МДж/(м3*год)	99.34

Экономическая оптимизация тепловой защиты стен здания

Экономическая оптимизация тепловой защиты стен здания выполнена в соответствии с методикой оптимизации оболочки здания по окупаемости энергосберегающих мероприятий, разработанной В.Г. Гагариным и В.В. Козловым и приведенной в проекте актуализированной редакции СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий» (ред. 2012 г.).

Выбор оптимальной конструкции оболочки здания осуществляется по варианту с меньшими удельными приведенными затратами.

По экономическим и климатическим параметрам района строительства определяется удельная прибыль от экономии энергетической единицы, соответствующая проекту здания, по формуле:

$$\Omega_{\text{пр}} = m_{\text{кл}} (C_{\text{тепл}} Z_{\text{ок}} + C_{\text{от}}) \quad (21)$$

где $C_{\text{тепл}}$ — тарифная цена тепловой энергии в районе строительства проектируемого здания; $C_{\text{от}}$ — удельная цена отопительного оборудования и подключения к тепловой сети в районе строительства проектируемого здания; $m_{\text{кл}} = \text{ГСОП} / \text{ГСОП}(\text{Э})$ — климатический коэффициент района строительства (ГСОП — значение градусосуток отопительного периода, определяемое по формуле (2) СНиП 23–02–2003; ГСОП(Э) — эталонное значение градусосуток отопительного периода, принимаемое равным 1000 °С·сут/год); $Z_{\text{ок}}$ — срок окупаемости, определяемый как половина срока службы элемента до замены или ремонта, но не более 12 лет.

В качестве энергетической единицы принят 1 кВт·ч/год сэкономленной энергии при значении ГСОП = 1000 °С·сут/год. По удельной прибыли от экономии энергетической единицы назначается требуемый класс теплозащитной эффективности здания. Используя оптимальный набор элементов ограждающих конструкций, по требуемому классу выбираются экономические и теплотехнические характеристики элементов конструкций. По характеристикам и стоимости элементов из оптимального набора определяются характеристики и стоимость конструкции.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется по формуле:

$$R_{\text{о}}^{\text{пр}} = \frac{1}{\sum a_i U_i + \sum l_j \psi_j + \sum n_k \chi_k}, \quad (22)$$

где a_i — площадь i -го плоского элемента, приходящаяся на 1 м² выделенной ограждающей конструкции; U_i — удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида; l_j — протяженность линейной неоднородности j -го вида, приходящаяся на 1 м² выделенной ограждающей конструкции; ψ_j — удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида; n_k — количество точечных неоднородностей k -го вида, приходящихся на 1 м² выделенной ограждающей конструкции; χ_k — удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида.

Полные единовременные затраты на производство 1 м² конструкции определяются по формуле:

$$K_{\text{кон}}^{\text{ед}} = K_0^{\text{ед}} + \sum a_i K_i^{\text{ед}} + \sum l_j K_j^{\text{ед}} + \sum n_k K_k^{\text{ед}}, \quad (23)$$

где $K_0^{\text{ед}}$ — базовая стоимость 1 м² конструкции (наиболее холодный вариант всех элементов конструкции); $K_i^{\text{ед}}$, $K_j^{\text{ед}}$, $K_k^{\text{ед}}$ — удельные единовременные затраты на неоднородности различных видов.

Удельные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию конструкции определяются по формуле:

$$\Pi = \frac{K_{\text{кон}}^{\text{ед}}}{Z_{\text{ок}}} + 0,024 \frac{\text{ГСОП}}{R_{\text{о}}^{\text{пр}}} \left(C_{\text{тепл}} + \frac{C_{\text{от}}}{Z_{\text{ок}}} \right). \quad (24)$$

Вышеприведенная методика использована для экономической оптимизации тепловой защиты стен здания.

При проектировании здания возникла необходимость выбрать между двумя альтернативными вариантами стены. Первый вариант — навесная фасадная система с вентилируемой воздушной прослойкой с основанием из кирпичной кладки. Второй вариант — кладка из ячеистобетонных блоков с облицовкой кирпичной кладкой.

Конструкция по варианту 1 состоит из четырех видов элементов: плоского (стена по глади), узла установки кронштейна, выхода балконной плиты, оконного откоса. Стена по глади имеет базовую стоимость 3200 руб. (при нулевой толщине утеплителя). Каждые дополнительные 10 мм утеплителя повышают стоимость конструкции на 70 руб.

Конструкция по варианту 2 также состоит из четырех видов элементов: плоского (стена по глади), кладочных швов, выхода плиты перекрытия (с включением балконных плит), оконного откоса. Стена по глади имеет базовую стоимость 1300 руб. (при нулевой толщине утеплителя). Каждые дополнительные 50 мм кладки ячеистобетонных блоков повышают стоимость конструкции на 220 руб.

Показатели ряда экономически обоснованных вариантов отдельных элементов указанных ограждающих конструкций приведены в прил. С проекта актуализированной редакции СНиП 23–02–2003.

Здание жилое, пункт строительства — г. Волгоград.

Градусосутки отопительного периода ГСОП = 3965 °С·сут/год.

Климатический коэффициент района строительства $m_{\text{кл}} = 3,965$.

Тарифная цена тепловой энергии $C_{\text{тепл}} = 1$ руб/(кВт·ч).

Удельная цена отопительного оборудования и подключения к тепловой сети $C_{\text{от}} = 5$ руб/(кВт·ч/год).

Срок окупаемости для обоих вариантов $Z_{\text{ок}} = 12$ лет.

По формуле (21) удельная прибыль от экономии энергетической единицы $\Omega_{\text{пр}} = 67,4$ руб/(кВт·ч/год).

Требуемый класс теплозащитной эффективности здания — 8.

Характеристики элементов из оптимального набора элементов для рассматриваемых вариантов конструкций приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики элементов рассматриваемых вариантов конструкций

Вариант конструкции	Наименование элемента конструкции	Характеристики элемента	
		удельные единовременные затраты, руб/(ед. изм.)	удельные потери теплоты, Вт/(°С·ед. изм.)
1. Навесная фасадная система с вентилируемой воздушной прослойкой	Плоский элемент (1 м ² /м ²)	3900	0,354
	Кронштейн (2,7 шт/м ²)	120	0,055
	Выход балконной плиты (0,12 п.м/м ²)	800	0,3
	Оконный откос (0,8 п.м/м ²)	240	0,1
2. Кладка из ячеистобетонных блоков с наружной облицовкой кирпичной кладкой	Плоский элемент (1 м ² /м ²)	2400	0,468
	Кладочные швы (3,2 п.м/м ²)	80	0,03
	Выход плиты перекрытия (0,4 п.м/м ²)	700	0,3
	Оконный откос (0,8 п.м/м ²)	240	0,1

На основании данных табл. 6 определена структура удельных потерь теплоты для рассматриваемых вариантов конструкций (рис. 5, 6).

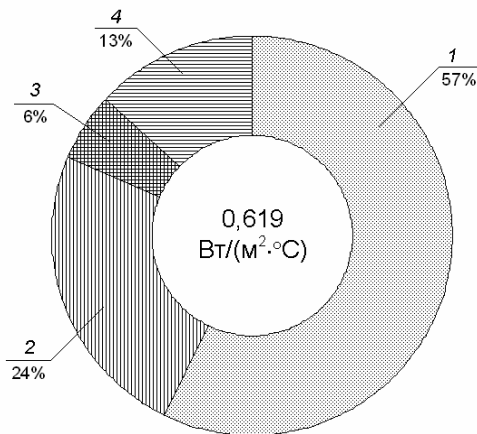


Рис. 5. Структура удельных потерь теплоты для навесной фасадной системы с вентилируемой воздушной прослойкой 1 — плоский элемент; 2 — кронштейн; 3 — выход балконной плиты; 4 — оконный откос

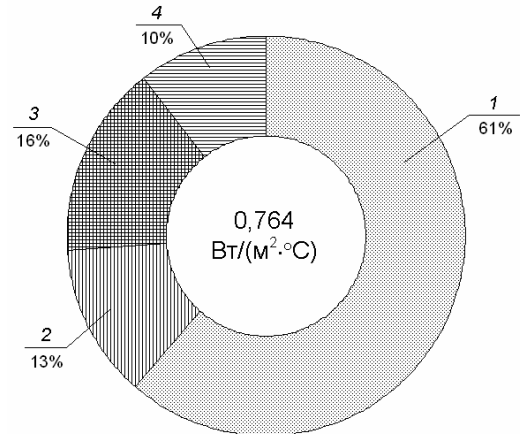


Рис. 6. Структура удельных потерь теплоты для кладки из ячеистобетонных блоков с наружной облицовкой кирпичной кладкой: 1 — плоский элемент; 2 — кладочные швы; 3 — выход плиты перекрытия; 4 — оконный откос

Из рис. 5 видно, что суммарные теплопотери через теплотехнически неоднородные участки конструкции по варианту 1 составляют 43 % от общих теплопотерь, при этом наибольшие теплопотери отмечаются через кронштейн (24 %). Из рис. 6 видно, что доля теплопотерь через теплотехнически неоднородные участки конструкции по варианту 2 несколько снижается (39 % от общих теплопотерь). Однако общие теплопотери по варианту 2 выше, чем по варианту 1 на 23,4 %.

На основании данных табл. 6 определена структура удельных единовременных затрат для рассматриваемых вариантов конструкций (рис. 7, 8).

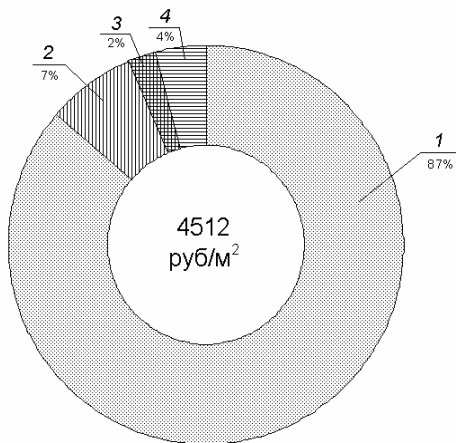


Рис. 7. Структура удельных единовременных затрат для навесной фасадной системы с вентилируемой воздушной прослойкой 1 — плоский элемент; 2 — кронштейн; 3 — выход балконной плиты; 4 — оконный откос

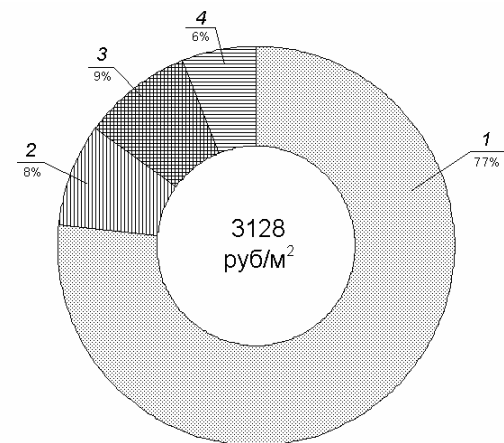


Рис. 8. Структура удельных единовременных затрат для кладки из ячеистобетонных блоков с наружной облицовкой кирпичной кладкой: 1 — плоский элемент; 2 — кладочные швы; 3 — выход плиты перекрытия; 4 — оконный откос

Из рис. 7 видно, что основные затраты в конструкции по варианту 1 приходятся на плоский элемент (по глади стены), что связано с применением дорогостоящего минераловатного утеплителя. Из рис. 8 видно, что затраты на плоский элемент в конструкции по варианту 2 ниже, чем по варианту 1 в связи с отсутствием эффек-

тивного утеплителя. Общая стоимость 1 м² стены по варианту 2 ниже по сравнению с вариантом 1 на 30,7 %.

По известным характеристикам элементов определены показатели рассматриваемых вариантов конструкции (табл. 7).

Таблица 7

Показатели вариантов наружных стен

Наименование показателя	Обозначение, ед. изм.	Значение показателя для вариантов конструкций	
		1	2
Приведенное сопротивление теплопередаче стены	$R_o^{пр}$, м ² ·°C/Вт	1,62	1,31
Общая стоимость 1 м ² стены	$K^{сд}$, руб/м ²	4512	3128
Удельные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию	П, руб/(м ² ·год)	459	364

Таким образом, наименьшие удельные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию среди рассматриваемых вариантов имеет кладка из ячеистобетонных блоков с наружной облицовкой кирпичной кладкой.

Протоколы и акты о внедрении результатов диссертационной работы (копии)

ПРОТОКОЛ № 1/2015 от 27 апреля 2015 года

к стандарту организации СТО 73090654.001–2015
«Оценка влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле»
ООО «КНАУФ Инсулейшн»

Настоящий стандарт разработан с целью повышения уровня безопасности людей в зданиях и сооружениях и сохранности материальных ценностей в соответствии с Федеральным законом от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», повышения уровня гармонизации нормативных требований с европейскими и международными нормативными документами, применения единых методов определения эксплуатационных характеристик и методов оценки.

Актуальность разработки данного стандарта обусловлена необходимостью корректировки СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» в части защиты от переувлажнения ограждающих конструкций в связи с отсутствием в нормах проектирования методов расчета влажностного режима, доступных широкому кругу проектировщиков и гармонизированных с международными стандартами. В ряде случаев, например, для ограждающих конструкций с мультizonальной конденсацией влаги метод расчета согласно СП 50.13330.2012 дает противоречивые результаты в оценке влагозащитных свойств ограждений и потому неприменим на практике.

Приведенные в СТО 73090654.001–2015 методы расчета содержат принципиальные основы оценки влагозащитных свойств ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения и гармонизированы с международным стандартом ISO 13788.

Настоящий стандарт разработан впервые и распространяется на проектирование ограждающих конструкций вновь строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданий с нормируемыми температурой и относительной влажностью воздуха в холодный период года. Стандарт содержит методику расчетной оценки влажностного режима многослойных ограждающих конструкций в годовом цикле с одномерным влагопереносом по механизму диффузии водяного пара при стационарных граничных условиях. Суть методики заключается в определении плоскостей конденсации влаги в ограждении в наиболее холодный месяц года на основе профилей парциального давления водяного пара и давления насыщенного водяного пара с последующей оценкой влагонакопления в годовом цикле.

Автором разработки настоящего стандарта является к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО «ВолгГАСУ» Корниенко С.В.

Стандарт организации содержит следующие основные разделы и приложения:

- 1 Область применения
- 2 Нормативные ссылки
- 3 Термины и определения
- 4 Обозначения и сокращения

5 Исходные данные для расчета

6 Расчет влагонакопления в ограждающей конструкции в годовом цикле

7 Оценка результатов расчета

Приложение А (рекомендуемое) Расчет параметров микроклимата в жилых и офисных помещениях

Приложение Б (справочное) Расчет парциального давления насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

Приложение В (рекомендуемое) Определение плоскости конденсации влаги в ограждении

Приложение Г (рекомендуемое) Расчет профилей температуры, парциального давления водяного пара и давления насыщенного водяного пара в ограждающей конструкции

Приложение Д (справочное) Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле

Приложение Е (справочное) Пример расчета профилей температуры, парциального давления водяного пара и давления насыщенного водяного пара в ограждающей конструкции

Приложение Ж (справочное) Пример определения плоскости конденсации в ограждении

Приложение И (обязательное) Теплотехнические характеристики тепло- и звукоизоляционных изделий из стеклянного штапельного волокна «КНАУФ Инсулейшн»

В приложении Д СТО 73090654.001–2015 выполнена оценка влажностного режима трехслойной стеновой конструкции с наружным слоем из лицевого керамического кирпича с использованием теплоизоляционных изделий из стеклянного штапельного волокна марки TS 034–Aquastatik производства ООО «КНАУФ Инсулейшн».

Библиографический список содержит 25 источников отечественной и зарубежной литературы.

Общий объем стандарта 39 страниц.

СТО 73090654.001–2015 принят в качестве стандарта организации ООО «КНАУФ Инсулейшн».

СТО 73090654.001-2015 прошел обсуждение на заседании Технического совета ООО «КНАУФ Инсулейшн» 29.04.2015 г.

Председатель Технического совета А.М. Деев





187332, Ленинградская область,
Кировский р-н, г. Отрадное,
Никольское шоссе, дом 55
Тел. (+7 812) 334-87-72,
(+7 812) 334-87-44
info@lsrstena.ru
www.lsrstena.ru

АКТ о внедрении результатов диссертационного исследования

г. Санкт-Петербург

22 мая 2015 г.

Мы, нижеподписавшиеся сотрудники ООО «ЛСР. Стеновые—СЗ», коммерческий директор Саенко Э.Г. и ведущий инженер по разработке технологий и продвижению продукции, кандидат военных наук, Ефименко М.Н. составили настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы кандидата технических наук, доцента Корниенко С.В. на тему «Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций при оценке тепловой защиты и энергоэффективности зданий», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Концепция, предложенная и обоснованная в указанной диссертационной работе, внедрена в рамках разработки стандарта организации ООО «ЛСР. Стеновые—СЗ» СТО 03984362.574100.056-2015 «Оценка влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле», постоянно используется при проведении консультаций застройщиков и представителей проектных организаций.

Коммерческий директор

Э. Г. Саенко

Ведущий инженер по разработке
технологий и продвижению
продукции, кандидат военных наук

Ефименко М.Н.

Филиал Общества с ограниченной ответственностью
«ЛСР. Управляющая компания»-«Стеновые материалы Северо-Запад»
193091, Санкт-Петербург, Октябрьская наб., д. 40, лит. Б
ИНН 7838381332, КПП 781143001 р/с 40702810455000000686 в Северо-Западном банке ОАО «Сбербанк России» г. СПб
к/с 30101810500000000653, БИК 044030653



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение
 высшего образования
 «Санкт-Петербургский политехнический
 университет Петра Великого»
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
 ОКПО 02068574
 Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
 Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
 E-mail: office@spbstu.ru
 21.09.2015 № 2109-СУЗИС

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

г. Санкт-Петербург

21 сентября 2015 г.

Мы, нижеподписавшиеся сотрудники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», директор Инженерно-строительного института, д.т.н., профессор Ватин Н.И. и директор учебно-научного центра «Мониторинг и реабилитация природных систем», к.т.н. Горшков А.С. составили настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы к.т.н., доцента Корниенко С.В. на тему «Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций при оценке тепловой защиты и энергоэффективности зданий», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Концепция, предложенная и обоснованная в указанной диссертационной работе, внедрена в рамках разработки Альбома технических решений тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций жилых, общественных и производственных зданий и сооружений на основе изделий из стеклянного штапельного волокна «КНАУФ Инсулейшн» и может быть использована при оценке влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле.

Директор инженерно-строительного
 института, д.т.н., профессор

Ватин Н.И.

Директор учебно-научного центра
 «Мониторинг и реабилитация
 природных систем», к.т.н.

Горшков А.С.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.
2. Богословский, В.Н. Три аспекта концепции ЗЭИЭ и особенности переходного периода / В.Н. Богословский // Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях : сб. докл. науч.-практ. конф. : [в 3-х т.]. – М. : НИИСФ РААСН, 1997. – Т.1. – С. 7–9.
3. Fanger, P.O. Thermal comfort / P.O. Fanger. – McGraw Hill, 1970.
4. Фангер, П.О. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства / П.О. Фангер // АВОК. – 2000. – № 2. – С. 14–20.
5. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М. : АВОК–ПРЕСС, 2002. – 194 с.
6. Табунщиков, Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю.А. Табунщиков, Д.Ю. Хромец, Ю.А. Матросов. – М. : Стройиздат, 1986. – 380 с.
7. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин. – М. : АВОК–ПРЕСС, 2003. – 200 с.
8. Табунщиков, Ю.А. Лицом к проблеме энергосбережения / Ю.А. Табунщиков // Архитектура и строительство Москвы. – 2010. – Т. 554. – № 6. С. 2–13.
9. Савин, В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение / В.К. Савин. – М. : Лазурь, 2005. – 432 с.
10. Савин, В.К. Строительная физика: аэродинамика и теплообмен при взаимодействии потоков и струй со зданиями / В.К. Савин. – М. : Лазурь, 2008. – 480 с.
11. Савин, В.К. Строительная физика. Энергоэкономика / В.К. Савин. – М. : Лазурь, 2011. – 418 с.
12. Гагарин, В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В.Г. Гагарин // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 8–16.
13. Гагарин, В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Гагарин Владимир Геннадьевич. – М., 2000. – 48 с.
14. Гагарин, В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий / В.Г. Гагарин // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 297–305.
15. Гагарин, В.Г. О нормировании теплопотерь через оболочку здания / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 279–286.
16. Гагарин, В.Г. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Жилищное строительство. – 2011. – № 8. – С. 2–6.
17. Шубин, И.Л. Законодательство по энергосбережению в США, Европе и России. Пути решения / И.Л. Шубин, А.В. Спиридонов // Бюллетень строительной техники. – 2012. – № 2. – С. 14–18.
18. Ананьев, А.И. Научно-технические основы повышения теплозащитных качеств и долговечности наружных ограждающих конструкций зданий из штучных материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Ананьев Алексей Иванович. – М., 1998. – 40 с.

19. Ананьев, А.И. Долговечность и энергоэффективность наружных стен из облегченной кирпичной кладки / А.И. Ананьев, А.А. Ананьев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 352–356.
20. Ананьев, А.И. Комплексный подход к созданию энергоэкономичных отапливаемых зданий / А.И. Ананьев // Проблемы строительной теплофизики, систем микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. третьей науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 1998. – С. 59–68.
21. Перехоженцев, А.Г. Нормирование и расчет тепло- и пароизоляции многослойных ограждающих конструкций / А.Г. Перехоженцев // Строительная физика в XXI веке : матер. науч.-техн. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2006. – С. 139–143.
22. Матросов, Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения / Ю.А. Матросов. – М. : НИИСФ РААСН, 2008. – 496 с.
23. Ройфе, В.С. Экспресс-методика комплексного неразрушающего контроля теплотехнического состояния ограждающих конструкций зданий / В.С. Ройфе // Жилищное строительство. – 2011. – № 1. – С. 24–26.
24. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А.Н. Дмитриев, И.Н. Ковалев, Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.
25. Теория здания. Т. 1. Здание — оболочка / С.Н. Булгаков, В.М. Бондаренко, Ю.Я. Кувшинов, А.М. Курзанов и др. – М. : Издательство АСВ, 2007. – 280 с.
26. Кувшинов, Ю.Я. Вопросы энергетической и экономической эффективности панельно-лучистого охлаждения помещений / Ю.Я. Кувшинов, Д.Н. Зинченко, С.Г. Булкин // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 398–403.
27. Прохоров, В.И. Облик энергосбережения / В.И. Прохоров // Актуальные проблемы строительной теплофизики (Академ. чтения) : сб. докл. седьмой науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2002. – С. 73–93.
28. Качество теплоснабжения городов / Е.П. Кузнецов, Н.В. Кобышева, Т.А. Дацюк, Ю.И. Мусийчук и др. – СПб. : ПЭИПК, 2004. – 295 с.
29. Дацюк, Т.А. Инженерные аспекты энергосбережения зданий / Т.А. Дацюк // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 326–328.
30. Сотников, А.Г. Мониторинг микроклимата — основа создания эффективных систем и здания с минимальным энергопотреблением / А.Г. Сотников // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7. – С. 47–52.
31. Соловьев, А.К. Энергоэффективные жилые здания в климатических условиях Северного Китая / А.К. Соловьев, В. Лу // Вестник МГСУ. – 2010. – № 3. – С. 10–15.
32. Малявина, Е.Г. Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий / Е.Г. Малявина // АВОК. – 2009. – № 1.
33. Малявина, Е.Г. Теплотери здания: справочное пособие / Е.Г. Малявина. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
34. Самарин, О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / О.Д. Самарин. – М. : АСВ, 2009. – 296 с.
35. Самарин, О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий / О.Д. Самарин. – М. : Издательство АСВ, 2011. – 128 с.
36. Береговой, А.М. Показатели эффективности энергосбережения путем снижения теплопотерь через наружные ограждения / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 1. – С. 63–68.
37. Гертис, К. Здания XXI века — здания с нулевым потреблением энергии / К. Гертис // Энергосбережение. – 2007. – № 3.
38. Файст, В. Основные положения по проектированию пассивных домов / В. Файст. М. : Издательство АСВ, 2008. – 144 с.

39. Tenpieric, M. An Analytical Model for Calculating Thermal Bridge Effects in High Performance Building Enclosure / M. Tenpieric, W. Van der Spoel, H. Cauberg // *Journal of Building Physics*. – 2008. – No. 31. – pp. 361–387.
40. Cheng, Y. Thermal comfort models: A review and numerical investigation / Y. Cheng, J. Nin, N. Gao // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 47. – pp. 13–22.
41. Alajmi, A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate / A. Alajmi // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 47. – pp. 122–130.
42. Территориальные строительные нормы проектирования энергосберегающих зданий // ССК «Окна и двери». – 2002. – № 1 (58). – С. 41–46.
43. Франчук, А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А.У. Франчук. М. : Стройиздат, 1949. – 120 с.
44. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. – М. : Стройиздат, 1984. – 126 с.
45. Каталог температурных полей узлов типовых ограждающих конструкций. Ч. 1: Жилые здания. – М. : Стройиздат, 1980. – 112 с.
46. Мачинский, В.Д. О конденсации паров воздуха в строительных ограждениях / В.Д. Мачинский // *Строительная промышленность*. – 1927. – № 1. – С. 60–62.
47. Мачинский, В.Д. К вопросу о конденсации водяных паров в строительных ограждениях / В.Д. Мачинский // *Вестник инженеров и техников*. – 1935. – № 12. – С. 742–745.
48. Борщевский, А.Н. Причины поражения зданий домовыми грибами / А.Н. Борщевский. – М.–Л., 1932. – 124 с.
49. Фокин, К.Ф. Расчет влажностного режима наружных ограждений / К.Ф. Фокин. – М.–Л. : ЦНИПС, 1935. – 23 с.
50. Одельский, Э.Х. Графоаналитический метод построения тепловлажностной характеристики деревянных покрытий / Э.Х. Одельский. – Минск, 1937. – 48 с.
51. Шкловер, А.М. О расчете увлажнения наружных ограждений зданий методом стационарного режима / А.М. Шкловер // *Строительная промышленность*. – 1949. – № 7. – С. 20–23.
52. Ушков, Ф.В. Метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий / Ф.В. Ушков. – М. : МКХ РСФСР, 1955. – 104 с.
53. Шкловер, А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков. – М. : Госстройиздат, 1956. – 350 с.
54. Ильинский, В.М. Расчет влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара / В.М. Ильинский // *Промышленное строительство*. – 1962. – № 2. – С. 223–228.
55. Ильинский, В.М. Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учетом физико-климатических воздействий) / В.М. Ильинский. – М. : Стройиздат, 1965. – 295 с.
56. Поликанов, М.В. Теплотехнический расчет ограждений влажных и мокрых помещений / М.В. Поликанов // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1960. – № 1. – С. 79–90.
57. Поликанов, М.В. Оптимальная влажность ограждений с пароизоляцией из бетона / М.В. Поликанов // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 1966. – № 8. – С. 112–120.
58. Перехоженцев, А.Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. – 212 с.

59. Андреев, Д.А. Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации / Д.А. Андреев, В.А. Могутов, А.Н. Цирлин // Строительные материалы. – 2001. – № 12. – С. 42–45.
60. Вытчиков, Ю.С. Исследование влажностного режима строительных ограждающих конструкций с помощью метода безразмерных характеристик / Ю.С. Вытчиков, И.Г. Беляков // Известия вузов. Строительство. – 1998. – № 8. – С. 76–79.
61. Вытчиков, Ю.С. Определение плоскости конденсации для многослойных ограждающих конструкций / Ю.С. Вытчиков // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 92–94.
62. Козлов, В.В. Параметры зоны конденсации ограждающей конструкции, с учетом влагопроводности материалов / В.В. Козлов // Актуальные проблемы строительной теплофизики (Академ. чтения) : сб. докл. седьмой науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2002. – С. 255–260.
63. Glaser, H. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen / H. Glaser // Kältetechnik Bd. II. – 1959. – pp. 345–349.
64. Каммерер, И. Теплоизоляция в промышленности и строительстве / И. Каммерер. – М. : Стройиздат, 1965. – 380 с.
65. Шпайдель, К. Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях / К. Шпайдель. – М. : Стройиздат, 1985. – 48 с.
66. Строительная физика / Е. Шильд, Х.-Ф. Кассельман, Г. Дамен, Р. Поленц. – М. : Стройиздат, 1982. – 296 с.
67. Майнерт, З. Теплозащита жилых зданий / З. Майнерт. – М. : Стройиздат, 1985. – 208 с.
68. Bobran, H.W. Handbuch der Bauphysik (Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchteschutz) / H.W. Bobran, I. Bobran. – Düsseldorf, 1990. – 345 p.
69. Hohmann, R. Bauphysikalische Formeln und Tabellen: Wärmeschutz–Feuchteschutz–Schallschutz / R. Hohmann, M.J. Setzer. – Düsseldorf: Werner, 1995. – 422 p.
70. Brandt, J. Bauphysik nach Maß: Planungshilfen für Hochbauten aus Beton / J. Brandt, H. Moritz. – Köln-Düsseldorf: Beton-Verl., 1995. – 178 p.
71. Berber, J. Bauphysik: Wärmetransport–Feuchtigkeit–Schall / J. Berber. – 4., neu bearbeitete Auflage. – Bernh. Friedr. – Voigt, Hamburg, 1994.
72. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази. – М. : Техносфера, 2004. – 480 с.
73. Гагарин, В.Г. Основы для разработки инженерного метода расчета влажностного режима / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики (Академ. чтения) : сб. докл. восьмой науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2003. – С. 23–35.
74. Гагарин, В.Г. Метод инженерного расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, учитывающий перенос парообразной и жидкой влаги / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции : материалы второй Междунар. науч.-техн. конф. – М. : МГСУ, 2005. – С. 49–53.
75. Козлов, В.В. Учет фильтрации влажного воздуха при расчете влажностного режима ограждающей конструкции / В.В. Козлов // Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики (Академ. чтения) : сб. докл. восьмой науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2003. С. 54–60.
76. Козлов, В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Козлов Владимир Владимирович. – М., 2004. – 24 с.

77. Фокин, К.Ф. Сорбция водяного пара строительными материалами / К.Ф. Фокин // Сб. ЦНИПС «Вопросы строительной физики в проектировании». – М.–Л., 1939. – С. 24–37.
78. Франчук, А.У. Определение сорбционной влажности строительных материалов / А.У. Франчук // Сб. ЦНИПС «Исследования по строительной физике». – М., 1949. – С. 163–192.
79. Литвинова, Т.А. Адсорбция паров воды капиллярно-пористыми телами / Т.А. Литвинова // Сб. тр. НИИ по инж. изыск. в стр.-ве. – Вып. 44. – 1974.
80. Александровский, С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести бетона / С.В. Александровский. – М. : НИИЖБ, 2004. – 712 с.
81. Эпштейн, А.С. Расчет конденсационного увлажнения конструкций / А.С. Эпштейн // Проект и стандарт. – 1936. – № 11. – С. 10–14.
82. Эпштейн, А.С. К вопросу о конденсационном увлажнении деревянных конструкций ограждений / А.С. Эпштейн // Проект и стандарт. – 1937. – № 12. – С. 19–21.
83. Фокин, К.Ф. Расчет последовательного увлажнения материалов в наружных ограждениях / К.Ф. Фокин // Сб. ЦНИПС «Вопросы строительной физики в проектировании». – М.–Л., 1941. – С. 2–18.
84. Власов, О.Е. Основы строительной теплотехники / О.Е. Власов. – М. : Издательство ВИА, 1938.
85. Фокин, К.Ф. Уточненный метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций / К.Ф. Фокин // Холодильная техника. – 1955. – № 3. – С. 28–32.
86. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М. : Стройиздат, 1953. – 320 с.
87. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М. : Стройиздат, 1973. – 287 с.
88. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
89. Власов, О.Е. Основы теории капиллярной диффузии / О.Е. Власов. – М. : Стеклографическое издание ЦНИПС, 1940.
90. Брилинг, Р.Е. Миграция влаги в строительных ограждениях / Р.Е. Брилинг // Сб. ЦНИПС «Исследования по строительной физике». – М.–Л., 1949. – С. 85–120.
91. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М. : Гостехиздат, 1954. – С. 98–121.
92. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск : Издательство Акад. наук БССР, 1961. – 520 с.
93. Лыков, А.В. Массо- и теплоперенос в строительных материалах / А.В. Лыков // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 8. – № 2. – С. 161–169.
94. Лыков, А.В. О термической диффузии влаги / А.В. Лыков // Журнал прикладной химии. – 1935. – Т. 8. – № 8. – С. 1354–1359.
95. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.
96. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 472 с.
97. Федосов, С.В. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 86–87.
98. Федосов, С.В. Применение методов математической физики для моделирования массо и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии

/ С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, А.В. Гущин // Строительные материалы. – 2008. – № 4. – С. 65–67.

99. Долгов, С.И. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений / С.И. Долгов. – М. –Л. : Акад. наук СССР, 1948. – 208 с.

100. Глобус, А.М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена / А.М. Глобус. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.

101. Phillip, J.R. Moisture movement in porous materials under temperature gradients / J.R. Phillip, D.A. de Vries // Transactions, American Geophysical Union 38. – 1957. – H.2. – pp. 222–232.

102. Kohonen, R. Transient analysis of the thermal and moisture physical behaviour of the building constructions / R. Kohonen, J. Maatta // Technical Research Centre of Finland. Research Reports, Espoo, 1983. – 74 p.

103. Gawin, D. Model sprzezonego transportu masy i energii w osrodkach kapilarno-porowatych / D. Gawin, P. Klemm // Materiały konferencyjne. – Łódź, 1989. – pp. 30–35.

104. Rode, C. Combined heat and moisture transfer in building constructions : Dissertation Technical University of Denmark, 1990.

105. Франчук, А.У. Теоретические основы и метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий / А.У. Франчук // Сб. ЦНИПС «Исследования по строительной физике». – М. –Л., 1951. – С. 17–59.

106. Франчук, А.У. Вопросы теории и расчета влажности ограждающих частей зданий / А.У. Франчук. – М. : Стройиздат, 1957. – 188 с.

107. Франчук, А.У. Исследование переноса влаги в строительных материалах / А.У. Франчук // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3. – № 12. – С. 99–102.

108. Лукьянов, В.И. Снижение потерь тепла через наружные стены за счет оптимизации их влажностного режима / В.И. Лукьянов // Науч. тр. НИИСФ Госстроя СССР «Исследования по вопросам экономии энергии при строительстве и эксплуатации зданий». – М., 1982. – С. 140–145.

109. Лукьянов, В.И. Нестационарный массоперенос в строительных материалах при решении проблемы повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Лукьянов Вениамин Иванович. – М., 1991.

110. Ясин, Ю.Д. Экспериментальные исследования движения жидкой влаги в строительных материалах ограждающих конструкций зданий с повышенным влажностным режимом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968.

111. Ясин, Ю.Д. Электрические методы исследования криогенных фазовых превращений жидкой влаги в строительных материалах / Ю.Д. Ясин // Инженерно-физический журнал. – 1982. – Т. 42. – № 3. – С. 437–442.

112. Ясин, Ю.Д. Термодинамическая интерпретация математической модели равновесного состояния фаз влаги в капиллярно-пористых материалах / Ю.Д. Ясин // Инженерно-физический журнал. – 1984. – Т. 47. – № 3. – С. 221–228.

113. Ясин, Ю.Д. Сравнительная оценка способов определения криогенных фазовых превращений влаги в строительных материалах / Ю.Д. Ясин, О.В. Дегтярев // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 23. – № 1.

114. Cammerer, W. Die Kappillare Flüaligkeitsbewegung in porösen Körpern / W. Cammerer // VDI-Forschungst. – 1965. – No. 500. –pp. 37.

115. Künzels, H. Gasbeton. Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten / H. Künzels. – Wiesbaden. – Berlin, 1970. – 120 p.

116. Schwarz, B. Kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen / B. Schwarz // Gesundheits- Ingenieur. – 1972. – B. 93, No. 7. – pp. 206–211.

117. Перехоженцев, А.Г. Исследование тепловлажностного состояния ограждающих конструкций зданий в области теплопроводных включений : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Перехоженцев Анатолий Георгиевич. – М., 1979.
118. Перехоженцев, А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев. – Волгоград : ВолгГАСА, 1997. – 273 с.
119. Перехоженцев, А.Г. Применение локально-одномерного метода для решения двумерных задач нестационарной тепло-влажностной проводимости ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев, С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. третьей науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 1998. – С. 196–203.
120. Корниенко, С.В. Исследование совместного нестационарного тепло-влажностного переноса в ограждающих конструкциях зданий (трехмерная задача) : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Корниенко Сергей Валерьевич. – М., 2000. – 204 с.
121. Kießl, K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen : Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen, 1983.
122. Künzle, H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters / H.M. Künzle. – Stuttgart : IRB Verl., 1995.
123. Богословский, В.Н. Исследование температурно-влажностного режима наружных ограждений методом гидравлических аналогий : дис. ... канд. техн. наук / Богословский Вячеслав Николаевич. – М., 1954.
124. Богословский, В.Н. О потенциале влажности / В.Н. Богословский // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 8. – № 2. – С. 216–222.
125. Лыков, А.В. Теплообмен (Справочник) / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
126. Лыков, А.В. Теория тепло- и массообмена / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
127. Богословский, В.Н. Выбор теплофизических характеристик строительных материалов для расчетов теплопередачи через ограждающие конструкции / В.Н. Богословский, Е.И. Тертичник // Вопросы тепловлажностного и воздушного режимов кондиционирования микроклимата: сб. науч. трудов. – М. : МИСИ, 1970. – С. 16–24.
128. Богословский, В.Н. Об определении потенциала влажности строительных материалов / В.Н. Богословский, А.М. Микшер // Успехи строительной физики в СССР : науч. тр. НИИ строит. физики. – Вып. 3 : Теплофизика. М., 1967. – С. 149.
129. Богословский, В.Н. К определению потенциала влажности наружного климата / В.Н. Богословский, Б.В. Абрамов // сб. науч. трудов. – М. : МИСИ, 1978.
130. Никитина, Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах / Л.М. Никитина. – М. : Энергия, 1968.
131. Богословский, В.Н. Потенциал влажности. Теоретические основы / В.Н. Богословский, В.Г. Гагарин // Рос. акад. архит. и стр.-ва. Вестник отд.-я строит. наук, 1996. – Вып. 1. – С.12–14.
132. Гагарин, В.Г. История возникновения и трансформации понятия «потенциала влажности» от Ч. Слихтера до В.Н. Богословского / В.Г. Гагарин // Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях (Академ. чтения, посвященные памяти В.Н. Богословского) : сб. докл. 6-й науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2001. – С. 333–340.
133. Богословский, В.Н. Термодинамика влажного материала / В.Н. Богословский // Вопросы тепловлажностного и воздушного режимов кондиционирования микроклимата : сб. науч. трудов. – М. : МИСИ, 1970. – С. 5–15.

134. Гурский, Д.А. Вычисления в MathCAD / Д.А. Гурский. – Минск : Новое знание, 2003. – 814 с.
135. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 1970. – 408 с.
136. Цытович, Н.А. О незамерзающей воде в рыхлых горных породах / Н.А. Цытович // Известия Акад. наук СССР. – 1947. – № 3. – С. 39–48.
137. Нерсесова, З.А. О таянии льда в грунтах при отрицательных температурах / З.А. Нерсесова // Докл. Акад. наук СССР. – 1951. – Т. 79. – № 6. – С. 507–508.
138. Бакаев, В.А. Понижение температуры плавления воды в капиллярах пористого тела / В.А. Бакаев, В.Ф. Киселев, К.Г. Красильников // Докл. Акад. наук СССР. – 1959. – Т. 125. – № 4. – С. 831–834.
139. Литвинова, Т.А. Фазовый состав воды в материалах при отрицательных температурах / Т.А. Литвинова // Науч. тр. НИИСФ. – 1967. – Вып. 3.
140. Ройфе, В.С. Способ определения незамерзшей воды и льда в капиллярно-пористых материалах при теплофизических испытаниях ограждающих конструкций / В.С. Ройфе // Инженерно-физический журнал. – 1981. – Т. 40. – № 5. – С. 889–893.
141. Fagerlund, G. Determination of pore-size distribution from freezing-point depression / G. Fagerlund // *Materiaux et constructions*. – 1973. – Vol. 6. – No. 33. – pp. 215–225.
142. Пак, Н.В. Сравнительная оценка теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов при температуре ниже и выше 0 °С / Н.В. Пак // Инженерно-физический журнал. – 1967. – Т. 12. – № 1. – С. 68–71.
143. Васильев, Б.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима крупнопанельных жилых зданий / Б.Ф. Васильев. – М. : Стройиздат, 1968. – 120 с.
144. Фокин, К.Ф. Паропроницаемость строительных материалов / К.Ф. Фокин // Проект и стандарт. – 1934. – № 4. – С. 17–20.
145. Фокин, К.Ф. Новые данные о паропроницаемости строительных материалов / К.Ф. Фокин // Проект и стандарт. – 1936. – № 8–9. С. 19–24.
146. Монствилас, Э.Э. Экспериментально-теоретическое исследование математических моделей нестационарного влагопереноса в ограждающих конструкциях и разработка предложений по регламентации расчетных характеристик : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982.
147. Ильинский, В.М. Коэффициенты переноса водяного пара для расчета влажностного состояния ограждающих конструкций зданий / В.М. Ильинский // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 8. – № 2. – С. 223–228.
148. Куприянов, В.Н. К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, А.Г. Хабибулина // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 504–507.
149. Куприянов, В.Н. Паропроницаемость и проектирование ограждающих конструкций / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 385–390.
150. Куприянов, В.Н. Проектирование ограждающих конструкций с учетом диффузии и конденсации парообразной влаги / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1 (15). – С. 93–103.
151. Кришер, О. Научные основы техники сушки / О. Кришер. – М. : Издательство иностр. литературы, 1961. – 540 с.
152. Гагарин, В.Г. О температурной зависимости коэффициентов влагопроводности строительных материалов / В.Г. Гагарин // Тепловой режим и теплозащита зданий. – М. : НИИСФ, 1988. – С. 109–112.

153. Ермоленко, В.Д. Новый метод определения коэффициента диффузии влаги во влажных материалах / В.Д. Ермоленко // Инженерно-физический журнал. – 1962. – Т. 5. – № 2. – С. 223–228.
154. Тертичник, Е.И. Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колонки / Е.И. Тертичник // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 8. – № 2. – С. 247–250.
155. Микшер, А.М. Экспресс-метод экспериментального определения влажностных характеристик капиллярнопористых материалов / А.М. Микшер, В.С. Ройфе // Инженерно-физический журнал. – 1973. – Т. 24. – № 5. – С. 897–901.
156. Ройфе, В.С. А. с. № 266286 / В.С. Ройфе, М.И. Фримштейн // Бюллетень изобретений. – 1970. – № 11.
157. Брдлик, П.М. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при конденсации водяного пара из влажного воздуха на вертикальной поверхности в условиях естественной конвекции / П.М. Брдлик, И.А. Кожин, Н.Г. Петров // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 8. – № 2. – С. 243–246.
158. Брдлик, П.М. Пособие по расчету тепло- и массообмена при конденсации пара из влажного воздуха на внутренней поверхности наружных стен / П.М. Брдлик, И.А. Кожин, Н.Г. Петров. – М. : НИИСФ, 1967. – 10 с.
159. Елисеева, И.И. Общая теория статистики: учебник / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев ; под ред. И.И. Елисеевой. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 480 с.
160. Александров, А.А. Вязкость воды при температурах $-20 \div 150$ °С / А.А. Александров, М.С. Трахтенгерц // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т. 27. – № 4. – С. 660–666.
161. Александров, А.А. Теплофизические свойства воды при атмосферном давлении / А.А. Александров, М.С. Трахтенгерц. – М. : Издательство стандартов, 1977. – 100 с.
162. Александровский, С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций / С.В. Александровский. – М. : НИИСФ РААСН, 2004. – 332 с.
163. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
164. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.
165. Карслоу, Х.С. Теплопроводность твердых тел / Х.С. Карслоу, Д.К. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
166. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.
167. Кауфман, Б.Н. Теплопроводность строительных материалов / Б.Н. Кауфман. – М. : Стройиздат, 1955. – 160 с.
168. Франчук, А.У. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности строительных материалов и их роль при теплофизической оценке ограждающих конструкций зданий / А.У. Франчук // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3. – № 9. – С. 69–73.
169. Tye, R.P. Thermal conductivity / R.P. Tye. – London–N.Y., 1969. – Vol. 1.
170. Теплопроводность влажных стекловолокнистых и минераловатных плит / С.А. Веялис, А.Ю. Каминкас, И.Я. Гнип и др. // Строительные материалы. – 2002. – № 6. – С. 38–40.
171. Киселев, И.Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры / И.Я. Киселев // Строительные материалы. – 2003. – № 7. – С. 17–18.

172. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
173. Математическое моделирование: Процессы в нелинейных средах / Под ред. А.А. Самарского, С.П. Курдюмова, В.И. Галактионова. – М. : Наука, 1986. – 312 с.
174. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
175. Строительная климатология: справочное пособие к СНиП 23–01–99* / Под ред. В.К. Савина. – М. : НИИСФ РААСН, 2006. – 258 с.
176. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1989. – 616 с.
177. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.
178. Годунов, С.К. Введение в теорию разностных схем / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – М. : Физматгиз, 1962. – 340 с.
179. Яненко, Н.Н. Об экономичных неявных схемах (метод дробных шагов) / Н.Н. Яненко // Докл. Акад. наук СССР. – 1960. – Т. 134. – № 5. – С. 1034–1036.
180. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н.Н. Яненко. – Новосибирск : Наука, 1967. – 197 с.
181. Crank, J. The mathematics of diffusion / J. Crank. – Oxford University Press, 1975.
182. Коздоба, Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Киев : Наукова думка, 1976. – 136 с.
183. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
184. Вабищевич, П.Н. Численное моделирование / П.Н. Вабищевич. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 152 с.
185. Вабищевич, П.Н. Аддитивные схемы (схемы расщепления) для систем уравнений с частными производными / П.Н. Вабищевич // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11. – С. 1–6.
186. Беляев, Н.М. Методы теории теплопроводности / Н.М. Беляев, А.А. Рядно. – Ч.2. – М. : Высшая школа, 1982. – 250 с.
187. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений: Расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека / Л. Банхиди. – М. : Стройиздат, 1981. – 248 с.
188. Могутов, В.А. Новые принципы теплотехнических расчетов светопрозрачных конструкций / В.А. Могутов // Светопрозрачные конструкции. – 2009. – № 1–2. – С. 40–43.
189. Тиатор, И. Отопительные системы / И. Тиатор. – М. : Техносфера, 2006. – 272 с.
190. Гагарин, В.Г. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – Т.1 – С. 192–200.
191. Валанчюс, К. Анализ детального энергетического аудита зданий университета / К. Валанчюс, С. Паулаускайте, А. Вайчайтис // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 50–58.
192. Перехоженцев, А.Г. О необходимости корректировки СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий» / А.Г. Перехоженцев // Жилищное строительство. – 2009. – № 11. – С. 2–6.

193. Самарин, О.Д. Предложения по совершенствованию актуализированной редакции СНиП 23–02 / О.Д. Самарин // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 13–15.
194. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. – Ч. 1–6. – Вып. 13. – Л. : Гидрометеиздат, 1987.
195. Кондратьев, К.Я. Радиационный режим наклонных поверхностей / К.Я. Кондратьев, З.И. Пивоварова, М.П. Федорова. – Л. : Гидрометеиздат, 1978.
196. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : [федер. закон от 30 дек. 2009 г. № 384–ФЗ].
197. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : [федер. закон от 23 нояб. 2009 г. № 261–ФЗ].
198. О техническом регулировании : [федер. закон от 27 дек. 2002 г. № 184–ФЗ].
199. СНиП 23–02–2003 Тепловая защита зданий. – М. : ФГУП ЦПП, 2004.
200. СНиП II–3–79* Строительная теплотехника. – М. : ГУП ЦПП, 2001.
201. СП 23–101–2004 Проектирование тепловой защиты зданий. – М. : ФГУП ЦПП, 2004.
202. СТО 17532043–001–2005 Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий. – М. : РНТО строителей, 2006.
203. СТО 00044807–001–2006 Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. – М. : РОИС, 2006.
204. СП 50.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий». – М. : ФГУП ЦПП, 2012.
205. СП 131.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 23–01–99* «Строительная климатология». – М. : ГУП ЦПП, 2012.
206. ГОСТ 30494–2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М. : ФГУП ЦПП, 2011.
207. ГОСТ 12.1.005–88* ССБТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
208. ГОСТ 25898–2012 Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропроонианию. – М. : Изд-во стандартов, 2012.
209. ГОСТ 21718–84 Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
210. ГОСТ Р 54853–2011 Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера. – М. : Изд-во стандартов, 2011.
211. СП 52.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 23–05–95* «Естественное и искусственное освещение». – М. : Минрегионразвития РФ, 2011.
212. СП 30.13330–2012 Актуализированная редакция СНиП 2.04.01–85* «Внутренний водопровод и канализация зданий». – М. : Минстрой России, 2012.
213. ГОСТ 31168–2014 Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление. – М. : ФГУП ЦПП, 2014.
214. ГОСТ Р 54852–2011 Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – М. : Изд-во стандартов, 2012.
215. МДС 23–1.2007 Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М. : ОАО «ЦПП», 2008.

216. СП 54.13330.2016 Актуализированная редакция СНиП 31–01–2003 «Здания жилые многоквартирные». – М., 2016.
217. СП 118.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 31–06–2009 «Общественные здания и сооружения». – М., 2012.
218. СП 60.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 41–01–2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». – М., 2012.
219. ГОСТ Р 54257 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – М., 2011.
220. ГОСТ Р 53778 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М., 2011.
221. Корниенко, С.В. Исследование коэффициента влагообмена ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики и энергосбережения в зданиях : сб. докл. первой науч.-практ. конф. : [в 3-х т.]. – М. : НИИСФ РААСН, 1997. – Т. 3. – С. 276–280.
222. Корниенко, С.В. Исследование тепловлажностных структур в нелинейной среде шпоночного соединения трехслойных панелей (компьютерный эксперимент) / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1998. – 64 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 12.10.98, № 2985–В98.
223. Корниенко, С.В. Конечно-разностное решение пространственной задачи нестационарного тепло-влажноперевода в ограждающих конструкциях зданий / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1998. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 21.08.98, № 2630–В98.
224. Перехоженцев, А.Г. Определение коэффициента диффузии влаги влажных капиллярно-пористых материалов методом двусторонней сушки / А.Г. Перехоженцев А.Г., С.В. Корниенко // Известия вузов. Строительство. – 1998. – № 4–5. – С. 129–132.
225. Перехоженцев, А.Г. Определение коэффициентов влажопроводности капиллярно-пористых материалов / А.Г. Перехоженцев, С.В. Корниенко ; информ. л. № 12–98, сер. 67.01.81. – Волгоград: ВЦНТИ, 1998.
226. Перехоженцев, А.Г. Применение локально-одномерного метода для решения двумерных задач нестационарной тепло-влажнопроводности ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев, С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. третьей науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 1998. – С. 196–203.
227. Корниенко, С.В. Применение локально-одномерного метода для решения трехмерных задач нестационарной тепло-влажнопроводности ограждающих конструкций / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1998. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 29.05.98, № 1660–В98.
228. Корниенко, С.В. Применение теплозащитного экрана «МИК» для утепления эксплуатируемых зданий / С.В. Корниенко, А.Н. Максимов // Региональные аспекты реформы жилищно-коммунального хозяйства : материалы науч.-практ. конф. Волгоград : ВолГАСА, 1998. – С. 90–92.
229. Корниенко, С.В. Программа WATEC–3 расчета температурно-влажностного режима конструкций зданий / С.В. Корниенко ; информ. л. № 271–98, сер. 50.41.25. – Волгоград : ВЦНТИ, 1998. – 3 с.
230. Корниенко, С.В. Программа WATEKOR–2 расчета температурно-влажностного режима / С.В. Корниенко ; информ. л. № 70–98, сер. 50.41.25 : 50.51.17. – Волгоград: ВЦНТИ, 1998. – 3 с.
231. Корниенко, С.В. Экспериментальное исследование коэффициента диффузии влаги в строительных материалах ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем микроклимата и энергосбе-

режения в зданиях : сб. докл. третьей науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 1998. – С. 188–195.

232. Корниенко, С.В. Исследование теплового режима стыков ограждающих конструкций сложной геометрической структуры / С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. четвертой науч.-практ. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 1999. – С. 306–323.

233. Корниенко, С.В. Компьютерное тестирование трехмерной задачи нестационарного тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1999. – 33 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 17.02.99, № 502–В99.

234. Корниенко, С.В. Метод расчета тепловлажностного режима трехмерных неоднородных областей ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1999. – 38 с. Деп. в ВИНТИ РАН 17.02.99, № 503–В99.

235. Корниенко, С.В. Совместный нестационарный тепло-влагоперенос в ограждающих конструкциях зданий (трехмерная задача) : Монография / С.В. Корниенко. – Волгоград, 1999. – 187 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 01.12.99, № 3568–В99.

236. Корниенко, С.В. Исследование совместного нестационарного тепло-влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий (трехмерная задача) : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01 / Корниенко Сергей Валерьевич. – М., 2000. – 24 с.

237. Корниенко, С.В. Компьютерное моделирование тепловлажностного состояния конструкции со шпоночным соединением / С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. пятой науч.-практ. конф. (Академ. чтения). – М. : НИИСФ РААСН, 2000. – С. 307–312.

238. Корниенко, С.В. Метод расчета нелинейного теплопереноса в конструкциях зданий (трехмерная задача) / С.В. Корниенко. – Волгоград, 2000. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 10.10.00, № 2588–В00.

239. Корниенко, С.В. Исследование температурного режима трехслойной стеновой панели со шпоночным соединением / С.В. Корниенко. – Волгоград, 2001. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 24.07.01, № 1770–В2001.

240. Корниенко, С.В. К проблеме комплексной автоматизации теплотехнического проектирования ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов : сб. материалов третьей Междунар. науч.-практ. конф. : [в 2-х ч.]. – Пенза : Приволж. Дом знаний, 2001. – Ч. 1. – С. 131–134.

241. Корниенко, С.В. К тестированию задачи стационарной теплопроводности для ограждающих конструкций с источниками (стоками) тепла / С.В. Корниенко. – Волгоград, 2001. – 5 с. – Деп. в ВИНТИ РАН 24.07.01, № 1769–В2001.

242. Корниенко, С.В. Комплексная автоматизация теплотехнического проектирования ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // VI Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Волгоград, 13–16 ноября 2001 г. : тез. докл. по направлению № 16 «Экология, охрана среды, строительство». – Волгоград : ВолГАСА, 2001. – С. 56–57.

243. Корниенко, С.В. Компьютерный аудит температурного режима фундаментов / С.В. Корниенко // Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях : сб. докл. шестой науч.-практ. конф. (Академ. чтения, посвящ. памяти В.Н. Богословского). – М. : НИИСФ РААСН, 2001. – С. 197–202.

244. Корниенко, С.В. Метод многофакторного прогноза температурного режима в ограждающих конструкциях зданий / С.В. Корниенко // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 2–3. – С. 129–132.

245. Корниенко, С.В. Повышение тепловой эффективности жилого здания / С.В. Корниенко // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов : сб. материалов третьей Междунар. науч.-практ. конф. : [в 2-х ч.]. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2001. – Ч. 1. – С. 127–130.

246. Корниенко, С.В. Программно-вычислительный комплекс WTCODE 1.0 / С.В. Корниенко ; информ. л. № 51–208–01. – Волгоград : ВЦНТИ, 2001. – 3 с.

247. Корниенко, С.В. Решение задачи стационарной теплопроводности для наружных ограждений / С.В. Корниенко. – Волгоград, 2001. – 8 с. Деп. в ВИНТИ РАН 24.07.01, № 1768–В2001.

248. Корниенко, С.В. Температурный режим трехслойной стеновой панели / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2001. – № 9. – С. 20–21.

249. Корниенко, С.В. Исследование теплозащитных качеств сопряжений ограждающих конструкций с многокомпонентными включениями / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. акад. Сер.: Стр-во и архит. – 2002. – Вып. 2 (5). – С. 151–155.

250. Корниенко, С.В. Новая шкала потенциала влажности для прогноза влажностного режима ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко, А.Г. Перехоженцев // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 4–8.

251. Корниенко, С.В. Оценка теплоэнергетической эффективности жилого здания серии «Дом–2000 КП» массового применения / С.В. Корниенко // Актуальные проблемы строительной теплофизики : сб. докл. седьмой науч.-практ. конф. (Акад. чтения). – М. : НИИСФ РААСН, 2002. – С. 261–266.

252. Корниенко, С.В. Повышение теплозащитных качеств наружных стен эксплуатируемых зданий / С.В. Корниенко, А.К. Елисеев // Альманах–2002. – Волгоград : Издательство Волгогр. гос. ун-та, 2002. – С. 58–60.

253. Корниенко, С.В. Температурный режим вентилируемых стен / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2002. – № 12. – С. 7–9.

254. Корниенко, С.В. Температурный режим вентилируемых стен / С.В. Корниенко // Рациональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. [в 2-х ч.]. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. – Ч. 1. – С. 123–129.

255. Корниенко, С.В. Температурный режим сопряжений ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2002. – № 4. – С. 7–8.

256. Корниенко, С.В. К проблеме автоматизации проектирования тепловой защиты зданий / С.В. Корниенко // Строительство–2003: сб. тез. докл. науч.-практ. конф. Ростов н/Д : Рост. гос. строит. ун-т, 2003. – С. 218–219.

257. Корниенко, С.В. Потенциал влажности. Сравнительный анализ / С.В. Корниенко // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования, 1–5 дек. 2003г. – М. : Акад. наук о Земле, 2003. – С. 88–90.

258. Корниенко, С.В. Программа «Теплоэнергетический паспорт здания (TERAS 1.0)» / С.В. Корниенко ; информ. л. № 51–022–03. – Волгоград: ВЦНТИ, 2003. – 3 с.

259. Корниенко, С.В. Теплозащитные качества вентилируемых стен / С.В. Корниенко // Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики: сб. докл. восьмой науч.-практ. конф. (Акад. чтения). – М.: НИИСФ РААСН, 2003. – С. 107–110.

260. Корниенко, С.В. Методика определения расхода тепловой энергии на отопление жилых зданий по укрупненным измерителям / С.В. Корниенко // Вестник

Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2004. – Вып. 4 (13). – С. 29–33.

261. Корниенко, С.В. Температурный режим оконных откосов / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2004. – № 3. – С. 16–19.

262. Корниенко, С.В. Методика определения площади остекления фасадов зданий / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2005. – Вып. 5 (17). – С. 169–172.

263. Корниенко, С.В. Некоторые аспекты учета влажностного режима ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Актуальные проблемы развития АПК : сб. докл. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию Победы в Великой Отечественной войне. – Волгоград : Волгогр. гос. с.-х. акад., 2005. – С. 164–166.

264. Корниенко, С.В. Новая шкала потенциала влажности для материалов наружных ограждений зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 5–6.

265. Корниенко, С.В. Потенциал влажности / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2005. – № 7. – С. 16–18.

266. Корниенко, С.В. Учет формы при определении нормируемого удельного расхода тепловой энергии на отопление зданий / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2005. – Вып. 5 (17). – С. 178–182.

267. Корниенко, С.В. Метод решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 2. – С. 108–111.

268. Корниенко, С.В. Потенциал влажности воздушной среды / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2006. – № 7. – С. 16–17.

269. Корниенко, С.В. Потенциал влажности для материалов ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительная физика в XXI веке : материалы науч.-техн. конф. – М. : НИИСФ РААСН, 2006. – С. 132–135.

270. Корниенко, С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 88–89.

271. Korniyenko, S. The potential of humidity for definition of moisture condition of materials of external enclosing structures in non-isothermal conditions / S. Korniyenko // Construction and Building Materials. – 2006. – No. 4. – pp. 88.

272. Корниенко, С.В. Замерзание влаги в материалах ограждений / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2007. – № 9. – С. 17–18.

273. Корниенко, С.В. Инженерный метод определения плоскости наибольшего увлажнения для ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 6. – С. 50–51.

274. Корниенко, С.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции : материалы второй Междунар. науч.-техн. конф., 21–23 нояб. 2007 г. – М. : МГСУ, 2007. – С. 79–81.

275. Корниенко, С.В. Решение трехмерной задачи совместного нестационарного тепло- и влагопереноса для ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 10. – С. 54–55.

276. Korniyenko, S. The decision of the three-dimensional problem combined non-stationary heat- and moisture condition for enclosing structures of buildings / S. Korniyenko // Construction and Building Materials. – 2007. – No. 10. – pp. 54.

277. Корниенко, С.В. Связь между шкалами потенциала влажности / С.В. Корниенко // Актуальные проблемы современного строительства : сб. тез. докл. Междунар.

науч.-техн. конф. (Пенза, 23–25 апр. 2007 г.). Пенза : Пенз. гос. ун-т архит. и стр-ва, 2007. – С. 53–54.

278. Корниенко, С.В. Температурный режим оконных откосов / С.В. Корниенко // Светопрозрачные конструкции. – 2007. – № 6. – С. 10–11.

279. Корниенко, С.В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 74–76.

280. Корниенко, С.В. Экспериментальная проверка состояния системы «внутренняя среда–ограждение–наружная среда» на основе потенциала влажности / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2007. – № 2. – С. 5–7.

281. Корниенко, С.В. Экспериментальное исследование переноса влаги в материалах ограждающих конструкций зданий / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 42–44.

282. Корниенко, С.В. Экспериментальное исследование переноса влаги в материалах / С.В. Корниенко // Тез. докл. 64-й науч.-техн. конф. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2007. – С. 57–58.

283. Корниенко, С.В. Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе потенциала влажности / С.В. Корниенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 2. – С. 46–48.

284. Корниенко, С.В. Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Инженерные системы. – 2008. – № 2. – С. 52–55.

285. Корниенко, С.В. Равновесное влагосодержание материалов в шкале потенциала влажности / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2008. – № 5. – С. 34–35.

286. Корниенко, С.В. Расчет температурно-влажностного режима наружных углов стен / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2008. – № 12. – С. 25–27.

287. Корниенко, С.В. Расчет тепловлажностного режима в краевых зонах неоднородных участков ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Вестник Международной академии холода. – 2008. – Вып. 4. – С. 12–14.

288. Корниенко, С.В. Расчет тепловлажностного режима оконных откосов / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2008. – № 6. – С. 36–38.

289. Корниенко, С.В. Состояние влажного воздуха в шкале потенциала влажности / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2008. – № 2. – С. 42–43.

290. Корниенко, С.В. Тестирование метода решения трехмерной задачи совместного тепло- и влагопереноса / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 72–73.

291. Корниенко, С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом / С.В. Корниенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 389–394.

292. Корниенко, С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом / С.В. Корниенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 10. – С. 43–45.

293. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 348–351.

294. Корниенко, С.В. Снижение теплопотерь за счет совершенствования краевых зон ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2010. – № 3. – С. 31–32.

295. Корниенко, С.В. Совершенствование конструктивного решения светопрозрачных ограждений при оценке теплопотерь / С.В. Корниенко // Строительные материалы. – 2010. – № 6. – С. 72–73.
296. Корниенко, С.В. Расчет тепlopоступлений от солнечной радиации за отопительный период / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2010. – № 6. – С. 40–41.
297. Корниенко, С.В. Оценка влияния температурно-влажностного режима на теплопотери через краевые зоны ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Светопрозрачные конструкции. – 2010. – № 3(71). – С. 58–59.
298. Корниенко, С.В. Проект многофункционального энергоэффективного жилого комплекса в Волгограде / С.В. Корниенко, П.В. Шабунин // Научный потенциал молодых ученых для инновационного развития строительного комплекса Нижнего Поволжья : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24 дек. 2010 г., г. Волгоград : в 2-х ч. Ч. II / Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. – С. 108–111.
299. Корниенко, С.В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплопотери здания / С.В. Корниенко // Вестник МГСУ. – 2011. – Т. 1. – № 3. – С. 359–365.
300. Корниенко, С.В. Оценка энергоэффективности с учетом влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплопотери здания / С.В. Корниенко // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 167–173.
301. Корниенко, С.В. Оценка влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплозащиту и энергоэффективность зданий / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 8. – С. 5–12.
302. Корниенко, С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь в краевых зонах ограждающих конструкций : Монография / С.В. Корниенко. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. – 108 с.
303. Корниенко, С.В. Методы инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности : Монография / С.В. Корниенко. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. – 100 с.
304. Корниенко, С.В. Оценка влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на теплозащиту зданий / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 26 (45). – С. 148–154.
305. Корниенко, С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах натурных измерений параметров микроклимата помещений / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2 (28). – С. 18–23.
306. Корниенко, С.В. Оценка инсоляции жилых зданий в зоне влияния проектируемого здания / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 27 (46). – С. 156–163.
307. Корниенко, С.В. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания при верификации метода расчета влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2012. – Вып. 28 (47). – С. 19–26.
308. Корниенко, С.В. Оценка энергоэффективности жилого здания по результатам энергоаудита / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 19–22.

309. Корниенко, С.В. Оценка теплозащитных качеств фрагментов оболочки здания методом неразрушающего контроля / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2012.
310. Электронная версия СНиП II–3–79* «Строительная теплотехника» (WTCODE 1.0) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610954 от 01.08.2001.
311. Теплоэнергетический паспорт здания (ТЕPAS 1.0) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610358 от 18.03.2002.
312. Нестационарное температурное поле (НТП) / С.В. Корниенко ; свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610522 от 24.02.2004.
313. Совместный влаготеплоперенос (COBT) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611175 от 04.02.2011.
314. Энергетический паспорт здания (ЭНПАС) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610351 от 10.01.2012.
315. Rode, C. Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer / C. Rode, D.M. Burch // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building VI, December 4–8. Clearwater Beach, FL: 1995. – pp. 283–295.
316. Künzeli, H.M. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components / H.M. Künzeli, K. Kiehl // International Journal of heat and mass transfer. – 1997. – No. 1. – pp. 159–167.
317. Motuziene, V. Complex Analysis of Energy Efficiency of public buildings: case study of VGTU / V. Motuziene, K. Valancius, G. Rynkun // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 2 (28). – С. 9–17.
318. Thorsell, T. Integrated methodology for evaluation of energy performance of the building enclosures: part 3 – uncertainty of thermal measurements / T. Thorsell, M. Bomberg // Journal of Building Physics. – 2011. – Vol. 35. – pp. 83–96.
319. Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements / F. Miranville, A. H. Fakra, S. Gnichard [and others] // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 48. – pp. 79–90.
320. Condensation risk assessment on box windows: the effect of the window-wall interface / W. Maref, N. Van Den Bossche, M. Armstrong [and others] // Journal of Building Physics. – 2012. – V. 36. – pp. 35–56.
321. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non-air-conditioned rooms / G. Barrios, G. Huelsz, R. Rechtman, J. Rojas // Energy and Buildings. – 2011. – V. 43. – No. 1. – pp. 219–223.
322. D’Orazio, M. Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions / M. D’Orazio, C. Di. Perna, E. Di. Giuseppe, M. Morodo // Journal of Building Physics. – 2013. – Vol. 36. – pp. 229–246.
323. Asadi, S. Performance evaluation of an attic radiant barrier system using three-dimensional transient finite element method / S. Asadi, M.M. Hassan, A. Beheshti // Journal of Building Physics. – 2013. – Vol. 36. – pp. 247–264.
324. Distributed DC-UPS for Energy Smart Buildings / A. Moreno-Munoz, V. Pallarés-Lopez, R.J. Real-Calvo [and others] // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – No. 1. – pp. 93–100.
325. Energy Efficiency: Building on Standard 90.1 / S.D. Kennedy, M.G. Vangeem, T. Lawrence, R. Lord // ASHRAE Journal. – 2010. – Vol. 52. – No. 6. – pp. 22–28.
326. Energy Saving Potential and Repercussions on Indoor Air Quality of Demand Controlled Residential Ventilation Strategies / J. Laverge, N. Van Den Bossche, A.

Janssens, N. Heijmans // *Building and Environment*. – 2011. – Vol. 46. – No. 7. – pp. 1497–1503.

327. Verbeeck, G. Life Cycle Inventory of Buildings: A Contribution Analysis / G. Verbeeck, H. Hens // *Building and Environment*. – 2010. – V. 45. – No. 4. – pp. 964–967.

328. Primary Energy Implications of End-Use Energy Efficiency Measures in District Heated Buildings / L. Gustavsson, A. Dodoo, N.L. Truong, I. Danielski // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – No. 1. – pp. 38–48.

329. Energy Efficiency Studies Through 3D Laser Scanning and Thermographic Technologies / S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto, P. Arias // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – No. 6. – pp. 1216–1221.

330. Serra, V. Experimental Evaluation of a Climate Façade: Energy Efficiency and Thermal Comfort Performance / V. Serra, F. Zanghirella, M. Perino // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – No. 1. – pp. 50–62.

331. Richman, R.C. More Sustainable Masonry Façades: Preheating Ventilation Air Using a Dynamic Buffer Zone / R.C. Richman, C. Cianfrone, K.D. Pressnail // *Journal of Building Physics*. – 2010. – Vol. 34. – No. 1. – pp. 27–41.

332. Standards for Heating Energy Use in Russian Buildings: A Review and a Report of Recent Progress / Yu.A. Matrosov, I.N. Butovsky, L.K. Norford, M.W. Opitz // *Energy and Buildings*. – 1997. – Vol. 25. – No. 3. – pp. 207–222.

333. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon / H. Orr, J. Wang, D. Fetsch, R. Dumont // *Journal of Building Physics*. – 2013. – Vol. 36. – pp. 294–307.

334. Mlakar, J. Temperature and Humidity Profiles in Passive-house Building Blocks / J. Mlakar, J. Štrancar // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 60. – pp. 185–193.

335. Dos Santos, G.H. Heat, Air and Moisture Transfer through Hollow Porous Blocks / G.H. Dos Santos, N. Mendes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 52(9–10). – pp. 2390–2398.

336. Teodosiu, R. Integrated Moisture (Including Condensation) — Energy — Air-flow Model within Enclosures / R. Teodosiu // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 61. – pp. 197–209.

337. Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency / W.A. Friess, K. Rakhshan, T.A. Hendawi, S. Tajerzadeh // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 44. – pp. 26–32.

338. Wang, W. Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall / W. Wang, Zh. Tian, Y. Ding // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 64. – pp. 218–223.

339. Dodoo, A. Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective / A. Dodoo, L. Gustavsson, R. Sathre // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – Issue 7. – pp. 1589–1597.

340. Revel, G.M. Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment / G.M. Revel, E. Sabbatini, M. Arnesalo // *Measurement Science and Technology*. – 2012. – Vol. 23. – No. 3.

341. Brunner, C.U. Wärmebrückenkatalog. Neubaudetails / C.U. Brunner, J. Nänni. – Zürich: SIA-Dokumentation 99, 1985.

342. Mainka, G.W. Wärmebrückenkatalog / G.W. Mainka, H. Paschen. – Stuttgart: Teubner-Verlag, 1986.

343. Staelens, P. Thermal Bridges: A Non-Computerized Calculation Procedure / P. Staelens // *Journal of Building Physics*. – 1987. – Vol. 10. – No 3. – pp. 173–188.

344. Hauser, G. Wärmebrücken-Atlas für den Holzbau / G. Hauser, H. Stiegel. – Wiesbaden, 1992.
345. Hauser, G. Wärmebrückenatlas für den Mauerwerksbau / G. Hauser, H. Stiegel. – Wiesbaden, 1997.
346. Woroniak, G. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community / G. Woroniak, J. Piotrowska-Woroniak // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 72. – pp. 51–61.
347. Varas-Muriel, M.J. Monitoring the thermal-hygrometric conditions induced by traditional heating systems in a historic Spanish church (XII—XVIC.) / M.J. Varas-Muriel, M.I. Martínez-Garrido, R. Fort // *Energy and Buildings*. – 2014.
348. Turk, A. Research, protection and restoration studies on the historical fabric of Isparta, using Aya Baniya Church as an example / A. Turk, M.E. Celebi // *Building and Environment*. – 2006. – Vol. 41. – Issue 12. – pp. 1867–1871.
349. Van Schijndel, A.W.M. Improved HVAC operation to preserve a church organ / A.W.M. Van Schijndel, H.L. Schellen, M.H. De Wit // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – Issue 1. – pp. 156–168.
350. D'Agostino, D. Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy) / D. D'Agostino // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 63. – pp. 122–133.
351. Pitsch, S. Ventilation system design for a church pipe organ using numerical simulation and on-site measurement / S. Pitsch, S. Holmberg, J. Angster // *Building and Environment*. – 2010. – Vol. 45. – Issue 12. – pp. 2629–2643.
352. Berggren, B. Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology / B. Berggren, M. Wall // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 65. – pp. 331–339.
353. Matrosov, Yu.A. Results of comparing solutions of calculation problems of enclosing structures with thermal bridges by Soviet and American methods / Yu.A. Matrosov, I.N. Butovsky, K.V. Childs // *Energy and Buildings*. – 1990. – Vol. 14. – Issue 4. – pp. 303–311.
354. Equivalent wall method for dynamic characterization of thermal bridges / K. Martin, C. Escudero, A. Erkoreka, I. Flores [and others] // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 55. – pp. 704–714.
355. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions / K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola [and others] // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – Issues 2–3. – pp. 529–535.
356. Mao, G. Dynamic calculation of thermal bridges / G. Mao, G. Johannesson // *Energy and Buildings*. – 1997. – Vol. 26. – Issue 3. – pp. 233–240.
357. Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization / N.I. Vatin, D.V. Nemova, V. Murgul [and others] // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2014. – No. 1. – pp. 37–44.
358. An approach to energy saving assessment of solar assisted heat pumps for swimming pool water heating / L.A. Tagliafico, F. Scarpa, G. Tagliafico, F. Valsuani // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 55. – pp. 833–840.
359. Harrington, C. Swimming pools as heat sinks for air conditioners: California feasibility analysis / C. Harrington, M. Modera // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 59. – pp. 252–264.
360. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools / P. Sun, J.Y. Wu, R.Z. Wang, Y.X. Xu // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – Issue 5. – pp. 1071–1080.

361. Kampel, W. Energy-use in Norwegian swimming halls / W. Kampel, B. Aas, A. Bruland // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 59. – pp. 181–186.
362. Shah, M.M. Improved method for calculating evaporation from indoor water pools / M.M. Shah // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 49. – pp. 306–309.
363. Woolley, J. Swimming pools as heat sinks for air conditioners: Model design and experimental validation for natural thermal behavior of the pool / J. Woolley, C. Harrington, M. Modera // *Building and Environment*. – 2011. – Vol. 46. – Issue 1. – pp. 187–195.
364. Increase of Energy Efficiency for Educational Institution Building / N.I. Vatin, D.V. Nemova, D.S. Tarasova, A.A. Staritsyna // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 953–954. – pp. 854–870.
365. Increase of Energy Efficiency of the Building of Kindergarten / N.I. Vatin, D.V. Nemova, A.S. Kazimirova, K.N. Gureev // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 953–954. – pp. 1537–1544.
366. The Energy-Efficient Heat Insulation Thickness for Systems of Hinged Ventilated Facades / N.I. Vatin, A.S. Gorshkov, D.V. Nemova, A.A. Staritsyna [and others] // *Advanced Materials Research*. – 2014. – No. 941–944. – pp. 905–920.
367. Renewable Energy Sources Used to Supply Pre-School Facilities with Energy in Different Weather Conditions / R. Alihodzic, V. Murgul, N. Vatin, E. Aronova [and others] // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 624. – pp. 604–612.
368. Taylor, T. Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building façades / T. Taylor, J. Counsell, S. Gill // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 76. – pp. 130–142.
369. Novel approach to 3D thermography and energy efficiency evaluation / D. González-Aguilera, P. Rodríguez-Gonzálvez, J. Armesto, S. Lagüela // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 54. – pp. 436–443.
370. Taylor, T. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography / T. Taylor, J. Counsell, S. Gill // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 66. – pp. 222–231.
371. Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes / F. Cerdeira, M.E. Vázquez, J. Collazo, E. Granada // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43 (8). – pp. 1845–1851.
372. Belussi, L. Method for the prediction of malfunctions of buildings through real energy consumption analysis: Holistic and multidisciplinary approach of Energy Signature / L. Belussi, L. Danza // *Energy and Buildings*. – 2012. – Vol. 55. – pp. 715–720.
373. Vidas, S. HeatWave: A handheld 3D thermography system for energy auditing / S. Vidas, P. Moghadam // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 66. – pp. 445–460.
374. Porras-Amores, C. Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature / C. Porras-Amores, F.R. Mazarrón, I. Cañas // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 65. – pp. 292–298.
375. Korniyenko, S. The Experimental Analysis and Calculative Assessment of Building Energy Efficiency / S. Korniyenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. No. 618. – pp. 509–513.
376. Energy consumption and conservation in the Russian apartment building stock / M.W. Opitz, L.K. Norford, Yu.A. Matrosov, I.N. Butovsky // *Energy and Buildings*. – 1997. – Vol. 25. – Issue 1. – pp. 75–92.
377. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building / B. Blocken, T. Defraeye, D. Derome, J. Carmeliet // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44. – Issue 12. – pp. 2396–2412.

378. Luo, C. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods / C. Luo, B. Moghtaderi, A. Page // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – Issue 5. – pp. 605–617.
379. Chen, D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions / D. Chen // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 60. – pp. 420–428.
380. Martinho, N. Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body / N. Martinho, A. Lopes, M. Gameiro da Silva // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 58. – pp. 58–69.
381. Liu, Y. Study on heat transfer process for in-slab heating floor / Y. Liu, D. Wang, J. Liu // *Building and Environment*. – 2012. – Vol. 54. – pp. 77–85.
382. Simões, N. Transient conduction and convection heat transfer across a multi-layer floor subjected to multiple heat sources / N. Simões, A. Tadeu // *Building and Environment*. – 2006. – Vol. 41. – Issue 10. – pp. 1299–1310.
383. Brás, A. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation / A. Brás, F. Gonçalves, P. Faustino // *Energy and Buildings*. – 2014. – Vol. 72. – pp. 296–308.
384. Ge, H. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study / H. Ge, V.R. McClung, S. Zhang // *Energy and Buildings*. – 2013. – Vol. 60. – pp. 163–173.
385. Mao, G. Dynamic calculation of thermal bridges / G. Mao, G. Johannesson // *Energy and Buildings*. – 1997. – Vol. 26. – Issue 3. – pp. 233–240.
386. Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain / A. Tadeu, I. Simões, N. Simões, J. Prata // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – Issue 12. – pp. 3685–3695.
387. Корниенко, С.В. Комплексная оценка теплозащиты ограждающих конструкций оболочки здания / С.В. Корниенко // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – № 7 (33). – С. 43–49.
388. Корниенко, С.В. Оценка влияния проектируемого здания на инсоляционный режим окружающей застройки / С.В. Корниенко // *Светопрозрачные конструкции*. – 2012. – № 5–6 (85–86). – С. 36–39.
389. Корниенко, С.В. Тестирование метода расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на результатах тепловизионного обследования жилого здания / С.В. Корниенко // *Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит.* – 2012. – Вып. 29 (48).
390. Корниенко, С.В. Оценка микроклимата жилых помещений на основе натурных измерений / С.В. Корниенко // *Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит.* – 2013. – Вып. 30 (49). – С. 144–147.
391. Корниенко, С.В. Расчет тепlopоступлений от солнечного излучения для оценки энергоэффективности зданий / С.В. Корниенко // *Светотехника*. – 2013. – № 2. – С. 64–65.
392. Корниенко, С.В. Проблемы теплозащиты наружных стен современных зданий [Электронный ресурс] / С.В. Корниенко // *Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая*. – 2013. – Вып. 1(25). – Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.
393. Корниенко С.В. Комплексная оценка эксплуатационной безопасности жилого здания [Электронный ресурс] / С.В. Корниенко // *Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая*. – 2013. – Вып. 1(25). – Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.
394. Корниенко, С.В. Учет формы при оценке теплозащиты оболочки здания / С.В. Корниенко // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2013. – № 5(10). – С. 20–27.

395. Корниенко, С.В. Температурно-влажностный режим и теплозащитные свойства ограждающих конструкций с теплотехническими неоднородностями / Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность (V Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л.)». – М.: НИИСФ РААСН, 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

396. Корниенко, С.В. Тестирование программно-вычислительного комплекса «Энтеза» на результатах экспериментального определения теплопроводности кладки керамических блоков / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2013. – Вып. 33 (52). – С. 254–258.

397. Корниенко, С.В. Методы инженерной оценки температурно-влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности / Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: сб. докл. V Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РААСН Богословского В.Н. 20–22 ноября 2013. – М.: МГСУ, 2013. – С. 34–40.

398. Корниенко, С.В. Расчетно-экспериментальный контроль энергосбережения зданий / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 8 (43). – С. 24–30.

399. Корниенко, С.В. Опыт проектирования и строительства энергоэффективных зданий в г. Волгограде / С.В. Корниенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 9(14). – С. 21–33.

400. Корниенко, С.В. Теплотехнический расчет строительных конструкций с краевыми зонами / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2013. – Вып. 34 (53). – С. 22–29.

401. Корниенко, С.В. Температурно-влажностный режим и теплозащитные свойства ограждающих конструкций с краевыми зонами / С.В. Корниенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2014. – Вып. 35 (54). – С. 62–69.

402. Корниенко, С.В. Инженерный подход к расчету теплозащитных характеристик строительных конструкций с краевыми зонами [Электронный ресурс] / С.В. Корниенко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2014. – Вып. 1(31). – Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.

403. Корниенко, С.В. Повышение тепловой защиты при реконструкции храма Сергия Радонежского в Волгограде / С.В. Корниенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 5(20). – С. 39–53.

404. Корниенко, С.В. О комплексном показателе тепловой защиты зданий / С.В. Корниенко // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3 (44). – С. 159–163.

405. Корниенко, С.В. Альтернативный подход к комплексной оценке тепловой защиты зданий / С.В. Корниенко // Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях: сб. докл. междунар. конф. – М.: МГСУ, 2014. – С. 47–53.

406. Наибольшее увлажнение конструкций (НУК) / С.В. Корниенко ; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619917 от 25.09.2014.

407. Корниенко, С.В. О применимости методики СП 50.13330.2012 к расчету влажностного режима ограждающих конструкций с мультизональной конденсацией влаги / С.В. Корниенко // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 5 (55). – С. 29–37.

408. Корниенко, С.В. О нормировании тепловой защиты зданий с влажным и мокрым режимами / С.В. Корниенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 5. – С. 19–24.
409. Корниенко, С.В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий / С.В. Корниенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 11(26). – С. 43–58.
410. Корниенко, С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания / С.В. Корниенко // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 8 (52). – С. 25–37.
411. Корниенко, С.В. Инженерная оценка влажности наружных стен [Электронный ресурс] / С.В. Корниенко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2015. – Вып. 1(37). – Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/>.
412. Корниенко, С.В. Предложения по корректировке СП 50.13330.2012 в части защиты от переувлажнения ограждающих конструкций / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2015. – № 7. – С. 31–34.
413. Корниенко, С.В. Оценка влагонакопления в ограждающих конструкциях зданий в годовом цикле / С.В. Корниенко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 4. С. 12–17.
414. Корниенко, С.В. Оценка влажностного режима многослойной ограждающей конструкции с мультizonальной конденсацией влаги / С.В. Корниенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – Вып. 41(60). – С. 24–33.
415. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле / С.В. Корниенко, Н.И. Ватин, М.Р. Петриченко, А.С. Горшков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 6 (33). – С. 19–33.
416. Korniyenko, S. Thermal Comfort and Energy Performance Assessment for Residential Building in Temperate Continental Climate / S. Korniyenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – No. 725–726. – pp. 1375–1380.
417. Korniyenko, S. Assessment of Influence of Designed Building on Insolation Conditions of Residential Development / S. Korniyenko [International Conference on Chemical, Material and Food Engineering (CMFE-2015)] – Published by Atlantis Press, 2015. – pp. 529–532.
418. Korniyenko, S. Evaluation of Thermal Performance of Residential Building Envelope / S. Korniyenko // Procedia Engineering. – 2015. – No. 117. – pp. 191–196.
419. Строй, А.Ф. Управление тепловым режимом зданий и сооружений : Монография / А.Ф. Строй. – К. : Вища школа, 1993. – 155 с.
420. Хоменко, В.П. Справочник по теплозащите зданий / В.П. Хоменко, Г.Г. Фаренюк. – К. : Издательство «Будівельник», 1986. – 214 с.