

На правах рукописи



МАЛЬЦЕВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРАХ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА**

Специальность 05.23.01– Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пенза – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
БЕРЕГОВОЙ Александр Маркович

Официальные оппоненты: **ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
общеобразовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный
технический университет», профессор кафедры
«Архитектура и строительство зданий»
СЕМЕНОВА Эльвира Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
общеобразовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующая кафедрой «Проектирование
зданий и сооружений».

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное
общеобразовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»**

Защита состоится 19 декабря 2014 года в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Г.Титова, дом 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/43-malcev-aleksey-viktorovich>.

Автореферат разослан 20 октября 2014 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Бакушев Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С конца XX века наблюдается постоянный рост цен на углеводородное сырьё, что послужило стимулом для проведения широкого фронта научных исследований в строительстве по разработке способов и методов экономии энергоресурсов.

Однако, действующая система нормативных документов и расчетов по тепло–массопереносу через наружное ограждение и по формированию микроклимата помещений не учитывает в полной мере всей сложности и комплексности решения задач по энергосбережению и созданию экологически чистой воздушной среды в помещениях энергоэффективного здания, а ошибки в проектировании, дефекты в строительстве, неграмотная эксплуатация элементов тепловой защиты и устройств по естественной вентиляции помещений существенно усугубляют решение этих задач. Поэтому существует необходимость в более точной оценке уровня энергоэффективности наружных ограждений, основанной на учете специфики протекания физических процессов тепло-массопереноса через толщу ограждений в конкретных условиях эксплуатации зданий.

Цель работы: повышение теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций путём совершенствования методик расчета параметров тепло-массопереноса.

Задачи исследования:

1. Провести натурные исследования состояния тепловой защиты ограждающих конструкций, особенностей их конструктивных решений, влияющих на теплофизические показатели массопереноса.

2. Выполнить анализ воздействия климатических факторов на температурно-влажностные характеристики и воздухопроницаемость наружных ограждений, а также дать оценку теплофизическим свойствам новых строительных материалов, разработанных в Пензенском ГУАС для региональных условий Среднего Поволжья.

3. Выполнить теоретическое исследование процессов влагопереноса и воздухопроницания через наружное ограждение, влияющих на здание как на единую энергетическую и экологическую систему.

4. Разработать методику оценки тепловых потерь через наружное ограждение с увлажнёнными конструктивными слоями при фазовых переходах влаги.

5. Разработать методику оптимизации процесса инфильтрации воздуха через ограждающую конструкцию с целью экономии тепловых потерь при регулировании воздухообмена в помещениях.

6. Развить существующие способы утилизации тепла уходящего воздуха посредством устройства вентилируемой воздушной прослойки в конструкции ограждения.

7. Создать программные продукты, основанные на разработанных расчётных моделях по регулированию параметров тепло-массопереноса с целью получения эффекта энергосбережения.

Объект исследования: наружные ограждающие конструкции жилых зданий.

Предмет исследования: процессы тепло-массопереноса, обеспечивающие повышение тепловой эффективности наружных ограждающих конструкций и требуемые условия микроклимата помещений.

Методы исследования включали: натурные исследования тепловой защиты зданий (выявление и анализ повреждений тепловой защиты ограждающих конструкций и инженерных систем, измерение параметров микроклимата помещений), физико-математическое моделирование и численные эксперименты процессов тепло-массопереноса через наружные ограждающие конструкции (теплопередача, воздухо- и влагопередача).

Научная новизна:

-получены расчётные зависимости сопротивления теплопередаче увлажнённого слоя

наружных ограждений, находящегося в зоне отрицательных температур, и теплопотерь через эти конструкции от объёмной влажности и плотности материала;

-усовершенствована методика определения коэффициента теплопроводности материала этого конструктивного слоя при фазовых переходах влаги;

-уточнены закономерности экономайзерного эффекта в наружной ограждающей конструкции;

-разработана методика энергосбережения на основе оптимизации процесса инфильтрации воздуха в холодный период года с учётом экономайзерного эффекта;

-разработана методика энергосбережения для одного из способов утилизации тепла наружным ограждением с вентилируемой воздушной прослойкой.

Теоретическая и практическая значимость работы:

-получены фактические теплозащитные характеристики наружных ограждений многоэтажных жилых зданий г.Пензы и параметры микроклимата помещений, послужившие основой для разработки методик энергосбережения;

-разработаны программные продукты для ЭВМ по расчёту и нахождению оптимальных параметров тепломассопереноса через наружное ограждение, которые позволяют получить энергосберегающий эффект;

-разработана методика определения теплопотерь через наружное ограждение, учитывающая увеличение коэффициента теплопроводности увлажнённого слоя, находящегося в зоне отрицательных температур;

-разработана методика энергосбережения и оптимизации процесса инфильтрации воздуха в холодный период года на основе экономайзерного эффекта;

-разработана методика определения количества утилизируемого тепла для варианта конструктивного решения наружной стены с вентилируемой воздушной прослойкой;

-выявлены возможности совершенствования существующих методик повышения энергосберегающей функции наружных ограждений, основанные на учёте специфики протекания физических процессов тепломассопереноса через толщу ограждений в конкретных условиях эксплуатации зданий.

Результаты исследований использованы и внедрены при строительстве, реконструкции и повышении тепловой защиты жилых зданий г.Пензы, проводимых МУП «Пензгорстройзаказчик», в конструктивных решениях наружных ограждений и инженерных систем, проектируемых ОАО «Приволжское КБ по архитектурно-строительным системам и новым технологиям им. А.А. Якушева», а также в ООО «Гражданпроект».

На основе разработанных моделей и методик созданы программные продукты «Теплопроводность увлажнённого материала при отрицательных температурах» и «Утилизация тепла наружным ограждением».

Разработанные методики энергосбережения и программные продукты для ЭВМ внедрены в учебный процесс при подготовке курсов лекций и практических занятий, в курсовом проектировании инженеров и бакалавров по направлению «Строительство».

Достоверность результатов, полученных при проведении натурных и лабораторных исследований, численных экспериментов обеспечивалась использованием современных методов и средств измерений, аппаратов математического моделирования и обоснована применением классических положений теории тепломассопереноса.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования уровня тепловой защиты эксплуатируемых жилых зданий и измерений параметров микроклимата помещений эксплуатируемых жилых зданий в г.Пенза.

2.Методика оценки тепловых потерь через наружное ограждение с увлажнёнными конструктивными слоями при фазовых переходах влаги.

3.Методика оптимизации процесса инфильтрации воздуха через ограждающую конструкцию с целью экономии тепловых потерь в процессе регулирования воздухообмена в помещениях.

4.Закономерности, возникающие при экономайзерном эффекте.

5.Оценка энергосберегающего эффекта в способе утилизации тепла наружным ограждением с вентилируемой воздушной прослойкой.

6. Программные продукты, основанные на разработанных методиках.

Апробация работы: основные результаты исследования докладывались и обсуждались на:

- международной научно-практической конференции «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах» (Пенза, 2009);

- международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и современных методов строительства» (Пенза, 2011);

- международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и методов строительства» (Пенза, 2012);

- международной научно-технической конференции «Энергоэффективность, энергосбережение и экология в городском строительстве и хозяйстве» (Пенза,2013);

- международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза,2013);

- международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций» (Пенза,2013);

- региональном молодёжном форуме «Открытые инновации - вклад молодёжи в развитие региона» (Пенза,2013).

Результаты научной работы автора выставлялись на XIV межрегиональной специализированной выставке «Строительство. Ремонт. Коммунальное хозяйство» (Пенза,2011) в виде проекта «Энергоэффективные здания для региональных условий» и были награждены дипломом оргкомитета выставки.

По результатам исследования опубликованы 1 монография и 19 научных статей, в том числе 8 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов по результатам исследований, списка литературы из 172 наименований. Объём диссертации составляет 155 страниц, содержит 59 рисунков, 11 таблиц. Имеет 7 приложений, изложенных на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, представлено теоретическое и практическое значение полученных результатов.

В первой главе рассмотрен ход развития основных принципов энергосберегающих решений в отечественной и зарубежной практике строительства, дан анализ законодательных документов Российской Федерации по энергосбережению и строительных норм по тепловой защите зданий, а также результатов исследований по созданию эффективных теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов, в том числе разработанных в Пензенском ГУАС.

В приложениях к диссертации показаны возможные области применения и конструктивные решения наружных ограждений с использованием полученных теплоизоляционных материалов, отличающихся большей экологичностью и меньшей стоимостью по сравнению с промышленными аналогами. Приведен краткий обзор исследований по созданию расчётных моделей и разработке методов решения задач при проектировании наружных ограждений энергоэффективных зданий.

Современное состояние проблемы повышения энергосберегающей функции наружных ограждающих конструкций зданий базируется на исследованиях и достижениях отечественных учёных Фокина К.Ф., Шкловера А.М., Франчука А.У., Лыкова А.В., Богословского В.Н., Ушкова Ф.В., Ильинского В.М., Хлевчука В.Р., Гагарина Г.В., Табунщикова Ю.А., Аверьянова В.К., Иванова Г.С., Бодрова В.И., Езерского В.А., Монастырева П.В., Куприянова В.Н., Берегового А.М., Ливчака В.И., Семеновой Э.Е., Самарина О.Д., Селиванова Н.П., Матросова Ю.А. и др., а также зарубежных ученых - Даффи Дж., Клейна С., Бекмана У., Зоколя С.В., Андерсона Б., Харкнесса Е., Мехта М. и др.

Выполненный анализ отечественных и зарубежных научных достижений по теме диссертации позволил установить следующие актуальные задачи повышения энергоэффективности наружных ограждающих конструкций, требующие проведения дальнейших исследований:

- недостаточно исследована тепловая эффективность увлажненных конструктивных слоев наружных стен в холодные периоды их эксплуатации;
- не до конца исследован и в общепринятой методике расчета не учитывается так называемый экономайзерный эффект, возникающий в капиллярно-пористой структуре наружного ограждения и обеспечивающий энергосбережение за счет уменьшения количества поступающего в помещение холодного вентиляционного воздуха через приточные отверстия
- не полностью раскрыт потенциал энергоактивности наружных ограждений по утилизации теплового потока, уходящего через их толщу.

Во второй главе представлены результаты натурных исследований тепловой защиты и параметров микроклимата помещений многоэтажных жилых домов г.Пензы.

Результаты натурных исследований многоэтажных жилых домов показали, что на ряде объектов:

-конструкции наружных стен имеют высокую (не контролируемую) воздухопроницаемость по причине плохой герметичности стыковых соединений стен и плит наружного утеплителя, а также из-за пустошовки кирпичных стен. Это приводит к переувлажнению материала ограждений, появлению влажных пятен, изморози и плесени на внутренней поверхности стен, а также к дополнительным теплотерям в зимнее время. По этой причине и из-за плохого состояния кровель измеренная весовая влажность материала вблизи наружной поверхности стен обследованных зданий находилась в пределах: для кирпича глиняного обыкновенного 5–12%, для пенобетона 10–30%, для шлакобетона 7–9,5%, что в несколько раз превышает предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги для этих материалов;

-наружные стены поэтажной кладки из кирпича и пенополистирола в домах по серии 125 (ул. Ладожская, Онежская, Антонова) отличаются весьма малой воздухопроницаемостью, что в сочетании с герметичными стеклопакетами и отсутствием автоматически регулируемых приточных отверстий способствует формированию слабого воздухообмена помещений и резкому повышению относительной влажности внутреннего воздуха. По данным инструментальных измерений фактический воздухообмен в помещениях квартир составляет только часть от требуемого значения по нормам (например, для 2-комнатной квартиры при микрощелевом проветривании 23 – 34%, при открытии створки окна до упора на горизонтальной оси 34 – 46%) и то при условии одновременного и долговременного открытия жильцами створок окон в квартирах, расположенных

по высоте здания, с одним и тем же магистральным вытяжным каналом.

Соблюдение этого условия, как показали обследования, по ряду причин оказалось трудновыполнимым и носило случайный характер.

Это указывает на то, что обследованные дома имеют все признаки синдрома "больного" здания ("Sick house"), в отличие от энергоэффективного типа здания, в котором по определению должен быть обеспечен не только минимальный расход тепловой энергии, но и комфортные условия микроклимата его помещений.

С целью учета воздействия климатических факторов на процессы теплопереноса через наружные ограждения был выполнен анализ климатограмм для Пензенского и ряда других регионов 2-го климатического района, который показал, что на этих территориях отмечаются значительные амплитуды колебаний температуры наружного воздуха и упругостей водяного пара воздушных сред по обе стороны наружного ограждения. Это указывает на возможность интенсивной передачи и накопления парообразной влаги в толще ограждения, а также на большую вероятность фазовых переходов влаги в структуре материала ограждения со стороны наружной поверхности.

Проведенный анализ состояния отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации и анализ результатов выполненных натурных обследований позволили уточнить цель и конкретизировать задачи диссертационной работы.

В третьей главе представлены результаты теоретического исследования изменения коэффициента теплопроводности увлажнённого слоя наружного ограждения при фазовых переходах влаги. Данное исследование основано на расчётном моделировании физических процессов теплопереноса в ограждающих конструкциях.

В задачу исследования входили:

1. Оценка теплопроводности увлажнённого материала наружного ограждения в конструктивном слое с отрицательной температурой.

2. Определение термического сопротивления наружной стены, и разработка методики определения тепловых потерь с учётом промерзания материала слоя.

Необходимость проведения данного исследования вызвана тем, что в строительных нормах и правилах по теплотехническому проектированию наружных ограждающих конструкций теплопроводность материала определяют по условиям эксплуатации А или Б, которые устанавливаются раз и навсегда на весь длительный период эксплуатации здания, и практически не оценивают теплопроводность переувлажнённого материала, а также ее зависимость от фазовых превращений влаги в его капиллярно-пористой структуре при теплопереносе. Как показали проведенные натурные исследования, к переувлажнению материала ограждающих конструкций приводят ошибки на этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий (недостаточный учет климатических факторов района строительства, не оптимальное взаиморасположение их конструктивных слоев др.). С наступлением периода низких температур наружный слой увлажнённых конструкций ограждений подвергается промерзанию на определенную толщину δ_z , которая меняется во времени. Процессы теплообмена в таких конструкциях связаны с фазовыми превращениями влаги (льдообразованием, таянием, испарением, конденсацией). Это вызывает заметные изменения теплофизических показателей материалов, теплового баланса в ограждении, постепенное снижение прочностных характеристик конструкции.

В результате проведенного исследования была разработана методика оценки теплопроводности увлажнённого наружного ограждения, материал которого подвергся промерзанию на определенную глубину в период резкого похолодания.

По Лыкову А.В. и Богословскому В.Н., теплота льдообразования g в капиллярах и порах

материала на границе промерзания конструкции определяется по уравнению теплового баланса:

$$r \cdot i \cdot u_{\text{ж}} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{d\delta_3}{dz} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial t_3}{\partial x} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{\partial t_{\text{в}}}{\partial x}, \quad (1)$$

которое на границе мёрзлой и влажной зон, исходя из условий стационарной теплопередачи, имеет вид:

$$\lambda_3 \cdot \frac{t_3^I - t_{\text{н}}}{\delta_3} - \lambda_{\text{в}} \cdot \frac{t_{\text{в}} - t_3^I}{\delta - \delta_3} = 0, \quad (2)$$

для продолжительного и медленного характера изменения низких температур, когда скорость

продвижения границы промерзания $\frac{\partial \delta_3}{\partial z} \rightarrow 0$, а величина r пренебрежительно мала.

В уравнении (2) λ_3 , $\lambda_{\text{в}}$, t_3 , $t_{\text{в}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности материала и его температура в мерзлой и влажной зонах наружного ограждения; $u_{\text{ж}}$ – влажность материала; i – доля замерзающей влаги; γ_0 – плотность материала в сухом состоянии, t_3^I – температура начала замерзания влаги.

Из уравнения (2) коэффициент теплопроводности материала в зоне промерзания конструкции для однослойного однородного ограждения составит величину:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_{\text{в}}(t_{\text{в}} - t_3^I) \cdot \delta_3}{(t_3^I - t_{\text{н}}) \cdot (\delta - \delta_3)} \quad (3)$$

Теплопроводность материала влажной зоны конструкции в последней формуле принимается по известным экспериментальным или расчетным данным, а максимально возможная глубина зоны промерзания может быть приближенно определена по методу расчета температур в толще ограждения.

Установлены расчетные зависимости теплопроводности некоторых распространенных местных материалов от влажности этих материалов в зоне промерзания при температуре наружного воздуха -25°C (рис.1). На этих же графиках показаны экспериментальные значения теплопроводности материалов при отрицательных температурах по данным Франчука А.У.

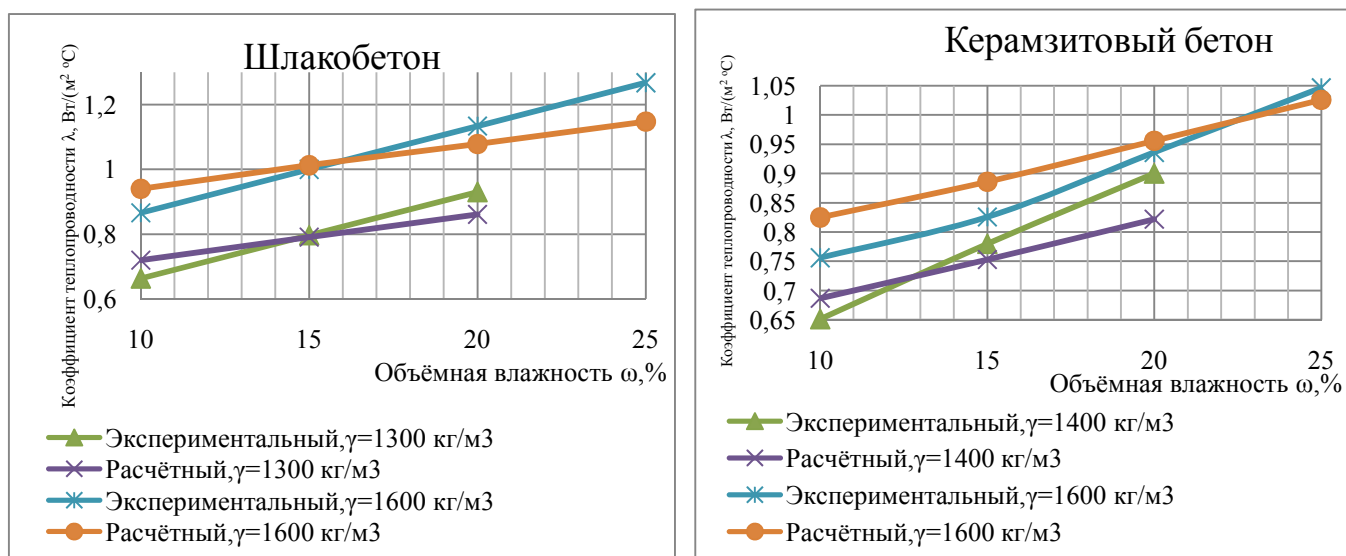


Рис.1. Расчетные и экспериментальные зависимости теплопроводности некоторых распространенных местных материалов в зоне промерзания от объёмной влажности этих материалов

Проведенное исследование позволило установить, что в условиях резкого падения температур наружного воздуха через увлажненные наружные ограждающие конструкции значительно увеличиваются тепловые потери, которые могут на 10-21% превышать их величину, найденную по нормам теплотехнического проектирования, в зависимости от влажности и материала стены (рис.2).

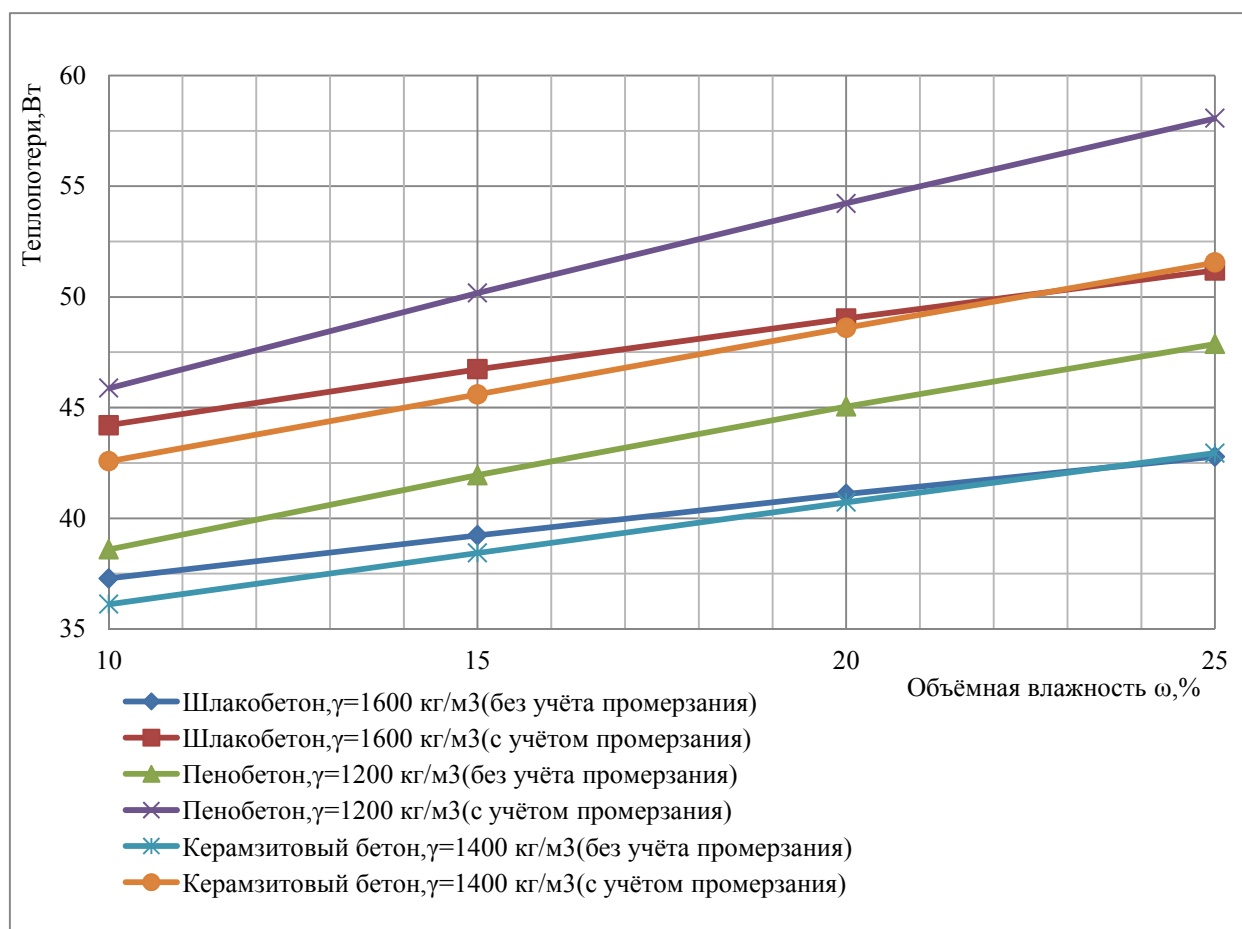


Рис.2. Полученные зависимости теплопотери от объемной влажности и плотности для шлакобетона, пенобетона, керамзитового бетона

В ходе исследования для рассмотренных материалов был введен коэффициент корреляции (шлакобетон-1,2; пенобетон-1,25; керамзитовый бетон-1,1), что обусловлено сложными процессами, происходящими в порах материала, и увеличением теплопроводности воды в тонкоплёночном состоянии. С учетом введенного коэффициента полученные расчетные значения показывают хорошую сходимость (2-10%) с экспериментальными данными. Это позволило расширить условия применения разработанной расчетной модели:

1. Шлакобетон:

-для объемной влажности от 10 до 20%;

2. Пенобетон:

-для объемной влажности от 10 до 25%;

3. Керамзитовый бетон:

-плотностью 1200, 1400 кг/м³ - для объемной влажности от 10 до 20%;

-плотностью 1600 кг/м³ - для объемной влажности от 10 до 25%;

4. Пеносиликальцит:

-для объемной влажности от 10 до 30%;

5. Кирпич силикатный:

-плотностью 1700,1800кг/м³- для объёмной влажности от 5 до 15%;

-плотностью 2000 кг/м³- для объёмной влажности от 5 до 10%;

6. Кирпич красный:

-для объёмной влажности от 5 до 20%;

По разработанной методике создан программный продукт «Теплопроводность увлажнённого материала при отрицательных температурах» на языке Visual Basic.

В четвёртой главе представлены результаты, полученные при разработке методики регулируемого процесса инфильтрации воздуха через ограждающую конструкцию, основанной на экономайзерном эффекте, с целью экономии тепловых потерь.

Проведенное натурное исследования многоэтажных домов показало, что в них нарушена одна из основных функций энергоэффективного здания - необходимость обеспечения комфортного микроклимата помещений по причине установки герметичных стеклопакетов, высокого сопротивления воздухопроницанию конструкций наружных стен и плохой работы системы естественной вентиляции. В таких условиях появляется необходимость в поисках архитектурно-конструктивного решения наружных ограждений, позволяющего увеличить объёмы приточного вентиляционного воздуха и снизить затраты энергии на его обогрев в холодное время года при минимальных расходах материально-технических ресурсов.

Поэтому разработка инновационного решения по регулированию процесса теплопереноса, в том числе воздухопроницания через наружное ограждение, позволяющего создать конструкцию "дышащей" стены, и была поставлена в качестве одной из задач диссертационного исследования.

В процессе решения этой задачи была разработана расчетная модель и методика оценки энергосбережения, основанная на экономайзерном эффекте. Концепция разработанной модели заключается в том, что в процессе подогрева инфильтрующегося воздуха тепловым потоком, движущимся в обратном направлении из отапливаемого помещения, в последнее поступает некоторый объем относительно подогретого вентиляционного воздуха, что позволяет уменьшить объем его поступления через традиционные приточные отверстия на некоторую величину. Рассчитанный по этой методике энергосберегающий эффект заключается в количестве тепловой энергии, затрачиваемой на подогрев этой разницы объемов воздуха до комнатной температуры.

Таким образом, результат этого исследования направлен на создание энергосберегающей "дышащей" стены. При относительно большом количестве инфильтрующегося воздуха через пористую структуру наружного ограждения минимизируются тепловые потери помещения, так как на нагрев наружного вентиляционного воздуха затрачивается большое количество тепла, поступающего из отопительной системы или от механической приточной системы с подогревом.

Такая повышенная величина инфильтрации может превышать ее нормативное значение для наружных стен, однако это значение было введено в нормы с целью уменьшения неконтролируемой воздухопроницаемости через наружные ограждения. В нашем же случае регулируемые параметры воздухопроницания стены взаимосвязаны с параметрами аэрации и кратностью воздухообмена помещений.

Оценка точной величины этого эффекта энергосбережения представляется сложной математической задачей, связанной с решением полной системы дифференциальных уравнений тепло-массопереноса и определением потенциалов переноса тепла и массы. С целью упрощения этой задачи разработали расчетную модель и методику оценки эффекта энергосбережения при инфильтрации, основу которых составили уравнения строительной теплофизики при стационарных условиях теплопереноса.

Объектом исследования выбрана конструкция наружной стены с воздухопроницаемой капиллярно–пористой структурой, заданными значениями сопротивления воздухопроницанию и общего сопротивлением теплопередаче.

В ходе разработки модели и методики энергосбережения последовательно находили:

- сопротивление воздухопроницанию ограждения $\sum R_u = R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$;
- общее сопротивление теплопередаче $R_o = 1/\alpha_b + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_n$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- разницу давлений воздуха по обе стороны ограждения с наветренной стороны ниже нейтральной зоны здания $\Delta P = -0,8 \cdot \left[-g \cdot (\gamma_n - \gamma_b) \cdot (0,7 \cdot h \cdot m - \frac{h}{2}) - 0,6 \frac{(0,6 \cdot v)^2 \cdot \gamma_n}{2} \right]$, Па;
- количество инфильтрующегося через стену воздуха $w_{инф} = \Delta P / \sum R_u$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
- температуру на внутренней поверхности ограждения $t_b = t_n + (t_b - t_n) \cdot \frac{e^{0,28 W_{инф} \cdot R} - 1}{e^{0,28 W_{инф} \cdot R_0} - 1}$, °C ;
- тепловой поток на внутренней поверхности ограждения $q_{инф} = \frac{0,28 \cdot W_{инф} \cdot e^{0,28 W_{инф} \cdot R}}{e^{0,28 W_{инф} \cdot R_0} - 1} \cdot (t_b - t_n)$; $\text{Вт}/\text{м}^2$;
- дополнительные теплотери при наличии инфильтрации $q_{доп} = q_{инф} - q$, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
- количество тепла Q_o , затрачиваемого на подогрев полученной разницы в расходах воздуха, т.е., энергосберегающий эффект $Q_o = Q_{вент} - Q_{\Delta w_{вент}} + Q_{\Delta w_{инф}} + Q_{\Delta w_{инф}^{доп}}$, Вт;
- экономайзерный эффект $\Delta = \frac{Q_{вент} - Q_o}{Q_o} \cdot 100\%$.

В расчет вводили две поправки: первую как часть трансмиссионного тепла, затрачиваемого на обогрев инфильтрующегося воздуха в поровом пространстве конструкции, и вторую на дополнительное тепло, которое потребуется на подогрев инфильтрационного объема воздуха до температуры воздуха помещения.

Численный эксперимент экономайзерного эффекта энергосбережения проводили на примере помещения площадью 12 м^2 , расположенного на первом этаже 12-и этажного жилого дома.

Проанализировав полученные результаты и выявив основные факторы влияния, были установлены закономерности проявления экономайзерного эффекта в капиллярно-пористой структуре материала наружной стены (рис.3,4).

Эффект уменьшается снизувверх по мере приближения этажа к нейтральной оси здания. Наибольших значений он достигает на нижних этажах рассмотренного 12–этажного здания.

Таким образом, разработанная методика регулируемого процесса инфильтрации воздуха через крупнопористый материал ограждающей конструкции обеспечивает экономию тепловых потерь в энергетической и экологической системе многоэтажного здания. В частности, эффект энергосбережения составил в помещениях нижнего этажа рассмотренного здания при $\Delta P = 44,77$ Па для конструкций стен:

- из кирпичной кладки на цементно-шлаковом растворе – 13% (при $\sum R_u = 29 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$, $R_o = 1,025 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- из крупнопористого керамзитобетона плотностью – 16% (при $\sum R_u = 35 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$, $R_o = 1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);
- из шлакопемзобетона – 18% (при $\sum R_u = 20,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$, $R_o = 0,873 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$);

Рассмотренный способ энергосбережения основан на использовании в наружных ограждениях относительно воздухопроницаемых материалов. Меньшая чем у стен с эффективными

утеплителями теплоизолирующая способность, во-первых, окупается в этих ограждающих конструкциях более низкими затратами на их капитальный и текущий ремонты, поскольку они отличаются большими сроками службы, а, во-вторых, компенсируется комплексом эксплуатационных свойств, позволяющих формировать экологически чистую и комфортную среду проживания. Главным преимуществом таких конструкций является возможность регулирования их воздухопроницаемости, что способствует стабильному воздухообмену помещений и благоприятным экологическим параметрам внутренней среды проживания без постоянного использования специальных приточных отверстий, подающих холодный зимой воздух, отбирающий тепло внутренней воздушной среды.

Экономический эффект внедрения способа энергосбережения с использованием экономайзерного эффекта для 12-этажного дома с площадью этажа 1.000 м² составляет для стен:

- из керамзитобетона плотностью 900 кг/м³ – 110 тыс.руб.;
- из шлакопемзобетона – 157 тыс.руб.;
- из кирпичной кладки на цементно-шлаковом растворе в помещениях – 90 тыс.руб.

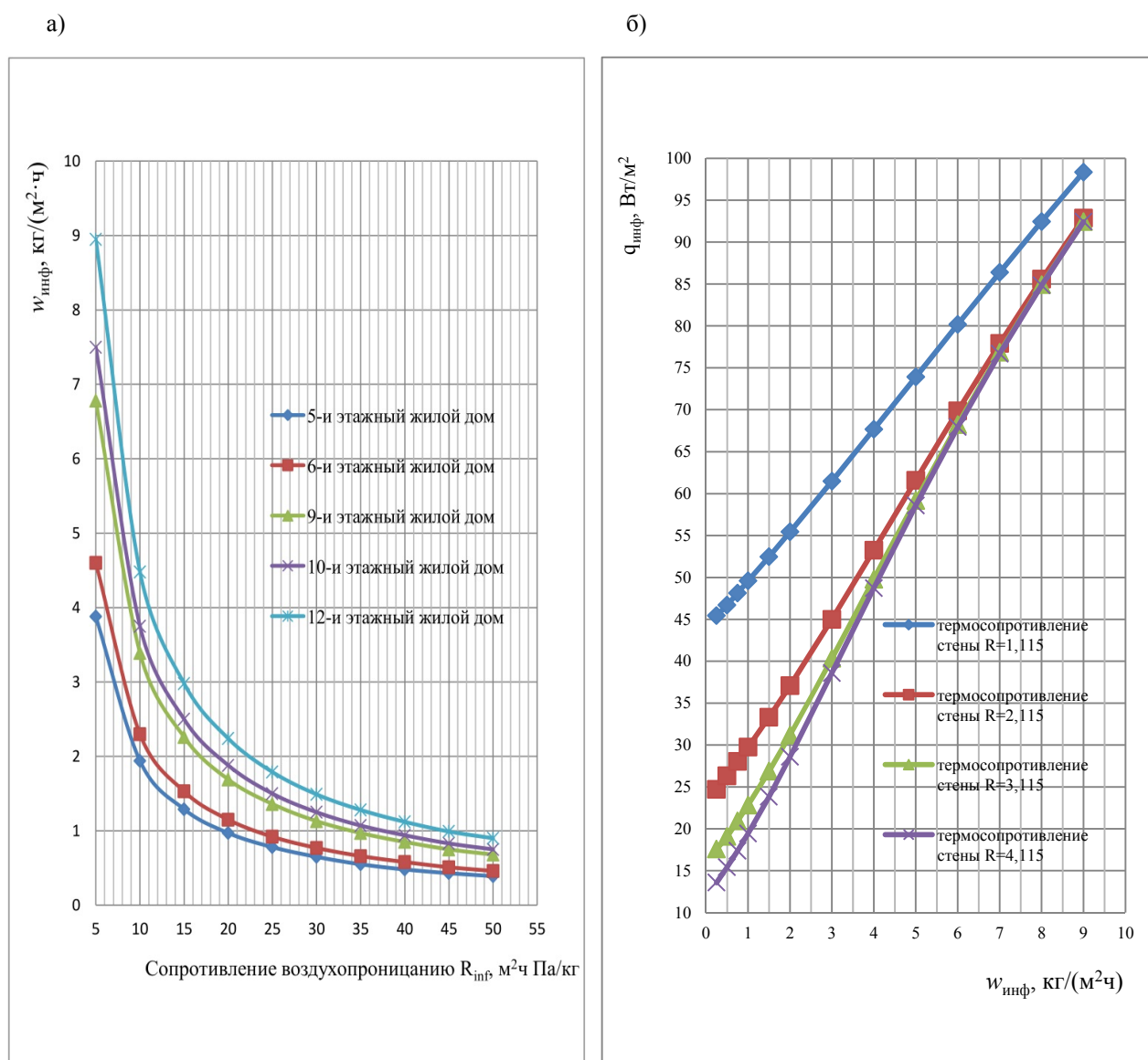


Рис.3. а) зависимость количества инфильтрующегося воздуха $w_{инф}$ от сопротивления воздухопроницанию; б) зависимость теплового потока на внутренней поверхности наружной стены $q_{инф}$ от количества инфильтрующегося воздуха

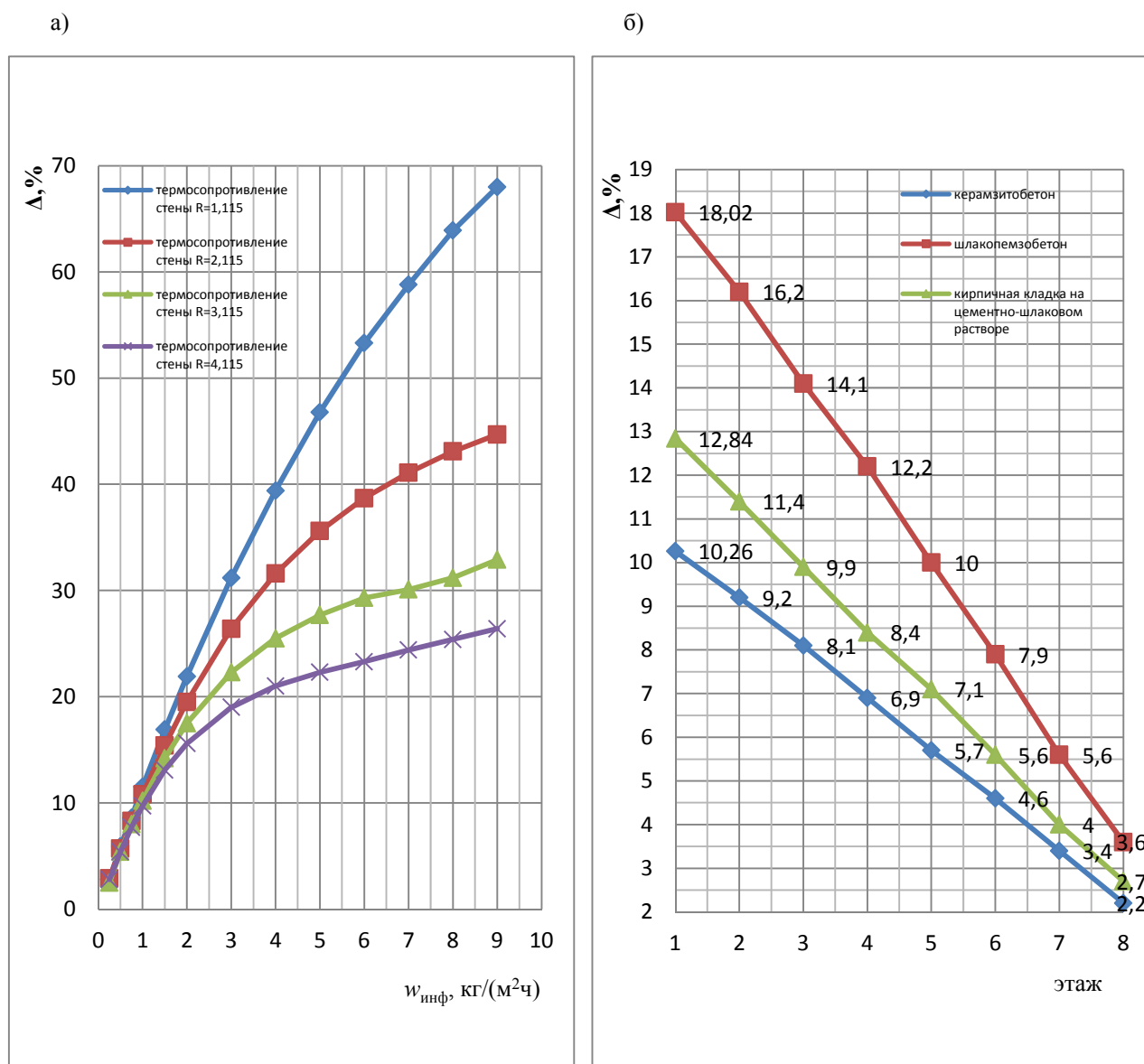


Рис.4. а) зависимость экономайзерного эффекта от количества инфильтрующегося воздуха; б) зависимость экономайзерного эффекта по высоте 12-этажного здания для кирпичной кладки на цементно-шлаковом растворе плотностью 1700 кг/м³; для крупнопористого керамзитобетона плотностью 900 кг/м³; для шлакопемзобетона плотностью 1500 кг/м³

В пятой главе исследовался вариант подогрева приточного воздуха в наружной стене, имеющей вентилируемую прослойку, тепловым потоком, уходящим из помещения через массив этой конструкции.

Опыт эксплуатации зданий показывает, что наружные ограждения с вентилируемыми воздушными прослойками превосходят сплошные конструкции по энергоэффективности и к тому же они имеют меньшую массу и более экономичны.

В известных конструкциях-аналогах стен эти прослойки обычно располагается в их толще и могут вентилироваться наружным воздухом с выходом в помещение. При этом происходит утилизация части теплового потока и возникает энергосберегающий эффект, величина которого зависит от целого ряда геометрических и теплоэнергетических параметров (поперечного сечения и длины прослойки, её месторасположения в конструкции, температур наружного и внутреннего воздуха, скорости его движения, коэффициента теплообмена и др.).

Такая задача нестационарной теплопередачи через наружное ограждение с вентилируемой воздушной прослойкой решается сложным путём на основе дифференциальных уравнений теплопроводности с использованием метода конечных разностей. Эта задача применительно к конструкции совмещенного покрытия здания была значительно упрощена Богословским В.Н. Выполненный нами анализ месторасположения воздушной прослойки применительно к наружной стене показал, что более интенсивный теплообмен между воздухом помещения и прослойкой будет происходить при её размещении со стороны внутренней поверхности наружного ограждения, где тепловой поток наибольший, а термосопротивление разделяющей перегородки незначительное.

В процессе разработки расчетной модели находили:

- коэффициент конвективного теплообмена α_k между воздухом в прослойке и её поверхностями;
- значения оценочных критериев C_0 , D_0 , A (по Богословскому В.Н.);
- количество воздуха G , проходящего через прослойку, $G = v \cdot \gamma_n \cdot \delta_{вн} \cdot d$, кг/с;
- температуру воздуха $t_{\text{вых}}$, поступающего из прослойки в помещение, $t_{\text{вых}} = t_c - (t_c - t_n) \cdot e^{-Al}$, °C.

За основной критерий эффективности предложенного способа утилизации тепла наружным ограждением принято значение температуры t_x в любом сечении воздушной прослойки.

Численный эксперимент по оценке энергоэффективности данного способа утилизации тепла производили для 10-этажного здания, имеющего в конструкции наружной стены воздушную прослойку (рис.5). Воздух, прошедший по прослойке, попадает в квартиру, имеющую геометрические размеры 9,6·6·3 м. Конструктивное решение стены представлено на рис.6.

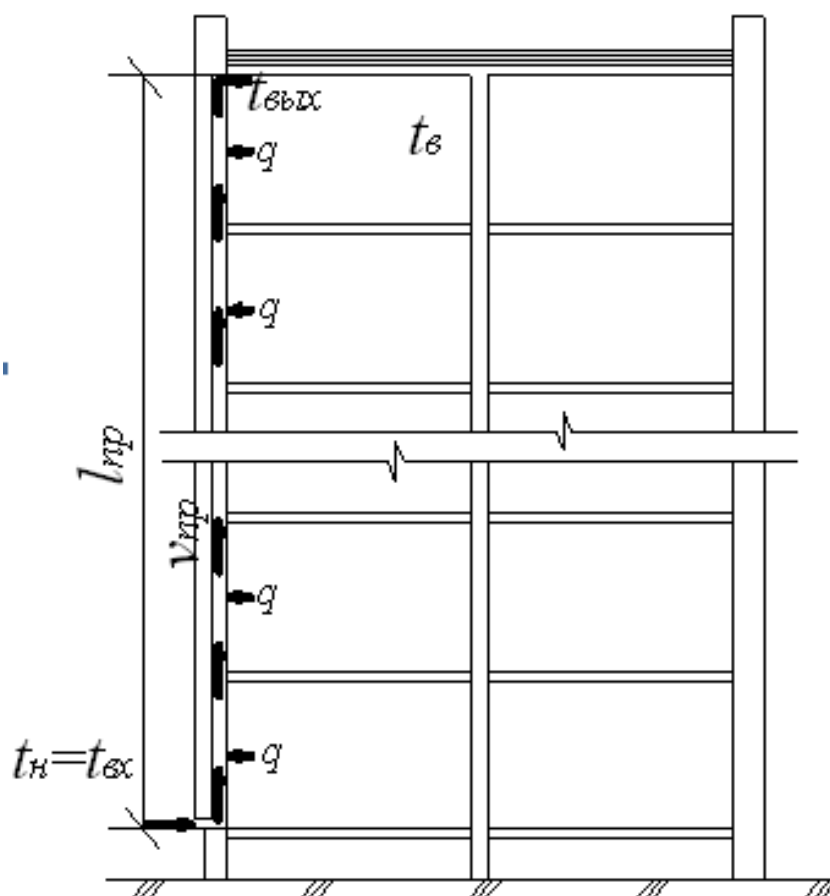


Рис.5. Схема утилизации тепла

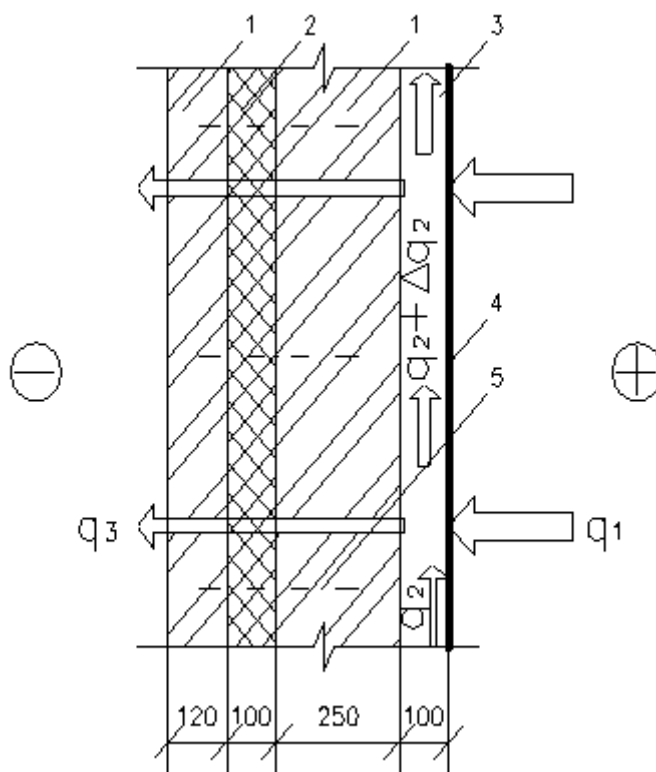


Рис.6. Конструктивная схема стены с воздушной прослойкой: 1-основная стена (здесь: кирпичная кладка); 2-минеральная вата; 3-воздушная прослойка; 4-алюминиевая пластина толщиной 1 мм; 5-гибкие связи

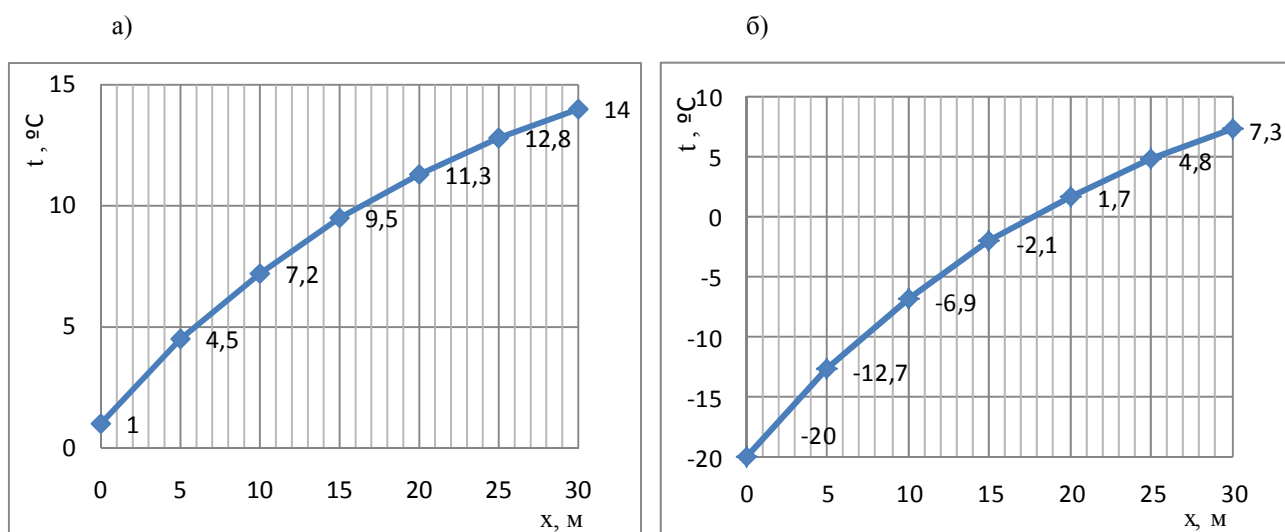


Рис.7. а) зависимость температуры воздуха t_x в воздушной прослойке от расстояния до входа в прослойку при температуре приточного воздуха $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) зависимость температуры воздуха t_x в воздушной прослойке от расстояния до входа в прослойку при температуре приточного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

По разработанной методике для выявления области применения данного способа утилизации тепла были определены расчётные параметры при температуре наружного воздуха $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис.7 представлена зависимость температуры воздуха t_x в воздушной прослойке от расстояния до входа в прослойку. При низких температурах приточного воздуха ограничивается область применения данного способа утилизации тепла, так как при этом не только велика вероятность обильного конденсата на поверхности пластины со стороны помещения, но и может происходить её обледенение вблизи входа наружного воздуха. При положительных температурах наружного

воздуха рекомендуется стенку канала со стороны помещения устанавливать пластину из окрашенного металлического листа, имеющего малое термосопротивление. Это обеспечивает попадание со стенки канала в водоприёмную ёмкость капель конденсата, при испарении которого уменьшается такой неблагоприятный параметр микроклимата отапливаемого помещения, как сухость воздуха.

При прохождении приточного воздуха с заданными температурами $+1^{\circ}\text{C}$ и -20°C через прослойку его температура постепенно повышается, достигая при заданных параметрах максимальных значений на выходе из прослойки $+14^{\circ}\text{C}$ и $+7,3^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Для выявления в процентном отношении энергосберегающего эффекта предложенного варианта утилизации теплового потока был рассмотрен расход тепла Q_1 на подогрев необходимого количества вентиляционного воздуха до температуры $t_{\text{в}}$ помещения при поступлении последнего напрямую из наружной среды, который затем сравнили с количеством тепла Q_2 , необходимого на подогрев до этой же температуры воздуха, поступившего из воздушной прослойки. Расчёт дан для помещения второго этажа здания, остальные исходные данные приняты такие же, как в вышеприведённом примере расчёта.

При наружной температуре $+1^{\circ}\text{C}$:

$$Q_1 = 0,28 \cdot 172,8 \cdot (353 / (273 + 1)) \cdot (20 - 1) = 1184,35 \text{ Вт},$$

$$Q_2 = 0,28 \cdot 172,8 \cdot (353 / (273 + 5)) \cdot (20 - 5) = 921,56 \text{ Вт},$$

$$\Delta = (1184,35 - 921,56) / 1184,35 = 22,19\%$$

При наружной температуре -20°C :

$$Q_1 = 0,28 \cdot 172,8 \cdot (353 / (273 - 20)) \cdot (20 + 20) = 2700,32 \text{ Вт},$$

$$Q_2 = 0,28 \cdot 172,8 \cdot (353 / (273 - 12)) \cdot (20 - (-12)) = 2094,04 \text{ Вт},$$

$$\Delta = (2700,32 - 2094,04) / 2700,32 = 22,45\%$$

Таким образом, численный эксперимент по определению эффекта экономии тепла для помещения с размерами $9,6 \cdot 6 \cdot 3$ м при использовании данного способа утилизации тепла показал, что для 1,2,3,4,5 этажей здания при температуре наружного воздуха $+1^{\circ}\text{C}$ и -20°C эффект энергосбережения может достигать соответственно 8-46% и 11-48% в зависимости от этажа.

Для более высоких этажей этот способ утилизации тепла не рекомендуется из-за возможности возникновения технических трудностей по эксплуатации воздушной прослойки (установка сложной механической системы вытяжки воздуха, вибрация экранирующей пластины и др.).

Применение рассмотренного способа утилизации уходящего теплового потока наружным ограждением позволяет значительно сократить тепловую энергию на подогрев приточного вентиляционного воздуха, поступающего не из традиционных приточных отверстий (через форточки, фрамугу и т.п.), а из воздушной прослойки наружного ограждения.

Экономический эффект внедрения рассмотренного способа энергосбережения с использованием ограждающей конструкции, имеющей вентилируемую воздушную прослойку, для 10-этажного дома с площадью этажа 1.000 м^2 составляет 260 тыс.руб.

На основе разработанной модели и методики создан программный продукт «Утилизация тепла наружным ограждением» на языке Visual Basic.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. По результатам натурных исследований многоэтажных жилых зданий выявлены основные причины снижения тепловой защиты их ограждающих конструкций и ухудшения параметров микроклимата воздушной среды помещений. В соответствие с данными инструментальных измерений установлено, что параметры микроклимата помещений обследованных многоэтажных домов не соответствуют требованиям энергоэффективности здания как единой энергетической и экологической системы и позволяют отнести их в категорию так называемых «больных» зданий. Фактический воздухообмен в помещениях этих зданий составляет только часть от требуемого по нормам (23-46%).

2. Анализ климатограмм для территорий Среднего Поволжья показал, что значительные колебания амплитуды температуры наружного воздуха и упругостей водяного пара по обе стороны ограждающей конструкции благоприятствуют интенсивной передаче и накоплению парообразной влаги в толще конструкции и фазовым переходам влаги в структуре материала со стороны наружной поверхности.

3. На основании анализа результатов экспериментальных исследований физико-механических свойств новых строительных материалов из пенокерамобетона, пеностеклянного композита на основе опоки, проведённых кафедрой «Технология строительных материалов и деревообработки», показаны возможные области применения и конструктивные решения наружных ограждений с использованием полученных теплоизоляционных материалов, отличающихся большей экологичностью и меньшей стоимостью по сравнению с промышленными аналогами.

4. Разработана методика оценки теплопроводности увлажнённых слоёв наружной ограждающей конструкции при фазовых превращениях влаги. Установлены расчётные зависимости коэффициента теплопроводности местных материалов в зоне промерзания от их объёмной влажности.

Разработана методика определения тепловых потерь через увлажнённый слой наружного ограждения, находящийся в зоне отрицательных температур.

Проведенное исследование позволило установить, что в условиях резкого падения температур наружного воздуха через увлажненные наружные ограждающие конструкции значительно увеличиваются тепловые потери, которые могут на 10-21% превышать их величину, найденную по нормам теплотехнического проектирования, в зависимости от влажности и материала стены

В ходе исследования для коэффициента теплопроводности ряда рассмотренных материалов был введен коэффициент корреляции, учитывающий сложные процессы фазовых переходов влаги в порах материала. С учетом введенного коэффициента корреляции полученные расчетные значения показывают хорошую сходимость (2-10%) с экспериментальными данными других авторов. Это позволило расширить область применения разработанной расчётной модели.

5. Разработана методика расчёта энергосберегающего эффекта с учётом утилизации уходящего через наружное ограждение теплового потока при инфильтрации холодного воздуха.

Установлены закономерности экономайзерного эффекта в капиллярно-пористой структуре материала наружной стены и исследована его зависимость от различных факторов влияния (воздухопроницаемости материала, сопротивлений теплопередаче конструкции, величины теплового потока на внутренней поверхности наружного ограждения, разницы давлений воздуха по обе стороны конструкции). Эффект уменьшается снизу вверх по мере приближения этажа к нейтральной оси здания. Наибольших значений он достигает на нижних этажах.

Разработанная методика регулируемого процесса инфильтрации воздуха через

крупнопористый материал ограждающей конструкции обеспечивает экономию тепловых потерь в энергетической и экологической системе многоэтажного здания.

Экономический эффект внедрения способа энергосбережения с использованием экономайзерного эффекта для 12-этажного дома с площадью этажа 1.000 м² составляет 90-157 тыс.руб. в зависимости от материала стен

6.Разработаны способ утилизации тепла наружным ограждением с вентилируемой прослойкой и методика энергосбережения в системе естественной вентиляции. Разработанная методика утилизации части теплового потока посредством устройства вентилируемой прослойки в наружной стене обеспечивает большой энергосберегающий эффект (до 55%) в помещениях верхних этажей такого здания. Применение рассмотренного способа утилизации уходящего теплового потока наружным ограждением позволяет значительно сократить тепловую энергию на подогрев приточного вентиляционного воздуха, поступающего не из традиционных приточных отверстий (через форточки, фрамугу и т.п.), а из воздушной прослойки наружного ограждения.

Экономический эффект внедрения рассмотренного способа энергосбережения с использованием ограждающей конструкции, имеющей вентилируемую воздушную прослойку, для 10-этажного дома с площадью этажа 1.000 м² составляет 260 тыс.руб.

7.Результаты исследований внедрены при строительстве, реконструкции и повышении тепловой защиты жилых зданий г.Пензы, проводимых МУП «Пензгорстройзаказчик», в конструктивных решениях наружных ограждений и инженерных систем, проектируемых ОАО «Приволжское КБ по архитектурно-строительным системам и новым технологиям им. А.А. Якушева», ООО «Гражданпроект», в технологии изготовления изделий тепловой защиты строительной фирмы «ПБ Композит» г.Пензы.

Разработанные методики энергосбережения и программные продукты для ЭВМ «Утилизация тепла наружным ограждением» и «Теплопроводность увлажнённого материала при отрицательных температурах» внедрены в учебный процесс при подготовке курсов лекций и практических занятий, в курсовом проектировании инженеров и бакалавров по направлению «Строительство».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**А) в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Береговой, А.М. Энергосбережение в зданиях при воздействии экстремальных климатических факторов / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Региональная архитектура и строительство.-2011.-№ 1.-С.153-158.

2. Береговой, А.М. Энергосбережение в жилых зданиях с большим сроком эксплуатации / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Известия вузов. Строительство.-2011.-№ 5.-С.59-64.

3. Береговой, А.М. Тепловая эффективность наружных ограждений зданий при фазовых превращениях влаги / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Известия вузов. Строительство.-2011.-№ 12.-С.73-79.

4. Береговой, А.М. Тепловая эффективность эксплуатируемых жилых зданий / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Региональная архитектура и строительство.-2012.-№ 1.-С.107-111.

5. Мальцев, А.В. Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство.-2013.-№ 1.-С.57-61.

6. Береговой, А.М. Эффект энергосбережения в помещении с естественной вентиляцией в условиях инфильтрации воздуха через наружную стену / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина, А.В. Гречишкин // Региональная архитектура и строительство.-2013.-№ 3.-С.140-144.

7. Мальцев, А.В. Наружное ограждение, утилизирующее тепло уходящего воздуха из помещения / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, В.А. Береговой, М.А. Дерина // Региональная архитектура и строительство.-2014.-№ 1.-С.123-127.

8. Береговой, А.М. Оценка тепловых потерь при эксфильтрации воздуха через пористую структуру материала ограждения / А.М. Береговой, М.А. Дерина, В.А. Береговой, А.В. Мальцев // Региональная архитектура и строительство.-2014.-№ 2.-С.79-83.

Б) в монографии:

9. Береговой, А.М. Строительные материалы и наружные ограждающие конструкции зданий повышенной тепловой эффективности / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, А.В. Гречишкин, М.А. Дерина // Издательство ПГУАС, г. Пенза.-2014.-174 с.

В) в других изданиях:

10. Береговой, А.М. Состояние системы естественной вентиляции и экологии в эксплуатируемых жилых зданиях / А.М. Береговой, А.В. Гречишкин, А.В. Мальцев // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах», Пенза.-2009.-С.32-35.

11. Береговой, А.М. Архитектурно-строительные методы и система инженерного оборудования по повышению энергоэффективности зданий / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, Дорофеева А.В. // Сб. статей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и современных методов строительства», Пенза.-2011.-С.24-27.

12. Береговой, А.М. Наружные ограждающие конструкции с различной тепловой инерцией и энергоэффективностью / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Петрянина // Сб. статей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и современных методов строительства», Пенза.-

2011.-С.27-30.

13.Мальцев А.В. Тепловая эффективность увлажнённых стен из различных материалов в период резких похолоданий / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, М.А. Дерина // Сб. статей II международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и методов строительства», Пенза.-2012.-С.26-29.

14.Дерина М.А. Архитектурно-строительные способы повышения энергоэффективности малоэтажного жилого дома / / М.А. Дерина, А.М. Береговой, А.В. Мальцев / / Сб. статей II международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и возведения зданий и сооружений с учётом энергосберегающих технологий и методов строительства», Пенза.-2012.-С.17-20.

15.Береговой, А.М. Теплоаккумулирующая конструкция в здании с малотеплоинерционными ограждениями / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина // Сб. статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций», ПГУАС.-2013.-С.24-27.

16.Мальцев, А.В. Энергоэффективность наружных ограждающих конструкций в стадии предельного увлажнения / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, М.А. Дерина // Сб. статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций», ПГУАС.-2013.-С.102-108.

17.Береговой, А.М. Энергосбережение в здании с теплоаккумулирующей конструкцией / А.М. Береговой, А.В. Мальцев, М.А. Дерина // Сб. статей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства», ПГУАС.-2013.-С.38-41.

18.Мальцев, А.В. Повышение тепловых потерь через наружные ограждения в стадии предельного увлажнения / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, М.А. Дерина // Сб. статей международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства», ПГУАС.-2013.-С.201-206.

19.Мальцев, А.В. Утилизация тепла наружными ограждениями / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, М.А. Дерина // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Энергоэффективность, энергосбережение и экология в городском строительстве и хозяйстве», ПГУАС.-2013.-С.48-52.

20.Мальцев, А.В. Энергосбережение в многоэтажных жилых зданиях, основанное на экономайзерном эффекте / А.В. Мальцев, А.М. Береговой, М.А. Дерина // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Энергоэффективность, энергосбережение и экология в городском строительстве и хозяйстве», ПГУАС.-2013.-С.53-58.