

На правах рукописи

Низовцев Михаил Иванович

**ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЯХ И КЛИМАТИЧЕСКОМ
ОБОРУДОВАНИИ ЗДАНИЙ**

01.04.14 – теплофизика и
теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН

Научный консультант	доктор технических наук, профессор Терехов Виктор Иванович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Бурдуков Анатолий Петрович доктор технических наук, доцент Попов Игорь Александрович доктор технических наук, профессор Сеначин Павел Кондратьевич
Ведущая организация:	Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Защита состоится 17.06.2011 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.173.02 в Новосибирском государственном
техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, просп.
Карла Маркса, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Чичиндаев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С развитием современного общества потребность в энергетических ресурсах все увеличивается, запасы невозобновляемых источников энергии быстро иссякают, при этом сложность их добычи и соответственно стоимость все возрастают. Экономное расходование энергоресурсов для большинства стран становится одной из самых актуальных задач.

В России на энергопотребление зданий затрачивается более 40 % всей вырабатываемой тепловой энергии. Вопросы ресурсо- и энергосбережения в России рассматриваются в качестве одного из основных направлений технической модернизации. В современных зданиях помимо проблемы экономии энергетических ресурсов важными являются и вопросы комфортности. Поэтому, начиная с середины 90 годов прошлого столетия, термином "энергоэффективные" выделяют здания, которые наряду с минимальным расходом энергии обеспечивают высокое качество внутреннего микроклимата. Понятие энергоэффективного здания следует рассматривать как комплексный показатель, который обеспечивается энергоэффективностью ограждающих конструкций и энергоэффективностью инженерного оборудования, включая системы отопления и вентиляции.

Наиболее сложно в современных зданиях обеспечить энергоэффективность светопрозрачных конструкций. Теплозащитные характеристики оконных конструкций в несколько раз ниже, чем стен, что приводит к повышенным тепловым потерям через окна в зимний период времени и дополнительным затратам на кондиционирование в летний. В холодный период года из-за низкой температуры внутреннего остекления существенно понижается комфортность жилых и производственных помещений. Кроме того, светопрозрачные конструкции являются малоинерционными в тепловом отношении, то есть у них достаточно быстро изменяются тепловые параметры внутренних поверхностей при изменении наружных погодных условий. Поэтому актуальной является задача разработки и проведения комплексных исследований новых оконных заполнений с регулируемыми теплозащитными характеристиками. Теоретические и экспериментальные исследования светопрозрачных конструкций с регулируемыми теплозащитными характеристиками носят в настоящее время ограниченный фрагментарный характер, что связано, как со сложностями в проведении теплофизических экспериментов, так и отсутствием разработанных теоретических моделей, адекватно описывающих комплексный характер теплообмена в таких конструкциях.

Стены современных зданий, как правило, многослойные и теплоинерционные, их тепловая защита во многом определяется состоянием достаточно тонких теплоизоляционных слоев. Для улучшения тепловой

защиты зданий необходимо разработать научные основы методик инструментального определения теплозащитных характеристик современных многослойных стеновых конструкций, так как существующие методики требуют длительного времени проведения таких измерений и не обеспечивают необходимой точности.

На теплозащитные свойства стеновых конструкций значительное влияние оказывают процессы совместного тепло- и влагопереноса. Для описания этих процессов, имеющих сложную физическую природу, необходимо развивать современные бесконтактные экспериментальные методы и нестационарные методики расчетов, которые, как правило, используют ряд параметров, полученных из экспериментов.

Актуальны в настоящее время вопросы, связанные с оптимизацией учета и распределения тепла в многоквартирном жилом доме. Предложены системы учета с использованием регистраторов расхода тепла отопительных приборов. Для их внедрения, кроме решения организационных вопросов, необходимо проведение комплексных исследований влияния теплофизических параметров на работу регистраторов расхода тепла отопительных приборов.

Проводимые энергетические обследования показывают, что до половины энергетических затрат в современных зданиях расходуется на нагрев зимой и охлаждение летом воздуха, необходимого для вентиляции жилых и производственных помещений. Обычные теплообменные аппараты не обеспечивают достаточной эффективности теплообменных процессов для регенерации тепла вентиляционного воздуха. Актуальной является задача разработки научных основ новых методов интенсификации теплообмена и создания на их базе высокоэффективного теплообменного оборудования.

Целью работы является разработка, экспериментально-теоретические исследования теплотехнических параметров новых энергоэффективных элементов ограждающих конструкций и климатического оборудования зданий, создание научных основ методик расчета и определения их теплофизических характеристик.

В соответствии с намеченной целью были поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Выполнить критический обзор и анализ известных результатов исследований наиболее эффективных оконных конструкций с регулируемыми теплозащитными характеристиками.
2. Провести экспериментальные исследования, проанализировать и обобщить данные по влиянию режимных и конструктивных параметров на тепловые характеристики оконных заполнений с тепловыделениями в воздушных прослойках, с вентиляцией прослоек воздухом из помещения, с экранами или жалюзи с теплоотражающими покрытиями.

3. На основе численного решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса создать методику расчета совместного лучисто-конвективного теплообмена для вентилируемых окон и провести ее верификацию на результатах экспериментальных исследований.

4. Провести цикл расчетно-экспериментальных исследований, направленных на разработку научных основ более точных и оперативных методов инструментального определения эффективности тепловой защиты теплоинерционных ограждающих конструкций зданий по сравнению с существующими методами.

5. Разработать новые экспресс-методики экспериментального исследования тепло- и влагопереноса в пористых материалах в широком диапазоне изменения граничных условий при различных режимах увлажнения.

6. Методами математического моделирования исследовать совместный тепло- и влагоперенос в пористых материалах и провести верификацию полученных результатов на экспериментальных данных при капиллярной пропитке и сорбционном увлажнении.

7. Выполнить экспериментальные исследования влияния различных теплофизических параметров на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла отопительных приборов. Провести обобщение результатов исследований и разработать методики учета влияния изменения теплофизических параметров на точность измерения расхода тепла.

8. Разработать научные основы метода интенсификации теплообмена в регенеративных теплообменниках с вращающимися дисками и создать опытные образцы новых дисковых теплообменников. Выполнить серию экспериментальных исследований одноступенчатых и двухступенчатых дисковых вентиляторов-регенераторов тепла вентиляционного воздуха для определения тепловых и динамических характеристик аппаратов.

Научная новизна:

- Получены новые экспериментальные результаты по влиянию тепловыделений в межстекольном пространстве на тепловые характеристики тройного остекления. Проанализирована динамика выхода на стационарный режим и зависимость температуры остекления от мощности тепловыделений.
- Впервые получены зависимости распределения локальных тепловых характеристик окон, с тройным остеклением принудительно вентилируемых воздухом из помещения от толщины вентилируемой прослойки, скорости и расхода вентилирующего воздуха. Экспериментально определены тепловые характеристики окон при естественной вентиляции внутренней межстекольной прослойки.
- Предложена и реализована новая методика расчета лучисто-конвективного теплообмена для вентилируемого окна с тройным остеклением, основанная на решении уравнений Навье-Стокса в двумерной постановке с учетом лучистого теплообмена.

- На экспериментальных стендах и в натуральных условиях исследованы новые конструкции оконных экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями. Показана их высокая эффективность в управлении теплозащитными характеристиками окон.
- Экспериментальные исследования теплопроводности автоклавного газобетона с различной влажностью позволили установить зависимости коэффициентов теплопроводности для газобетона максимальной сорбционной влажности и предельного влагонасыщения при положительных и отрицательных температурах.
- Разработана новая методика экспериментального определения массообменных характеристик материалов с использованием "гамма-просвечивания". С применением данной методики получена зависимость коэффициента диффузии влаги в автоклавном газобетоне от влажности при различных режимах увлажнения.
- На основании изучения влияния теплофизических параметров на работу регистраторов расхода тепла отопительных приборов показано, что радиаторные коэффициенты зависят, как от средней температуры поверхности радиатора, так и от температуры окружающего воздуха. Предложена методика учета влияния температуры окружающего воздуха на радиаторный коэффициент.
- Разработаны научные основы метода интенсификации теплообмена в регенеративных теплообменниках с вращающимися дисками. Созданы и испытаны конструкции нового класса воздушных теплообменников для регенерации тепла вентиляционного воздуха. Впервые экспериментально определены их динамические параметры и тепловая эффективность.

Теоретическая значимость работы заключается:

- в постановке, создании компьютерного кода и численном решении задачи движения и теплообмена воздуха в двух смежных вертикальных прослойках при поперечном градиенте температуры и принудительной вентиляции одной из прослоек;
- в установлении общих закономерностей изменения тепловых параметров в теплоинерционных ограждающих конструкциях зданий при нестационарных тепловых граничных условиях;
- в верификации на экспериментальных данных расчетной модели нестационарного тепло- и влагопереноса в пористых материалах.

Практическая ценность работы заключается:

- в новых экспериментальных данных по влиянию эффективности тепловыделений в межстекольных прослойках на тепловые характеристики окон с тройным остеклением, которые могут быть использованы при их проектировании;

- в возможности использования полученных экспериментальных результатов и разработанной методики расчета тепловых характеристик при проектировании и внедрении в строительную практику вентилируемых окон;
- в получении результатов лабораторных и натурных испытаний межрамных экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями, которые показали их высокую эффективность в снижении тепловых потерь через окна, и по результатам которых они рекомендованы к широкому практическому применению;
- в обнаружении в результате расчетов изменения тепловых параметров в теплоинерционных стеновых конструкциях при нестационарных граничных условиях зон с наиболее быстрой стабилизацией тепловых параметров, проведение измерений в этих зонах может стать основой создания новых более точных и оперативных методик инструментального определения теплозащитных характеристик стен современных зданий;
- в проведении экспериментального исследования зависимости теплопроводности автоклавного газобетона от влажности, которое показало, что особенно значительное повышение теплопроводности происходит для газобетона сверхсорбционного увлажнения при отрицательных температурах, поэтому следует предусматривать меры защиты ограждающих конструкций из газобетона от увлажнения, особенно сверхсорбционного;
- в разработке неразрушающей методики определения характеристик влагопереноса пористых материалов методом “гамма-просвечивания” которая может быть применена для широкого круга материалов;
- в получении экспериментальных значений коэффициентов диффузии влаги автоклавных газобетонов различной плотности в широком диапазоне влажностей материалов, они могут быть использованы для проведения расчетов тепло- и массопереноса конструкций из газобетона;
- в предложении методики учета влияния температуры окружающего воздуха на радиаторный коэффициент регистратора расхода тепла, а также в определении оптимального положения его установки на отопительный прибор;
- в получении динамических и тепловых характеристик нового класса воздушно-воздушных теплообменников на основе системы вращающихся дисков для регенерации тепла вентиляционного воздуха.

Достоверность основных положений и выводов подтверждается достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена:

- определением погрешностей измерений при выполнении экспериментальных исследований и дублированием одних и тех же измерений разными методами;
- использованием при экспериментальных исследованиях современных методов измерения и компьютерной техники;

- тестированием программных модулей и сопоставлением результатов расчетов с данными других авторов;
- сравнением результатов, полученных численными и экспериментальными методами.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные результаты, их анализ и обобщение по эффективности повышения тепловых характеристик тройного остекления за счет тепловыделений в межстекольном пространстве.
2. Результаты экспериментального исследования и анализ зависимостей тепловых характеристик окон с тройным остеклением при вентиляции внутренней межстекольной прослойки воздухом из помещения от толщины прослойки, скорости, расхода вентилирующего воздуха и направления его подачи.
3. Новая математическая модель и результаты численных расчетов, полученных с ее использованием, сложного лучисто-конвективного теплообмена вентилируемых окон с тройным остеклением.
4. Результаты экспериментальных исследований, их обобщение, а также, результаты натурных испытаний теплозащитных характеристик оконных заполнений с экранами и жалюзи с односторонними и двухсторонними теплоотражающими покрытиями.
5. Разработанные и реализованные на практике экспресс-методики определения теплофизических свойств и массообменных характеристик материалов методом “тонкой проволоки” и “гамма-просвечивания”, полученные с их использованием экспериментальные результаты, их обобщение и анализ.
6. Результаты численных расчетов совместного тепло- и влагопереноса в автоклавном газобетоне с применением нестационарной методики расчета при капиллярной пропитке и сорбционном увлажнении.
7. Результаты экспериментальных исследований влияния различных физических факторов на работу регистраторов расхода тепла отопительных приборов, обобщение результатов исследований и методика учета влияния изменения теплофизических параметров на точность измерения расхода тепла.
8. Результаты расчетно-экспериментального исследования теплотехнических характеристик нового класса воздушно-воздушных теплообменников на основе системы вращающихся дисков для регенерации тепла вентиляционного воздуха.

Работа выполнялась при поддержке следующих программ и грантов: Федеральной целевой программы “Интеграция” (Проект № к-1-99 “Мониторинг тепловых потерь и теплопроводности ограждающих конструкций жилых и производственных зданий”, 1999 г.), программы Министерства общего и профессионального образования “Научное, научно-

методическое, материально-техническое и информационное обеспечение системы образования” (проект № 2394 “Экспериментальное и численное исследование теплопереноса в светопрозрачных ограждающих конструкциях” 2000–2001 гг.), программы Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники (код проекта № 03.01.034 “Долгосрочное прогнозирование изменения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений”, 2001–2002 г.), программы Энергосбережения СО РАН (“Фундаментальные исследования и мониторинг теплопотерь в ограждающих конструкциях зданий”, 2002–2003 гг.; “Распределители расхода тепла отопительных приборов”, 2004 г.; “Экспериментальное определение тепловой эффективности дискового вентилятора”, 2006–2008 гг.), совместного проекта РФФИ – БРФФИ (проект № 02-02-81005 “Экспериментальное и теоретическое исследование процессов нестационарного тепло- и влагопереноса в пористых средах”, 2002–2004 гг.), гранта Президента РФ для ведущих научных школ РФ (грант № 1308.2003.8.), интеграционного проекта СО РАН (№ 26 “Исследование физических механизмов формирования и свойств спектрально-селективных низкоэмиссионных теплоотражающих покрытий на основе оксидов металлов”, 2003–2005 гг.), программы “Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники”(код проекта № 03.03.079 “Разработка и опытная апробация метода расчета совместного нестационарного тепло- влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий”, 2003–2004 гг.), совместного проекта РФФИ – БРФФИ (проект 06-08-81003 Бел_а “Сопряженный нестационарный массоперенос пористых тел при вариации граничных условий. Эксперимент и теория”, 2006–2007 гг.), программы Министерство образования и науки Российской Федерации “Развитие научного потенциала высшей школы” (проект № 236 “Энергосберегающие окна с регулируемыми теплозащитными характеристиками”, 2005–2006 гг.), гранта РФФИ (ОФИ-06-08-061 “Разработка, экспериментальное определение основных характеристик и создание макетного образца дискового вентилятора-регенератора для утилизации тепла вентиляционного воздуха”, 2006–2007 гг.).

Апробация работы в виде докладов и обсуждений основных положений и результатов исследований проходила на следующих семинарах и конференциях: международных конгрессах “Ресурсосберегающие и энергосберегающие технологии реконструкции и нового строительства” (Новосибирск, 1998, 1999, 2000, 2004, 2005 гг.), международном семинаре “Энерго-ресурсосбережение в Сибирском регионе” (Новосибирск, 1998 г.), Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 1998, 2002, 2006, 2010 гг.), Международных научно-технических семинарах “Нетрадиционные технологии в строительстве” (Томск, 1999, 2001 гг.), Минских международных форумах по тепло- и массообмену (Республика

Беларусь, Минск, 2000, 2004 гг.), Пятой научно-практической конференции “Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях” (Москва, 2000 г.), Международной практической конференции “Утеплители и системы утепления ограждающих конструкций зданий” (Новосибирск, 2001 г.), Первой Всероссийской школе-семинаре “Энергосбережение – теория и практика” (Москва, 2002 г.), Сибирских теплофизических семинарах (Новосибирск, 2002, 2004, 2010 гг.), Международной научно-технической конференции (Томск, 2002 г.), IV Всероссийском совещании “Энергосбережение и энергобезопасность России” (Томск, 2003 г.), Международных научно-практических конференциях “Проблемы коммерческого учета теплоносителей” (Новосибирск, 2004, 2005 гг.), Научных школах-конференциях “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Украина, Алушта, 2004, 2005 гг.), Научно-технических конференциях НГАСУ (Новосибирск, 2005, 2006, 2007, 2008 гг.), Национальной конференции по теплоэнергетике (Казань, 2006 г.), Всероссийских научно-практических конференциях. “Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии – энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (Барнаул, 2007, 2008 гг.), Первой международной конференции «Энергопотребление зданий и окружающая среда (Китай, Далянь, 2008 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке задач всего комплекса выполненных исследований, в разработке и проектировании экспериментальных установок, в выборе методов и методик экспериментальных исследований, в научном консультировании и непосредственном участии при проведении экспериментов, в анализе и обобщении полученных экспериментальных данных, в постановке задач математического моделирования исследуемых процессов тепло- и влагообмена, в проведении численных расчетов, в верификации расчетных методов на результатах экспериментов, в обобщении расчетных и экспериментальных результатов и подготовке научных статей.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 66 работах (в автореферате приведен список 50 основных работ), в том числе 2 монографиях. 19 работ опубликованы в изданиях рекомендуемых ВАК для публикации материалов докторских диссертаций, 15 работ – в других периодических изданиях, 28 работ – в трудах международных и российских конференций. По теме диссертации получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство на полезную модель

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, списка основных обозначений, 8 глав, заключения, списка литературы из 211 наименования, 3 приложений. Основной текст диссертации содержит 318 страниц, включая 162 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, ее научная новизна, цели, задачи и методы исследования, отмечена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора, указаны положения, выносимые на защиту, рассмотрена структура диссертации и краткое содержание глав.

Для более детального анализа каждой из рассматриваемых проблем, а также четкости в формулировке задач и целей конкретных исследований обзоры современного состояния приведены по главам.

В первой главе проведен обзор и анализ методов повышения температуры внутренних поверхностей остекления.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования эффективности влияния тепловыделений в воздушных прослойках на тепловые характеристики окон с тройным остеклением.

Для экспериментального исследования тепловых характеристик моделей новых светопрозрачных конструкций была спроектирована и изготовлена климатическая камера (рис. 1).

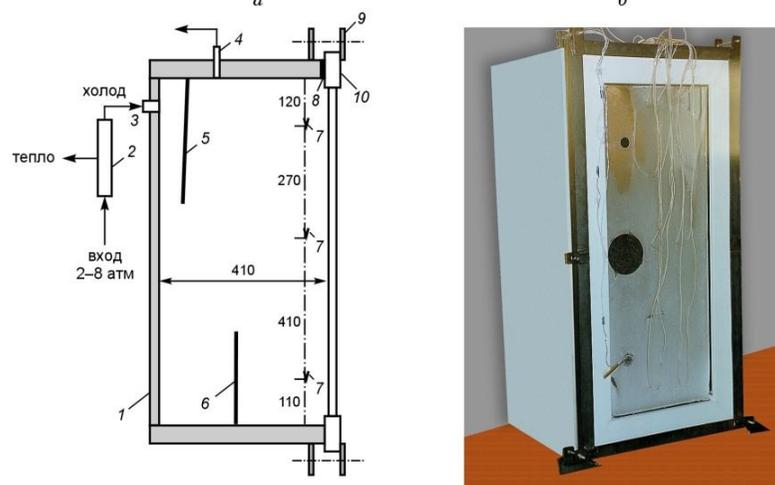


Рис. 1. Климатическая камера:
а – схема, б – фотография.

В качестве источника холода использовался вихревой охладитель газа (поз. 2). В диссертации приведен ряд результатов тестовых экспериментов, подтвердивших корректность проводимых теплотехнических измерений.

В основной серии экспериментов в центре внутренней воздушной прослойки по всей ширине окна на высоте $2 \cdot 10^{-2}$ м от нижнего края остекления монтировался тонкий цилиндрический омический нагреватель.

Модель окна устанавливалась в климатическую камеру, и проводились теплофизические измерения. Эксперименты показали, что при небольшой мощности тепловыделений 30–100 Вт/м наблюдалось значительное повышение температуры внутреннего остекления и более равномерное ее распределение по поверхности (рис. 2).

Наиболее сильный эффект от тепловыделений имел место в нижней зоне остекления, где у обычных окон область с наиболее низкими температурами. Получено обобщение результатов экспериментов по повышению температуры внутреннего стекла от мощности тепловыделений (рис. 3). Исследована динамика выхода на стационарный режим. При тепловыделениях 50 Вт/м время выхода на стационарный режим составляло около часа, причем достижения уровня 90 % от равновесной температуры происходило в течение получаса, что свидетельствовало о достаточной оперативности данного метода управления тепловыми характеристиками.

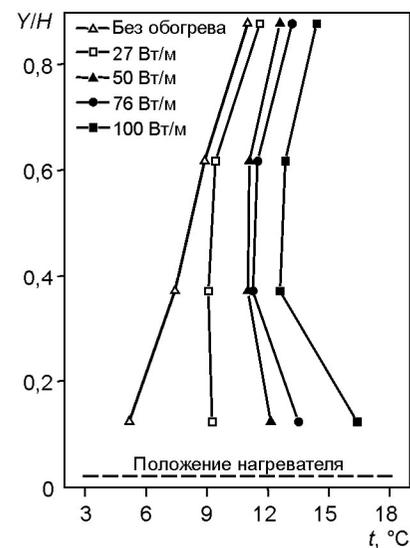


Рис. 2. Влияние тепловыделений на температуру внутреннего стекла.

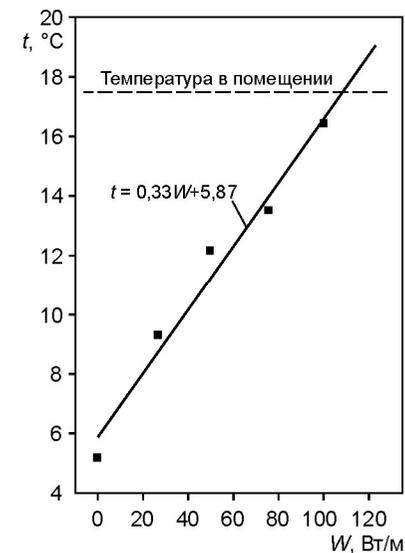


Рис. 3. Зависимость температуры нижней зоны внутреннего стекла от мощности тепловыделений.

Получены экспериментальные результаты, позволившие провести сравнение влияния тепловыделений во внутренней и наружной прослойках на тепловые характеристики окна с тройным остеклением.

Специальная серия экспериментальных исследований показала возможность сокращения тепловых потерь и повышения эффективности управления тепловыми характеристиками в окнах с тепловыделениями в воздушных прослойках при использовании на стеклах теплоотражающих покрытий.

Положительный эффект от использования тепловыделений в воздушных прослойках окна с тройным остеклением был подтвержден получением Свидетельства на полезную модель № 24495 от 10.8.2002 г.

Во второй главе выполнен критический обзор экспериментальных и теоретических работ по вентилируемым окнам и сформулированы задачи исследования. Представлены результаты экспериментального исследования тепловых характеристик окон с тройным остеклением, вентилируемых воздухом помещения с целью утилизации тепла вентиляционного воздуха. Проанализированы распределения температур и тепловых потоков по поверхностям остекления при различных расходах вентилирующего воздуха. Показано, что вентилирование воздушных прослоек приводило к повышению температуры внутреннего остекления и сопротивления теплопередаче окна с ростом расхода вентилирующего воздуха и уменьшением толщины вентилируемой воздушной прослойки (рис. 4). Отмечено определяющее влияние скорости движения воздуха в вентилируемой прослойке на распределение тепловых параметров.

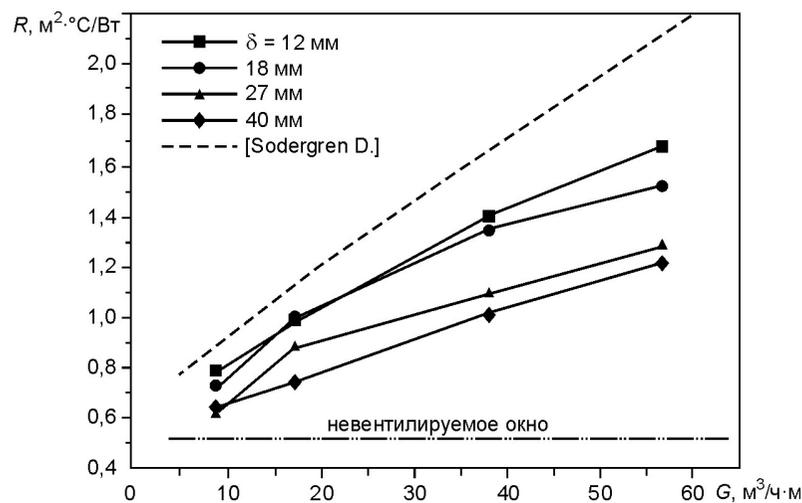


Рис. 4. Зависимость сопротивления теплопередаче тройного остекления от расхода вентилирующего воздуха.

Определено влияние направления движения воздуха в вентилируемом окне на его тепловые характеристики. Экспериментально исследован режим естественной вентиляции внутренней прослойки окна.

Предложены и реализованы в виде специальных компьютерных программ методики расчета лучисто-конвективного теплообмена обычного и вентилируемого окна с тройным остеклением на основе численного решения системы уравнений для ламинарного двухмерного движения воздуха: уравнение неразрывности, уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска и уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_{\text{ср}}), \quad (3)$$

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

Лучистый теплообмен учитывался в плоско-параллельном приближении через граничные условия. Граничные условия для невентилируемого окна на наружных и внутренних вертикальных стенках:

$$\left. \begin{aligned} u = v = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q_{\text{лн}} &= \alpha_n (T - T_n), \quad \text{при } x = \delta \text{ и } 0 \leq y \leq H, \\ u = v = 0, \quad \alpha_v (T - T_v) &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q_{\text{лв}}, \quad \text{при } x = 0 \text{ и } 0 \leq y \leq H, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

на горизонтальных стенках:

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{при } y = 0, H \text{ и } 0 \leq x \leq \delta \quad (6)$$

на перегородке:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_v + q_{\text{лв}} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_n + q_{\text{лн}}, \quad \text{при } x = \delta_1 \text{ и } 0 \leq y \leq H \quad (7)$$

Для вентилируемого окна изменялись условия на горизонтальных границах:

$$\left. \begin{aligned} u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, \quad \text{при } y = 0, H \text{ и } 0 \leq x \leq x_1, x_2 \leq x \leq \delta, \\ u = 0, \quad v = v_0, \quad T = T_0, &\quad \text{при } y = 0 \text{ и } x_1 \leq x \leq x_2, \\ \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &= 0, \quad \text{при } y = H \text{ и } x_1 \leq x \leq x_2, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где: x и y – продольная и поперечная координата, u и v – продольная и поперечная компоненты вектора скорости, τ – время, T и P – температура и давление, ρ – плотность, c – теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, ν – коэффициент кинематической вязкости, β – коэффициент температурного расширения, α – коэффициент теплоотдачи, q_d – плотность лучистого теплового потока, H и δ – высота и ширина воздушной полости, g – ускорение свободного падения

В результате численных расчетов выявлена сложная структура свободноконвективного течения в межстекольных прослойках окна, которая определялась градиентом температуры между стенками прослойки и ее геометрическими размерами. Определено влияние толщины воздушных прослоек на распределение тепловых и динамических параметров течения. Выполнены расчеты изменения тепловых и динамических характеристик течения при вентилировании воздушных прослоек (рис. 5). Проведено сопоставление распределения локальных тепловых параметров для вентилируемых окон по результатам расчетов и экспериментов, получено удовлетворительное согласование (рис. 6).

В целом, как показали расчеты, при доле тепла на нагрев воздуха для нужд вентиляции 50 % и более от общего теплопотребления здания, установка вентилируемых окон с характеристиками, полученными в работе, позволит экономить до 10 % общего количества тепла, поступающего на отопление здания, и значительно повысить комфортность внутренних помещений.

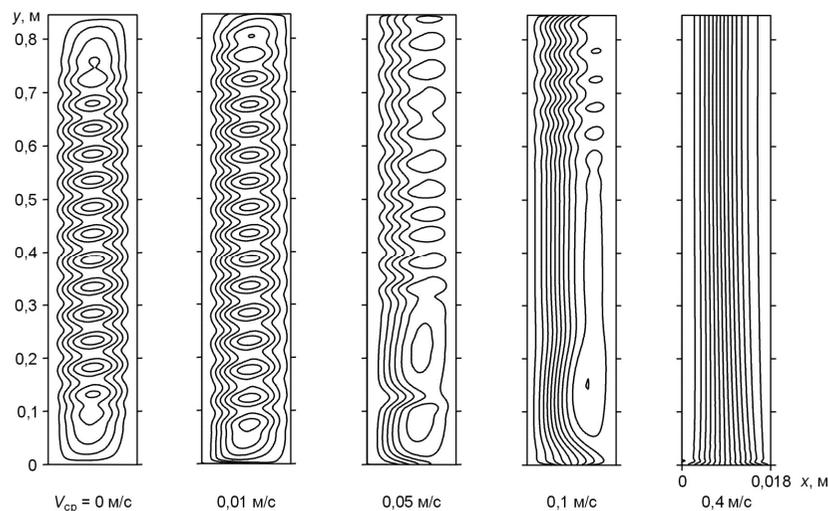


Рис. 5. Линии функций тока во внутренней прослойке вентилируемого окна.

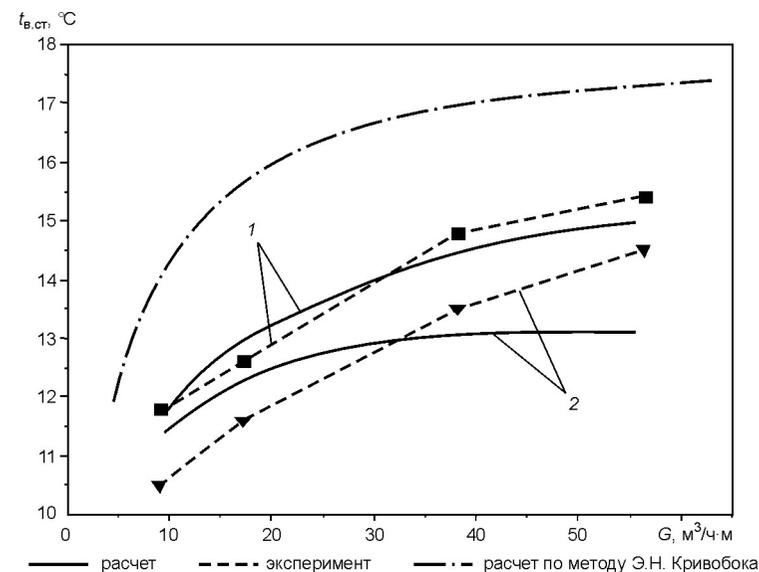


Рис. 6. Зависимость средней температуры внутреннего стекла от расхода вентилирующего воздуха: 1 – $\delta_l = 12$ мм, 2 – 40 мм.

В третьей главе проанализирована эффективность теплозащиты от применения разных по составу теплоотражающих покрытий на поверхностях стекол и пленок. Определены задачи исследования тепловых характеристик оконных конструкций с экранами и жалюзи с теплоотражающими покрытиями.

Приведены результаты теплотехнических исследований теплозащитной эффективности внутреннего вертикального жалюзи с односторонним теплоотражающим покрытием из алюминия на лавсановой пленке. Такая конструкция жалюзи позволила увеличить теплозащитные характеристики двойного остекления на 21 %.

Описаны результаты цикла экспериментальных лабораторных исследований тепловых характеристик межрамных экранов и жалюзи с различными теплоотражающими покрытиями на модели окна с тройным остеклением. Итоговые результаты исследований приведены на рис. 7 в виде относительного сопротивления теплопередаче R/R_0 , где R – сопротивление теплопередаче остекления с экраном или жалюзи, а R_0 – без экрана или жалюзи. Максимальный эффект роста теплозащитных характеристик окна получен при использовании экрана с двухсторонним покрытием, $R/R_0 = 1,8$.

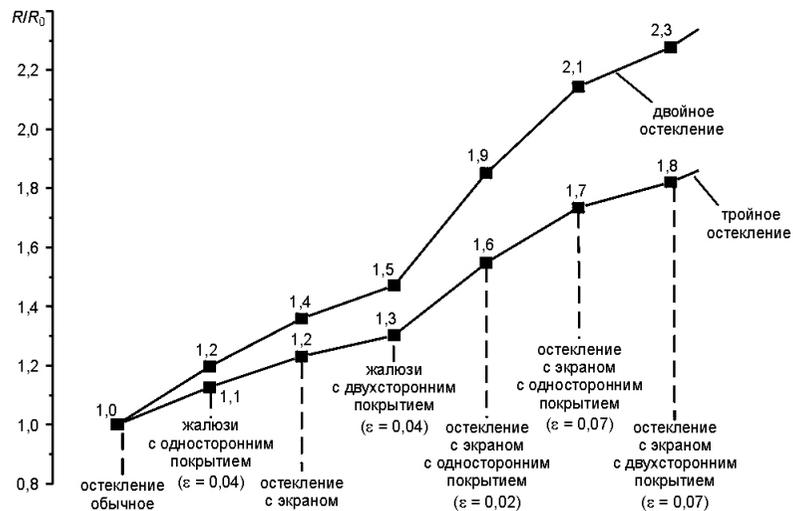


Рис. 7. Относительное сопротивление теплопередаче остекления при использовании экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями.

Применение межрамных горизонтальных жалюзи с двухсторонним теплоотражающим покрытием приводило к повышению теплозащитных характеристик тройного остекления в 1,3 раза. На основании выполненных лабораторных исследований экранов и жалюзи с покрытиями на модели окна с тройным остеклением был проведен расчет их использования при двойном остеклении (верхняя линия на рис. 7).

Выполнен цикл натурных измерений тепловых характеристик при использовании межрамных экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями на окне с двойным остеклением. Изучена динамика изменения тепловых параметров двухслойного остекления при применении межрамных экранов и жалюзи (рис. 8), показана возможность достаточно оперативно управлять тепловыми характеристиками окон. Натурные испытания межрамных экранов и жалюзи подтвердили их высокую эффективность в снижении тепловых потерь (рис. 9), и они могут быть рекомендованы к широкому практическому применению.

Были проведены натурные теплотехнические испытания внутренних оконных экранов с теплоотражающими покрытиями, которые показали, что для снижения тепловых потерь они могут быть не менее эффективны, чем межрамные экраны. Однако при их использовании происходит дополнительное охлаждение внутреннего стекла, что может приводить к конденсации влаги на его поверхности. Поэтому внутренние экраны с теплоотражающими покрытиями рекомендуется применять в помещениях с пониженной влажностью воздуха.

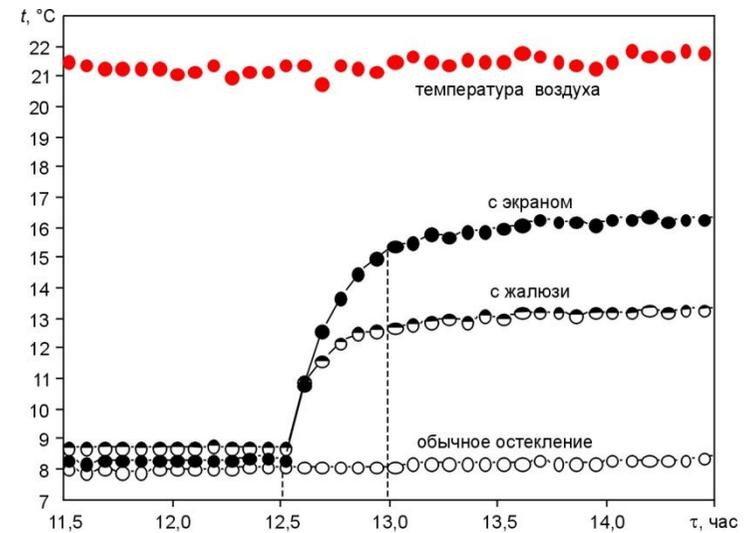


Рис. 8. Динамика изменения температуры на внутреннем стекле при опускании экрана и закрытии жалюзи.

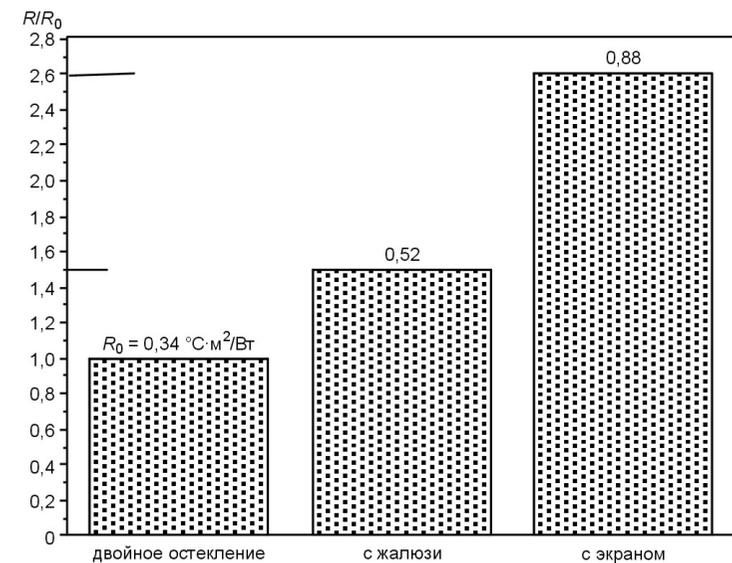


Рис. 9. Сопротивление теплопередаче двойного остекления при установке межрамных экранов и жалюзи.

Как показали экономические расчеты, использование экранов с теплоотражающими покрытиями в конструкциях окон может дать до 10–15 % экономии энергии на отопление и кондиционирование жилых и производственных помещений.

В четвертой главе рассмотрены проблемы инструментального определения теплозащитных характеристик стен современных зданий. Проанализированы существующие методики. Для создания основ новых более точных и оперативных методик определения теплозащитных характеристик стеновых конструкций были проведены компьютерные расчеты изменения тепловых параметров в теплоинерционных однослойных и двухслойных стенах.

Для анализа изменения теплофизических параметров в однослойной стене толщиной d при резком изменении температуры наружного воздуха было решено нестационарное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad (9)$$

где $\theta = \frac{T_x - T_1}{T_2 - T_1}$; $Fo = \alpha \tau / d^2$; $\xi = x/d$;

соответствующие краевые условия:

$$Fo = 0, \theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1)\xi \quad (10)$$

$$\xi = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_1 = Bi_1 \theta_1 \quad (11)$$

$$\xi = 1, \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_2 = Bi_2 (1 - \theta_2), \quad (12)$$

где $\theta_1 = \frac{T_{w1} - T_1}{T_2 - T_1}$, $\theta_2 = \frac{T_{w2} - T_1}{T_2 - T_1}$, $Bi_1 = \alpha_1 d / \lambda$, $Bi_2 = \alpha_2 d / \lambda$.

Рассмотрен случай резкого понижения температуры наружного воздуха от -20°C до -40°C при температуре воздуха внутри помещения $+20^\circ\text{C}$ и $Bi_1 = Bi_2 = 10$. Значение изменения относительной плотности теплового потока q/q^* , где q^* – плотность теплового потока после установления равновесного состояния, приведено на рис. 10. Следует отметить, что в центре однородной конструкции тепловой поток наиболее быстро, уже при $Fo = 0,1$, достигал равновесного значения и после этого практически не менялся.

Были проведены расчеты при разных уровнях понижения и повышения наружной температуры, и все они подтвердили вывод о наиболее быстрой релаксации теплового потока к равновесному значению в центральной зоне таких конструкций.

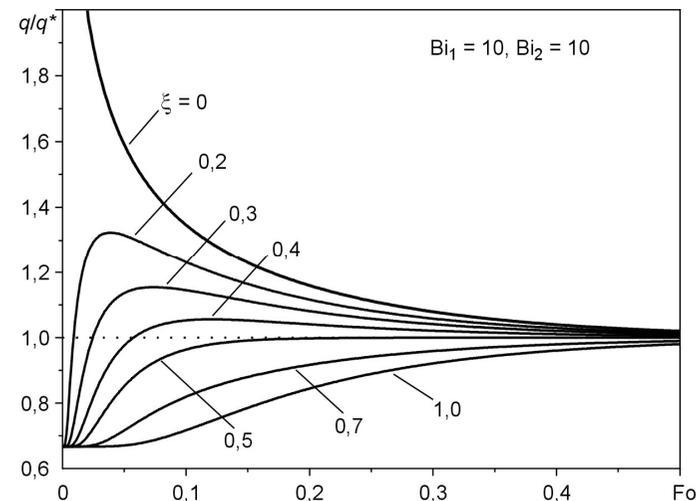


Рис. 10. Изменение относительной плотности теплового потока в однослойной стене при резком похолодании.

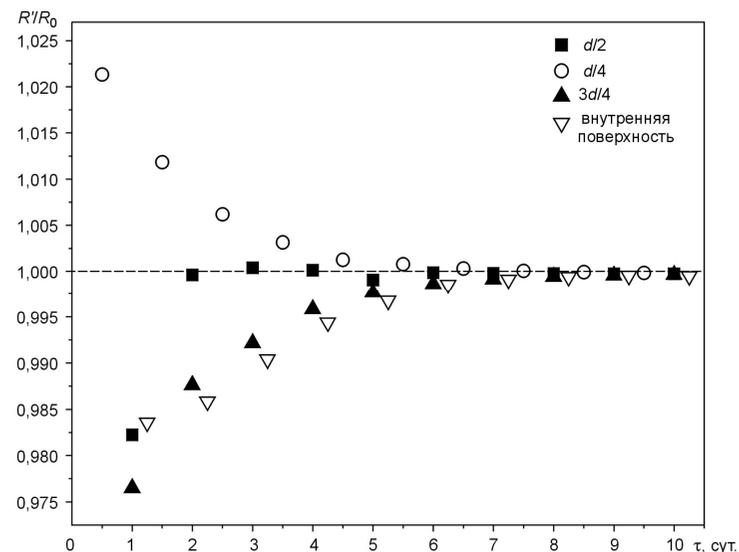


Рис. 11. Относительные среднесуточные значения сопротивления теплопередаче.

Проведены расчеты и проанализированы их результаты изменения тепловых параметров в однослойных стенах при циклических суточных колебаниях температуры наружного и внутреннего воздуха. Показано, что при наличии суточных колебаний температуры воздуха для повышения точности определения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций целесообразно проводить суточное осреднение измеряемых величин. На рис. 11 показано изменение относительного сопротивления теплопередаче R/R_0 , где R определено по среднесуточным значениям теплового потока в данном сечении кирпичной стены толщиной 0,64 м, а R_0 – действительное сопротивление теплопередаче данной стены. Из результатов следует, что в среднем сечении стены уже спустя 1,5 суток с начала колебаний наружной температуры по измерениям осредненного теплового потока можно получить достаточно точное значение сопротивления теплопередаче стены.

Для двухслойных стен выполнены расчеты, позволившие определить направление и величину смещения положения зоны с наиболее быстрой стабилизацией теплового потока в случае резкого изменения температуры наружного воздуха по сравнению с однослойными стенами (рис. 12, здесь x отсчитывался от наружной границы кирпичного слоя толщиной d). Показано, что для двухслойных стен зона с наиболее быстрой стабилизацией теплового потока смещается от центра конструкционного слоя в сторону расположения утеплителя, причем это смещение тем существеннее, чем толще слой теплоизоляционного материала.

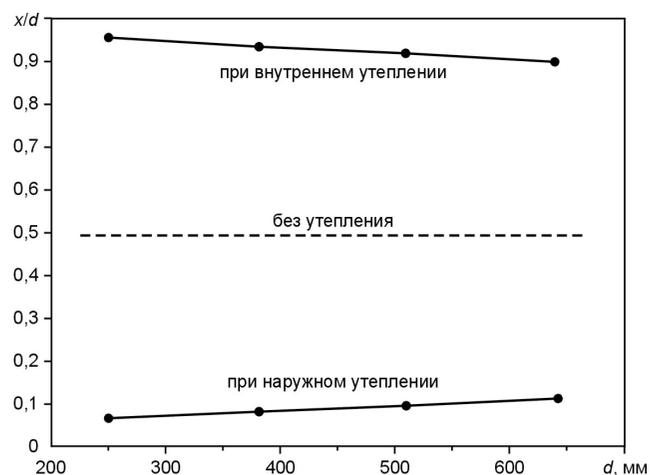


Рис. 12. Относительная координата зоны наиболее быстрой стабилизации теплового потока для кирпичных стен при утеплении слоем пенополистирола 120 мм.

Приведены результаты натуральных измерений изменения тепловых параметров в различных сечениях однослойной стены из газобетона в реальных условиях эксплуатации. Получено хорошее согласование выводов, сделанных по результатам расчетов с данными натуральных наблюдений.

Разрабатываемые методики инструментального определения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий и созданная аппаратура для их реализации применялись сотрудниками ИТ СО РАН совместно со специалистами ЗАО “ТЭЗИС” и “Новосибирского энергетического центра” при теплотехнических обследованиях более 20 жилых и производственных зданий в г. Новосибирске.

В пятой главе проведен критический анализ существующих стационарных и нестационарных методов экспериментального определения коэффициентов теплопроводности материалов. Для исследования зависимости теплопроводности автоклавного газобетона от влажности при положительных и отрицательных температурах был использован метод “горячей проволоки”. Метод основан на измерении временной зависимости температуры тонкой проволоки, помещенной между двумя гладкими пластинами исследуемого образца материала. Проволока, начиная с некоторого момента времени, нагревается электрическим током постоянной мощности. Для определения коэффициента теплопроводности использовалась зависимость изменения температуры цилиндрического тела, нагреваемого в неограниченной среде:

$$T(r, \tau) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left[2h + \ln \frac{4a\tau}{r^2 C} - \frac{r^2}{4a\tau} \left(\frac{4h - \alpha_1}{2\alpha_1} \right) + \frac{r^2}{4a\tau} \cdot \frac{\alpha_1 - 2}{2\alpha_1} \cdot \ln \frac{4a\tau}{r^2 C} \right], \quad (13)$$

где τ – время; r – радиус проволоки; T_0 – начальная температура проволоки; $T(r, \tau)$ – температура проволоки в любой момент времени; q – мощность нагрева на единицу длины; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; $h = 2\pi R\lambda$; R – контактное термосопротивление между проволокой и образцом на единицу длины, $C = \exp(\gamma) = 1.7811$ ($\gamma = 0.5772$ – постоянная Эйлера); $\alpha_1 = c_0/c_n$ – отношение теплоемкостей образца и проволоки.

Так как изменение температуры проволоки и образца при измерениях не превышают 1–5 °С, то из (13) можно получить:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\ln(\tau_2 / \tau_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (14)$$

Измеряя температуру проволоки в моменты времени τ_1 и τ_2 , определялся коэффициент теплопроводности образца.

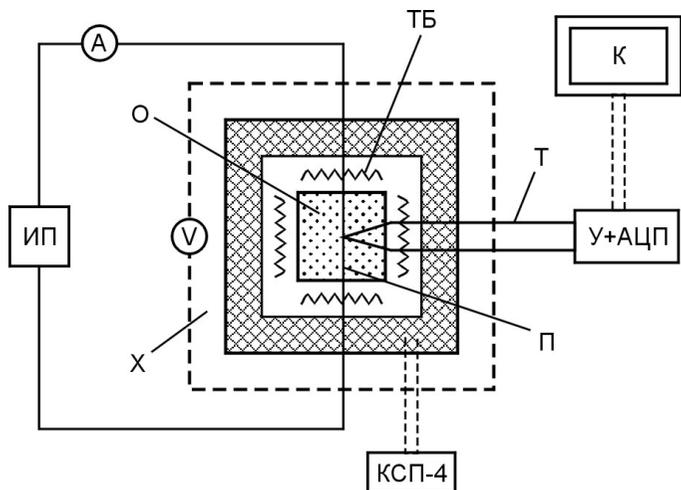


Рис. 13. Схема экспериментального стенда: ИП – источник питания; Т – термопара; П – проволока – зонд, А и V – амперметр и вольтметр; О – образец; У+АЦП – усилитель и аналогово-цифровой преобразователь; К – компьютер, Х – холодильник; ТБ – термобатарея; КСП-4 – регулятор температуры.

Для проведения измерений был создан экспериментальный стенд (рис. 13), который состоял из холодильной камеры и модуля для определения теплопроводности материалов методом “горячей проволоки”. В результате экспериментальных исследований получены зависимости коэффициентов теплопроводности для автоклавного газобетона плотностью $\rho = 400, 600$ и 700 кг/м^3 при различной объемной сорбционной влажности: сухого газобетона, газобетона с нормальной эксплуатационной влажностью для условий г. Новосибирска $W_{Vн} = 2-3 \%$ и газобетона с максимальной сорбционной влажностью $W_{Vс} = 9-11 \%$ (рис. 14). Из результатов экспериментов следовало, что при увлажнении сухого газобетона до эксплуатационной влажности коэффициент теплопроводности увеличивался на 10 %, а до максимальной сорбционной влажности на 70 %.

В ряде регионов России автоклавный газобетон применяется без защитного слоя и может подвергаться сверхсорбционному увлажнению. Получены результаты зависимости коэффициентов теплопроводности газобетонов различной плотности с предельным влагонасыщением. При увлажнении газобетона от максимальной сорбционной влажности $W_{Vс}$ до предельного влагонасыщения $W_{Vм}$ (для газобетона $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ $W_{Vм} = 32 \%$) в интервале температур от 0 до 20 °С коэффициент теплопроводности увеличивался примерно в 1,8 раза (рис. 15). Для газобетонов предельного

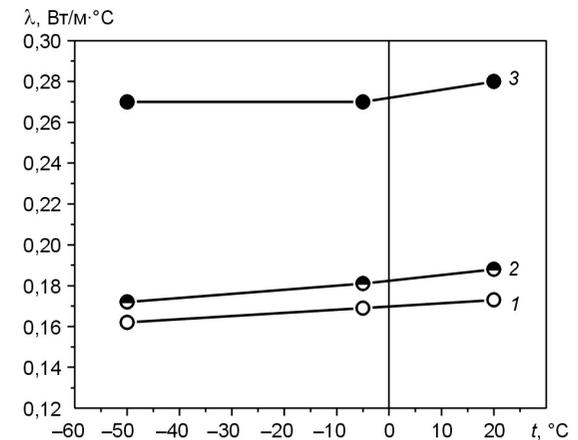


Рис. 14. Зависимость λ газобетона сорбционной влажности плотностью 700 кг/м^3 от температуры, 1 – $W_{Vн} = 0 \%$; 2 – $W_{Vн}$; 3 – $W_{Vс}$.

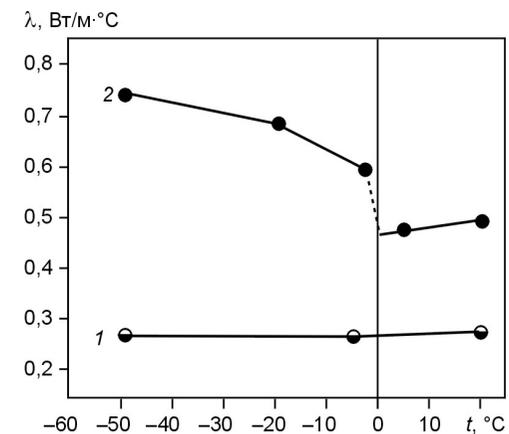


Рис. 15. Зависимость λ газобетона высокой влажности плотностью 700 кг/м^3 , от температуры, 1 – $W_{Vс}$, 2 – $W_{Vм}$.

влажнонасыщения при понижении температуры от 0 до -3 °С наблюдался резкий рост λ на 25 %, дальнейшее понижение температуры до -50 °С приводило к повышению коэффициента теплопроводности еще на 20 %. Для газобетона максимальной сорбционной влажности коэффициент теплопроводности в интервале температур от 0 до -50 °С практически не изменялся.

Полученные экспериментальные результаты зависимостей коэффициентов теплопроводности газобетона сорбционной и сверхсорбционной влажности от плотности и температуры использовались в ОАО “Главнотехстрой” при разработке мероприятий по предотвращению увлажнения конструкций из газобетона для повышения их теплозащитных характеристик.

В шестой главе проведена классификация экспериментальных и расчетных методов исследования процессов влагопереноса в пористых материалах по работам А.В. Лыкова, В.Н. Богословского, В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокина, А.Д. Франчука, Е.В. Бриллинга, Е.И. Тертичник, Н.Н. Гринчика, Н.М. Kunzel и др.

Сформулированы задачи развития новых экспериментальных и расчетных методик исследования перемещения и накопления влаги в пористых материалах. На примере автоклавного газобетона проведена апробация разработанных методик.

Различными физическими методами определена пористая структура, изотерма сорбции и паропроницаемость газобетона. Из результатов измерений получено, что в дифференциальном распределении пор по размерам для газобетона независимо от плотности присутствовало два максимума (рис. 16), то есть, газобетон относится к материалам с двумодальным распределением пор. Анализ полученных данных показал, что пористость у газобетона представлена, в основном, крупными порами газообразования (10^{-4} м) и мелкими капиллярными порами (10^{-7} м).

Разработана методика экспериментального исследования процессов влагопереноса методом “гамма-просвечивания” образцов, основанная на законе Бугера:

$$I_w = I_s \cdot e^{-\rho_s \cdot \epsilon_w \cdot W_m \cdot d}, \quad (15)$$

где I_w , I_s – интенсивность гамма-излучения после прохождения через влажный и через сухой материал; ρ_s – плотность материала в сухом состоянии; ϵ_w – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения для воды ($\epsilon_w = 0.00862 \text{ м}^2/\text{кг}$); W_m – относительная массовая влажность материала; d – толщина материала, через который проходит гамма-излучение.

Приведена конструкция экспериментального стенда, созданного для исследования влагопереноса в материалах методом “гамма-просвечивания” в режимах капиллярной пропитки и сорбционного увлажнения. Разработана методика определения коэффициентов диффузии влаги с использованием решения уравнения диффузии влаги методом Больцмана-Матано. Получены зависимости коэффициентов диффузии влаги от влажности для автоклавного газобетона (рис. 17). Приведены результаты экспериментальных исследований влагопереноса в газобетоне при сорбционном влагонасыщении в неизотермических условиях.

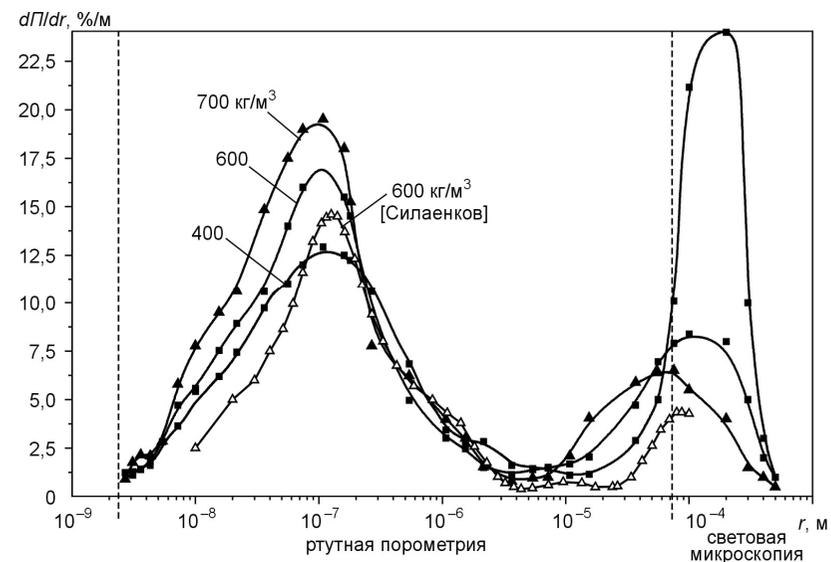


Рис. 16. Дифференциальное распределение пор по радиусам.

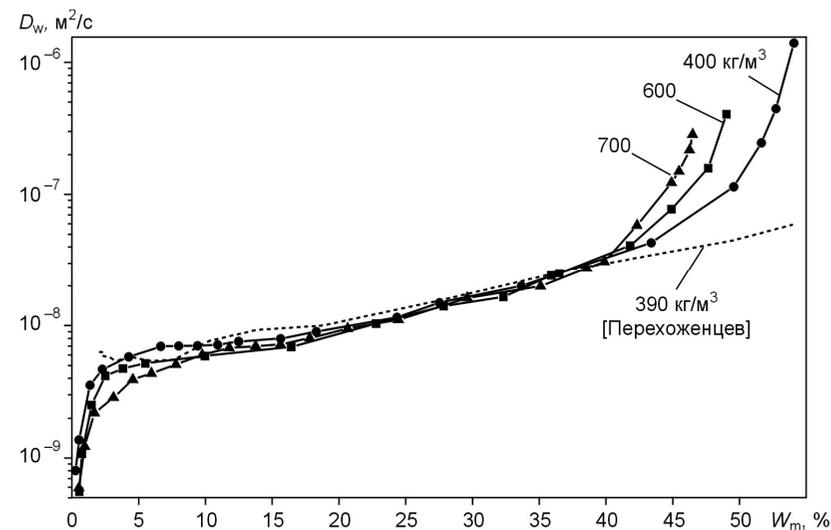


Рис. 17. Зависимость коэффициента диффузии влаги от влажности для газобетонов различной плотности.

Полученные экспериментальные данные по увлажнению газобетона были использованы для верификации расчетной модели совместного нестационарного тепло- и влагопереноса Н.М. Kunzel. Численно решена система уравнений (16) и (17) при граничных условиях, соответствующих сорбционному влагонасыщению и капиллярной пропитке:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + h \nabla(\mu \nabla(\varphi p_{\text{нас}})), \quad (16)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \nabla(D_{\varphi} \nabla \varphi + \mu \nabla(\varphi p_{\text{нас}})), \quad (17)$$

где H – энтальпия увлажненного материала, τ – время, λ – коэффициент теплопроводности влажного материала, T – температура, φ – относительная влажность, h – теплота фазового перехода жидкость – пар, μ – коэффициент паропроницаемости материала, $p_{\text{нас}}$ – давление насыщения пара при данной температуре, W – объемная влажность, D_{φ} – коэффициент диффузии жидкой влаги.

Результаты численных решений хорошо согласовались с экспериментальными данными при капиллярной пропитке и сорбционном увлажнении газобетона (рис. 18). С использованием данной модели выполнены расчеты накопления влаги в слое газобетона в неизотермических условиях при различных вариантах пароизоляции.

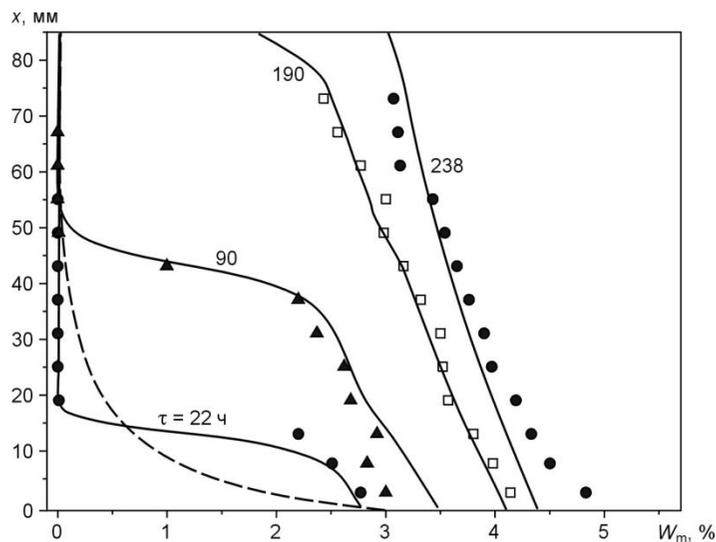


Рис. 18. Сопоставление результатов расчетов и экспериментов для сорбционного увлажнения газобетона при 20 °С, пунктир – расчет с изотермой сорбции [Н.М. Kunzel].

Разработанные методики тепло- влажностных расчетов были использованы при проведении расчетов для “ АНО Сибстройсертификации” (г. Новосибирск) фасадных систем “Камилан” (2005 г.) и “Алпан” (2008 г.), для ООО “Термолэнд” при разработке принципиально новой теплозащитной панели с вентилируемыми наружными каналами (2010 г.).

В седьмой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния основных теплофизических факторов на работу регистраторов расхода тепла отопительных приборов. Электронное устройство регистратора фиксировало разность температуры поверхности отопительного прибора и окружающего воздуха и интегрировало ее по времени. Показания регистратора были пропорциональны количеству тепла, отданного отопительным прибором.

Дано описание стенда, на котором проведены эксперименты (рис. 19). Основными элементами стенда являлись: отопительный прибор 1, циркуляционный термостат 2, два электронных регистратора “Dorigimo” 5, 6.

Приведены результаты измерений тепловых полей поверхности радиатора при различных расходах и направлениях подачи теплоносителя с применением контактных датчиков и тепловизионной техники.

По результатам тепловых измерений определены радиаторные коэффициенты отопительных приборов, которые позволяют рассчитать количество тепла, полученное от радиатора:

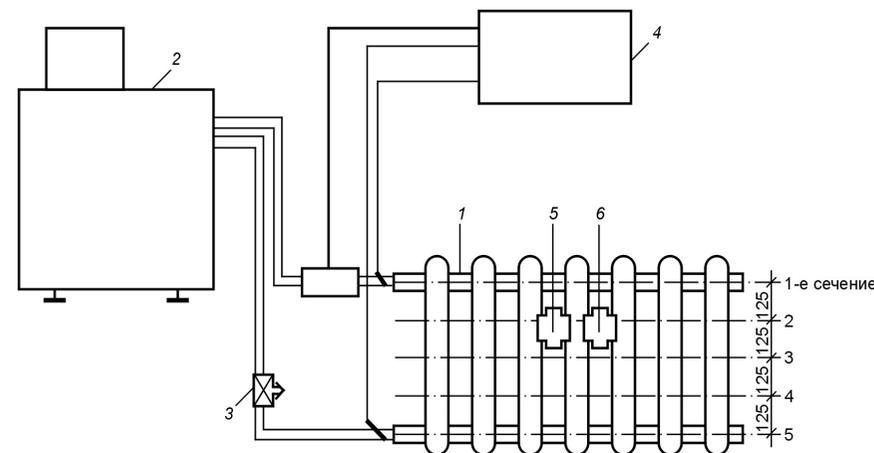


Рис. 19. Схема экспериментального стенда:

1 – отопительный прибор, 2 – циркуляционный термостат, 3 – шаровый кран, 4 – теплосчетчик, 5, 6 – регистраторы.

$$Q = kk_n S \Sigma, \quad (18)$$

где Q – количество тепла, S – площадь поверхности радиатора, Σ – показания регистратора, k – радиаторный коэффициент, а k_n – номинальный условный коэффициент теплопередачи отопительного прибора.

Экспериментально получены зависимости радиаторных коэффициентов от средней температуры поверхности радиатора и температуры окружающего воздуха (рис. 20). Для уменьшения зависимости радиаторного коэффициента от температуры окружающего воздуха предложено использовать температурный коэффициент

$$a = (t_{cp} - 20^\circ\text{C}) / (t_{cp} - t_b), \quad (19)$$

где t_b – температура воздуха в помещении, t_{cp} – средняя температура поверхности радиатора.

Анализ результатов комплекса $W/(t - t_b)$, пропорционального радиаторному коэффициенту, где W – мощность радиатора, а t – локальная температура при различных положениях установки, показал, что перенос регистратора в область среднего сечения по высоте чугунного радиатора приводит к снижению зависимости радиаторного коэффициента от средней температуры поверхности радиатора (рис. 21).

Полученные экспериментальные результаты влияния теплофизических факторов на работу регистраторов расхода тепла отопительных приборов будут способствовать внедрению энергоэффективных систем отопления в многоквартирных жилых зданиях.

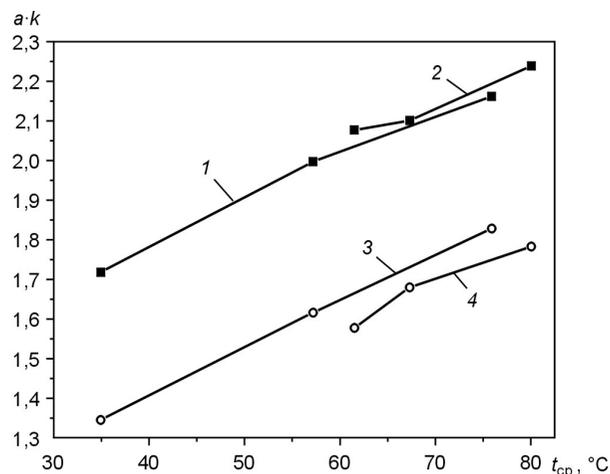


Рис. 20. Значения радиаторных коэффициентов с учетом температурного коэффициента; 1, 3 – при температуре $t_b = 20^\circ\text{C}$; 2, 4 – при $t_b = 25^\circ\text{C}$.

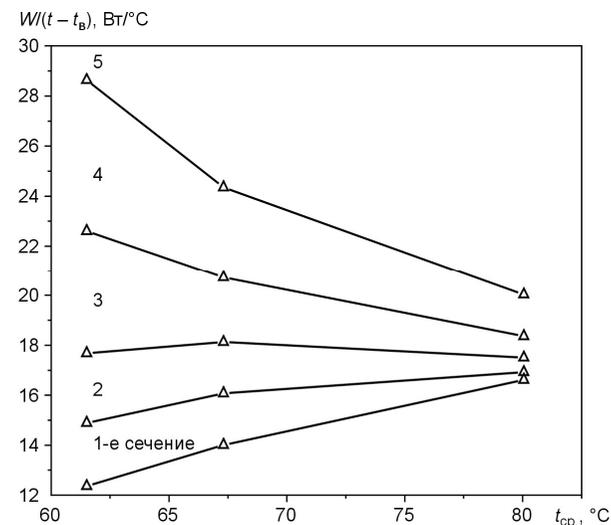


Рис. 21. Зависимость радиаторного коэффициента от средней температуры поверхности радиатора при различных положениях установки.

В восьмой главе проведен анализ наиболее эффективных конструкций воздушных рекуперативных и регенеративных теплообменников. На основе разработки научных основ метода интенсификации теплообмена в регенеративных теплообменниках с вращающимися дисками предложен новый класс регенеративных воздушных теплообменников. Одна из отличительных особенностей данных аппаратов заключается в том, что они одновременно являются и теплообменниками и вентиляторами. Получены зависимости предельной эффективности таких аппаратов от количества ступеней и скорости вращения дисков в турбулентном и ламинарном режиме течения воздушных потоков. На основе численного решения нестационарного уравнения теплопроводности определено влияние материала дисков и их толщины на тепловую эффективность аппарата.

Приведены результаты экспериментальных исследований тепловых и динамических параметров одноступенчатого дискового вентилятора-регенератора тепла вентиляционного воздуха, состоявшего из 16 алюминиевых дисков диаметром 0,2 м, вращающихся со скоростью до 4500 об./мин. Вращение ротора создавало два противоположно направленных воздушных потока. При различных температурах воздушных потоков вращающиеся диски переносили тепло из одного потока в другой.

По результатам экспериментальных испытаний аппарата в зимних условиях определена безразмерная тепловая эффективность Θ одноступенчатого дискового вентилятора-регенератора при различных расходах воздуха (рис. 22). Безразмерная тепловая эффективность по каждому каналу определялась отношением изменения температуры в канале к перепаду температуры на улице и в помещении. Средняя тепловая эффективность одноступенчатого дискового вентилятора-регенератора составила около 25 %, что удовлетворительно согласовалось с расчетом для турбулентного режима течения.

С целью дальнейшего повышения тепловой эффективности был спроектирован, изготовлен и испытан двухступенчатый однороторный дисковый вентилятор-регенератор тепла вентиляционного воздуха (рис. 23). Исследованы динамические параметры аппарата и получена его расходная характеристика. Определена средняя тепловая эффективность двухступенчатого аппарата (рис. 24), по результатам экспериментов она составляла 45–46 % и практически не менялась в диапазоне скоростей вращения ротора 1500–3400 об/мин.

Получен патент на изобретение многоступенчатого дискового вентилятора-регенератора тепла вентиляционного воздуха [23].

Как показали расчеты, применение двухступенчатых дисковых вентиляторов-регенераторов тепла для вентиляции современных жилых и промышленных зданий может дать до 25–30 % экономии энергии на отопление и кондиционирование.

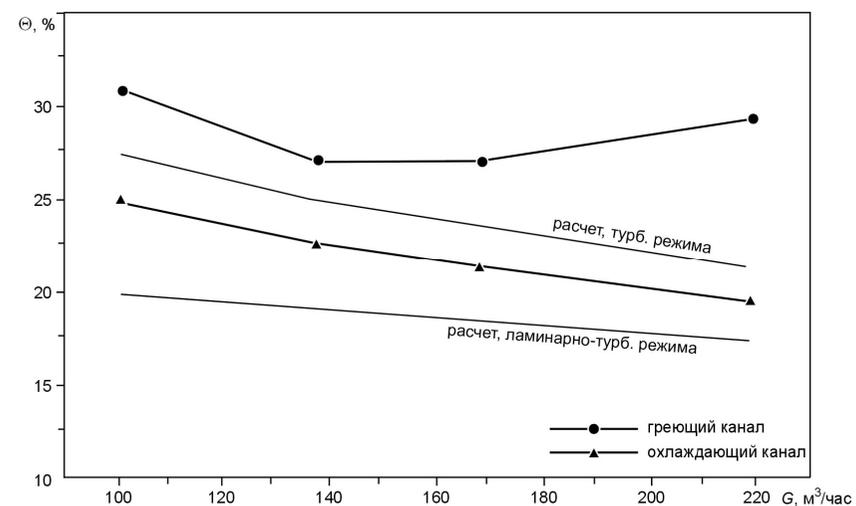


Рис. 22. Тепловая эффективность одноступенчатого вентилятора-регенератора.

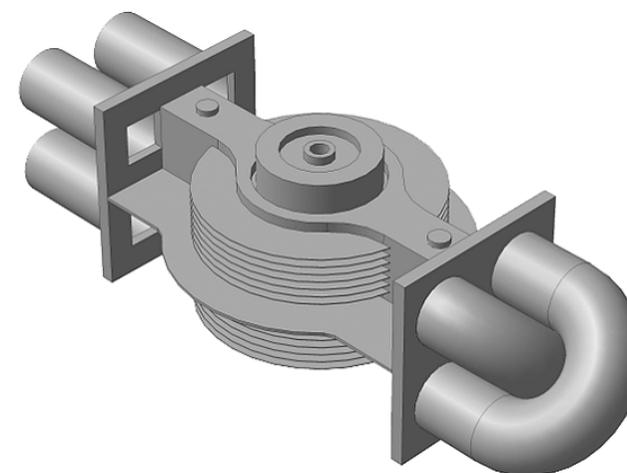


Рис. 23. Общий вид двухступенчатого однороторного дискового вентилятора-регенератора.

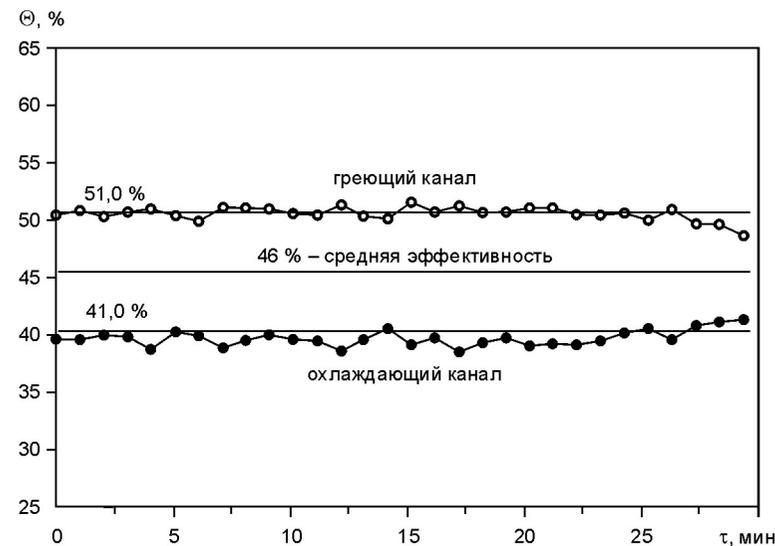


Рис. 24. Тепловая эффективность двухступенчатого вентилятора-регенератора.

В приложениях приведены документы, подтверждающие практическое использование полученных в работе результатов. Представлены результаты экономического прогноза эффективности организации производства дисковых вентиляторов-регенераторов тепла вентиляционного воздуха. Выполнен анализ погрешностей определения тепловых параметров светопрозрачных конструкций при проведении теплотехнических измерений в климатической камере.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. **Разработаны конструкции и выполнены экспериментальные исследования сложного лучисто-конвективного теплообмена окон с тепловыделениями в воздушных прослойках.** Установлено, что для окон с тройным остеклением при тепловыделениях 50–100 Вт/м, в нижней части внутренней межстекольной прослойки наблюдалось значительное повышение температуры остекления со стороны помещения. Среднее время выхода температуры остекления на стационарный режим составляло около одного часа.

2. **Разработаны конструкции и выполнены экспериментальные и теоретические исследования теплозащитных характеристик окон с тройным остеклением, вентилируемых воздухом помещения.** Установлено, что распределение температур и тепловых потоков по поверхности остекления в диапазоне расходов вентилирующего воздуха от 9 до 56 м³/ч·м и толщины внутренней вентилируемой прослойки от 12 до 40 мм определялось средней скоростью вентилирующего воздуха. Увеличение скорости воздуха приводило к повышению температуры внутреннего стекла и сопротивления теплопередаче окна.

Показано, что направление движения вентилирующего воздуха практически не оказывало влияния на средние тепловые характеристики, однако при нижней подаче воздуха наблюдалось более равномерное распределение температуры по поверхности остекления, чем при верхней.

Предложена и реализована в виде компьютерной программы новая методика расчета лучисто-конвективного теплообмена для вентилируемого окна, основанная на решении уравнений Новье-Стокса в двумерной постановке с учетом лучистого теплообмена. Выявлено наличие сложной структуры течения в межстекольных прослойках без вентилирования, а также влияние интенсивности вентилирования на изменение динамических и тепловых параметров. Получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов.

3. **Лабораторные исследования и натурные испытания предложенных новых конструкций межрамных оконных экранов с теплоотражающими покрытиями** показали их высокую эффективность в регулировании тепловой защиты и они рекомендованы к широкому практическому применению.

В результате натурных испытаний внутренних экранов с теплоотражающими покрытиями установлено, что для сокращения тепловых

потерь они не менее эффективны, чем межрамные экраны, однако, их рекомендуется применять в помещениях с пониженной влажностью воздуха.

4. **В результате компьютерного моделирования и экспериментального исследования нестационарного теплообмена в теплоинерционных конструкциях** установлено, что для однородных конструкций после резкого изменения температуры наружного воздуха зона наиболее быстрой стабилизации теплового потока расположена в центральной области. В двухслойных конструкциях эта зона смещается от центра конструкционного слоя в сторону расположения утеплителя, причем это смещение тем существенней, чем толще слой теплоизоляционного материала.

Полученные результаты могут стать основой разработки новых более точных и оперативных методик определения эффективности тепловой защиты теплоинерционных конструкций.

5. **В результате экспериментального исследования теплопроводности автоклавного газобетона с различной влажностью установлено,** что при увлажнении сухого газобетона плотностью 400–700 кг/м³ до нормальной эксплуатационной влажности, $W_m = 4-5\%$, его теплопроводность увеличивалась примерно на 10 %, а до максимальной сорбционной влажности, $W_m = 16-22\%$ – на 70 %. При увлажнении газобетона от максимальной сорбционной влажности до предельного влагонасыщения ($W_m = 46-55\%$) коэффициент теплопроводности при положительной температуре $20 \div 0\text{ }^\circ\text{C}$ увеличивается примерно в 1,8 раза, а в отрицательном диапазоне температур $0 \div -50\text{ }^\circ\text{C}$ – до 2,6 раза.

Показано, что увлажнение газобетона приводит к значительному ухудшению его теплозащитных характеристик, особенно для газобетона сверхсорбционного увлажнения при отрицательных температурах.

6. **В результате комплексных экспериментальных исследований процессов влагопереноса в пористых материалах** разработана методика определения коэффициентов влагопереноса методом “гамма-просвечивания”. Показано, что существенный рост коэффициентов диффузии влаги с увеличением влажности газобетона наблюдался при малых массовых влажностях до 3 % и при больших $>40\%$, а в диапазоне 3–40 % W_m с увеличением влажности происходило лишь незначительное изменение коэффициента диффузии влаги.

Апробирована и верифицирована на экспериментальных данных модель совместного нестационарного тепло- и влагопереноса. Получено удовлетворительное согласование между результатами расчетов и экспериментов в режимах капиллярной пропитки и сорбционного увлажнения.

7. **Экспериментально исследовано влияние теплофизических факторов на работу поквартирных регистраторов расхода тепла.** Для отопительных приборов получены значения радиаторных коэффициентов. Показано, что радиаторные коэффициенты зависят как от средней температуры поверхности радиатора, так и от температуры окружающего воздуха.

Предложена методика учета влияния температуры окружающего воздуха на радиаторный коэффициент.

8. **Разработаны научные основы метода интенсификации теплообмена в регенеративных теплообменниках с вращающимися дисками. Создана и испытана опытная модель одноступенчатого дискового роторного вентилятора-регенератора тепла вентиляционного воздуха** с регулируемой частотой вращения от 0 до 4500 об./мин. Измерена напорно-расходная характеристика аппарата. По результатам теплотехнических экспериментов средняя тепловая эффективность составила 25 %, что удовлетворительно согласовалось с расчетом теплообмена для турбулентного режима течения.

Создана и испытана опытная модель двухступенчатого однороторного дискового вентилятора-регенератора тепла вентиляционного воздуха. Определена средняя тепловая эффективность, она составляла 45–46 % и практически не менялась в диапазоне скоростей вращения дисков 1500–3400 об./мин.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I. Concrete materials: properties, performance and applications. Effect of material humidity on heat and moisture-transfer processes in gas-concrete / NY: NOVA SCIENCE PUBLISHERS. – 2009 – P.397–429. [Влияние влажности материала на тепло- и влагоперенос в газобетоне].
2. Исследования и разработки Сибирского отделения РАН в области энергоэффективных технологий / Ответственный редактор чл.-корр. РАН-С.В. Алексеенко. – Новосибирск: Издательство СО РАН. – 2009. –405 с. (Низовцев М.И. автор разделов: 1.2, 3.2, 3.3, 3.6).
3. Nizovtsev M.I., Stankus S.V., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I., Khairulin R.A. Determination of moisture diffusivity in porous materials using gamma-method // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – № 51. – PP. 4161–4167. [Определение влагопереноса в пористых материалах с использованием гамма-метода].
4. Гныря А.И., Петров Е.В., Терехов В.И., Низовцев М.И. Влияние инфильтрации холодного воздуха на сопротивление теплопередаче стеклопакета // Известия ВУЗОВ. Строительство. – 1999. – № 2–3. – С. 99–105.
5. Гныря А.И., Петров Е.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние обогрева межстекольного пространства на сопротивление теплопередаче при тройном остеклении // Известия ВУЗОВ. Строительство. – 1999. – № 11. – С. 74–79.

6. Низовцев М.И., Станкус С.В., Стерлягов А.Н., Терехов В.И., Хайрулин Р.А. Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги в пористых материалах при капиллярном и сорбционном увлажнении // ИФЖ. – 2005. – Т. 78. – № 1. – С. 67–73.
7. Петров Е.В., Терехов В.И., Низовцев М.И. Исследование обогрева межстекольного пространства при тройном остеклении // Вестник ТГАСУ, Томск. – 2000. – С. 221–227.
8. Гныря А.И., Петров Е.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Использование обогрева межстекольного пространства для повышения теплотехнических характеристик окон с тройным остеклением // Строительные материалы. – 2000. – № 11. – С. 10–11.
9. Diomidov M.V., Nizovtsev M.I. Ventilation of window interpane cavity armed at a higher temperature of the inner pane // Int. J. Thermal Science. – 2001. – V. 5. – № 2. – P. 15–22. [Вентиляция внутренней прослойке окна, приводящая к повышению температуры внутреннего стекла].
10. Гныря А.И., Низовцев М.И., Петров Е.В., Терехов В.И. Свидетельство на полезную модель. № 24495. Оконный блок. 10 августа 2002 г.
11. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние расхода воздуха на тепловые характеристики вентилируемого окна // Известия Вузов. Строительство. – 2001. – № 1. – С. 66–69.
12. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Тепловые характеристики окон с тройным остеклением при естественной вентиляции внутренней межстекольной прослойки // Известия Вузов. Строительство. – 2001. – № 7. – С. 70–73.
13. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Терехов В.В., Терехов В.И. Исследование теплообмена вентилируемого окна // Промышленная теплотехника. – 2002. – № 2–3. – С. 40–44.
14. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние толщины межстекольной прослойки на эффективность работы вентилируемого окна // Известия Вузов. Строительство. – 2001. – № 9–10. – С. 84–87.
15. Грищенко В.В., Низовцев М.И., Терехов В.В., Терехов В.И. Математическое моделирование теплообмена в межстекольном промежутке окна // Известия Вузов. Строительство. – 2002. – № 7. – С. 120–127.
16. Мапохов Д.В., Низовцев М.И., Терехов В.И., Терехов В.В. Определение теплозащитных характеристик теплоинерционных ограждающих конструкций зданий // Известия Вузов. Строительство. – 2002. – № 7. – С. 72–75.
17. Низовцев М.И., Терехов В.И. Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С. 44–54.
18. Низовцев М.И., Терехов В.И., Яковлев В.В. Влияние сорбционного увлажнения автоклавного газобетона на его теплопроводность // Известия Вузов. Строительство. – 2004. – № 6. – С. 31–36.
19. Низовцев М.И., Терехов В.И., Яковлев В.В. Теплопроводность газобетона повышенной влажности // Известия Вузов. Строительство. – 2004. – № 9. – С. 36–38.

20. Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Распространение теплового фронта при капиллярной пропитке пористых материалов // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С. 39–43.
21. Низовцев М.И., Станкус С.В., Терехов В.И., Хайрулин Р.А., Стерлягов А.Н. Экспериментальное определение коэффициента диффузии влаги газобетона гамма-методом // Известия Вузов. Строительство. – 2002. – № 4. – С. 123–127.
22. Низовцев М.И., Станкус С.В., Терехов В.И., Хайрулин Р.А., Стерлягов А.Н. Измерение коэффициента диффузии влаги газобетона гамма-методом при сорбционном увлажнении // Известия Вузов. Строительство. – 2003. – № 4. – С. 16–120.
23. Низовцев М.И. Дисковый теплообменник / Низовцев М.И., Терехов В.И., Яворский А.И. // Патент на изобретение № 2255282 от 27 июня 2005.
24. Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Верификация модели расчета сопряженного тепло- и влагопереноса при увлажнении газобетона // Известия Вузов. Строительство. – 2008. – № 1. – С. 104–109.
25. Низовцев М.И. Экспериментальное исследование динамических и тепловых характеристик дискового вентилятора-регенератора тепла вентиляционного воздуха // Известия Вузов. Строительство. – 2007. – № 10. – С. 46–50.
26. Низовцев М.И. Влияние толщины межстекольной прослойки на теплоизолирующие свойства // Журнал “Светопрозрачные конструкции”. – 2001. – № 4. – С. 3–4.
27. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К. Межрамные экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями // Светопрозрачные конструкции. – 2005. – № 2. – С. 32–33.
28. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П. Влияние физических параметров на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла отопительных приборов // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2005. – № 5. – С. 36–40.
29. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К., Гаврилов В.П., Федоринин В.Н. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями // Современные окна Сибири и Дальнего Востока. – 2005. – № 1. – С. 34–35.
30. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К., Гаврилов В.П., Федоринин В.Н. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями // Современные окна Сибири и Дальнего Востока. – 2005. – № 2. – С. 28–29.
31. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К., Гаврилов В.П., Федоринин В.Н. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями // Современные окна Сибири и Дальнего Востока. – 2005. – № 3. – С. 26–27.
32. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П. Влияние режимных параметров и направления подачи теплоносителя на работу регистраторов расхода тепла // Энергосбережение и энергоэффективность экономики Кузбасса. – 2006. – №4/15. – С. 59–61.
33. Низовцев М.И., Терехов В.И., Яковлев В.В. Оптимизация рабочих параметров определения теплопроводности теплоизоляционных материалов методом «горячей проволоки» // Труды НГАСУ. – 2002. – Т. 5. – № 3 (18). – С. 50–54.

34. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Рудяк В.Я., Терехов В.И. Теплопередача через вентилируемые окна. Обзор экспериментальных исследований // Труды НГАСУ. 1999. – Т. 2. – №4 (7). – С. 108–117.
35. Низовцев М.И., Терехов В.И., Гныря А.И., Петров Е.В. Экспериментальное исследование влияния тепловыделения в межстекольном пространстве на тепловые характеристики окна // Труды ММФ. – 2000. – Т. 1. – С. 369–375.
36. Захарченко В.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Определение сопротивления теплопередаче теплоинерционных элементов ограждающих конструкций зданий в условиях нестационарного // Сборник докладов V научно-практической конференции “Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях, НИИСФ, Москва. – 2000. – С. 287–292.
37. Матюхов Д.В., Низовцев М.И., Терехов В.И., Терехов В.В. Определение теплозащитных характеристик теплоинерционных конструкций в условиях нестационарного теплообмена // Третья Российская национальная конференция по теплообмену, октябрь 2002 г. – Т. 7. – С. 184–187.
38. Матюхов Д.В., Низовцев М.И., Терехов В.И., Терехов В.В. Особенности определения тепловых характеристик теплоинерционных ограждающих конструкций зданий в реальных условиях / Первая Всероссийская школа-семинар “Энергосбережение – теория и практика” 15–18 апреля 2002 г. – М., МЭИ. – С. 95–97.
39. Стерлягов А.Н., Низовцев М.И., Терехов В.И. Влияние температуры пористого материала на влагоперенос при высокой влажности воздуха // Труды четвертой российской национальной конференции по теплообмену. – М., 2006. – Т. 6. – С. 121–124.
40. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П., Кротов С.В., Серов А.Ф. Регистраторы расхода тепла для квартирного учета в многоквартирном жилом доме // 3-я Международная научно-практическая конференция. Теплосиб-2004. Проблемы коммерческого учета теплоносителей. – Новосибирск. – 2004. – С. 51–56.
41. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П. Экспериментальное исследование влияния основных физических факторов на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла. // Проблемы коммерческого учета теплоносителей. Материалы 4 международной научно-практической конференции “ТЕПЛОСИБ 2005”. – С. 22–29.
42. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П. Особенности применения регистраторов расхода тепла // Программа энергоэффективности и энергобезопасности Новосибирской области, Сборник обосновывающих материалов. – Новосибирск. – 2005. – Вып. 1. – С. 299–305.
43. Низовцев М.И., Терехов В.И., Чепурная З.П. Влияние физических параметров на работу регистраторов расхода тепла // Материалы докладов национальной конференции по теплоэнергетике, 4–8 сентября 2006 г. – Казань. 2006. – Т. 2. – С. 188–191.

44. Низовцев М.И., Терехов В.И., Митасов В.М., Бондаренко П.Н. Комплексное определение сопротивлений теплопередаче элементов ограждающих конструкций зданий и сооружений // *Материалы международного научно-технического семинара "Нетрадиционные технологии в строительстве"*, май 1999 г. – Томск. 1999. – С. 23–24.
45. Низовцев М.И. Экспериментальные и теоретические исследования дисковых роторных теплообменников для утилизации тепла вентиляционного воздуха // *Материалы Всероссийской научно-практ. конф. "Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии – энергетические, экологические и технологические проблемы экономики"*, октябрь. – Барнаул. – 2007. – С. 51–52.
46. Nizovtsev M.I., Terechov V.I. Fenestration Products with Adjustable Heat-protective Characteristics // *Proceedings The First International Conference on Building Energy and Environment. – Dalian, China. – July 13–16 2008. – P. 1780–1787.* [Светопрзрачные конструкции с регулируемыми теплозащитными характеристиками].
47. Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I. Determination of Moisture Diffusivity in Porous Building Materials Using Gamma-method // *Proceedings The First International Conference on Building Energy and Environment. – Dalian, China, – July 13–16 2008. – P. 1788–1795.* [Определение влагопереноса в пористых строительных материалах с использованием гамма-метода].
48. Низовцев М.И. Определение теплозащитных характеристик двухслойных теплоинерционных ограждающих конструкций зданий // *Материалы второй Всероссийской Научно-практ. Конф. С Международным участием "ЭЭТПЭ-2008"*. – Барнаул, октябрь.– 2008. – С. 158–161.
49. Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Новые бесконтактные методы исследования тепло- и массообмена в пористых средах// *Труды XVII Школы-семинара "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях"*.– Жуковский. – 2009 – С. 134-136.
50. Низовцев М.И., Терехов В.И.// *Исследование новых светопрзрачных конструкций с регулируемыми тепловыми характеристиками// Труды 5-ой Национальной конференции по теплообмену, Москва. – 25-29 октября 2010. – М.: Изд-во МЭИ (ТУ). – Т. 2, – С. 114 -121.*