

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 536.1

**Акельев
Валерий Дмитриевич**

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ОГРАНИЧЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

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

Минск, 2013

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный консультант – **Хрусталеv Борис Михайлович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, ректор Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Гагарин Владимир Геннадьевич**, член-кор. РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией строительной теплофизики НИИ строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), заведующий кафедрой «Отопление и вентиляция» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (Москва);

Васильев Леонард Леонидович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории пористых сред Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси;

Северянин Виталий Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» УО «Брестский государственный технический университет»

Оппонирующая организация: Государственное предприятие «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»

Защита состоится «15» марта 2013 г. в 15 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.01 Белорусского национального технического университета по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 204, тел. ученого секретаря (+375-17) 265-64-21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » февраля 2013 г.

Ученый секретарь Совета по защите диссертаций Белорусского национального технического университета

Нестеров Л. В.

© Акельев В. Д.

© Белорусский национальный технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Здания и сооружения, ограждающие конструкции которых по теплотехническим показателям не соответствуют требованиям действующих нормативных документов, с целью повышения их энергетической эффективности подвергаются модернизации путем устройства дополнительных теплоизолирующих систем. Научные исследования в этом направлении и практика их применения в конкретных климатических и эксплуатационных условиях привели к появлению достаточно большого количества технических решений и технологий их реализации. Теоретической основой разработок являются закономерности переноса теплоты в конструкциях с неоднородной структурой, а также законы формирования конвективных потоков в каналах и замкнутых полостях, входящих в систему тепловой защиты и конструктивно принадлежащих ограждающим конструкциям. Недостаточно учитывается влияние процессов воздухо- и паропроницаемости строительных материалов на перенос теплоты в конструкциях. На формирование теплового баланса зданий и сооружений оказывают влияние и играющие теплозащитную роль замкнутые приквартирные пространства.

В странах СНГ на отопление жилых, административных и производственных зданий пока еще расходуется больше энергоресурсов, чем в развитых странах с аналогичными климатическими условиями. Основной путь снижения расхода теплоты на отопление – повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Активная деятельность органов государственного управления Республики Беларусь, профильных строительных организаций и научно-исследовательских институтов позволили добиться в этом направлении ощутимых результатов.

Тепло- и массоперенос в замкнутых приквартирных пространствах и полых включениях в наружные ограждающие конструкции определяется их формой и ориентацией, характером внешних и внутренних воздействий. Важный вклад в развитие этого направления научных исследований внесли А. В. Лыков, В. Н. Богословский, В. Г. Гагарин, А. И. Гныря, О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин, Б. М. Хрусталева, К. Ф. Фокин.

В строительных конструкциях воздушная прослойка между утеплителем и внешним слоем увеличивает теплоизоляционные качества стены за счет экранящего действия облицовки. Теплотехнические и экономические расчеты свидетельствуют о том, что для повышения теплозащиты зданий в большинстве случаев эффективным является наружное утепление (В. Г. Гагарин). Одним из вариантов увеличения сопротивления теплопередаче термомодернизируемой конструкции служит устройство дополнительных теплоизоляционных слоев,

выполненных на основе замкнутых радиационно-конвективных воздушных потоков, в которых формируются малоизученные температурные поля и схемы циркуляции воздуха (С. С. Кутателадзе, А. Кэтон, Х. Уонг и др.).

До настоящего времени отсутствуют оптимальные решения задач свободно-конвективного переноса для тепло- и массозащиты ограждений, покрытий, светопрозрачных конструкций, приквартирных пространств. В связи с этим работа, направленная на создание теории, методики определения термических сопротивлений ограждающих конструкций отапливаемых зданий, тепло- и массообменной модернизации стыковых сопряжений, методов расчета термодинамических характеристик воздуха приквартирных пространств, приводящая к снижению энергопотребления при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения, является важной и актуальной. Решение проблем снижения потерь теплоты, а также повышения энергоэффективности зданий и сооружений на этапе их проектирования и определило цель диссертационного исследования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Основу диссертации составили обобщенные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора, полученные при выполнении научно-исследовательских работ в рамках Государственной программы модернизации и тепловой реабилитации жилых домов на 1997–2000 гг., утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.07.1997 № 876. Работа является результатом многолетних исследований автора в рамках важнейших комплексных научно-технических программ и тем:

1. Проект ГБ 01–94 «Исследование влияния геометрических параметров радиационно-конвективных воздушных контуров на термическое сопротивление ограждений отапливаемых зданий и разработка технологии их применения при тепловой реабилитации зданий». Заказчик – Министерство образования Республики Беларусь. 2000–2001 гг.;

2. Государственная программа ориентированных фундаментальных исследований («Строительство и архитектура», «Стык») ГБ 06–59 «Разработка термо- и гидроаэродинамических основ создания стыковых сопряжений при строительстве и реконструкции жилых и общественных зданий». 2006–2010 гг.;

3. Государственная программа ориентированных фундаментальных исследований («Строительство и архитектура», «Контур») ГБ 06–57 «Разработка теоретических основ теплопереноса через ограждающие конструкции с замкнутыми, вентилируемыми, экранированными газовоздушными контурами жилых и общественных зданий». 2006–2010 гг.;

4. Государственная программа научных исследований «Строительные материалы и технологии» на 2011–2015 гг. «Разработка материалов с высокими потребительскими свойствами на заданный срок службы, научных принципов и импортозамещающих экологически чистых строительных технологий, обеспечивающих энергоэффективность и эксплуатационную надежность».

Цель и задачи исследования. Целью исследования являются разработка теоретических основ и реализация практических мероприятий, направленных на решение задач, связанных с тепло- и массопереносом в ограниченных пространствах строительных конструкций, для обеспечения надежности их функционирования, энерго- и ресурсосбережений.

Цель исследования достигалась решением следующих задач:

1. Выявить закономерности тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных конструкций различного назначения для минимизации теплотерь с целью снижения энергопотребления в строительной отрасли.

2. Определить механизм теплообмена применительно к термической реабилитации строительных конструкций и сооружений и разработать энергоэффективные технологии терморехабилитации стволов дымовых труб с малыми трудозатратами. Обосновать и получить аппроксимирующие соотношения для определения термических сопротивлений ограждающих конструкций отапливаемых зданий при контактных и бесконтактных измерениях температурных полей внешних поверхностей наружных ограждений.

3. Предложить теоретические принципы для определения пористости с применением сверхвысоких частот, провести экспериментально-натурные измерения воздухо-и влагопроницаемости ограждающих конструкций.

4. Разработать физико-математическую модель массопереноса через элементы стыковых сопряжений крупнопанельных зданий для создания технологии минимизации теплотерь.

5. Обосновать и получить расчетные зависимости тепло- и массообмена в ограниченных приквартирных остекленных пространствах отапливаемых зданий.

6. Составить алгоритм расчета аэродинамической устойчивости помещений и ограждающих конструкций.

Объектом исследования являются отапливаемые общественные здания, ограждающие конструкции различного назначения, потоки теплоты и массы в них, приквартирные пространства.

Предмет исследования – оптимизация конвективно-диффузионного тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных конструкций различного назначения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика минимизации потерь теплоты в ограниченных пространствах строительных конструкций, разработанная на основании анализа результатов комплексного исследования процессов тепло- и массообмена: в наружных ограждающих конструкциях микро- и макромодульных элементов, фильтрационные и диффузионные характеристики которых превосходят существующие; в стыковых сопряжениях – путем применения технологии термо- и влагодиффузионной защиты, обеспечивающей круглогодичное существенное снижение их воздухо-, влаго- и теплопроницаемости.

2. Методы и технологии термической модернизации строительных конструкций и сооружений, основанные на применении разработанных автором ограниченных замкнутых многопрофильных контуров различной геометрической формы с оптимальными характеристиками переноса теплоты и массы и позволяющие снизить теплопотребление на 10–15 %, энергоэффективная технология модернизации стволов дымовых труб путем защиты внутренней поверхности стеклопластиковыми коррозионно-стойкими защитными коробами, позволяющая снизить теплопередачу от дымовых газов к наружному воздуху и практически полностью исключить химическое взаимодействие агрессивных компонентов дымовых газов и внутренней поверхности трубы.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований воздухо- и паропроницаемости материалов строительных конструкций, в том числе и в натуральных условиях; методика определения пористости капиллярно-пористых материалов путем применения направленного излучения сверхвысокой частоты.

4. Совокупность теоретических и экспериментальных исследований, позволивших разработать физико-математическую модель массопереноса через элементы стыковых сопряжений крупнопанельных зданий, технологию применения оболочек, заполняемых флюидами, коэффициенты термических расширений которых обратно пропорциональны температурам воздуха. Результаты анализа температурных и фильтрационных полей наиболее распространенных стыковых соединений.

5. Методика аналитического и графо-аналитического анализа процессов тепло- и массообмена в ограниченных приквартирных остекленных пространствах отапливаемых зданий, основанная на информации о параметрах наружного и внутреннего воздуха и позволяющая на стадии проектирования и эксплуатации повысить энергоэффективность здания в целом.

6. Алгоритм расчета аэродинамической устойчивости помещений и ограждающих конструкций, понимаемой как их способность снижать колебания термодинамических характеристик воздуха в помещениях при флуктуациях

тепловых потоков от внутренних источников теплоты, представляет собой последовательность уравнений, включающую разности давлений у менее и более нагретых поверхностей и амплитуды колебаний воздуха в поверхностных слоях ограждения, которые изменяются во времени по синусоиде и косинусоиде.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационного исследования получены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. Лично автором выполнено:

- создание концепции исследования; постановка проблемы в целом и задач экспериментальных и численных исследований; выводы и их формулировка, разработка концептуальных основ создания энергоэкологически эффективных теплозащитных систем в строительной отрасли;
- разработка физико-математической модели тепло- и массообмена в элементах модулей, используемых в технологиях термомассореабилитации;
- руководство и непосредственное участие в экспериментах; написание монографии и основополагающих для исследования статей, патентов, тезисов докладов, разделов учебников и учебных пособий.

Опубликованные по теме диссертации работы выполнены автором лично и в соавторстве.

Выбор научно-технического направления, основные положения, выводы и рекомендации принадлежат автору, который, определив цели и задачи диссертационной работы, разработал методики теоретических и экспериментальных исследований. Автором непосредственно осуществлена постановка задач и проведены исследования воздухопроницаемости керамзитобетонных и других материалов, расчет температур, влагосодержания, энтальпии воздуха в остекленных балконах и лоджиях, натурные теплотехнические обследования стволов дымовых труб.

Основными соавторами соискателя по опубликованным работам являются доктора технических наук, профессора М. Т. Солдаткин, А. П. Несенчук, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Б. М. Хрусталев – научный консультант по диссертационной работе, с которыми проведена совместная работа по внедрению результатов исследований.

В проведении экспериментальных исследований под руководством автора принимали участие магистранты, аспиранты, участие которых выразалось в подготовке и проведении экспериментов, обработке и обсуждении полученных результатов.

Список объектов, по которым выполнены экспертизы, разработки проектов, проведены исследования, расчеты, реконструкции, внедрения по тепло- и массопереносу в различных термодинамических системах при руководстве и участии автора диссертационной работы, включает более 130 позиций.

Результаты работы подтверждены 16 патентами и авторскими свидетельствами, 12 актами внедрения.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и опубликованы в трудах Международного семинара *Pohoda prostředí ve školských stavbách*, (Praha, 1978); Международных научно-технических конференциях «МНТК 1» – «МНТК 10», (Минск, БНТУ, 2002–2012); Международной научно-технической конференции (Могилев, 2002); Международного научно-практического семинара по реализации задач Госпрограммы ориентированных фундаментальных исследований «Строительство и архитектура» (II Workshop C & A, Минск, 2007); Всесоюзной юбилейной IV межвузовской конференции по вопросам совершенствования крупноэлементного строительства (Днепропетровск, 1967); XXIV научно-технической конференции научного общества ЛИСИ совместно с молодыми строителями Главленинградстроя и Главзапстроя (Ленинград, 1968); Республиканской научно-технической конференции (Брест, 1968); V научной конференции по вопросам архитектуры (Харьков, 1969); научно-технической конференции «Радиофизические методы контроля в строительной индустрии» (Минск, 1970); V конференции молодых ученых и специалистов республик Прибалтики и Белорусской ССР по проблемам стройматериалов (Минск, 1972); научно-технической конференции «Антикоррозионная защита строительных конструкций, трубопроводов и оборудования на предприятиях химической промышленности» (Могилев, 1974) и др.

Опубликованность результатов диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 95 работах, в их числе одна монография, 20 статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Беларуси, 50 публикаций в научно-технических и научно-практических журналах, сборниках материалов и тезисов конференций, отчетах о НИР и др., 16 авторских свидетельств и патентов на изобретения, 8 учебников и учебных пособий. Среди них такие фундаментальные учебники, как «Техническая термодинамика» и «Тепло- и массообмен», получившие широкую известность не только в Республике Беларусь, но и за ее пределами. Общий объем публикаций превышает 70 усл. печатных листов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации – 373 страницы, из них таблиц – 8 (5 страниц), иллюстраций – 145 (38 страниц), приложений – 7 (73 страницы). Список использованных источников включает 407 наименований, из них на иностранных языках – 39. Список публикаций автора – 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обоснована научно-техническая проблема, определившая актуальность исследования тепло- и массопереноса в ограниченных пространствах строительных материалов и конструкций различного назначения, приведены исходные предпосылки для ее выполнения.

Отражена научная новизна и практическая значимость теоретических и экспериментальных исследований.

В первой главе «Проблемы тепло- и массообмена при естественной конвекции в ограниченных пространствах и сооружениях» представлен обзор и анализ основных положений по вопросам тепло- и массообмена, решаемых с целью снижения энергопотребления в строительной отрасли, в последующих главах обсуждаются проблемы тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных конструкций различного назначения, предложена структурно-логическая схема исследования.

Недостатками строительных конструкций, в том числе ограждающих, цилиндрических и других профилей дымовых труб, являются: относительно малые термические сопротивления, незащищенность от воздействия химически активных компонентов сопряжений элементов конструкции. Решением этой проблемы может служить снижение в них тепло- и массопереноса.

На характер свободного конвективного течения форма тела оказывает второстепенное влияние, а протяженность элемента поверхности, ориентация – более существенное (Б. Гебхарт, А. В. Гетлинг и др.). У вертикально обращенных нагретыми поверхностями вверх пластин движение воздуха определяется их расположением и размерами. Обычно при свободной конвекции и малых скоростях потока имеет место ламинарный режим движения жидкости. Циркуляционные токи – это вращающиеся элементы с квадратным поперечным сечением и горизонтальными осями, параллельными меньшей стороне полости. Если число Ra меньше $500h/\delta$, жидкость движется у более нагретой поверхности вверх (в половине полости), затем в противоположную сторону – у менее нагретой поверхности. Теплообмен увеличивается линейно с возрастанием числа Ra по сравнению с теплопроводностью. В результате естественного тепло- и массообмена происходит движение воздуха, водяных паров, пыли, концентрации которых взаимозависимы и представляют собой комплекс разнородных, но взаимосвязанных субстанций.

Выявлено, что при естественной конвекции в вертикально ограниченном пространстве с плоскими поверхностями и отношении высоты h к толщине слоя жидкости (в общем случае – флюида) δ , равном $10,0 < Gr < 2,8 \cdot 10^3$, имеет место режим псевдотеплопроводности с преобладанием кондуктивного переноса

са и малых числах Ra ; при $2,8 \cdot 10^3 < Gr < 2,5 \cdot 10^4$ – режим развитой ламинарной конвекции (режим пограничного слоя); при $3,2 \cdot 10^5 < Gr < 10^6$ имеют место вторичные течения в виде отдельных крупных вихрей, взаимодействующих с потоком. При $10^6 < Gr < 10^7$ появляются течения, предшествующие переходу к турбулентному режиму. Развитое турбулентное течение возникает при $Gr > 10^7$.

Градиенты температур на внутренних поверхностях стволов дымовых труб равны (0,2–0,4) °С/м и зависят от скоростей и температур газов. Коэффициенты конвективной теплоотдачи у внутренних поверхностей трубы, зависящие от скорости, температур дымовых газов, равны (8,2–11,3) Вт/(м²·К), радиационные – (7,4–14,3) Вт/(м²·К). Коэффициенты теплоотдачи у внешней поверхности трубы равны (10,2–34,0) Вт/(м²·К). Результаты измерений температурных полей внешних поверхностей дымовых труб, например цементного завода в г. п. Красносельск Волковысского района, показали, что вследствие фильтрационных и диффузионных потоков дымовых газов температуры внешних поверхностей трубы на 3–5 °С и более выше расчетных для многослойной цилиндрической стенки при стационарном тепловом режиме. Конструктивно-технологическим решением, например для дымовых труб, выступает монтаж стеклопластикового ствола из участков труб на расстоянии $0,33h$ от оголовка трубы, где h – высота дымовой трубы; для отапливаемых зданий – использование микро- и макромодульных элементов при термомодернизации ограждающих конструкций; стыковых сопряжений – гидropневморегулируемых оболочек.

Значительно снижает качество проектировочных и эксплуатационных работ несовершенство методик экспериментального определения фильтрационно-диффузионных потоков в капиллярно-пористых материалах, стыковых сопряжениях. В нормативных документах отсутствуют методики расчетов относительной влажности, влагосодержания, температуры воздуха в приквартирных остекленных пространствах.

Диссертантом разработаны и запатентованы установки для определения воздухопроницаемости ограждений в натурно-лабораторных условиях, например в виде соосно расположенных стеклянных труб с поршнями из эластичных материалов; метод определения воздухопроницаемости с помощью теплового источника.

Из результатов исследований фильтрационных потоков, при различных давлениях воздуха, плотностях и влагосодержании материалов, сделан вывод об аэродинамических потоках воздуха в керамзитобетонных и аналогичных материалах, с объемной массой более 1200 кг/м³, описываемых линейными уравнениями. В результате графоаналитической обработки опытных данных получены расчетные формулы, связывающие фильтрационные потоки, влагосо-

держание, объемную массу керамзитобетона, перепад давлений воздушной среды. При плотности (850–1500) кг/м³ построены номограммы из выравненных точек.

Применяемые устройства не обеспечивают достаточно высокой точности измерения внутрикапиллярного давления, так как погрешность измерения пропорциональна отношению объема измерительной системы к объему капилляров пористого тела. Разработана методика измерения внутрикапиллярного давления, характеризующая его поровое пространство. Предложен метод реализации сверхвысоких частот для получения интегральных и дифференциальных кривых распределения пор по размерам с применением в качестве хладагента паров жидкого азота. Теоретически обоснован метод экспериментального исследования пористости с использованием сверхвысоких частот, проведен термодинамический анализ фазовых переходов в капиллярно-пористых телах.

Разработаны методики определения сопротивлений теплопередаче приквартирных остекленных пространств, зависящих от термодинамических характеристик воздуха (температура, относительная влажность, влагосодержание, энтальпия), определяющих теплопотери и теплопоступления в отапливаемые здания.

Автором обоснованы и предложены методики инженерного расчета термодинамических характеристик воздуха в приквартирных помещениях, в том числе алгоритм расчета температурных полей воздуха, радиационных поступлений, термических характеристик ограждений при нормируемых воздухопотоках.

В нормативных документах по отоплению, вентиляции, кондиционированию отсутствуют функциональные зависимости аэродинамической устойчивости воздуха помещений и ограждающих конструкций с факторами микро- (теплофизические характеристики элементов конструкций зданий) и макросреды (рельеф дорожного полотна, высота над уровнем моря, климатологические характеристики наружного воздуха и др.). Автором выявлено, что аэродинамическая, диффузионная устойчивость ограждающих конструкций, помещений характеризуется амплитудами колебаний общих и парциальных давлений компонентов потока в отапливаемых помещениях, максимальных и средних потоков массы и парциальными давлениями водяного пара у более и менее нагретых поверхностей, коэффициентами массоотдачи, диффузии водяного пара и капельной влаги, барометрическими давлениями.

В заключительной части постановочной главы автором предлагается структурно-логическая схема (рисунок 1), отражающая цели и задачи исследования.

ПРОБЛЕМА: разработка механизмов повышения энергоэффективности зданий и сооружений на этапе проектирования, строительства и эксплуатации.

ЦЕЛЬ: методологические принципы создания эффективных зданий на основе оптимизации тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных конструкций различного назначения.

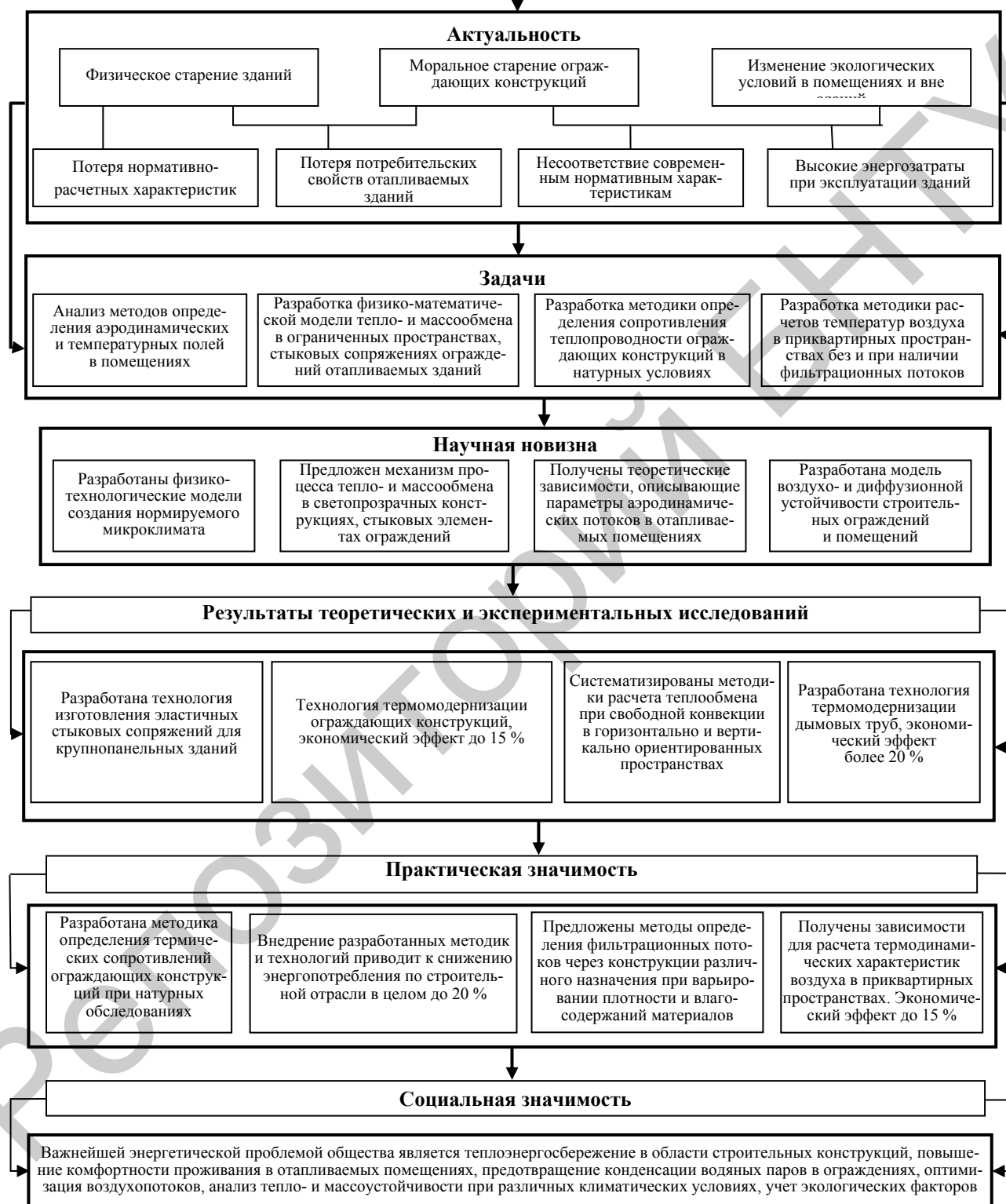


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема исследования «Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций»

Во второй главе «Тепло- и массоперенос в горизонтально ориентированных и ячеистых ограниченных пространствах» представлена авторская физико-математическая модель переноса теплоты и массы в ограниченных пространствах.

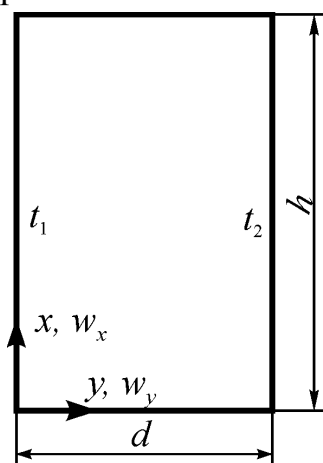


Рисунок 2 – Схема ограниченного контура

Внутренние течения при естественной конвекции между параллельными, плоскими, цилиндрическими, сферическими, горизонтальными, вертикальными, наклонными поверхностями имеют место на различных расстояниях и с разными температурами. Схема прямоугольного, цилиндрического, вертикального, ограниченного контура представлена на рисунке 2.

Определяющими факторами являются характерные параметры: разность температур между вертикальными поверхностями $\Delta t = t_{0,1} - t_{0,2}$; расстояние между ними d ; их высота h ; $t_{0,1} - t_{0,2}$ – температура более и менее нагретых поверхностей. Поверхности могут быть теплоизолированными, с заданными температурами и т. д. Рассматривалось двумерное конвективное течение при воздействии выталкивающей силы, обусловленной разностью температур, наличием теплообмена.

Пренебрегая вязкой диссипацией, используя приближения Буссинеска – Обербека, можно записать:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\delta}{\partial y} + g\beta(t_{0,1} - t_{0,2}) + g\beta w_x; \quad (2)$$

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\delta}{\partial y} + g\beta(t_{0,1} - t_{0,2}) + gv^2 w_y; \quad (3)$$

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \alpha \nabla^2 t. \quad (4)$$

где w_x, w_y – компоненты скорости, м/с;

β – коэффициент объемного расширения, 1/К.

Граничные условия целесообразно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} w_x = w_y = 0, \quad t = t_{0,1}, \quad \text{если } y = 0, \quad \text{то } 0 \leq x \leq h; \\ w_x = w_y = 0, \quad t = t_{0,2}, \quad \text{если } y = \delta, \quad \text{то } 0 \leq x \leq h; \\ w_x = w_y = 0, \quad \text{если } x = 0, h, \quad \text{то } 0 \leq y \leq \delta, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а граничные условия для горизонтально ориентированных контуров в виде

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0; \text{ если } x = 0, h \text{ и } 0 \leq y \leq \delta, \text{ то } \Delta t = t_{0,2} - (t_{0,1} - t_{0,2}) \frac{y}{\delta}. \quad (6)$$

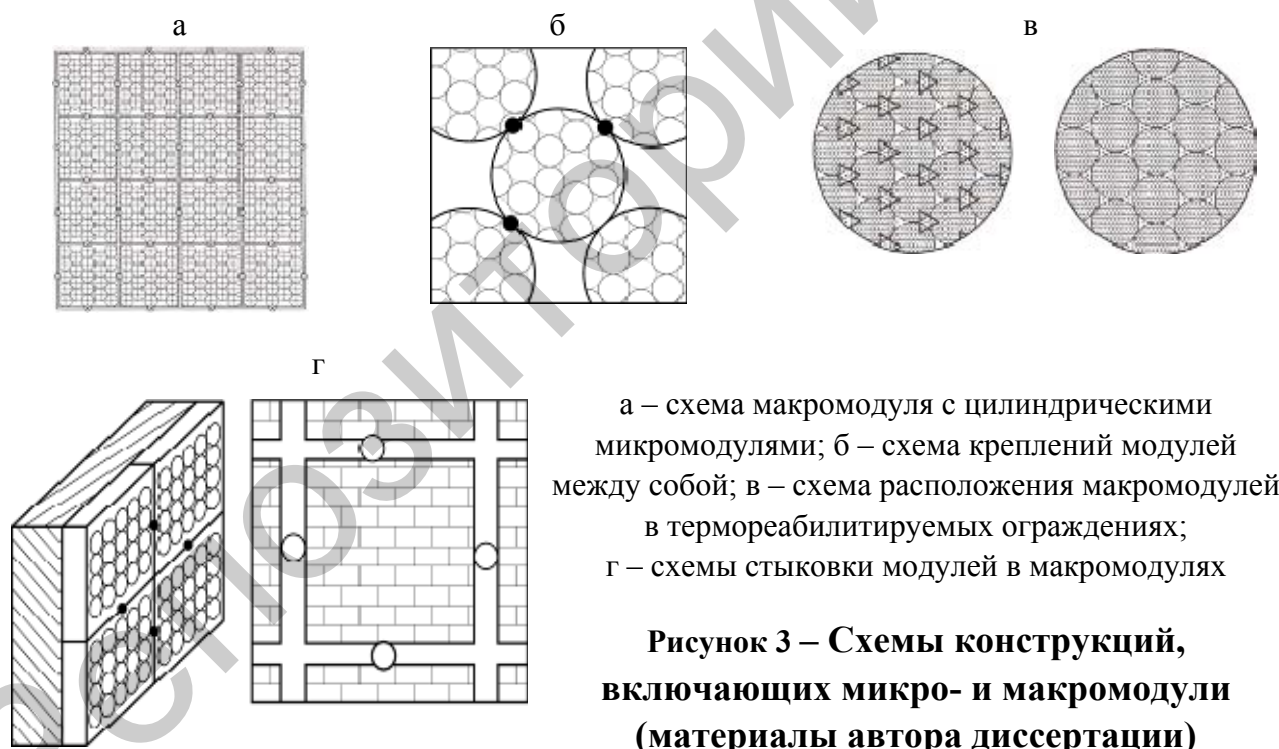
Естественная конвекция у горизонтальных поверхностей минимальна, если температура верхней выше температуры нижней, а при тепловом потоке снизу возникает при $Ra = 1700$, имеет ячеистую структуру и с увеличением числа Ra реконструируется, проходя через ряд дискретных состояний в интервале $Ra = 3 \cdot 10^3 \dots 10^7$, до перехода в турбулентное течение и рассчитывается из выражения

$$Nu = 1 + 1,44(1 - 1700/Ra), \quad (7)$$

при $Pr > 0,7$ $Ra = 1700-4000$.

У горизонтальных кольцевых цилиндрических контуров движение жидкости зависит от ориентации более или менее нагретых поверхностей, их геометрических характеристик.

Схемы вариантов конструкций, включающих микро- и макромодули, представлены на рисунке 3.



Методика определения термических сопротивлений при различных способах измерения температуры поверхности основана на замене граничных условий III рода на граничные условия IV рода. При этом ограждающие конструкции рассматриваются как полуограниченные тела.

При традиционных теплотехнических расчетах элементы строительных объектов рассматриваются как неограниченные пластины. Если источники теп-

лоты на поверхностях систем не оказывают влияния на температурное поле, некоторые части системы могут быть исключены из рассмотрения.

Имеем

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \bar{\alpha} (t_{\infty,2} - t_0), \quad (8)$$

где $t_{\infty,2}$, t_0 – температуры наружного воздуха и наружной поверхности;

$\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи у наружной поверхности.

Для полуограниченного тела при граничных условиях III рода безразмерная температура является функцией теплофизических характеристик ограждения, продолжительности измерений (τ) и коэффициента теплоотдачи у внешней поверхности ($\alpha_{\infty,1}$)

$$t(0, \tau) - t(0, 0) / [t_{\infty,2} - t(0, 0)] = 1 - \exp\left(\frac{\bar{\alpha}^2}{\lambda_{\text{эк}}^2} a_{\text{эк}} \tau\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{\text{эк}}} \sqrt{a_{\text{эк}} \tau}\right)\right], \quad (9)$$

где $t(0, \tau)$ и $t(0, 0)$ – температуры внешней поверхности ограждения в моменты времени τ измерений (1, 2, 3 и т. д.), то же в начальный момент времени ($\tau = 0$);

$t_{\infty,2}$ – средняя температура наружного воздуха во время измерений;

$\lambda_{\text{эк}}$, $a_{\text{эк}}$ – эквивалентные коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов наружного ограждения, Вт/(м·К), м²/с.

В (9) известными являются $t(0, \tau)$, $t(0, 0)$, $t_{\infty,2}$, τ , а искомыми $\bar{\alpha}$, R_0 ($\bar{\alpha}$ – у поверхностей обследуемого ограждения и его реальные теплофизические характеристики). Тогда уравнение (9) может быть представлено в виде

$$\frac{t(0, \tau) - \varepsilon(0, 0)}{t_{\text{эк1}} - t(0, 0)} = 1 - \exp\left(\frac{\bar{\alpha}^2 R_{\text{эк}} \tau}{\delta c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}}}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{\alpha} R_{\text{эк}}^{0,5} \tau}{\delta^{0,5} c_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}}}\right)\right], \quad (10)$$

где $R_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \frac{\delta_i}{R_{\text{эк}}}$ – эквивалентное сопротивление теплопроводности ограждения с n слоями;

$\operatorname{erf}(x)$ – интеграл (функция) ошибок Гаусса,

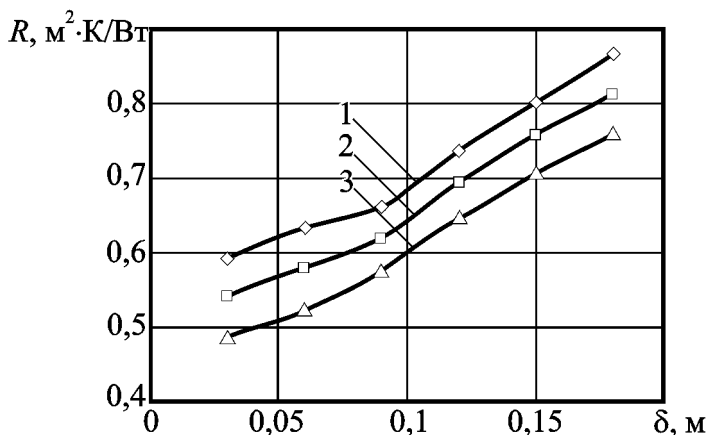
$\bar{\alpha} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$, $\alpha_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{л}}$ – конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи.

Эквивалентные теплофизические характеристики материалов можно рассчитать из выражений:

$$\lambda_{\text{эк}} = \frac{\sum \delta_i}{R_{\text{эк}}}; \quad R_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \quad c_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / c_i}; \quad \alpha_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \alpha_i}; \quad a_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i c_{i,\text{эк}} \rho_{i,\text{эк}}}{\lambda_{i,\text{эк}}}}. \quad (11)$$

При толщине воздушной прослойки от 0,02 до 0,10 м и разностях температур между ограничивающими поверхностями 2–10 °С получено, что их термическое сопротивление равно 0,43–0,83 м²·К/Вт и зависит не только от разно-

сти температур между поверхностями, но и от температуры воздуха в контурах. Термическое сопротивление ограниченных горизонтальных контуров возрастет с увеличением расстояния между поверхностями, например когда $\delta = 0,03$ м, то $R_{\text{эк}} = 0,59$ м²·К/Вт, а когда $\delta = 0,18$ м, то $R_{\text{эк}} = 0,87$ м²·К/Вт (рисунок 4).



1 – $t = 5^\circ\text{C}$; 2 – $t = 7^\circ\text{C}$; 3 – $t = 10^\circ\text{C}$

Рисунок 4 – Зависимость термического сопротивления от толщины микромодулей

Исследования показали, что крупноразмерные элементы ограждающих конструкций более эффективны, когда в них вместо пенопластовых минераловатных материалов использованы микро- и макро модульные системы (результаты расчетов представлены на рисунке 4).

Конструкции из модулей в теплотехническом аспекте наиболее эффективны из материалов, термические сопротивления которых (3,28–3,43) м²·К/Вт.

Технология изготовления крупнопанельных изделий с использованием газоздушных контуров обеспечивает общее сопротивление теплопередаче выше нормативных на 10–15 %.

Разработаны схемы термомодернизации с использованием микро- и макро модульных контуров для горизонтальных и вертикальных поверхностей ограждений зданий и технологии их изготовления в заводских условиях.

Предложена технология реконструкции дымовой трубы (рисунок 5), что позволило выполнить монтаж стеклопластиковой оболочки с использованием вертолетной техники «сверху вниз». Коррозионно-атмосферостойкость стеклопластикового экрана обеспечивает продолжительность его эксплуатации до 50 лет без капитального ремонта в различных климатических условиях; экран обладает прочностью, близкой к прочности углеродистой стали, при малой теплопроводности и незначительном термическом расширении.

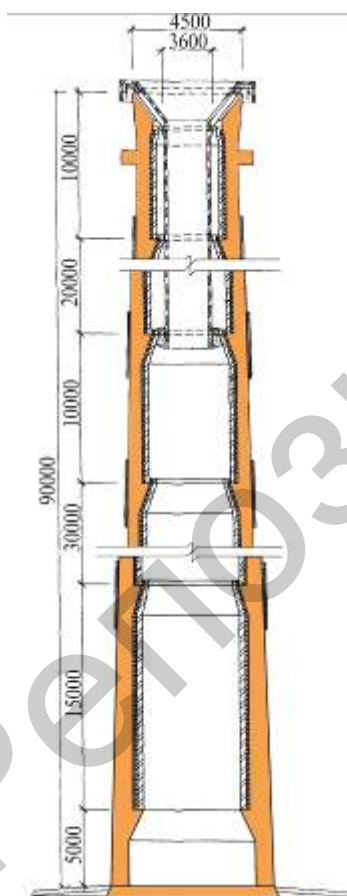


Рисунок 5 – Схема термомодернизируемой дымовой трубы

В третьей главе «Фильтрационные потоки в материалах ограждающих конструкций» показано, что сложность и разнообразие геометрических характеристик порового пространства материалов, структура которых определяется системой сообщающихся, замкнутых пор, капилляров, сферических частиц различной геометрической формы и т. д., обусловили необходимость их модельного представления.

Разработаны теоретические основы экспериментального определения дифференциальных и интегральных кривых распределения пор по размерам. Показано, что в некапиллярных объемах устанавливается динамическое равновесие между потоками пара и давлением. В капиллярных объемах силы, действующие на молекулы пара, зависят от расстояния до поверхности жидкости, поэтому парциальное давление насыщенного пара зависит от радиусов капилляров. Разработаны методики экспериментального исследования пористости строительных материалов, получены интегральные и дифференциальные кривые распределения пор по размерам. Работы в области различных диапазонов длин волн показали, что корреляционные зависимости величины ослабления энергии сверхвысоких частот от температуры плавления льда можно использовать для оценки поровой структуры. Показано, что характеристикой капиллярно-порового пространства является внутрикапиллярное давление, схема измерения которого разработана в настоящей работе.

При определенной температуре в капиллярах с радиусами r_1, r_2 , где находятся насыщенный пар и капельная жидкость, состояние динамического равновесия между ними вероятнее при меньшем парциальном давлении, т. е. в капилляре с радиусом r_2 :

$$p_1'' = p_\infty'' \exp(2v_1\sigma / RT r_1); \quad p_2'' = p_\infty'' \exp(2v_2\sigma / RT r_2), \quad (12)$$

где p_1'', p_2'' – давление насыщенного водяного пара в капиллярах, радиусы которых r_1, r_2 ;

p_∞'' – давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью;

R – газовая постоянная;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Следовательно:

$$p_1'' = f(r), \quad p_1'' > p_2'', \quad (p_0'', p_1'', p_2'') = f(t''). \quad (13)$$

При $v, \sigma, R = \text{const}$ имеем $t'' = f(r)$.

В материалах, в которых происходят фазовые переходы, разность удельных объемов жидкости и льда равна

$$v_3 - v_2 = (r_\phi / t'')(dt / dp), \quad (14)$$

где r_ϕ – теплота фазового перехода;

v_2 – удельный объем воды;

v_3 – то же льда.

Допуская, что все термодинамические параметры материала, кроме удельных объемов жидкости и льда, остаются постоянными, будем иметь:

$$\Delta N = f(v_3 - v_2); \quad \Delta N = f\left[\left(r_{\phi} / t''\right)(dt / dp)\right]. \quad (15)$$

Так как поглощение энергии сверхвысоких частот зависит от V_2/V и V_3/V , то

$$V_2/V = f(\Delta N_2/\Delta N_{\max}). \quad (16)$$

Пористость систем анализировалась с использованием методик охлаждения образца парами жидкого азота в криостате.

Получены дифференциальные и интегральные кривые распределения пор по размерам материалов при различных видах твердения бетонов. С использованием рентгеновских микроанализаторов представлены структурные характеристики цементно-песчаных и других материалов наружных ограждающих конструкций (рисунок 6).

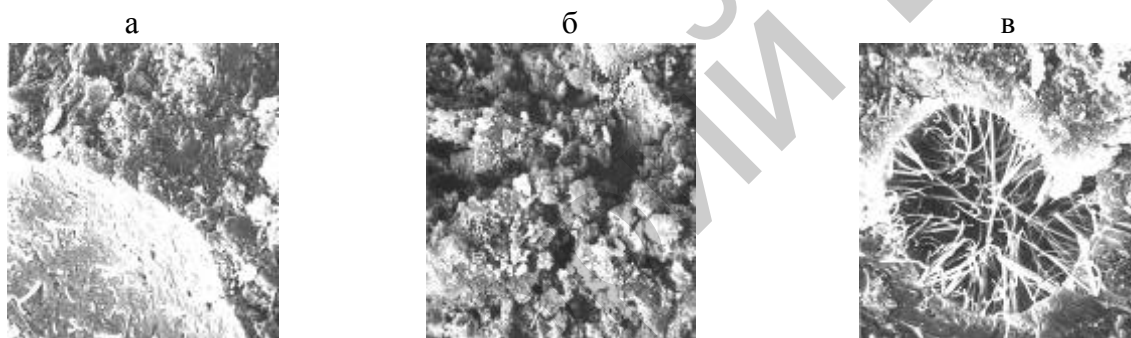


Рисунок 6 – Стереоснимки излома поверхности цементно-песчаных образцов (увеличение в 500 раз)

Представлены сведения, связанные с фильтрацией воздуха в материалах строительных конструкций, методы измерения воздухопроницаемости капиллярно-пористых систем, выполненных на установках, общий вид и схемы которых приведены на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены некоторые результаты исследований воздухопроницаемости керамзитобетонных образцов I , их влагосодержание $u = 0,33-19,98 \%$, толщина $\delta = 0,16-0,34$ м.

Автором получены расчетные формулы, связывающие фильтрационные потоки, влагосодержание, объемную массу керамзитобетона и перепад давлений воздушной среды:

$$I = \Delta p \left[c_1 \rho^4 + c_2 \rho^3 + c_3 \rho^2 + c_4 \rho + c_5 - u^2 (a_1 \rho^2 + a_2 \rho + a_3) - u (b_1 \rho^2 + b_2 \rho + b_3) \right];$$

$$I = \Delta p^2 [d_1 \rho^2 + d_2 \rho + d_3 - u(l_1 \rho^2 + l_2 \rho + l_3)] + \Delta p [f_1 \rho^3 + f_2 \rho^2 + f_3 \rho + f_4 - u(g_1 \rho^2 + g_2 \rho + g_3)] + i_1 \rho^3 + i_2 \rho^2 + i_3 \rho + i_4 - u(l_1 \rho^2 + l_2 \rho + l_3), \quad (17)$$

где $a_1, a_2, a_3, d_1, d_2, d_3$ и т. д. – коэффициенты в рассматриваемом диапазоне объемных масс.

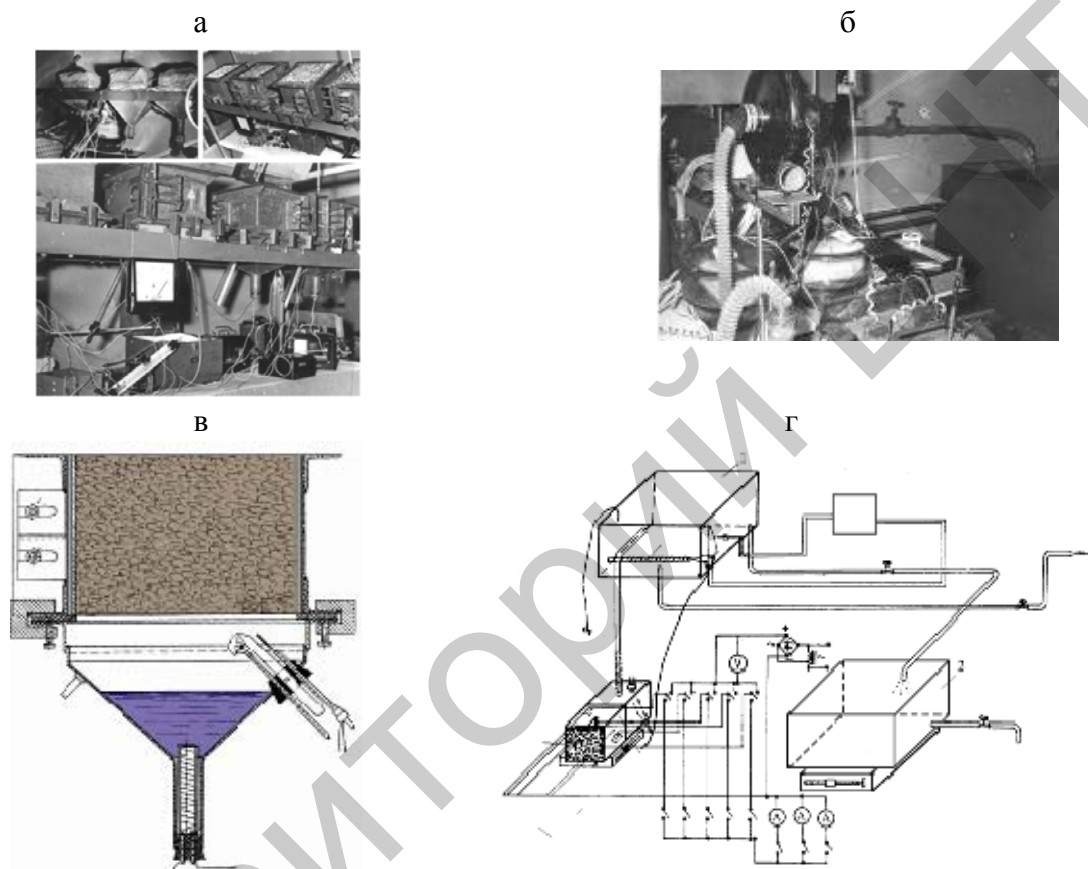


Рисунок 7 – Общий вид (а, б) и схема (в, г) установки для определения воздухо- и паропроницаемости капиллярно-пористых материалов

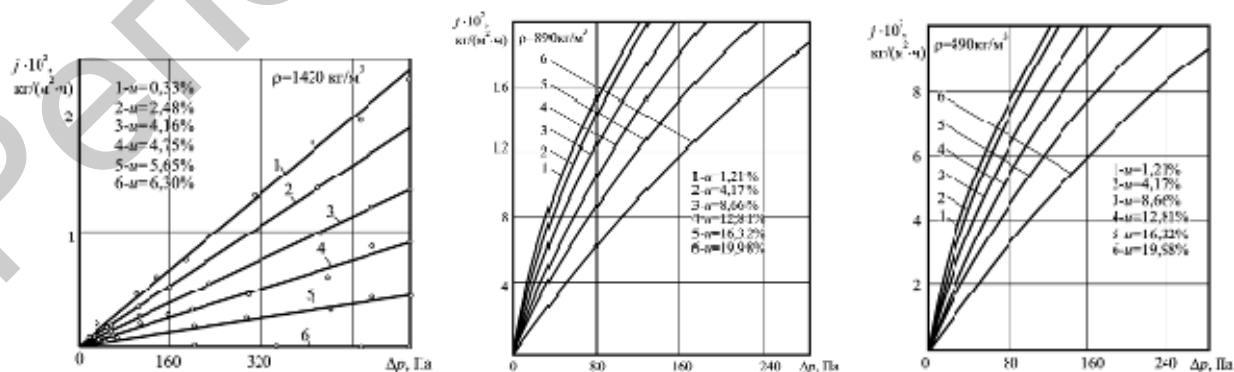
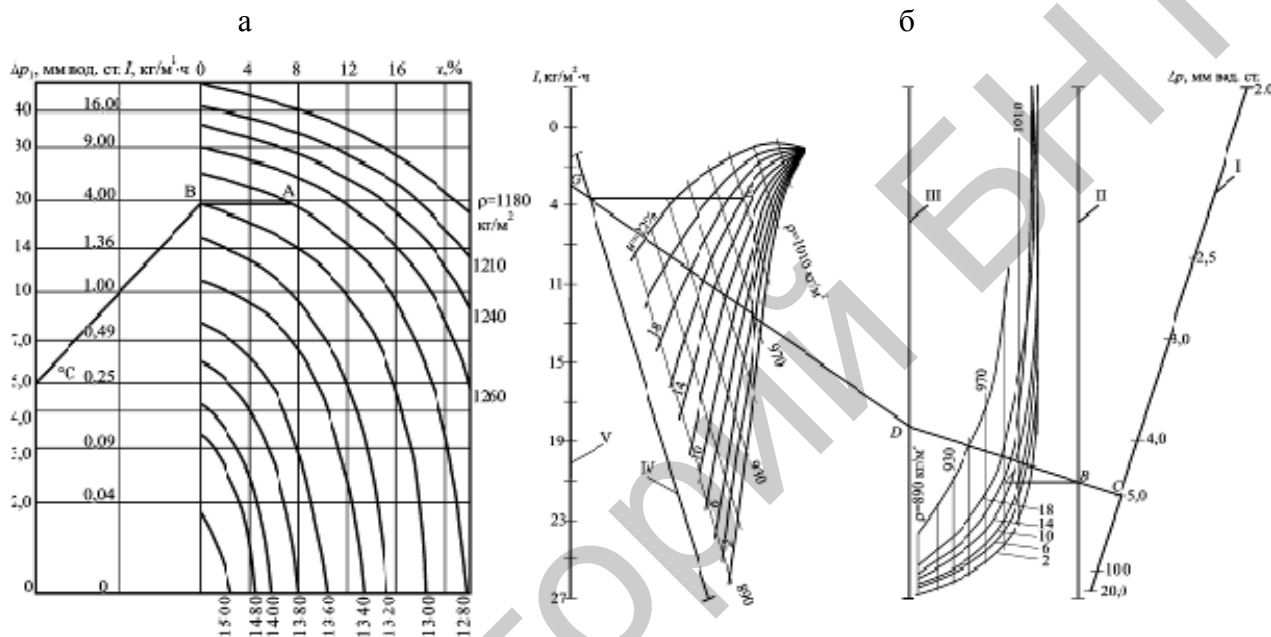


Рисунок 8 – Зависимости фильтрационных потоков от перепадов давления при различных влагосодержаниях и плотности материалов

Из результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о качественном изменении фильтрации воздуха при различных объемных массах материала описываемой линейными и квадратичными уравнениями, которые приведены к канонической форме. Для практических расчетов фильтрации составлены определители, по которым построены номограммы из выравненных точек (рисунок 9). Разработана методика определения воздухопроницаемости плотных строительных материалов с помощью теплового источника. Разработаны и апробированы устройства для испытаний строительных материалов на воздухопроницаемость в натуральных условиях.



а – $\rho = 1150\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$; б – $\rho = 850\text{--}1150 \text{ кг/м}^3$

Рисунок 9 – Номограммы для определения удельных фильтрационных потоков воздуха при различных Δp и плотности керамзитобетона

В четвертой главе «Тепло- и массоперенос в стыковых сопряжениях отапливаемых зданий» показано, что геометрическая форма стыкового сопряжения может существенно влиять на влагоперенос в нем. Разработано стыковое сопряжение, при котором температурные, фильтрационные, диффузионные поля близки к стационарным, а также физико-математическая модель стыкового сопряжения, учитывающая гидроаэродинамические сопротивления от внутренних до внешних поверхностей стыковых сопряжений.

При граничных условиях III рода в стыковых сопряжениях границы массопотоков (воздуха, капельной влаги) зависят от чисел Pr, геометрических размеров стыковых сопряжений. В каждой точке воздухопотока при течении в стыковом элементе может быть положительная, отрицательная или нулевая величина дивергенции скорости w

$$\operatorname{div} w = dw_x/dx + dw_y/dy + dw_z/dz = -1/F(d\rho/d\tau), \quad (18)$$

где dw_x, dw_y, dw_z – составляющие скорости по координатным осям x, y, z ;

F – поверхность в вертикальном поле, плотность воздухопотока.

Для стыковых сопряжений при наличии в них оболочек, заполненных флюидом, давление в сечении I–I равно p_1 , а в сечении II–II – p_2 . Расстояние от уровня земли до сечения I–I составляет h_1 , до II–II – h_2 . Если p – давление флюида на горизонтальную площадку на высоте h , то $p + dp$ – давление на такую же площадку на высоте $h + dh$, тогда разность этих давлений dp равна весу, отнесенному к единице поверхности столба флюида высотой dh между сечениями. Тогда:

$$dp = -\rho g dh, \quad (19)$$

а также:

$$p/p_0 = \rho/\rho_0; \quad \rho = (p \cdot \rho_0)/p_0; \quad dh = -p_0/g\rho_0 \cdot dp/p, \quad (20)$$

где ρ_0 – плотность флюида при давлении p_0 .

После интегрирования левой части уравнения (19) от h_1 до h_2 , правой – от p_1 до p_2 , можно получить: $\int_{h_1}^{h_2} dh = -p_0/g\rho_0 \int_{p_1}^{p_2} dp/p$;

$$h_2 - h_1 = -p_0/g\rho_0 (\ln p_2 - \ln p_1) = h_0/g\rho_0 \ln p_1/p_2. \quad (21)$$

Зависимости для расчета расхода воздуха через стыковые сопряжения описываются выражениями:

$$j = i\Delta p; \quad j = i(\Delta p)^n, \quad (22)$$

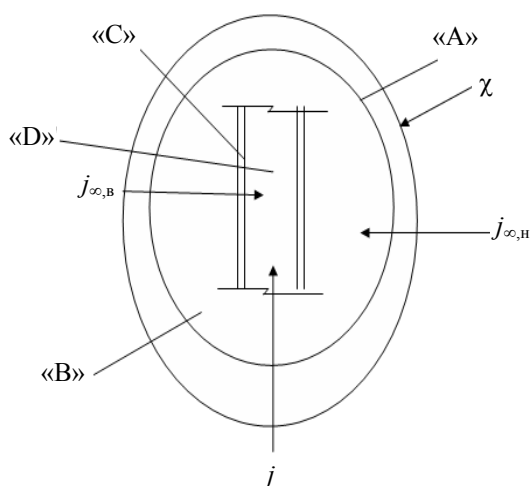
где j – поток воздуха через 1 м^2 площади стыка при разности давлений Δp ;

Δp – разность давлений у более и менее нагретых поверхностей стыкового сопряжения;

$n = 1,0$ соответствует ламинарному, $n = 0,5$ – турбулентному, $1,0 > n > 0,5$ – смешанному движению воздуха через стыковые сопряжения.

Представлена модель системы, характеризующая оптимальную герметизацию стыка (рисунок 10).

Анализ деформативно-прочностных характеристик оболочек, заполненных флюидом, основывался на том, что возникновение значительных упругих сил при небольших деформациях характерно для флюидов и оболочек. Отличие материалов оболочек от флюидов в том, что значительные упругие силы возникают в них при небольших изменениях объема, а в жидкостях такие сдвиги не сопровождаются возникновением упругих сил. Полимеры рассматриваются как особая разновидность твердых тел. Их модели состоят из десятков и сотен тысяч атомов, что обуславливает их особые свойства, например способность к сравнительно большим деформациям.



$j_{\infty, \text{в}}$ – диффузионно-фильтрационный поток внутреннего воздуха (более нагретой жидкости);
 j – поток флюида с различными термодинамическими параметрами; $j_{\infty, \text{н}}$ – диффузионно-фильтрационный поток наружного воздуха (менее нагретой жидкости);
 «А» – открытая неравновесная гетерогенная термодинамическая система, включающая термодинамические подсистемы «В», «С», «D», рассматриваемые как открытые и неравновесные

Рисунок 10 – Схема модели массопотоков стыковых сопряжений

Для определения воздухопроницаемости межпанельных стыков в лабораторных и натуральных условиях разработаны установки, состоящие из кассет, вакуумных механизмов, выполненных в виде наклонно расположенных соосных стеклянных цилиндров с эластичными поршнями.

Расчеты температурных полей стыков выполняются в соответствии с применяемыми конструктивными, теплоизоляционными, декоративными материалами стыковых сопряжений и контактирующими с ними строительными элементами по вертикали и горизонтали при стационарных и нестационарных температурно-влажностных климатических условиях. То есть решается система двумерных дифференциальных уравнений теплопроводности Фурье – Кирхгофа при граничных условиях II и III родов для больших и малых интервалов времени.

Эффективными стыковыми сопряжениями будут такие, коэффициенты термических (объемных) расширений которых обратно пропорциональны температурам, т. е. их объемы в летний и демисезонный периоды уменьшаются, а в зимний – увеличиваются. Номинальное давление в эластичных (гибких, деформируемых) оболочках реализуется гидростатическими способами или наличием внутренних источников теплоты. Оптимальное давление – это давление флюида (в ограничивающих оболочках сопряжений), необходимое для обеспечения равенства массопотоков в единицу времени через единицу поверхности как обычных многослойных ограждений, так и стыковых сопряжений между ними.

Предложена технология изготовления конструкции стыков крупноразмерных элементов ограждающих конструкций зданий, в которых отсутствуют температурные напряжения, деструктивные процессы, трещинообразование. При этом обеспечиваются оптимальные диффузионные и фильтрационные потоки через стык капельной, паровой, газовой фаз.

Автором разработана установка (рисунок 11) для определения воздухопроницаемости межпанельных стыков в лабораторных и натуральных условиях, которая

состоит из кассет, вакуумных механизмов, выполненных в виде наклонно расположенных соосных стеклянных цилиндров с эластичными поршнями.

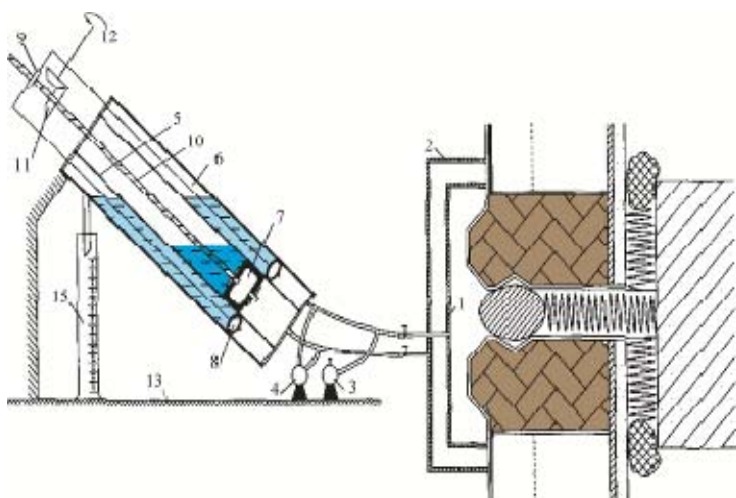


Рисунок 11 – Схема установки для определения воздухопроницаемости стыков

Установка включает камеры 1 и 2, к которым подключены манометры 3 и 4, присоединенные к цилиндрам 5 и 6. Во внутреннем цилиндре расположен поршень 7, во внешнем – кольцевой поршень 8, объединенные подшипником 9, связанные с механизмом поступательного движения 10–12 зубчатой передачей 11. Камеры монтируются к испытуемому фрагменту стыкового сопряжения 14 и герметизируются по периметру. Использование камеры 2 обусловлено необходимостью взаимной компенсации объемов воздуха, проходящего за пределами камеры 1.

Создавая вращательное движение с помощью механизма 10, 11, поршни 7, 8 одновременно перемещаются, что создает разрежение у поверхности стыкового сопряжения, контролируемое манометрами 3, 4 в камерах 1, 2. По массе жидкости, вытесненной из цилиндров 5, 6, определяется объем воздуха, прошедшего через стыковое сопряжение.

Монтаж гибких, пластичных устройств в стыковых сопряжениях возможен при изготовлении панелей, блоков в заводских условиях, на строительных объектах, при капитальном ремонте и реконструкции зданий.

В пятой главе «Тепло- и массоперенос в приквартирных светопрозрачных пространствах» впервые выполнены теоретические и экспериментальные исследования термических характеристик ограждений с учетом светопрозрачных приквартирных пространств, их ориентации, времени года, этажности, коэффициентов облученности, радиационных характеристик поверхностей (рисунок 12).

Температуры воздуха в приквартирных пространствах без учета фильтрационных и радиационных потоков принимались равными средним арифметическим температурам поверхностей ограждений, а коэффициенты теплоотдачи у поверхностей определялись расчетным путем.

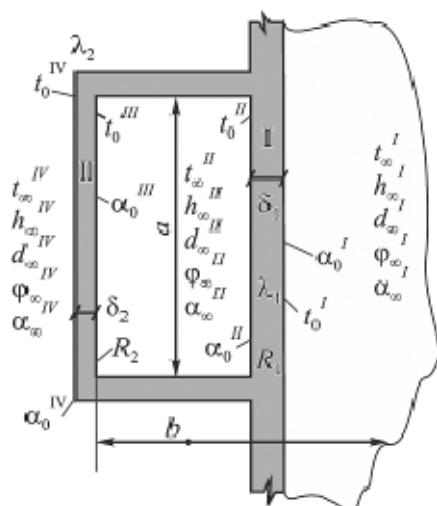


Рисунок 12 – Схема приквартирного пространства и отапливаемого помещения

Тогда при известных температурах воздуха в помещении и высоте наружной стены можно рассчитать коэффициент теплоотдачи α_0 (лучистый и конвективный) у внутренней поверхности – $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Средние термические сопротивления стены I (между отапливаемым помещением и приквартирным пространством) (рисунок 12) и теплопроводности стены II находятся из выражения

$$\bar{R}_1 = (R_1 F_1 + R_1^{ok} F_1^{ok}) / (F_1 + F_1^{ok}), \quad (23)$$

где F_1, F_1^{ok} – площадь поверхности стены I без оконного проема и окна, м^2 ;

R_1, R_1^{ok} – эквивалентные термические сопротивления теплопроводности стены I и оконного проема соответственно,

$$\bar{R}_2 = \sum_{i=1}^n R_i F_i / \sum_{i=1}^n F_i, \quad (24)$$

где R_i – термическое сопротивление i -го участка;

F_i – площадь поверхности неостекленных и остекленных i -х участков;

$R_i = \delta_i / \lambda_i$,

δ_i – толщина i -го участка стенки I;

δ_2 – толщина i -го участка стенки II;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го участка.

Средняя температура внешней поверхности стены I, разделяющей отапливаемое и приквартирное помещения:

$$\bar{t}_0^{\text{II}} = t_x^{\text{I}} - \left((t_\infty^{\text{I}} - t_\infty^{\text{II}}) / (1/\alpha_0^{\text{I}} + R_1 + 1/\alpha_0^{\text{II}}) \right) (R_1 + 1/\alpha_0^{\text{II}}), \quad (25)$$

где α_0^{II} – коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности стены I.

В интервале температур от минус $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ при среднем коэффициенте теплопроводности воздуха, равном $2,34 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, и среднем коэффициенте термического расширения воздуха – $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1}/\text{К}$:

$$\text{Nu}_x'' = \alpha_0^{\text{II}} h_1 / 2,34 \cdot 10^{-2}, \quad \text{Gr}_\infty'' = 2,43 \cdot 10^8 h_1^3 (t_0'' - t_\infty''')^{0,25}; \quad (26)$$

$$\alpha_0^{\text{II}} h_1 / 2,34 \cdot 10^{-2} = 0,7 \left[3051 h_1^3 (t_0'' - t_\infty''') \right]^{0,25}, \quad (27)$$

$$\alpha_0^{\text{II}} = 2,05 h_1^{-0,25} (t_0'' - t_\infty''')^{0,25}. \quad (28)$$

Допуская, что температура t_∞'' равна среднеарифметической из t_0'' и t_0''' (28), можно записать:

$$\alpha_0^{\text{II}} = 0,12 \bar{h}_2^{-0,25} ((t_0'' - t_\infty''')/2)^{0,25} \quad \text{или} \quad \alpha_0^{\text{III}} = 0,12 \bar{h}_2^{-0,25} (t_\infty''')^{0,25}. \quad (29)$$

Количество теплоты, передаваемое лучеиспусканием от поверхности стены I к внутренним остекленным поверхностям:

$$Q_{\text{I,II}} = C_0 \bar{\varepsilon}_{\text{пр}} F_p \left[(\bar{T}_0''/100)^4 - (\bar{T}_0'''/100)^4 \right], \quad (30)$$

где \bar{T}_0'' , \bar{T}_0''' – средние температуры внутренних поверхностей остекленных ограждений II и III.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием между остекленными и неостекленными стенами можно рассчитать из выражения

$$\alpha_{0,\text{I,II}} = \frac{c_0 \bar{\varepsilon}_{\text{пр}} F_p \left[\left(\frac{\bar{t}_0^{\text{II}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{t}_0^{\text{III}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{\bar{t}_0^{\text{II}} - \bar{t}_0^{\text{III}}} = 0,12 h_1^{-0,25} (\bar{t}_0^{\text{II}} - \bar{t}_0^{\text{III}})^{0,25}. \quad (31)$$

Для вертикальных стен лучистый теплообмен (при одинаковых температурах) больше конвективного в среднем на 6 %. Общий коэффициент теплоотдачи ($t = (-25) - 0$ °C, $\bar{\varepsilon}_{\text{пр}} = 0,78$) равен

$$\sum \alpha = \alpha'_0 + \alpha''_1 = 0,24 h_1^{-0,25} (t_\infty'')^{0,25}. \quad (32)$$

Тепловой баланс для воздуха приквартирного пространства ΔQ может быть представлен формулой

$$\Delta Q = Q + Q_x + Q_\lambda = j_x c_p (t_{\infty,1}^{\text{II}} - t_{\infty,2}^{\text{II}}) = c_p (185 F_x / F) (t_{\infty,1}^{\text{II}} - t_{\infty,2}^{\text{II}}), \quad (33)$$

где $t_{\infty,1}^{\text{II}}$, $t_{\infty,2}^{\text{II}}$ – температуры воздуха в начальный и конечный моменты времени в приквартирном пространстве.

Массопоток, проходящий через наружную стену, при наличии светопрозрачных конструкций равен $j_x = \frac{F_x \cdot 185}{F}$, кг/ч, тогда можно записать:

$$\Delta Q = 185 \frac{F_x}{F} \vartheta c_p, \quad (34)$$

где F – площадь наружного ограждения;

F_x – площадь наружной стены, разделяющей отапливаемые и приквартирные остекленные помещения;

$\vartheta = t_{\infty,1}^{\text{II}} - t_{\infty,2}^{\text{II}}$ – избыточная температура воздуха в приквартирном пространстве, °С.

Средняя температура \bar{t} , влагосодержание \bar{d} , энтальпия \bar{h} и относительная влажность $\bar{\varphi}$ воздуха в приквартирном пространстве рассчитываются из выражений:

$$\bar{t} = \frac{\bar{h} - 2501\bar{d}}{1 + 1,96\bar{d}}; \quad \bar{d} = \frac{m_1 d_{\infty}^{\text{I}} + m_2 d_{\infty}^{\text{IV}}}{m_1 + m_2}; \quad \bar{h} = \frac{m_1 h_{\infty}^{\text{I}} + m_2 h_{\infty}^{\text{IV}}}{m_1 + m_2}; \quad \bar{\varphi} = \frac{1,608\bar{d}}{1 + 1,608\bar{d}} \frac{p}{p^{\text{II}}}. \quad (35)$$

Таким образом, автором предложено рассчитывать среднюю температуру воздуха приквартирного пространства \bar{t} из выражения

$$\bar{t} = \left[\frac{m_1 h_{\infty}^{\text{I}} + m_2 h_{\infty}^{\text{IV}}}{m_1 + m_2} - 2501 \frac{m_1 d_{\infty}^{\text{I}} + m_2 d_{\infty}^{\text{IV}}}{m_1 + m_2} \right] / \left[1 + 1,96 \frac{m_1 d_{\infty}^{\text{I}} + m_2 d_{\infty}^{\text{IV}}}{m_1 + m_2} \right]. \quad (36)$$

В h - d -диаграмме (рисунок 13) термодинамические характеристики воздуха приквартирных пространств можно представить точками A_1, A_2, A_3 . Так как отношение массы фильтрующегося наружного воздуха β_1 , а в помещениях квартиры β_2 , то $\beta_1 = m_2/m_1$ и $\beta_2 = m_3/m_1$. Численные значения температуры, относительной влажности, влагосодержания, энтальпии для воздуха в приквартирном пространстве при известных термодинамических параметрах наружного

воздуха (точка A_1) и в отапливаемом помещении (точка A_3) характеризуются точкой A_2 и отличаются от расчетных менее чем на 1 %.

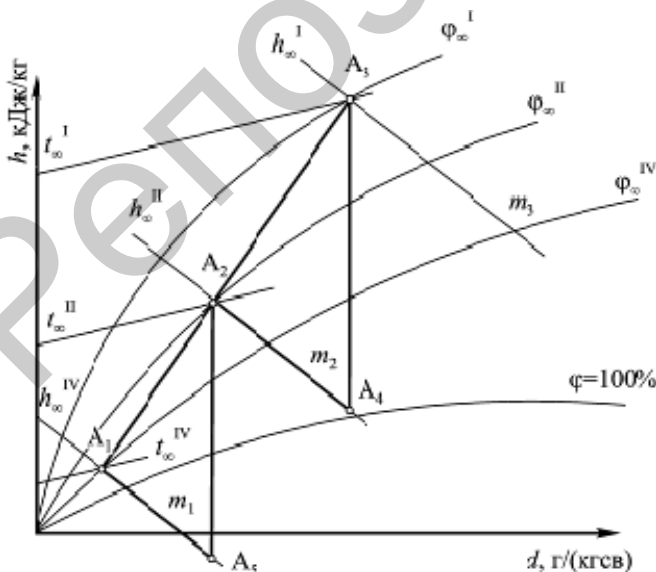


Рисунок 13 – Схема процесса смешения воздуха приквартирного пространства в h - d -диаграмме

В шестой главе «Аэродинамическая устойчивость помещений и ограждающих конструкций» обоснован вводимый автором термодинамический термин «аэродинамическая устойчивость помещений» – способность снижать колебания термодинамических характеристик воздуха в помещениях при флуктуациях тепловых потоков от внутренних источников теплоты. Другой термин – «устойчивость ограждающих конструкций» определяется коэффициентами устойчивости потокам капельной жидкости, пара и влажного воздуха воздухопроницаемости ограждения π , представляющими собой:

$$\pi_0^I = \frac{P_{\infty,1}^I - P_{\infty,2}^I}{P_{\infty,1}^I - P_{\infty,1,\min}^I}; \quad \pi_0^{II} = \frac{P_{\infty,1}^{II} - P_{\infty,2}^{II}}{P_{\infty,1}^{II} - P_{\infty,1,\min}^{II}}; \quad \pi_0^{III} = \frac{P_{\infty,1}^{III} - P_{\infty,2}^{III}}{P_{\infty,1}^{III} - P_{\infty,1,\min}^{III}}, \quad (37)$$

где $P_{\infty,1}^I, P_{\infty,2}^I$ – давление капельной фазы у менее и более нагретых поверхностей элементов ограждающих конструкций;

$P_{\infty,1}^{II}, P_{\infty,2}^{II}$ – парциальное давление водяного пара у менее нагретых поверхностей элемента ограждающей конструкции;

$P_{\infty,1}^{III}, P_{\infty,2}^{III}$ – давления паровоздушной смеси у наружной поверхности ограждающей конструкции;

$P_{\infty,1,\min}^I, P_{\infty,1,\min}^{II}, P_{\infty,1,\min}^{III}$ – минимальные давления капельной жидкости и паровоздушной смеси у внутренних поверхностей ограждающих конструкций.

Амплитуда колебаний потоков массы (воздуха, пара и т. д.), проходящих через единицу более нагретой поверхности, может быть представлена

$$A^p = j_{\max}^p - j^p. \quad (38)$$

Имеем

$$A_p^p = \alpha_1^p (p_{\max} - p_{0,\max}) - \alpha_1^p (p_{\max} - \bar{p}_0) = \alpha_1^p A_p^p - \alpha_1^p A_0^p, \quad (39)$$

где A_p^p – амплитуда колебания давления воздуха в отапливаемом помещении;

A_0^p – то же в пограничном слое ограждения, Па.

Отношение амплитуды колебания потока массы A_Q^p к величине амплитуды колебания давления на более нагретой поверхности A_0^p предложено представлять с использованием коэффициента массоусвоения более нагретой поверхности Y_0^p , кг/(м²·ч·Па), т. е.

$$Y_0^p = A_Q^p / A_0^p, \quad (40)$$

зависящего от периода колебаний потока массы, тепло- и массообменных характеристик конструкции, представляющего собой максимальное изменение амплитуды колебания потока массы, поступающей к более нагретой поверхно-

сти ограждения, если амплитуды колебания потенциала массопереноса, например давления, равны единице. С увеличением коэффициента массоусвоения внутренней поверхности ограждения уменьшается A_0^p .

Изменения потенциалов массопереноса, концентраций компонентов, давлений в плоскости у более нагретой поверхности ограждающей конструкции обуславливают флюктуации этих параметров в ограждении, их градиенты уменьшаются с удалением от начала координат – происходит затухание – запаздывание этих колебаний с течением времени.

В ограждающих конструкциях отапливаемых помещений возникает волна массообменных потенциалов, стремящаяся к нулю с увеличением расстояния от поверхности (расстояние между соседними максимумами или минимумами волны – длина волны).

Число волн в ограждении характеризует его показатель массообменной инерции D^p – безразмерная величина, зависящая от периода колебаний массопотоков (произведение его сопротивления массопереносу R^p и коэффициента усвоения материала ограждения по отношению к массе S^p). При уменьшении колебания потока массы увеличивается показатель D^p , следовательно, в ограждении располагается большее число волн, уменьшается длина волны массопотоков и интенсивнее изменяются массообменные характеристики. Показатели массообменной инерции – величины, зависящие от периода колебания массопотоков. Уменьшение периода колебания увеличивает инерцию ограждения, следовательно, в ограждении возможно наличие большего числа волн, при этом интенсивнее уменьшаются колебания в ограждении и длина волны для потенциала массопереноса.

Представлены авторские материалы для проектных и эксплуатирующих организаций по критерию аэродинамической устойчивости воздушно-теплого режима помещений, строительных конструкций с точки зрения энергосберегающих технологий. Показано, что здание – это единая аэродинамическая система, состоящая из многочисленных коммуникаций, по которым перемещается воздух от энергоисточников. Участками перемещения воздуха являются все помещения, вентиляционные каналы, вентиляционное оборудование, ограждающие конструкции здания, от которых зависит m .

Колебание массопотоков от их источников охарактеризовано коэффициентом неравномерности массоотдачи

$$m = \frac{j_{\max} - j_{\min}}{2\bar{j}}, \quad (41)$$

где j_{\max} , j_{\min} , \bar{j} – максимальный, минимальный, средний потоки массы от их источников, кг/(кг/м²).

Рассмотрены периодические аэродинамические (квазистационарные) воздействия на плоскую конструкцию, замкнутое помещение, которые повторяются с тем же периодом в одном направлении. Через ограждение проходят аэродинамические волны, которые постепенно затухают. Давление у поверхности стены – функция времени, тепло- и массопереноса между воздухом и поверхностью – характеризуется линейной зависимостью. Многие случаи периодических воздействий рассматриваются как синусоидальные, например:

$$p = A \sin(360\tau/z + \varphi'') \text{ или } p = A \cos(360\tau/\Delta\tau + \varphi'), \quad (42)$$

где p – барометрическое давление; Па;

A – амплитуда колебания давления, Па;

φ – начальный фазовый угол колебания давления, град.;

τ – время, ч.

Величина φ зависит от начального момента отсчета времени ($\tau = 0$), $\varphi = 90 - \varphi'$.

Массопотоки (воздух, пар, капельная влага) перемещаются синхронно движению волны или в обратную сторону. При этом положительный аэродинамический поток в течение полупериода – это поток по направлению распространения волны, а следующего – против направления.

Для плоскопараллельного слоя перенос массы можно охарактеризовать уравнением

$$dp/d\tau = a_m \partial^2 p / \partial x^2, \quad (43)$$

решение которого можно представить в виде

$$p = -\exp(2\pi i / \Delta\tau) \left(c \cdot \operatorname{chx} \sqrt{2\pi i / (\Delta\tau a_m)} + l \cdot \operatorname{shx} \sqrt{2\pi i / (\Delta\tau a_m)} \right), \quad (44)$$

где a_m – коэффициент массопроводности, м²/ч;

c и l – постоянные;

i – мнимая единица.

Плотность потока массы можно записать в виде следующих уравнений:

$$j = -\lambda_m \partial p / \partial x, \quad (45)$$

$$j = -\exp(2\pi i / \Delta\tau) i \lambda_m \sqrt{2\pi i / (\Delta\tau a_m)} \times \\ \times \left(c \cdot \operatorname{shx} \sqrt{2\pi i / (\Delta\tau a_m)} + l \cdot \operatorname{chx} \sqrt{2\pi i / (\Delta\tau a_m)} \right), \quad (46)$$

где λ_m – коэффициент массопроводности.

Анализ результатов позволяет отметить, что в наружных ограждениях находятся участки регулярных и нерегулярных аэродинамических колебаний воздуха, водяного пара, капельной влаги. Затухание аэродинамических волн в ограждении минимально, если его слои не имеют аэродинамической устойчивости. Вероятны волны, обусловленные ветровым, гравитационным, парциальным давлениями.

Плотность массопотоков в венткоммуникациях, массодинамическая устойчивость помещений зависят от пространственного распределения атмосферного давления и концентраций различных компонентов.

Аэродинамическая устойчивость жилых помещений зависит от функционирования вентиляционных каналов, шахт, аэродинамических потерь участков от поверхностей наружных ограждений до жалюзийных решеток различных помещений. Показано, что аэродинамические потери зависят от геометрических размеров «живых сечений» венткоммуникаций, скорости воздуха. На аэродинамическую устойчивость отапливаемых помещений влияют «теплые» чердаки, теплообмен между воздухопотоками расстояний от устья вентиляционных шахт.

Аэродинамическая устойчивость помещений увеличивается, когда площади живого сечения, плотностей оконных проемов, дверных проемов входных дверей, дверей кухонь, ванных комнат, жилых комнат равны или больше площадей сечений жалюзийных решеток кухонных, ванных комнат и санузлов.

Результаты диссертационной работы внедрены на объектах промышленного, гражданского и жилищного назначения, а также в учебный процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены основные направления минимизации теплопотерь в ограниченных пространствах, которая обеспечивается комплексным решением проблем тепло- и массообмена в строительных конструкциях, а именно: в наружных ограждающих конструкциях созданы микро- и макромодульные элементы, фильтрационные и диффузионные характеристики которых превосходят существующие [1, 17, 18, 21, 23, 24, 27, 51]; в стыковых сопряжениях разработана технология термовлагодиффузионной защиты, обеспечивающая необходимый уровень воздухо-, влаго- и термопроницаемости во все времена года [58, 88, 95]; впервые разработаны экспериментальные методики определения воздухо- и влагопроницаемости массивов капиллярно-пористых систем [27, 56, 63,

72, 73], алгоритм расчета температурных полей воздуха, термических характеристик ограждений при нормируемых воздухопотоках, не имеющих аналогов в научных, нормативных и патентных источниках [60, 83–85, 91].

Разработана структурно-логическая схема в области «Тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных материалов и конструкций различного назначения» [21].

2. Разработаны новая технология терморевитации с использованием микро- и макромодульных контуров для горизонтальных и вертикальных поверхностей терморевитируемых ограждений зданий и технологии их изготовления в заводских условиях. Конструкции, выполненные из модулей многопрофильных сечений, в теплотехническом аспекте более эффективны из материалов, термические сопротивления теплопроводности которых составляют (3,28–3,43) м²·К/Вт. Предложена и защищена патентами новая технология ревитации стволов дымовых труб, энергоэффективность которой при монтаже стеклопластиковых коррозионно-стойких защитных труб определяется: уменьшением теплопотерь от дымовых газов к наружному воздуху; исключением химических взаимодействий дымовых газов и внутренней поверхности трубы. Разработанный вариант отличается от известных тем, что монтаж стеклопластиковой трубы выполняется не «снизу вверх», а «сверху вниз», что определяет его низкую трудозатратность [1, 5, 10, 12, 14, 15, 20, 22, 26, 38, 41, 46, 48, 50–52, 57, 59, 61, 78]. Предложена и внедрена новая технология изготовления оригинальных крупнопанельных изделий с использованием ограниченных воздушных контуров, обеспечивающая общее сопротивление теплопередаче в соответствии с нормативно-технической документацией Республики Беларусь при энерго- и ресурсосбережении от 10 до 15 % [13, 54, 92, 94].

3. Разработаны и апробированы устройства для испытаний воздухо- и влагопроницаемости строительных конструкций, для измерений внутрикапиллярного давления в пористых телах, которые имеют термодинамический контакт с ограниченными пространствами; методы экспериментального исследования пористости строительных материалов; проведен термодинамический анализ фазовых переходов в капиллярно-пористых телах; разработаны метод сверхвысоких частот, когда в качестве хладагентов использовались пары жидкого азота с целью получения интегральных и дифференциальных кривых распределения пор по размерам [3, 4, 6, 28–30, 37, 40, 64, 65]; методика экспериментального определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях [61, 71, 80]; установка для определения воздухопроницаемости плотных строительных материалов методом теплового источника [27, 44, 80, 92].

4. Предложена новая физико-математическая модель стыковых сопряжений, в которой показано, что оптимальное давление в эластичных (гибких, де-

формируемых) оболочках может быть реализовано гидростатическими способами с использованием автоматического регулирования. Оптимальное давление – это давление флюида (жидкости, пасты и т. д.) в ограничивающих оболочках сопряжений, выполненных из деформируемых материалов (резины, пластмассы, металла и т. д.), необходимое для обеспечения равенства массопотоков через единицу поверхности в единицу времени как обычных многослойных ограждений, так и стыковых сопряжений. Выполнены расчеты температурных полей наиболее распространенных стыковых сопряжений при стационарных, нестационарных режимах и граничных условиях III рода. Проанализированы термофизические характеристики флюидов ньютоновских, не-ньютоновских жидкостей, мастик и т. д. Установлено, что имеется качественное изменение фильтрации воздуха, начиная с объемной массы материала, например для керамзитобетона равной 1200 кг/м^3 , фильтрационные потоки в них описываются линейными уравнениями. Получены расчетные формулы, связывающие фильтрационные потоки, влагосодержание, объемную массу материала, перепад давлений воздушной среды, которые применимы для керамзитобетонных материалов при плотности $(1150\text{--}1500)$ и $(850\text{--}1150) \text{ кг/м}^3$. Эти уравнения были приведены к канонической форме, составлены определители, по которым построены номограммы из выравненных точек [1, 3, 4, 6, 11, 20, 23, 24, 27, 29–32, 34–36, 39, 40, 42, 43, 45, 47, 56, 63, 64–67, 77].

5. В результате исследований установлены расчетные зависимости тепло- и массообмена в ограниченных приквартирных остекленных пространствах отапливаемых зданий, обоснованные теплотехническими и термодинамическими закономерностями, реализуемые на основании сопоставления климатологических данных наружного и воздуха в отапливаемых помещениях (температур, относительных влажностей, влагосодержаний, энтальпий), что определяет энергоэффективность, экологическую чистоту и надежность зданий на этапе их проектирования и эксплуатации, улучшает качество и обеспечивает конкурентоспособность строительных технологий [2, 7, 16, 19, 49, 70, 71, 86, 89, 91, 92]. Предложены аналитико-графические методы расчетов температур, относительной влажности, влагосодержания, энтальпии воздуха в приквартирных пространствах в зависимости от массы воздухопотоков, их термодинамических характеристик [16, 19]. Проанализированы термоаккумулирующие системы с капельными жидкостями, уменьшающими расход теплоты на 10 % [8, 9, 33, 68, 74, 81].

6. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что внедрение энергосберегающих технологий в жилых домах, создание в них комфортных условий в значительной степени связаны с обеспечением противодействия экстремальным климатическим условиям внешней среды с учетом теп-

ломассообменных факторов и аэродинамической устойчивости в различных элементах зданий [11, 21, 82]. Разработан алгоритм расчета аэродинамической устойчивости помещений и ограждающих конструкций, представляющий собой последовательность уравнений, включающую разности давлений у менее и более нагретых поверхностей и амплитуды колебаний воздуха в поверхностных слоях ограждения, которые изменяются во времени по синусоиде и косинусоиде [69, 75, 82, 86].

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Результаты проведенных исследований, подтвержденные патентами на изобретения, авторскими свидетельствами и актами внедрения, позволили сформулировать следующие практические рекомендации:

1. Разработан комплекс поправок к нормативным документам, регламентирующих расчет и проектирование аэродинамической, диффузионной устойчивости и устойчивости относительно капельной влаги (проект пособия нормативных материалов к строительным нормам и правилам) [1].

2. Предложена и защищена патентами новая технология реабилитации ствола трубы, применимая, например, на цементном заводе, которая основана на реализации монтажа стеклопластиковой трубы с толщиной стенки до 3 мм и массой до 3000 кг. Разработанный вариант отличается от известных тем, что монтаж реабилитационной трубы выполняется не «снизу вверх», а «сверху вниз» с использованием вертолетной техники. Предложен вариант защиты внутренней поверхности ствола дымовой трубы и наружного воздуха путем конденсации водяных паров [5, 14, 50, 52, 59, 61, 93].

3. Разработана физико-математическая модель стыковых сопряжений, в которой показано, что оптимальное давление в эластичных (гибких, деформируемых) оболочках может быть реализовано гидростатическими способами с использованием автоматического регулирования. Оптимальное давление – это давление флюида (жидкости, пасты и т. д.) в ограничивающих оболочках сопряжений, выполненных из деформируемых материалов (резина, пластмассы, металл и т. д.), необходимое для обеспечения равенства массопотоков через единицу поверхности как обычных многослойных ограждений в единицу времени, так и стыковых сопряжений между ними [1, 56, 58, 96].

4. Исследована и предложена новая технология изготовления конструкций стыков крупноразмерных элементов ограждающих конструкций зданий, в которых маловероятны температурные напряжения, деструктивные процессы, способствующие образованию трещин, а также исключают диффузионные и фильтрационные потоки капельной, паровой, газовой фаз. Разработана мето-

дика определения водопроницаемости стыковых сопряжений в лабораторных и натуральных условиях [64–66].

5. Рекомендуются к применению методика расчета температур, относительной влажности, влагосодержания, энтальпии воздуха в приквартирных пространствах в зависимости от массы потока воздуха, его термодинамических характеристик, расчет которых может быть выполнен также графическим методом. Рассмотрен альтернативный вариант термоаккумулирующих систем, когда в светопрозрачных конструкциях используется капельная жидкость с уменьшением на 10 % расхода теплоты [16, 60, 62].

6. Исследования, выполненные автором (например, тепловая реабилитация ограждающих конструкций отапливаемых зданий с использованием ограниченных контуров, термоаэродинамическая и диффузионная устойчивость отапливаемых помещений зданий и сооружений), включены в государственные программы, нормативные документы, относящиеся к строительной отрасли. В учебном процессе в Беларуси (БНТУ) и России (ФГБОУ «МГСУ») результаты исследований используются в курсовом и дипломном проектировании, диссертационных и магистерских работах строительного направления [53, 54, 57].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Акельев, В.Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В.Д. Акельев; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. – 317 с.

Статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК Беларуси

2. Ковалев, Я.Н. К вопросу определения зимней расчетной температуры асфальтобетонных покрытий / Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. – 1966 – № 5. – С. 145–147.

3. Солдаткин, М.Т. Расчет фильтрации воздуха через керамзитобетонные материалы / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Вес. Акад. наук БССР. Сер. физ.-энергетич. наук. – 1968. – № 3. – С. 86–92.

4. Солдаткин, М.Т. К вопросу измерения перепада давлений при испытании материалов на воздухопроницаемость в неизотермических условиях / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, В.П. Пилюшенко // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. – 1969. – № 8. – С. 128–131.

5. Солдаткин, М.Т. Влияние коррозионного воздействия на некоторые массообменные характеристики строительных материалов / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Т.Б. Артихович // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. – 1974. – № 1. – С. 66–70.
6. Солдаткин, М.Т. Некоторые термодинамические особенности определения пористости строительных материалов СВЧ / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Л.Е. Стаховская // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. – 1976. – № 4. – С. 146–155.
7. Солдаткин, М.Т. Технические особенности зданий школ Белорусской ССР / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Pohoda prostředí ve školských stavbách: mezin. seminář, Praha, 1978: sborník / Kom. Životního Prostředí ČSVTS; [předml.] F. Hanyk. – Praha, 1978. – С. 85–93.
8. Акельев, В.Д. Автоматизированная система теплоснабжения с высокотемпературным теплоносителем / В.Д. Акельев, А.Д. Зарецкая, О.А. Мухин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1991. – № 6. – С. 8–10.
9. Автоматизированный отопительный теплогенератор малой мощности с высокотемпературным теплоносителем / О.А. Мухин, А.Д. Зарецкая, В.Д. Акельев, Н.И. Шимко // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1992. – № 5. – С. 20–23.
10. Акельев, В.Д. Расчет систем напольного отопления / В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, Е.И. Довнар // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2002. – № 1. – С. 85–93.
11. Анализ аэродинамических режимов помещений зданий / В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, А.И. Арестович, С.Г. Быковский // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2003. – № 6. – С. 61–70.
12. Напольное отопление из стеклопроводов / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, А.Б. Золотарев // Материалы. Технологии. Инструмент – Т. 9 (2004) – № 4. – С. 24–29.
13. Термодинамические особенности течения пара в теплопроводах / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, И.М. Золотарева // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2008. – № 3. – С. 42–49.
14. Акельев, В.Д. К вопросу реконструкции дымовых труб / В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, В.В. Питиримов // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2009. – № 4. – С. 69–77.
15. К вопросу диагностики сопротивлений теплопроводности наружных ограждающих конструкций зданий / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, И.М. Золотарева // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2010. – № 4. – С. 36–43.
16. Хрусталеv, Б.М. К вопросу теплового режима приквартирных остекленных пространств / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов. // Строительная наука и техника. – 2011. – № 1. – С. 17–21.

17. Повышение качества использования первичного топлива в энергосистеме Республики Беларусь / Б.М. Хрусталеv, В.Н. Романюк, Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев, Н.А. Коломыцкая // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2012. – № 4. – С. 66–74.

18. К вопросу использования возобновляемых источников энергии в энергоэффективном строительстве / Б.М. Хрусталеv, В.М. Пилипенко, В.Д. Акельев, Нго Туар Киет // Энергетика... Изв. вузов и энергетич. об-ний СНГ. – 2012. – № 5. – С. 67–70.

19. Акельев, В.Д. Тепло- и массоперенос в остекленных приквартирных пространствах / В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, А.С. Пенкрат // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 54–58.

20. Акельев, В.Д. Технология реабилитации стволов дымовых труб с утилизацией химически активных компонентов дымовых газов / В.Д. Акельев, И.М. Золотарева, Е.А. Черванева // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 2 (16). – С. 104–113.

21. Тепло-и массоперенос в ограниченных пространствах строительных конструкций / Б.М. Хрусталеv, И.Б. Янчарский, В.Д. Акельев, Е.А. Черванева // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 2 (16). – С. 114–121.

Статьи в научно-технических и научно-практических журналах

22. Солдаткин, М.Т. Тепловлажностный режим наружных стен жилых домов из силикатного кирпича и силикатных блоков в климатических условиях БССР / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Проблемы строительной теплофизики: тр. межвуз. науч. конф. совместно с работниками пром-сти, науч.-исслед. и проект. ин-тов и Науч.-техн. о-вом стройиндустрии СССР, Минск, 1–4 февр. 1964 г. / Белорус. политехн. ин-т; под общ. ред. Э.Х. Одельского. – Минск, 1965. – С. 59–69.

23. Акельев, В.Д. Исследование зависимости воздухопроницаемости керамзитобетона от его влагосодержания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Д. Акельев; Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1968. – 20 с.

24. Солдаткин, М.Т. Установка для исследования влияния влагосодержания на воздухопроницание керамзитобетона / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Пром-сть Белоруссии. – 1968. – № 9. – С. 35–36.

25. Солдаткин, М.Т. О скорости охлаждения дорожных асфальтобетонных покрытий / М.Т. Солдаткин, Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев // Отопление, вентиляция и строительная теплофизика: респ. межведомств. сб. / Белорус. политехн. ин-т; редкол.: Э.Х. Одельский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 1971. – Вып. 1. – С. 52–57.

26. Солдаткин, М.Т. Исследование влажностного состояния керамзитобетонных панелей жилых зданий в Минске / М.Т. Солдаткин, Л.В. Астапова,

В.Д. Акельев // Отопление, вентиляция и строительная теплофизика: респ. межведомств. сб. / Белорус. политехн. ин-т; редкол.: Э.Х. Одельский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 1973. – Вып. 2. – С. 136–139.

27. Акельев, В.Д. Определение воздухопроницаемости плотных строительных материалов с помощью теплового источника / В.Д. Акельев // Отопление, вентиляция и строительная теплофизика: сб. ст. / Белорус. политехн. ин-т; редкол.: Э.Х. Одельский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 1974. – Вып. 3. – С. 112–115.

28. Ковалев, Я.Н. Исследование реологических свойств песчаного асфальтового бетона / Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев, Р.И. Смольский. – Минск: Вышэйшая школа – Автомобильный транспорт и дороги. – 1975. – № 2. – С. 193–199.

29. Ковалев, Я.Н. К вопросу о воздухопроницаемости дорожного асфальтобетона / Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев, Р.И. Смольский // Автомобильный транспорт и дороги: респ. межведомств. сб. / Белорус. политехн. ин-т; редкол.: В.К. Азаренко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 1975. – Вып. 2. – С. 193–199.

30. Солдаткин, М.Т. Исследование поровой структуры тяжелого бетона, прошедшего термообработку в установках с теплоизлучающими поверхностями / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Л.Е. Стаховская // Строительная теплофизика и микроклимат зданий: сб. науч. трудов Ин-та стр-ва и архитектуры / Ин-т стр-ва и архитектуры; редкол.: Н.Н. Ермоленко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 1977. – Вып. 17. – С. 80–85.

31. Акельев, В.Д. О микроструктуре дорожного асфальтового бетона / В.Д. Акельев, М.Т. Солдаткин, Я.Н. Ковалев – Минск: Вышэйшая школа – Автомобильный транспорт и дороги. – 1979. – № 6. – С. 135–139.

32. Информационный листок о научно-техническом достижении № 21–81. Серия 18А-11. Белорусский научно-исслед. инт-т научно- и технико-экономических исследований Госплана БССР. Устр-во для размораживания песка. Авторы: М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, И.И. Станецкая. Усл. печ. лист 0,23 ЭПП БелНИИТИ, Минск, пр. Машерова, 26.01.81.

33. Теплоперенос через пленочные покрытия парниково-тепличных сооружений в климатических условиях БССР / В.Д. Акельев, И.Я. Неусихин, И.М. Кваша, И.В. Перминов, Д.В. Елисеев. – Минск, 1989. – Деп. в ВИНТИ 28.06.89, № 10215. – С. 17–21.

Статьи в сборниках тезисов докладов и материалах конференций

34. Акельев, В.Д. Некоторые результаты исследования воздухопроницаемости стеновых керамзитобетонных панелей / В.Д. Акельев, М.Т. Солдаткин // Всесоюзная юбилейная IV межвузовская конференция по вопросам совершенствования крупноэлементного строительства, посвященная 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции (ноябрь–декабрь 1917 г.): тез. докл.

/ Днепрпетр. инженер.-строит. ин-т, Днепрпетр. обл. науч.-техн. о-во строит. индустрии. – Днепрпетровск, 1967. – С. 30.

35. Солдаткин, М.Т. Влияние влагосодержания на воздухопроницание керамзитобетона / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Тезисы докладов к республиканской научно-технической конференции, 26–28 ноября 1968 года / Брест. инженер.-строит. ин-т; редкол.: П.Н. Макарук (отв. ред.) [и др.]. – Брест, 1968. – С. 161–163.

36. Солдаткин, М.Т. О режиме движения воздуха в материалах строительных конструкций / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Вопросы архитектуры: тез. докл. V науч. конф. по вопр. архитектуры, посвящ. 100-летию со дня рождения В.И. Ленина, Харьков, 24–27 дек. 1969 г. / Харьк. инженер.-строит. ин-т; редкол.: А.Ю. Лейбфрейд (отв. ред.) [и др.]. – Харьков, 1969. – С. 45.

37. Солдаткин, М.Т. Результаты исследования измерения влажности строительных материалов путем поляризации электродов / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Т.Б. Пестрикова // Научно-техническая конференция «Радиофизические методы контроля в строительной индустрии»: тез. докл., Минск, 12–13 янв. 1970 г. / Белорус. правление науч.-техн. об-ва стройиндустрии; подгот. И.Н. Ахвердова. – Минск, 1969. – С. 195–202.

38. Акельев, В.Д. Теплофизические характеристики поризованного грунтобетона / В.Д. Акельев, Л.В. Астапова, Т.Б. Артихович // V конференция молодых ученых и специалистов республик Прибалтики и Белорусской ССР по проблемам стройматериалов: тез. докл., Минск, ноябрь 1972 г. / Мин. науч.-исслед. ин-т стройматериалов, М-ва пром-сти строит. материалов, Белорус. респ. правление Всесоюз. хим. о-ва. – Минск, 1972. – С. 106–109.

39. Солдаткин, М.Т. Влияние сероводорода на воздухопроницаемость цементно-песчаных растворов / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Т.Б. Артихович // Тезисы докладов научно-технической конференции «Антикоррозионная защита строительных конструкций, трубопроводов и оборудования на предприятиях химической промышленности», Могилев, 4–5 сентября 1974 г. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т коррозии металлов; редкол.: В.М. Москвин [и др.]. – Минск, 1974. – С. 18.

40. К вопросу определения пористости строительных материалов методом ослабления энергии СВЧ / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев / Тезисы докладов 22-й научно-технической конференции вузов Прибалтийских республик, Белорусской ССР и Молдавской ССР. – Ч. 2. – Рига. – 1986. – С. 116.

41. Акельев, В.Д. Опыт тепловой реабилитации ограждающих конструкций жилых зданий / В.Д. Акельев, А.И. Арестович, С.Г. Быковский // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 мая 2000 г. / Могилев. машиностроит. ин-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2000. – С. 288.

42. Расчет стальных конструкций вагонетки для обжига кирпича, работающих в условиях высоких температур / В.Д. Акельев, А.И. Арестович, С.В. Босаков, С.Г. Быковский // Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 марта 2002 г. / Белорус. гос. политехн. акад.; редкол.: А.А. Борисевич [и др.]. – Минск, 2002. – С. 30–34.

43. Акельев, В.Д. К вопросу конденсатообразования в зенитных фонарях промпредприятий / В.Д. Акельев, М.С. Иодо, М. Фролов // Материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 59.

44. Акельев, В.Д. Анализ закономерностей процессов сушки зерна и модель описания межзернового контактного теплообмена / В.Д. Акельев, Н.Д. Байлук, В.А. Занкевич // Материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 84–88.

45. Разработка принципов создания гидротеплопневморегулируемых стыковых сопряжений для герметизации стыковых элементов зданий / Б.М. Хрусталев, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева // Современные архитектурно-конструктивные решения для снижения стоимости и повышения качества строительства. Энерго- и ресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач Гос. программы ориентиров. фундам. исслед. «Стр-во и архитектура» (II Workshop C & A 2007), Минск, 19–21 сент. 2007 г.: в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; [под ред. Б.М. Хрусталева, С.Н. Леоновича]. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 37–49.

46. Теплоперенос в ограниченных контурах наружных ограждений отапливаемых зданий / Б.М. Хрусталев, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева // Современные архитектурно-конструктивные решения для снижения стоимости и повышения качества строительства. Энерго- и ресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач гос. программы ориентиров. фундам. исслед. «Стр-во и архитектура» (II Workshop C & A 2007), Минск, 19–21 сент. 2007 г.: в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; [под ред. Б.М. Хрусталева, С.Н. Леоновича]. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 10–22.

47. Development of principles of creation hydraulically and thermopneumatically controlled junction interfaces for hermetic sealing of wall elements of buildings / B.M. Krustalev, V.D. Sizov, V.D. Akelyeu, I.M. Zolotarova // Constructions a. Architecture. – 2008. – Vol. 3. – P. 17–19.

48. Heat transfer in restricted contours of outer protecting constructions of heated buildings / B.M. Krustalev, V.D. Sizov, V.D. Akelyeu, I.M. Zolotarova //

Constructions a. Architecture. – 2008. – Vol. 3. – P. 13–14.

49. Акельев, В.Д. Разработка рекомендаций по выполнению нормативных требований к параметрам микроклимата цеха № 3 Борисовского хрустального завода / В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, П.И. Дячек // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 65.

50. Акельев, В.Д. Тепло- и массоперенос в стволах дымовых труб / В.Д. Акельев, В.В. Крень // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 127.

51. Акельев, В.Д. Использование ячеистых ограниченных контуров в наружных ограждающих конструкциях / В.Д. Акельев, А.В. Адамович // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 128.

Патенты

52. Дымовая труба: пат. 4172 Респ. Беларусь, МПК Е 04Н 12/00 / Б.М. Хрусталева, С.Н. Леонович, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, Н.Д. Байлук; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № ГР 20070513; заявл. 11.07.07; опубл. 30.04.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 205.

53. Наружное ограждение здания: пат. 5292 Респ. Беларусь, МПК Е 04В 2/42 / Б.М. Хрусталева, В.Д. Сизов, И.М. Золотарева; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № и 20080483; заявл. 17.06.2008; опубл. 30.06.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – 5 с.

54. Наружное ограждение здания: пат. на изобретение № 13547 Респ. Беларусь, МПК Е 04В 2/42 / Б.М. Хрусталева, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20071580; заявл. 19.12.07; опубл. 25.05.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 4. – С. 118.

55. Способ сушки зерна в многозонной сушилке: пат. 13728 Респ. Беларусь, МПК F26В 3/00 / Б.М. Хрусталева, Н.Д. Байлук, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20070571; заявл. 16.05.2007; опубл. 29.07.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5. – С. 119.

56. Устройство для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций: Респ. Беларусь, МПК G 01N 33/38; Б.М. Хрусталева, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 20101098; заявл. 16.07.2010; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 27.

57. Многослойная стеновая панель: Респ. Беларусь, МПК Е 04В 1/76; Е 04С 2/26 / Б.М. Хрусталева, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, Л.В. Нестеров; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 20110977; заявл. 13.07.2011; (публикация в те-

чение 18 месяцев с даты подачи заявки).

58. Конструкция стыка панелей: пат. №15491 Респ. Беларусь, МПК E 04B 1/32 / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева / заявитель Бел.нац. техн. ун-т № а 20091836; заявл. 22.12.2009; опубл. 14.11.2011 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – 4 с.

59. Дымоная труба: Респ. Беларусь, МПК E 04H 12/00 / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.В. Крень; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 20111806; заявл. 23.12.2011; (публикация в течение 18 месяцев с даты подачи заявки).

60. Способ определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций: пат. 16191 Респ. Беларусь, МПК E 04B 1/76 / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарева; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № 20100721; заявл. 2.05.2010; опубл. 14.11.2011 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – 6 с.

61. Дымоная труба: пат. № 8376 Респ. Беларусь, МПК E 044 H 42/00 / Б.М. Хрусталеv, В.Д. Акельев, В.В. Крень / заявитель Бел. нац. техн. ун-т – № u 20111068, заявл. 28.12.2011, опубл. 03.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – 3 с.

62. Способ определения потерь теплоты через ограждающие конструкции отапливаемого помещения с приквартирными пространствами: МПК G 01K 17/20 / заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 20120919 заявл. 14.06.2012 / В.Д. Акельев, А.С. Пенкрат / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – 6 с. (публикация в течение 18 месяцев с даты подачи заявки).

Авторские свидетельства

63. Устройство для испытаний строительных материалов на воздухопроницаемость: а. с. 393682 СССР, G 01n 33/38 / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Л.В. Астапова; Белорус. политехн. ин-т. – № 1797027/29-33; заявл. 16.06.72; опубл. 10.08.73 // Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товар. знаки. – 1973. – № 33. – С. 180.

64. Устройство для измерения внутрикапиллярного давления в пористых телах: а. с. 516921 СССР, М. Кл. 2 G 01 L 7/08 / С.П. Баранов, М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Т.А. Уфимцева; Мин. фил. произв. об-ния «Техэнергохимпром». – № 1904240/26; заявл. 02.04.73(21); опубл. 05.06.76 // Центр. науч.-исслед. ин-т патент. информ. Гос. ком. Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий. – 1976. – 3 с.

65. Установка для испытания строительных материалов на водопроницаемость: а. с. 763712 СССР, G 01 M 3/00 / Р.И. Смольский, В.Д. Акельев, В.С. Батраченко; Белорус. политехн. ин-т. – № 258162/25-33; заявл. 06.03.78; опубл. 15.09.80 // Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товар. знаки. – 1980. –

№ 34. – С. 200.

66. Устройство для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций: а. с. 845098 СССР, G 01 N 33/38 / В.Д. Акельев, Г.Е. Гурова; Белорус. политехн. ин-т. – № 2790279/23-33; заявл. 07.06.79; опубл. 17.07.81 // Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товар. знаки. – 1981. – № 25. – С. 210.

67. Устройство для измерения парциального давления водяного пара: а. с. 922554 СССР, М. Кл. 3 G 01 L 11/00 / М.Т. Солдаткин, Л.Е. Стаховская, В.Д. Акельев; Белорус. политехн. ин-т. – № 922554(2852843/18-10); заявл. 17.12.79(21); опубл. 23.04.82 // Всесоюз. науч.-исслед. ин-т патент. информ. Гос. ком. СССР по делам изобретений и открытий. – 1982. – 3 с.

Учебники

68. Техническая термодинамика: учеб. для студентов строит. и энергет. специальностей: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк, В.Д. Акельев. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч. 1. – 486 с.

69. Техническая термодинамика: учеб. для студентов строит. и энергет. специальностей: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк, В.Д. Акельев. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч. 2. – 558 с.

70. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий: учеб. для студентов энергет. и строит. специальностей учреждений, обеспечивающих получение высш. образования: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, В.А. Седнин, В.Д. Акельев, В.Н. Романюк, А.В. Нерезько, В.М. Копко, А.П. Несенчук; под ред. А.П. Несенчука. – Минск: Технопринт, 2005. – Ч. 1. – 544 с.

71. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий: учеб. для студентов энергет. и строит. специальностей учреждений, обеспечивающих получение высш. образования: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, В.А. Седнин, В.Д. Акельев, В.Н. Романюк, А.В. Нерезько, В.М. Копко, А.П. Несенчук. – Минск: Технопринт, 2005. – Ч. 2. – 410 с.

Учебные пособия

72. Akeliev, V.D. Conductividad termica: curso post-grado / V.D. Akeliev. – Camagüey: Univ. de Camagüey, 1982. – 218 p.

73. Akeliev, V.D. Transferencia de energía por convección Y radiación: curso post-grado / V.D. Akeliev. – Camagüey: Univ. de Camagüey, 1983. – 140 p.

74. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.И. Тимошпольский, В.Д. Акельев, В.А. Седнин, В.М. Копко, А.В. Нерезько. – Минск: Бело-

рус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.

75. Тепло- и массообмен: учеб. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по строит., энергет. и машиностроит. специальностям: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.И. Тимошпольский, В.Д. Акельев, В.А. Седнин, В.М. Копко, А.В. Нерезько. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2007. – Ч. 2. – 273 с.

Пособие к строительным нормам Республики Беларусь

76. Проектирование и устройство систем отопления из полимерных труб: П1-03 к СНБ 4.02.01-03: утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 30.12.03: введ. 01.01.05 / Л.Я. Дроздович, Н.Р. Прокопчук, И.И. Реутский, В.Д. Акельев, А.Г. Рутковский. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2005. – 55 с. – (Пособие к строительным нормам Республики Беларусь).

Отчеты о НИР

77. Исследование процесса тепловой обработки керамзитобетонных изделий $\rho=900-1200 \text{ кг/м}^3$ в электроиндукционной установке с теплоизлучающими поверхностями: отчет о НИР / Белорус. политехн. ин-т; рук. темы М.Т. Солдаткин; исполн.: В.Д. Акельев, А.А. Арутюнян, С.П. Баранов, А.П. Лебедев, Л.В. Нестеров, Ж.Н. Петрович, И.Ф. Фиалко, А.Д. Шалак, Л.Б. Эйдельштейн // Строительная физика. – Минск, 1970. – 449 с. – № ГР 68057107.

78. Исследование влияния агрессивной среды на массоперенос в материалах стеновых ограждений 2-го прядильного цеха Могилевского завода искусственного волокна: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политехн. ин-т; рук. темы М.Т. Солдаткин; исполн.: В.Д. Акельев, Л.И. Козлов. – Минск, 1971. – 105 с. – № ГР 700372229.

79. Исследование теплофизических характеристик наружных фактурных слоев керамзитобетонных панелей, внедряемых заводами крупнопанельного домостроения ДСК № 2 ПМС БССР: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политехн. ин-т; рук. темы М.Т. Солдаткин; исполн.: В.Д. Акельев, Л.В. Астапова, С.Ф. Гудожников, Н.К. Ляшкевич, Ж.Н. Петрович. – Минск, 1971. – 78 с. – № ГР 71047372.

80. Исследование теплофизических характеристик наружных фактурных слоев: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политехн. ин-т; рук. темы М.Т. Солдаткин; исполн.: В.Д. Акельев. – Минск, 1973. – 69 с. – № ГР 720039739.

81. Теплообмен в зданиях из светопрозрачных конструкций с жидкими средами: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. политехн. акад.; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Д. Сизов, Д.Д. Якимович. – Минск, 1997. – 76 с. – № ГР 199771249.

82. Исследование и разработка перспективных направлений по повыше-

нию уровня теплозащиты зданий с составлением алгоритма расчета для сопоставления различных вариантов технико-экономического анализа эффективности предлагаемых и существующих конструкций: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. политехн. акад.; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Д. Сизов, Д.Д. Якимович, М.З. Шульман. – Минск, 1998. – 79 с. – № ГР 19983699.

83. Исследование воздушно-теплового режима в помещениях жилого здания и разработка рекомендации по эффективности организации воздухообмена при различных объемно-планировочных решениях: отчет о НИР / Белорус. гос. политехн. акад.; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Д. Сизов, М.З. Шульман, Э.В. Захаревич. – Минск, 2000. – 34 с. – № ГР 20001114.

84. Провести исследование воздушно-теплового режима в помещениях жилых зданий и разработать рекомендации по эффективной организации воздухообмена при различных объемно-планировочных решениях, г. Минск, пр. Машерова: договор 18-ФН00, ХД № 198 от 22 февр. 2000 г.; отчет о НИР / Белорус. гос. политехн. акад.; рук. темы В.Д. Сизов; исполн. В.Д. Сизов, Э.В. Захаревич, Л.С. Калинина, В.Д. Акельев, М.З. Шульман, В.П. Отчик, А.М. Булавко. – Минск, 2000. – 26 с.

85. Исследование влияния геометрических параметров радиационно-конвективных воздушных контуров на термическое сопротивление ограждений отапливаемых зданий и разработка технологий их применения при тепловой реабилитации зданий: отчет о НИР / Белорус. гос. политехн. акад.; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Д. Сизов, И.М. Золотарева. – Минск, 2001. – 32 с. – № ГР 2001663.

86. Исследование возможности использования нагревательных элементов из стеклянных труб в системах напольного отопления: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы Б.М. Хрусталева; исполн.: В.Д. Акельев, И.М. Золотарева, А.С. Довнар. – Минск, 2003. – 62 с. – № ГР 2003678.

87. Исследование тепловых карт распределения температур на поверхности асфальтобетонных смесей методом динамического инфракрасного термокартирования в процессе их изготовления, транспортирования и укладки: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы В.Д. Сизов; исполн.: В.Д. Акельев, Д.Д. Якимович, М.З. Шульман, И.М. Золотарева. – Минск, 2003. – 60 с. – № ГР 20031534.

88. Исследование конструктивных решений отдельных узлов ограждающих конструкций и разработка рекомендаций по повышению термического сопротивления вертикальных и горизонтальных стыков между изделиями по фасадам жилых зданий из объемных конструкций: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: Д.Д. Якимович, В.Д. Сизов, И.М. Золотарева. – Минск, 2004. – 33 с. – № ГР 20043065.

89. Приборный контроль соответствия термических сопротивлений ог-

раждающих конструкций нормативным. «Спортивно-оздоровительный центр», г. Минск, пр. Машерова: ХД № 2050 от 30 марта 2004 г.: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Д. Сизов, И.М. Золотарева. – Минск, 2004. – 33 с.

90. Расчет температурного поля инертных материалов и асфальтобетона при различных граничных условиях: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы В.Д. Сизов; исполн.: В.Д. Акельев, И.М. Золотарева. – Минск, 2004. – 161 с. – № ГР 20041187.

91. Исследование тепло- и массопереноса в остекленных лоджиях жилых зданий РБ и разработка рекомендаций по их проектированию с целью определения теплотерь: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т, науч.-исслед. и испытат. лаб. теплофизики; рук. темы В.Д. Акельев. – Минск, 2005. – 44 с. – № ГР 2005608.

92. Разработка методики определения термических сопротивлений наружных стен зданий с использованием тепловизионной съемки: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т, науч.-исслед. и испытат. лаб. теплофизики; рук. темы В.Д. Акельев; исполн.: В.Н. Заяц, А.И. Орлович, Н.Д. Байлук. – Минск, 2005. – 101 с. – № ГР 20021372.

93. Теоретические и экспериментальные исследования температурных полей дымовых труб ТЭЦ, котельных, других топливоиспользующих установок с целью определения границы достижения «точки росы» (начала конденсации паров) удаляемых дымовых газов: отчет о НИР / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы Б.М. Хрусталева, исполн.: В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, В.Н. Заяц, И.М. Золотарева. – Минск, 2006. – 83 с. – № ГР 20051296.

94. Разработка теоретических основ теплопереноса через ограждающие конструкции с замкнутыми, вентилируемыми, экранированными газовоздушными контурами жилых и общественных зданий: отчет о НИР (заключ.) ГБ–06–57/ Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы Б.М. Хрусталева; исполн.: В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, В.Н. Заяц, Н.Д. Байлук, И.М. Золотарева. – Минск, 2010 – 124 с. – № ГР 2006469.

95. Разработка термогидроаэродинамических основ создания стыковых сопряжений при строительстве и реконструкции жилых и общественных зданий: отчет о НИР (заключ.) ГБ–06–59/ Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы Б.М. Хрусталева; исполн.: В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, В.Н. Короткий, В.Н. Заяц, Н.Д. Байлук, И.М. Золотарева. – Минск, 2010 – 130 с. – № ГР 2006518.

РЭЗІЮМЭ

Акельеў Валерый Дзмітрыевіч

Цепла- і масаабмен у абмежаваных прасторах будаўнічых канструкцый

Ключавыя словы: цепламасаабмен, абмежаваныя прасторы, цеплааддача, цепламасаабменныя і аэрадынамічныя характарыстыкі, канвекцыя, цеплаправоднасць, структура матэрыяла, пранікальнасць.

Мэта работы: развіццё тэарэтычных асноў і практычных мерапрыемстваў у абмежаваных прасторах канструкцый.

Метады даследавання і апаратура: ужываліся фізічныя законы, сістэмны падыход, мадэліраванне, эксперыментальныя даследаванні, інжынерныя разлікі, аналіз, прыборы і абсталяванне для вывучэння цепла- і масапераносу ў агароджваючых канструкцыях з абмежаванымі прасторамі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны структурна-лагічная схема па тэме даследавання; тэхналогія тэрмарэабілітацыі вонкавых агароджваючых канструкцый ацяпляльных будынкаў, ствалоў дымавых труб; разліковыя характарыстыкі параметраў паветра ў прыкватэрных прасторах ацяпляльных памяшканняў; метадыкі вызначэння тэрмічных супраціўлення ў вонкавых агароджаў будынкаў пры розных метадах вымярэнняў тэмператур вонкавых паверхняў. Распрацаваны прыстасаванні для выпрабавання ў стыкавых спалучэннях, будаўнічых матэрыялаў на паветра- і водапранікальнасць, вымярэння ўнутрыкапілярнага ціску, сітаватасці; тэхналогія выканання буйнапанэльных вырабаў у заводскіх умовах з абмежаванымі паветранымі абрысамі. Атрыманы разліковыя ўраўненні і намаграмы, якія злучаюць паветрапранікненне, вільгацеўтрыманне, шчыльнасць матэрыялаў.

Ступень выкарыстання: вынікі выкананых даследаванняў паслужылі асновай практычных распрацовак, праектавання і ўкаранення будаўнічых аб'ектаў у Рэспубліцы Беларусь і шэрагу замежных краін. Да іх адносяцца: укараненне распрацовак у навучальны працэс і навуковыя даследаванні ў Маскоўскім дзяржаўным будаўнічым універсітэце РФ; укараненне распрацовак пры рэканструкцыі і праектаванні аб'ектаў у раённых цэнтрах Рэспублікі Беларусь, у г. Санкт-Пецярбургу і Ленінградскай вобласці РФ; выкарыстанне і ўкараненне патэнта Рэспублікі Беларусь на вынаходніцтва № 15431 ад 28.02.2012 «Канструкцыя стыку панэляў» пры распрацоўцы праектаў будаўнічых аб'ектаў, г. Санкт-Пецярбург РФ і інш. Эканамічны эффект ад укаранення распрацовак па кожнаму будаўнічаму аб'екту склаў у сярэднім 10–15 % ад першапачатковага кошту.

Галіна выкарыстання: арганізацыя комплекснай рэканструкцыі жылых масіваў з павышэннем іх энергаэфектыўнасці, даўгавечнасці.

РЕЗЮМЕ

Акельев Валерий Дмитриевич **Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах** **строительных конструкций**

Ключевые слова: тепломассообмен, ограниченные пространства, теплоотдача, тепломассообменные и аэродинамические характеристики, конвекция, теплопроводность, структура материала, проницаемость.

Цель работы: развитие теоретических основ и практических мероприятий в ограниченных пространствах конструкций.

Методы исследования и аппаратура: применялись физические законы, системный подход, моделирование, экспериментальные исследования, инженерные расчеты, анализ, приборы и оборудование для изучения тепло- и массопереноса в ограждающих конструкциях с ограниченными пространствами.

Полученные результаты и их новизна: разработаны структурно-логическая схема исследования; технология терморехабилитации наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий, стволов дымовых труб; расчетные характеристики параметров воздуха в приквартирных пространствах отапливаемых помещений; методики определения термических сопротивлений наружных ограждений зданий при различных методах измерений температур наружных поверхностей. Разработаны устройства для испытаний стыковых сопряжений, строительных материалов на воздухо- и водопроницаемость, измерения внутрикапиллярного давления, пористости; технология изготовления крупнопанельных изделий в заводских условиях с ограниченными воздушными контурами. Получены расчетные уравнения и номограммы, связывающие воздухопроницаемость, влагосодержание, плотность материалов.

Степень использования: результаты выполненных исследований послужили основой практических разработок, проектирования и внедрения строительных объектов в Республике Беларусь и ряде зарубежных стран: внедрение в учебный процесс и научные исследования в Московском государственном строительном университете РФ; при реконструкции и проектировании объектов в районных центрах Беларуси, г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области РФ; использование и внедрение патента Республики Беларусь на изобретение № 15431 от 28.02.2012 «Конструкция стыка панелей» при разработке проектов строительных объектов, г. Санкт-Петербург РФ и др. Экономический эффект от внедрения разработок по каждому строительному объекту составил в среднем 10–15 % от первоначальной стоимости.

Область использования: организация комплексной реконструкции строительных объектов с повышением их энергоэффективности, долговечности.

SUMMARY

Valery Akelyev

Heat and Mass Transfer in Limited Spaces of Building Structures

Keywords: heat and mass transfer, limited spaces, heat exchange, heat emission, heat and mass transfer and aerodynamic characteristics, convection, heat conduction, material structure, permeability.

Purpose of the work: Development of theoretical bases and practical actions in limited spaces of structures.

Methods of research and equipment: fundamental physical laws, system approach, modeling, pilot studies, engineering calculations, analysis, devices and equipment for the study of heat and mass transport in protecting structures with limited space.

Results and novelty: it is developed structural and logic scheme on a research subject; thermal rehabilitation technology in outdoor enclosures heated buildings, chimneys; settlement design characteristics of the thermodynamic parameters of the air in apartment spaces in heated premises; methods of determination of thermal resistance of external protections of buildings at different temperature measurement methods external surfaces. Devices are developed for tests of butt joints, construction, capillary and porous materials for air and water penetration, measurements of intra capillary pressure, porosity, manufacturing techniques of large-panel products industrially with limited air contours. The settlement equations connecting filtrational air streams, moisture content and density of materials are received; monograms are constructed of the leveled points.

Extent of Application: results of the executed researches formed a basis of practical development, design and introduction of construction objects in Republic of Belarus and a number of foreign countries. They include: introduction of development in educational process and scientific researches at "The Moscow State Construction University", the Russian Federation; at object reconstruction and developing projects of construction objects in Republic of Belarus, St. Petersburg and Leningrad region, the Russian Federation; use and introduction of the patent Republic of Belarus for the invention No 15431 of 28.02.2012 "A design of a joint of panels" when developing projects of construction objects, St. Petersburg, the Russian Federation, etc. Economic effect of introduction of development on each construction object averaged 10–15% from the initial cost.

Application area: organization of complex reconstruction of inhabited massifs by increase of their energy efficiency, durability.

Научное издание

**Акельев
Валерий Дмитриевич**

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ОГРАНИЧЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Подписано в печать 14.02.2013. Услов. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09.
Тираж 60 экз. Заказ 145.