

*На правах рукописи*



**Захарьин Евгений Николаевич**

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭКСТРУЗИОННОГО  
ПЕНОПОЛИСТИРОЛА. ОЦЕНКА И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Назиров Рашит Анварович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Верещагин Владимир Иванович**

кандидат технических наук, доцент  
**Лукьянчиков Сергей Альбертович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 21 октября 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, ауд. К-120.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат разослан 19 сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е. В. Пересыпкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Актуальность работы заключается в необходимости более глубокого изучения эксплуатационных свойств широко используемых в настоящее время пенополистирольных теплоизоляционных материалов с целью обеспечения высокой энергоэффективности строительных объектов.

Решение проблемы повышения энергоэффективности неразрывно связано с вопросом экологии и является одним из приоритетных направлений развития современной России. Мировой опыт показывает громадный потенциал для роста в этой области. К сожалению, на сегодня приходится констатировать, что энергоемкость нашей экономики существенно уступает развитым странам Европейского союза, Японии, США, Канады и др.

Для решения задачи повышения энергоэффективности жилищно-коммунального сектора экономики, потребляющего более 30 % топливно-энергетических ресурсов нашей страны, приняты: Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», с изменениями на 18 июля 2011 г., Постановление правительства РФ от 25 января 2011 г. № 18 «Об утверждении правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов», вышел Приказ Минрегионразвития РФ от 28 мая 2010 № 262 «О требованиях энергетической эффективности зданий, строений, сооружений».

Для обеспечения высокого класса энергетической эффективности зданий широкое применение нашли высокоэффективные пенополистирольные утеплители, среди которых лучшими техническими характеристиками обладают экструзионные пенополистиролы. Однако по результатам исследований данных материалов имеется ряд противоречивых мнений об их долговечности и эффективности применения.

Диссертационные исследования выполнены в соответствии с концепциями федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» и «Национальная технологическая база».

**Степень разработанности проблемы.** Исследованиям долговечности газонаполненных полимеров посвящены работы А. А. Берлина, Ф. А. Шутова, А. Г. Дементьева, О. Г. Тараканова, В. А. Павлова, И. Г. Романенкова, К. В. Панферова, В. В. Гурьева, В. Г. Гагарина, В. П. Ярцева, К. А. Андрианова, Ю. Д. Ясина, В. А. Могутова, В. Г. Хозина, А. Н. Дмитриева, А. И. Ананьева, О. И. Лобова,

Д. В. Ритца, М. А. Шутца, Л. Р. Гликсмана, М. Т. Бумберга, Ч. В. Во, М. К. Кумарана, Д. Р. Бута и др.

Благодаря исследованиям и разработкам НИИСФ РААСН, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, НП «АВОК», НИИЖБ, ЦНИИЭП жилища, Общероссийской общественной организации РОИС, вузов МГСУ, СГАСУ, КГАСУ и др. в нашей стране заложены основы по обеспечению высокой энергоэффективности зданий и сооружений.

Следует отметить феноменологическую методику определения долговечности ограждающих конструкций, разработанную в НИИСФ д.т.н., профессором С. В. Александровским.

Несмотря на значительные достижения в данной области, научным сообществом признается отсутствие единой методики определения долговечности пенополистирольных теплоизоляционных материалов, что в первую очередь объясняется необходимостью поиска обоснованного критерия, адаптированного к климатическим условиям нашей страны. Широкое внедрение пенополистирольных утеплителей в строительную практику требует более глубокого изучения свойств материалов, перво-степенное значение среди которых принадлежит теплопроводности.

**Объект исследования.** Экструзионные пенополистирольные теплоизоляционные материалы и изделия.

**Предмет исследования.** Процессы, обуславливающие изменение теплопроводности экструзионных пенополистирольных утеплителей при эксплуатации, и эффективность применения объекта исследования в наружных ограждающих конструкциях зданий.

**Цель работы.** Разработка методологии прогнозирования теплопроводности экструзионного пенополистирола в процессе эксплуатации и оценка его долговечности.

**Основными задачами исследований для достижения поставленной цели являются:**

- изучение влияния изменения теплопроводности экструзионных пенополистирольных материалов в зависимости от основных параметров их поровой структуры и газовой фазы;
- разработка адекватной модели поровой структуры пенополистиролов, позволяющей с помощью численных методов решения определять и прогнозировать коэффициент теплопроводности;
- исследование деструкции экструзионных пенополистиролов и определение методов её диагностирования;
- разработка математической модели прогнозирования теплопроводности пенополистирола в процессе долговременной эксплуатации в ограждающих конструкциях зданий;
- разработка критерия и методики расчета допустимого уровня снижения теплозащиты ограждающих конструкций зданий, применимой для расчетов долговечности основного теплоизоляционного слоя;

- разработка конструктивного решения нового теплоизоляционного элемента для использования в качестве эффективной теплоизоляции зданий.

#### **Научная новизна:**

1. На основе реальной геометрии поровой структуры экструзионного пенополистирола разработана новая структурная модель, позволяющая численными методами расчета определять эффективный коэффициент теплопроводности. Количественно определена анизотропия теплопроводности экструзионного пенополистирола. Для пенополистирола *THERMIT XPS* марки 35 установлено увеличение коэффициента теплопроводности на 0,002...0,006 Вт/м·°С в направлении от внешней грани плиты к ее середине.

2. Определены значения коэффициентов теплопроводности экструзионного пенополистирола при полном заполнении порового пространства фреонами *HCFC-22*, *HCFC-142b*, углекислым газом и воздухом при нормальных условиях. Для пенополистирола *THERMIT XPS* марки 35, данные значения составят: 0,007; 0,017; 0,022; 0,032 Вт/м·°С соответственно.

3. Установлена закономерность изменения теплопроводности экструзионного пенополистирола в процессе эксплуатации, на основании которой предложена математическая модель. Определено, что коэффициент теплопроводности пенополистирольных плит *THERMIT XPS* марки 35 толщиной 50 мм, произведенных с использованием фреонов в качестве вспенивающих агентов, в период времени 25...45 лет будет повышаться до значения 0,032 Вт/м·°С по логарифмическому закону при условии отсутствия развития деструктивных процессов.

4. Разработан критерий оценки снижения теплозащитных свойств теплоизоляционных материалов при их эксплуатации в ограждающих конструкциях зданий, определяемый с позиции энергоэффективности по удельному расходу тепловой энергии на отопление здания.

#### **Практическая значимость работы:**

- разработана и предложена для использования адекватная методика определения коэффициента теплопроводности пенополистиролов на основе новой структурной модели, позволяющая выполнять прогнозные расчеты на стадии разработки материала и в процессе его эксплуатации;

- разработана и внедрена в практику проектирования оригинальная методика определения значения допустимого уровня снижения требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий в ходе выполнения энергетической части проектирования для определения долговечности теплоизоляционных материалов;

- установлена реальная возможность использования физико-химических и микроскопических методов анализа для диагностирования деструкции пенополистирольных материалов;

- разработан и предложен для использования новый эффективный теплоизоляционный элемент, выполненный из пенополистирола.

**Методология работы.** Для решения поставленных задач использовался системный подход, реализованный в постановке экспериментальных исследований, проведении практических испытаний, применении физико-химических и микроскопических методов анализа на современном оборудовании, использовании методов структурного и математического моделирования и численных методов решения.

**Реализация результатов работы.** Полученные результаты исследований внедрены к использованию в лаборатории строительной физики Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета при разработке энергетических паспортов зданий и при выполнении обследований наружных ограждающих конструкций.

Представленные разработки были внедрены на предприятиях г. Красноярска: ЗАО «Фирма Культбытстрой» при выпуске наружных стеновых панелей с эффективным утеплителем; ООО «Технологъ» при производстве плит из экструзионного пенополистирола *THERMIT XPS*.

**Положения, выносимые на защиту:**

- алгоритм построения разработанной структурной модели пенополистирольного материала и ее теплотехнический расчет в коммерчески доступной компьютерной программе на примере исследования анизотропии теплопроводности экструзионного пенополистирола местного производства;

- результаты исследований повышения теплопроводности пенополистирольных материалов в результате естественной диффузии газов с помощью представленной структурной модели на примере экструзионного пенополистирола местного производства;

- результаты дефектоскопии поровой структуры пенополистирольных теплоизоляционных материалов с помощью физико-химических и электронно-микроскопических методов анализа;

- математическая модель повышения теплопроводности экструзионного пенополистирола в процессе эксплуатации на основе результатов зарубежных долговременных исследований;

- алгоритм расчета допустимого уровня снижения теплозащиты наружного ограждения по разработанному критерию на примере построенного в г. Красноярске жилого здания и определение долговечности основного теплоизоляционного слоя из экструзионного пенополистирола;

- конструкция эффективного теплоизоляционного элемента и результаты испытаний пробного образца.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXIII–XXVI региональных научно-технических конференциях «Проблемы строительства и архитектуры» (Красноярск,

2005–2008 гг.); Всероссийском научном фестивале «Молодежь и наука: начало XXI века» (Красноярск, 2009 г.); научной конференции – I академические чтения «Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение и экологическая безопасность», посвященной памяти академика Г. Л. Осипова (Москва, 2009 г.); 14-й Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2011 г.).

В полном объеме диссертационная работа докладывалась на расширенном научном семинаре кафедры строительных материалов и технологии строительства ИСИ ФГАОУ ВПО СФУ (Красноярск, 2011 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 10 печатных работах, в том числе в 2 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ. Результаты исследований защищены патентом РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 5 глав, основные выводы, библиографический список источников из 168 наименований и 3 приложений. Общий объем работы изложен на 156 страницах машинописного текста. Основной текст диссертации – 132 страницы, включая 55 рисунков и 35 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована проблематика затронутой темы, на основании которой показана её актуальность. Поставлена цель работы и определены основные задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Перечислены положения, выносимые на защиту, и приведены сведения о результатах реализации работы и её апробации.

**В первой главе** показано, что в настоящее время большое значение имеет применение эффективных утеплителей в строительных ограждающих конструкциях. Использование данных материалов позволяет обеспечивать высокие показатели энергоэффективности зданий с наименьшими экономическими издержками, и это особенно актуально для климатических условий Сибири. Установлено, что доля пенополистиролов составляет более 20 % от общего количества применяемых в стране теплоизоляционных материалов, основными видами которых являются пенополистиролы суспензионные беспрессовые (ПСБ) и пенополистиролы экструзионные (ЭППС). Объем потребления ЭППС в настоящее время растет быстрыми темпами ввиду более выгодных технических характеристик по сравнению с другими видами пенополистиролов.

Учеными Тамбовского ГТУ глубоко исследованы вопросы долговечности пенополистиролов с позиции изменения прочностных характеристик в процессе эксплуатации в зависимости от температуры и напряжений.

Проведенный анализ российских и зарубежных литературных источников по теме долговечности газонаполненных полистирольных материалов свидетельствует о достаточно широком диапазоне сроков долговечности этого материала с позиции изменения теплозащитных свойств (от 13 до 100 лет). Одним из ключевых моментов для решения представленной задачи является наличие обоснованного критерия оценки долговечности исследуемых материалов.

В расчетах определения долговечности основного теплоизоляционного слоя в ограждающих конструкциях по феноменологической методике, проведенных д.т.н., профессором В. С. Александровским, использовалось значение допустимого уровня снижения теплозащиты 5 %. Автор особо подчеркивает необходимость дополнительного изучения данного критерия. Позднее организацией РОИС было предложено за недопустимое значение принимать снижение теплозащитных свойств более 15 %. Таким образом, обосновывается необходимость дальнейших исследований.

**Во второй главе** представлены данные по используемым в работе материалам, оборудованию, методам исследований и анализу результатов.

При определении физико-технических свойств исследуемых материалов в работе использовалось современное оборудование для определения теплопроводности, многофункциональная пресс-машина, вакуумметр и другое вспомогательное оборудование (электронные весы, сушильный шкаф, различные средства измерения размеров и пр.). Экспериментальное изучение анизотропии теплопроводности пенополистирольных изделий требует определения теплопроводности на образцах, размеры которых не позволяют выполнять измерения классическими способами строительного материаловедения. В работе использован метод лазерной вспышки, позволяющий определять теплопроводность материалов на образцах толщиной до 3 мм с погрешностью 5 %.

Для изучения деструкции пенополистиролов в работе использованы физико-химические и электронно-микроскопические методы анализа. Обработка результатов исследований осуществлялась с помощью прилагаемых к современному оборудованию специальных программных продуктов.

Теоретические теплотехнические расчеты ограждающих конструкций и разработка структурных моделей выполнялись с использованием коммерчески доступных сертифицированных компьютерных программ, реализующие численные методы решения.



Для решения поставленных в работе задач основные исследования проводились на образцах ЭППС местного производства, все испытания проводились на сертифицированном и поверенном оборудовании лаборатории Строительной физики ИСИ СФУ и Центра коллективного пользования (ЦКП) ПИ СФУ.

В третьей главе изложен процесс разработки структурной модели газонаполненных полистиролов, составлен алгоритм ее построения. Проверена адекватность разработанной модели на примере определения анизотропии теплопроводности ЭППС местного производства.

Предложенное моделирование основано на принципе замены реальной пористой системы газонаполненного полимера (рис. 1) на упрощенную схему с упорядоченной структурой, которая может быть реализована на плоскости или в объеме. Разработка структурной модели производилась с целью определения эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{eff}$  исследуемых материалов с помощью теплотехнических расчетов в специализированных программах методом конечных элементов.

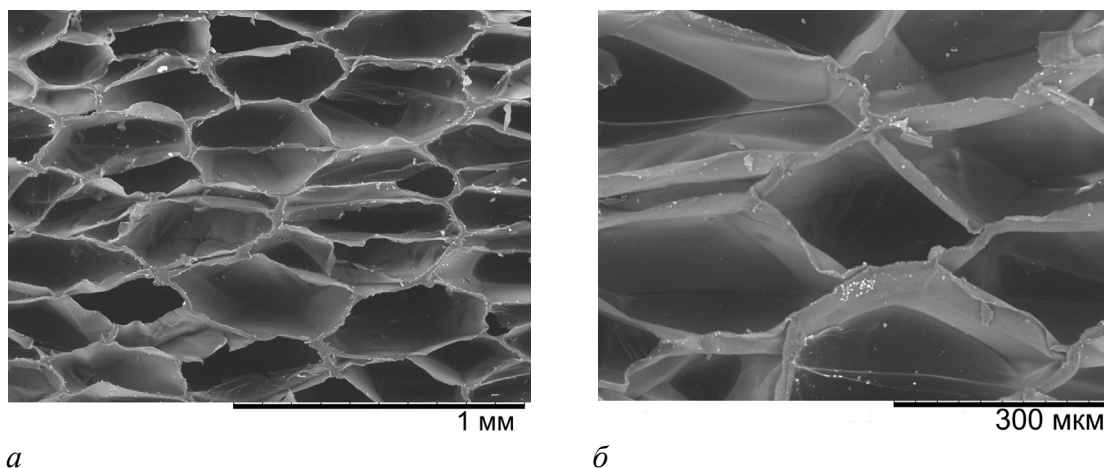


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки поровой структуры пенополистирола *THERMIT XPS* с увеличением: *a* –  $\times 100$ ; *б* –  $\times 250$

Изучение поровой структуры пенополистиролов (рис. 1) показывает, что наиболее предпочтительной является схема, в основу которой положена структура додекаэдра в объеме или правильного шестиугольника на плоскости.

Для построения структурной модели ЭППС на плоскости был выбран срез материала *THERMIT XPS* размером  $2 \times 8$  мм с неоднородной поровой структурой, который был условно разбит на 4 равных участка I...IV (рис. 2). На рис. 2 видно укрупнение поровой структуры от внешнего края плиты пенополистирола (участок IV) к её середине (участок I).

На первом этапе необходимо получить основные данные по геометрии поровой структуры, что выполняется по прямым измерениям на микроскопических снимках и последующей их статистической обработ-

кой. В работе полученные снимки обрабатывались в программах с функциями автоматического проектирования, что позволило успешно решить эту трудоемкую задачу (рис. 2).

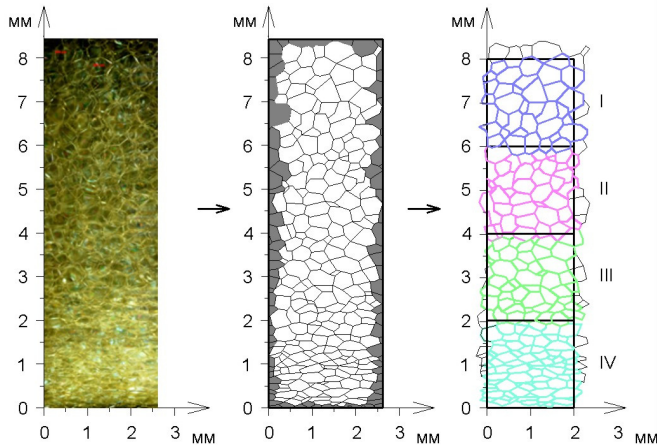


Рис. 2. Процесс обработки микрофотографии для получения геометрических данных пористой структуры исследуемого пенополистирола

решить эту трудоемкую задачу (рис. 2).

На каждом исследуемом участке (I...IV) были определены следующие геометрические данные для каждой ячейки:

- максимальные линейные размеры ячейки по двум взаимно перпендикулярным направлениям  $D_{\parallel i}$ ,  $D_{\perp i}$ ;
- площадь ячейки  $S_i$ .

На втором этапе по полученным средним значениям  $D_{\parallel}$ ,  $D_{\perp}$  и  $S$  всех рассмотренных ячеек для каждого участка (I...IV), производится построение газоструктурного элемента (ГСЭ).

Формой усредненной ячейки для каждого участка будет являться шестиугольник с габаритными размерами  $D_{\parallel}$ ,  $D_{\perp}$  и площадью  $S$  (рис. 3).

Толщину полимерных стенок  $h$  усредненной ячейки определим с помощью параметра газонаполненности  $G$  по следующей формуле:

$$h = (1-G) \cdot S_{gse} / l, \quad (1)$$

где  $S_{gse}$  – площадь ГСЭ,  $m^2$ ;  $l$  – суммарная длина всех полимерных перегородок, входящих в ГСЭ, м.

На третьем этапе выполняется построение модели полученного ГСЭ каждого рассмотренного участка в компьютерной программе по расчету температурных полей методом конечных элементов (рис. 4).

Далее необходимо определить и задать значения характеристик материалов, входящих в построенную модель:

- коэффициент теплопроводности твердой фазы  $\lambda_s$ , исходя из вида используемого полимерного сырья;

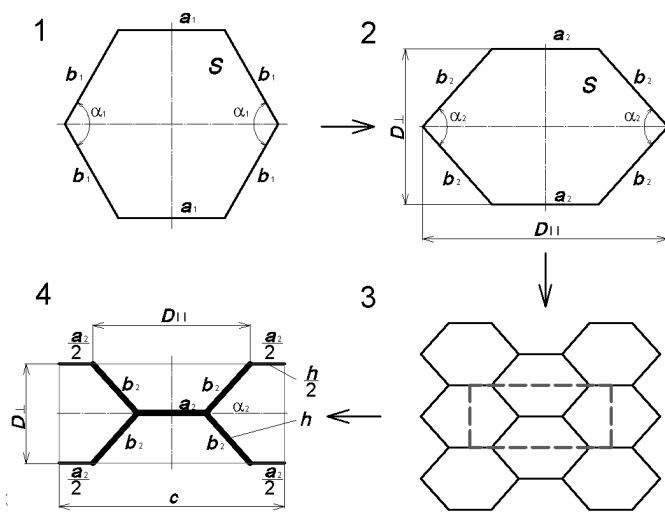


Рис. 3. Алгоритм построения ГСЭ

• эквивалентный коэффициент теплопроводности газообразной фазы  $\lambda_g$ , исходя из  $D_{\parallel}$  и  $D_{\perp}$  полученной усредненной ячейки и вида заполняющего ее газа для конкретной температуры ( $T$ ).

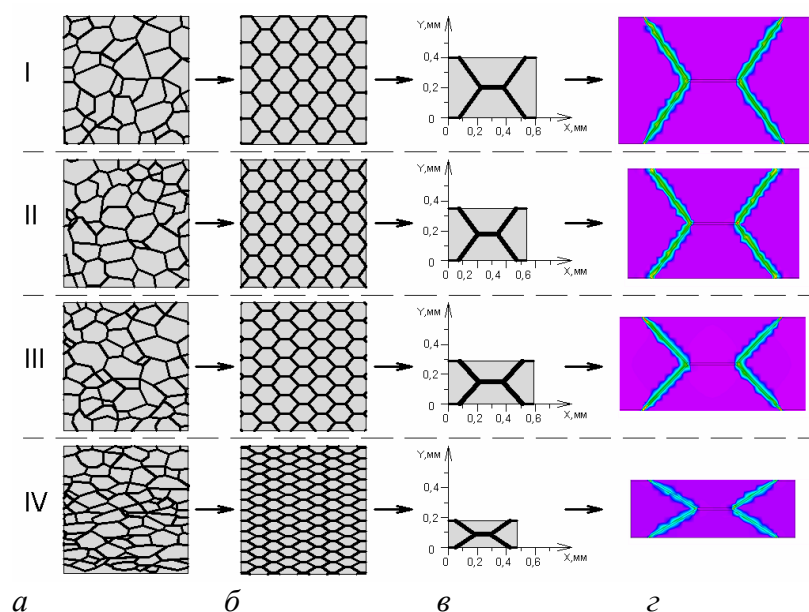


Рис. 4. Основные этапы построения модели поровой структуры пенополистирола *THERMIT XPS* и её теплотехнического расчета для участков I...IV: *a, б* – реальные и идеализированные, согласно предложенной методике, поровые структуры соответственно; *в* – модели; *г* – распределение плотностей тепловых потоков по моделям

В завершение в программе для построенной модели задаются граничные условия 3-го рода согласно поставленной задаче, и производится расчет тепловых потоков (рис. 4, *г*), по результатам которого определяется  $\lambda_{eff}$ .

Результаты определения основных параметров структурной модели пенополистирола *THERMIT XPS* представлены в таблице.

Для оценки адекватности разработанной структурной модели и выполненных на её основе теоретических расчетов проведено экспериментальное определение  $\lambda_{eff}$  методом лазерной вспышки. Значения  $\lambda_{eff}$ , полученные экспериментально и теоретически для каждого из рассмотренных участков I...IV, показывают хорошую сопоставимость с отклонением, не превышающим 9 % (см. таблицу).

Таким образом, экспериментально доказана адекватность теоретических расчетов теплопроводности по разработанной модели поровой структуры в программах по расчету температурных полей методом конечных элементов. Несмотря на то, что разработка модели производилась на примере пенополистиролов, её можно использовать для любых газонаполненных полимеров ввиду аналогии.

По результатам проведенных экспериментальных и теоретических исследований количественно определена анизотропия теплопроводности пенополистирола *THERMIT XPS* марки 35. Наблюдается увеличение  $\lambda_{eff}$  на 0,006 Вт/м·°С (по экспериментальным испытаниям) и на 0,002 Вт/м·°С (по теоретическим расчетам) на участке длиной 8 мм от внешней грани плиты в направлении ее середины.

Значения основных параметров структурной модели пенополистирола *THERMIT XPS* по исследуемым участкам и результаты определения эффективного коэффициента теплопроводности

Наименование параметра	Участок			
	I	II	III	IV
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	35,8	36,5	39,5	63,9
Габаритные размеры усредненной ячейки $D_{\parallel} \times D_{\perp}$ , мм	0,448 × 0,399	0,414 × 0,348	0,432 × 0,296	0,402 × 0,181
Площадь усредненной ячейки $S$ , мм <sup>2</sup>	0,121	0,097	0,086	0,049
Газонаполненность $G$	0,966	0,965	0,962	0,939
Толщина стенки усредненной ячейки $h$ , мм	0,006	0,006	0,006	0,007
Коэффициент теплопроводности твердой фазы $\lambda_s$ , Вт/м·°С	0,199			
Коэффициент теплопроводности газообразной фазы $\lambda_g$ , Вт/м·°С	0,0289*	0,0285*	0,0281*	0,0273*
Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{eff}$ , определенный теоретически (в числителе) и экспериментально (в знаменателе), Вт/м·°С	$\frac{0,032}{0,035}$	$\frac{0,032}{0,034}$	$\frac{0,031}{0,032}$	$\frac{0,030}{0,029}$

\* Определено при заполнении порового пространства воздухом при  $T = 26$  °С

**В четвертой главе** изучено влияние изменений газовой и твердой фаз в процессе эксплуатации на теплопроводность пенополистиролов и предложена математическая модель прогнозирования  $\lambda_{eff}$ .

Известно, что на повышение  $\lambda_{eff}$  пенополистиролов наибольшее влияние оказывают изменения, которые могут происходить в газовой фазе ввиду ее значительного преобладания по объему над твердой фазой поровой структуры. У пенополистиролов, произведенных с использованием в составе вспенивающих агентов (ВА) различных видов фреонов, происходит естественная диффузия этих газов из материала.

На рис. 5 представлен теоретический расчет изменения относительной концентрации фреонов во времени в плитах ЭППС в процессе их эксплуатации. Расчет произведен с использованием эффективных коэффициентов диффузии, значения которых получены в результате натурных экспериментов, проведенных зарубежными исследователями. Хорошо видно, что для наиболее широко применяемых в производстве фреонов процесс их замещения в порах на более теплопроводный и легкий воздух заканчивается в период 25...45 лет. По истечению данного срока  $\lambda_{eff}$  для ЭППС марки 35 будет равно 0,032 Вт/м·°С. Данное значение определено нами с помощью расчета на разработанной структурной модели для случая полного заполнения порового пространства воздухом при нормальных условиях.

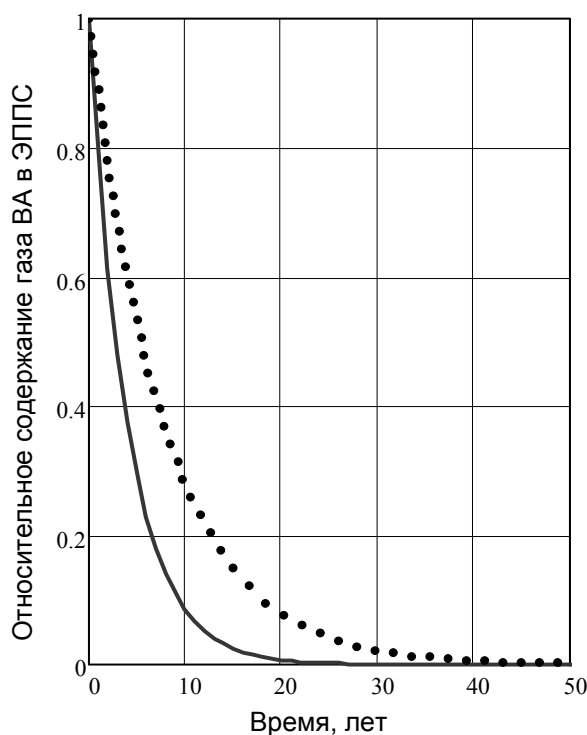


Рис. 5. Изменение содержания газа ВА с эффективными коэффициентами диффузии  $1,55 \cdot 10^{-12}$  (—) и  $8 \cdot 10^{-12}$  (.....) в плите экструзионного пенополистирола толщиной 50 мм с течением времени

тельствует об их согласованности. Хорошо видно, что наибольшее увеличение теплопроводности наблюдается в первые 10...20 лет эксплуатации.

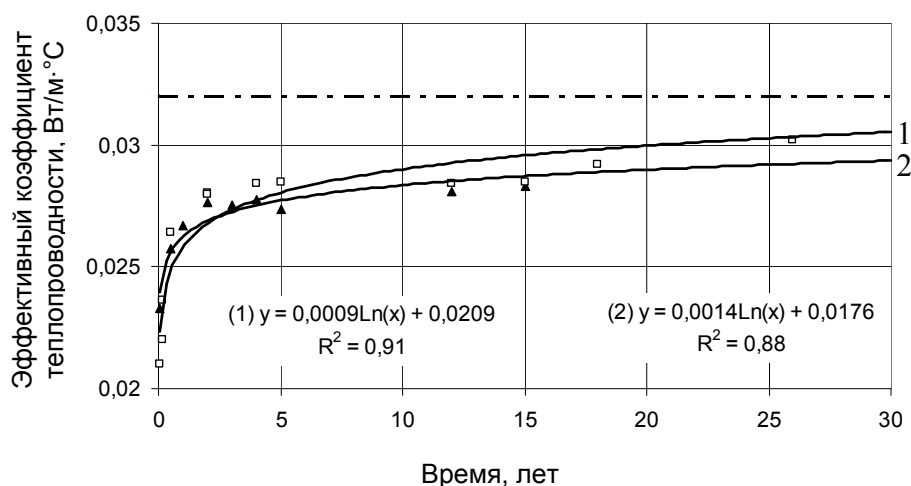


Рис. 6. Повышение теплопроводности ЭППС в процессе эксплуатации:  $\blacktriangle$ ,  $\square$  – обобщенные результаты экспериментальных испытаний плит *STYROFOAM<sup>TM</sup>* со вспенивающим агентом *HFC-142b* (1) и *CFC-12* (2) соответственно; — — — — аппроксимирующие кривые 1 и 2; - - - - теоретическое значение  $\lambda_{eff}$  при заполнении порового пространства воздухом

Сделанные теоретические выводы подтверждаются обобщенными нами долгосрочными (до 26 лет) экспериментальными результатами испытаний плит ЭППС *STYROFOAM<sup>TM</sup>* в лабораторных и естественных условиях, опубликованными зарубежными учеными (рис. 6).

По результатам анализа обобщенных долгосрочных натуральных испытаний выявлена логарифмическая зависимость изменения  $\lambda_{eff}$  от времени  $t$ :

$$\lambda_{eff} = A \cdot \ln(t) + B. \quad (2)$$

Сопоставление результатов теоретических расчетов диффузии фреонов и результатов натуральных экспериментов, представленных на рис. 6, свиде-

Проведенные нами экспериментальные наблюдения теплопроводности плит *THERMIT XPS* в течение одного года сопоставимы с результатами испытаний плит *STYROFOAM<sup>TM</sup>* и также подтверждают сделанные выводы.

Стоит отметить, что адекватность разработанной структурной модели подтверждается результатами независимых натуральных испытаний. На рис. 6 видно, что значения  $\lambda_{eff}$  с течением времени приближаются к теоретически определенному значению  $\lambda_{eff}$  для случая полного заполнения пор воздухом и не превышают его.

В целом можно констатировать, что заявляемая производителями теплопроводность плит ЭПС марки 35 менее 0,032 Вт/м·°С через 25...45 лет, вне зависимости от условий эксплуатации не будет являться актуальной для принятой технологии производства и должна учитываться при проектировании и энергоаудите.

Изменения твердой фазы пенополистиролов обусловлены деструкционными процессами, факторы инициирования которых хорошо изучены. В работе выполнено исследование деструкции пенополистирола с помощью РФА, ДТА и электронно-микроскопического анализа. Для сравнения исследовались две группы образцов пенополистирола *THERMIT XPS*:

- группа 1 – образцы без явных признаков деструкции;
- группа 2 – образцы с явными признаками деструкции (изменение цвета, специфический запах, меление поверхности).

Причиной деструкции образцов группы 2 послужили внешние воздействия, которые они получили в результате незащищенного хранения на открытом воздухе в течение 12 месяцев в климатической зоне г. Красноярска с переменным воздействием УФ солнца.

Проведено сравнительное исследование проб образцов пенополистирола *THERMIT XPS* с помощью РФА на рентгеновском дифрактометре *Bruker D8 ADVANCE* (рис.7).

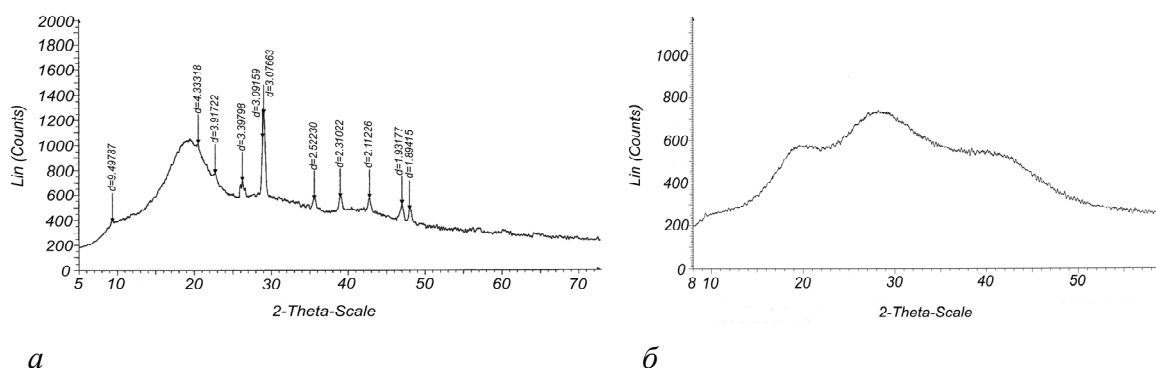


Рис. 7. Рентгенограммы пенополистирола *THERMIT XPS* проб образцов группы 1 (а) и 2 (б)

Сравнение дифрактограмм образцов группы 1 и 2 обнаруживает у последних наличие характерных дифракционных максимумов с межплоскостными расстояниями  $d = 0,309_8$ ;  $0,307_{10}$  нм и менее интенсивных пиков в диапазоне углов отражений  $2\Theta$  от  $35^\circ$  до  $49^\circ$  с  $d = 0,252$ ;  $0,231$ ;  $0,211$ ;  $0,1931$  и  $0,1894$  нм. Это свидетельствует об изменении структуры полистирола в направлении упорядочивания расположения атомов, и о появлении межатомных плоскостей.

Образцы группы 1 рентгеноаморфны, что свидетельствует об отсутствии дифракционных отражений и о наличии гало с четко выраженными вершинами при  $2\Theta$ , равном  $19^\circ$  и  $29^\circ$ . Следует отметить, что при изменении структуры строения полистирола гало при  $29^\circ$  значительно уменьшается при практически неизменной интенсивности гало наблюдаемого при  $19^\circ$ .

Результаты проведенных совмещенных термических анализов на приборе *NETZSCH STA 449 F1 Jupiter*<sup>®</sup> проб исследуемых групп образцов в среде азота представлены на рис. 8.

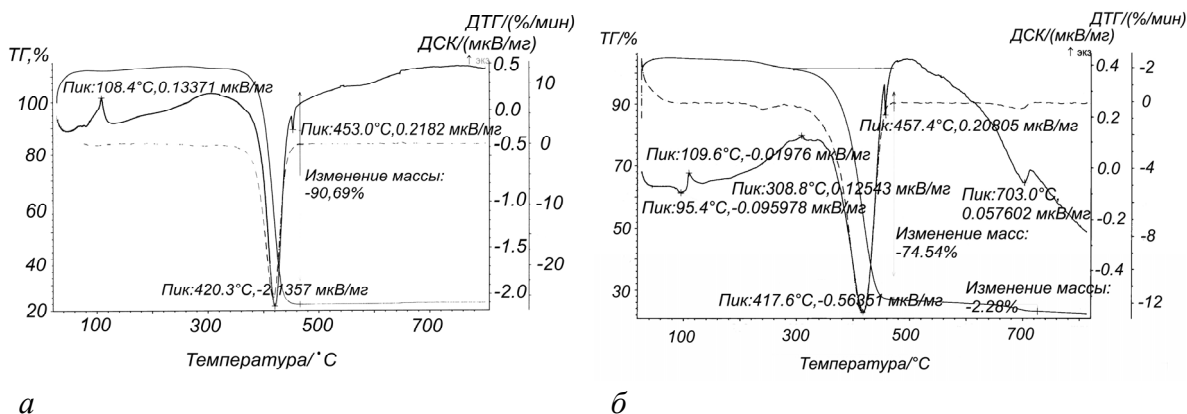


Рис. 8. Дериватограммы пенополистирола *THERMIT XPS* для образцов группы 1 (а) и 2 (б)

Общими на двух дериватограммах являются:

- экзотермический эффект с максимумом при  $108...110^\circ\text{C}$ , характеризующий процессы кристаллизации и размягчения полистирола;
- эндотермический эффект в диапазоне температур  $300...470^\circ\text{C}$ , с максимумом при  $417...420^\circ\text{C}$ , соответствующий десорбции полимера и сопровождающийся значительной потерей массы.

Процессы стеклования исследуемых материалов проходят в диапазоне температур  $70...100^\circ\text{C}$ , что говорит о начале развития деструктивных процессов при данных температурах.

Отличительной особенностью дериватограммы деструктивного пенополистирола является появление дополнительного эндотермического эффекта с максимумом при  $703^\circ\text{C}$ , сопровождающегося эффектом на

ДТГ-кривой и потерей массы по ТГ в количестве 2,28 %, который соответствует процессу термораспада.

Разница в потерях массы исследуемых групп образцов свидетельствует об уменьшении количества исходного полимера в составе пробы образцов группы 2.

С целью определения параметров изменения поровой структуры при деструкции пенополистирола, проведены исследования по микроснимкам поверхности образцов группы 2. На рис. 9 заметен хрупкий характер разрушения полистирольных стенок, который приводит к образованию открытых и сообщающихся пор. Отличительной особенностью поровой структуры деструктивного пенополистирола по сравнению с обычной (рис. 1) является наличие локальных групп пор размером до 10 мкм (рис. 9, б), образовавшихся в результате фотохимических и температурных воздействий.

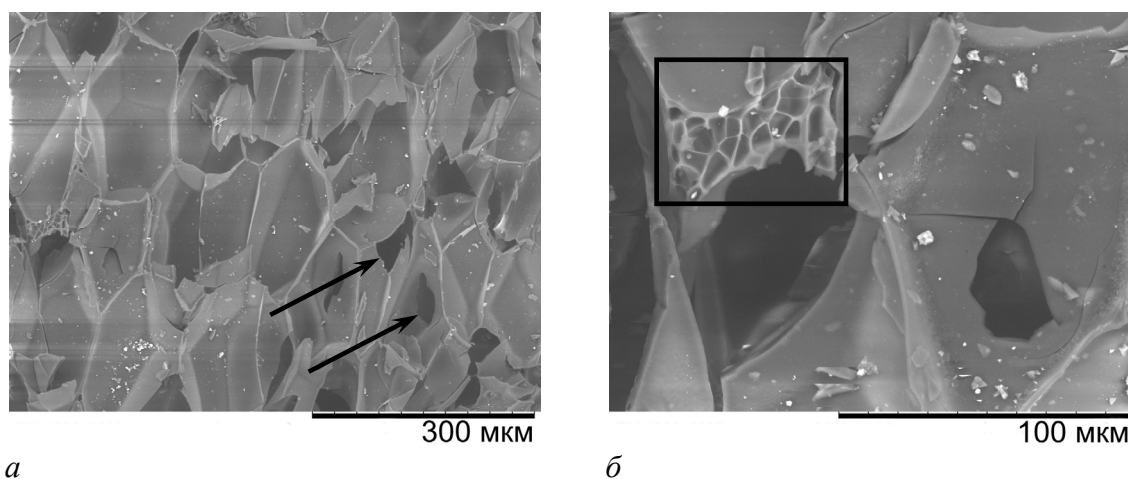


Рис. 9. Электронно-микроскопические снимки деструктивной поверхности образцов экструзионного пенополистирола *THERMIT XPS* с увеличением: а –  $\times 250$ ; б –  $\times 1000$

Деструкция коренным образом перестраивает поровую структуру пенополистиролов. Рост количества сообщающихся пор в материале приводит к резкому увеличению теплопередачи конвекцией и излучением и в итоге к повышению теплопроводности деструктивного слоя. Для обеспечения сохранения высоких теплоизоляционных свойств пенополистирол необходимо защищать от прямых ионизирующих излучений, нагревания выше 70 °С (температура начала процесса стеклования по ДТА), воздействий от несовместимых химических реагентов и др. Данная задача ограничивает область применения исследуемых материалов и решается конструктивно в наружных ограждениях зданий.

Экспериментальное определение водопоглощения пенополистирола *THERMIT XPS* при отрицательном давлении 0,1 МПа составило менее 1,4 % по объему. Установленное водопоглощение не будет оказывать



значительного влияния эксплуатационной влаги на снижение теплозащитных свойств при использовании ЭППС в ограждающих конструкциях зданий и указывает на незначительность деструкционных процессов в результате переменного замораживания и оттаивания влаги в порах материала.

**В пятой главе** представлено обоснование критерия долговечности пенополистирольных утеплителей при их эксплуатации в ограждающих конструкциях зданий. Разработан эффективный элемент для теплоизоляции зданий.

Снижение сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции  $R_0$  с эффективным утеплителем теплопроводностью  $\lambda_0$  в процессе эксплуатации в основном обусловлено снижением теплозащиты теплоизоляционного слоя. За максимально допустимое изменение величины  $R_0$  нами предлагается принимать значение  $K_R$ , при котором удельный расход тепловой энергии на отопление здания за отопительный период  $q_h^{des}$  соответствует граничному значению между классами энергетической эффективности «нормальный» и «низкий»:

$$K_R = 1 - R_m / R_0, \quad (3)$$

где  $R_m$  – сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции, определенное для граничного значения  $q_h^{des}$ .

Предлагается следующий алгоритм определения значения  $K_R$ :

1. Выполнить комплексный теплотехнический расчет ограждающих конструкций здания по проектным данным.

2. Выполнить теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций, содержащих эффективный утеплитель, с прогрессией повышения  $\lambda_0$ , с шагом обеспечивающим адекватную в рамках расчета интерполяцию, и определить по ним  $q_h^{des}$ .

3. Построить и аппроксимировать зависимость между  $q_h^{des}$  и повышением  $\lambda_0$  теплоизоляционного материала.

4. Определить значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала  $\lambda_{max}$  которому соответствует граничное значение  $q_h^{des}$ . Отношение  $\lambda_0$  к  $\lambda_{max}$  будет являться процентным ресурсом материала  $\lambda\%$ , определяющим допустимый срок эксплуатации.

5. Определить  $K_R$  по формуле (3).

По разработанной методике выполнен расчет  $\lambda\%$  основного теплоизоляционного слоя ограждающих конструкций 16-этажного крупнопанельного жилого здания серии 111-97 башенного типа, построенного в г. Красноярске. По результатам расчетов построен график зависимости  $q_h^{des}$  от повышения  $\lambda_0$  (рис. 10).

На рис. 10 видно, что при повышении проектного значения  $\lambda_0$  основного теплоизоляционного слоя ограждающей конструкции на 21 % ( $\lambda_{\max} = 0,050 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$ ) значение  $q_h^{des} = 26 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{°С}\cdot\text{сут})$ .

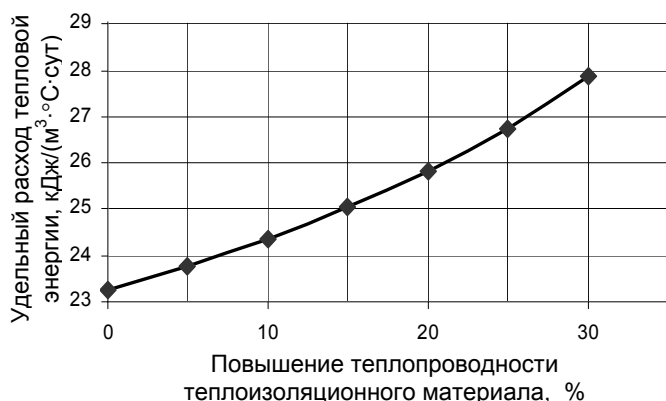


Рис. 10. Зависимость удельного расхода тепловой энергии на отопление здания от повышения коэффициента теплопроводности основного теплоизоляционного материала ограждающей конструкции

Для конкретно рассмотренного примера, использование ЭППС в качестве основного теплоизоляционного слоя толщиной не менее 150 мм в наружной ограждающей конструкции обеспечит нормативные энергетические показатели в течение всего срока службы при условии отсутствия внешних воздействий, приводящих к его деструкции.

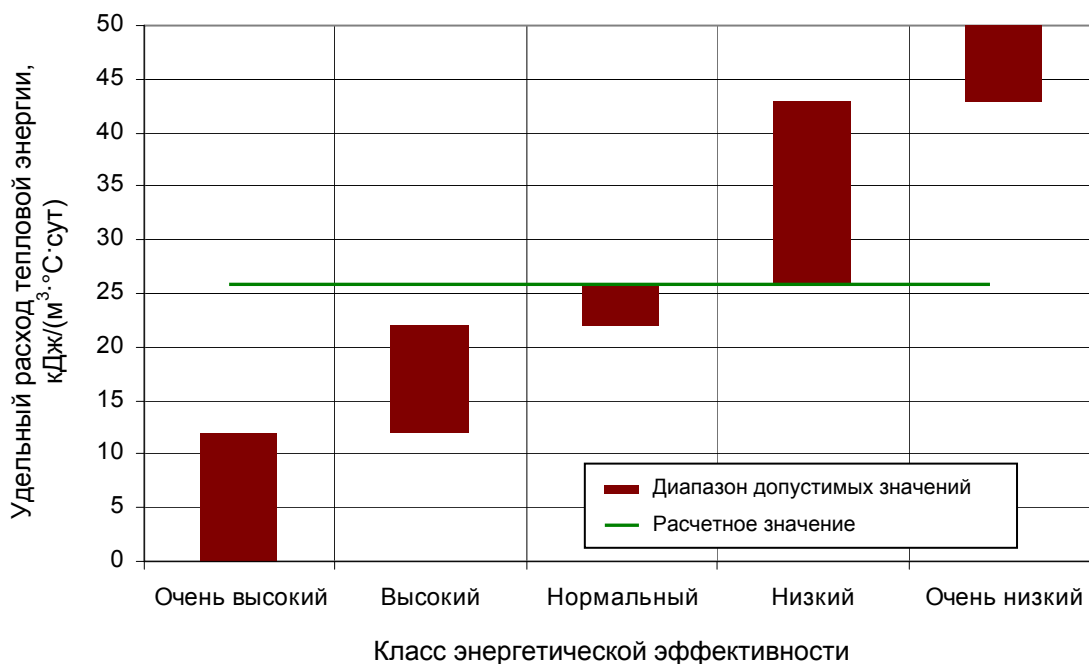


Рис. 11. Соответствие расчетного удельного расхода тепловой энергии на отопление здания классу энергетической эффективности

Данное значение является граничным значением между классами энергетической эффективности «нормальный» и «низкий» (рис. 11). Следовательно, при дальнейшем повышении  $\lambda_0$  здание уже будет соответствовать классу энергетической эффективности «низкий» и «очень низкий», что говорит о повышенных эксплуатационных затратах и необходимости реконструкции.



зии тяжелых и менее теплопроводных газов вспенивающих агентов на более легкий и теплопроводный воздух. Данный процесс для большинства используемых в производстве фреонов почти полностью протекает в период первых 25...45 лет эксплуатации. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проектировании для обеспечения долгосрочных нормативных санитарно-гигиенических требований к ограждающим конструкциям и при расчетах расхода тепловой энергии на отопление зданий при энергоаудите.

3. Признаками деструкции пенополистиролов являются:

- появление на дифрактограммах максимумов свидетельствующих об изменении структуры полистирола в направлении упорядочивания расположения атомов и появлении межатомных плоскостей;
- появление на дериватограммах дополнительного эндотермического эффекта с максимумом при 703 °С, сопровождающего потерей массы по ТГ-кривой на 2,28 %;
- различимый на микроснимках хрупкий характер разрушения полимерных стенок поровой структуры и появление локальных групп пор размером до 10 мкм.

Кристаллизация полимеров и разрушение поровой структуры является причиной повышения теплопроводности в деструктивном слое пенополистиролов.

4. Предложен критерий долговечности эффективных утеплителей по снижению теплозащитных свойств. Им является значение максимально допустимого изменения величины сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, при котором удельный расход тепловой энергии за отопительный период соответствует граничному значению между классами энергетической эффективности. Разработана методика его определения, которая может быть применена при проектировании ограждающих конструкций зданий и выборе теплоизоляционных материалов.

5. Значение допустимого уровня снижения теплозащиты ограждающей конструкции для крупнопанельного жилого 16-этажного здания башенного типа серии 111-97, построенного в г. Красноярске, составляет 14,6 %. Согласно полученному значению применение экструзионных пенополистиролов марки 35 в основном теплоизоляционном слое толщиной не менее 150 мм обеспечит нормированный уровень энергоэффективности в течение всего срока службы здания с учетом снижения теплозащитных свойств в процессе эксплуатации.

6. Использование в качестве утеплителя разработанного эффективного теплоизоляционного элемента позволяет повысить энергоэффективность зданий до 15 %.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Пат. № 92881 Российская Федерация, МПК E04B 1/76, E04B 1/78. Теплоизоляционный элемент [Текст] / Назиров Р. А., **Захарьин Е. Н.** – № 2008140614; заявл. 13.10.2008 ; опубл. 10.04.2010, Бюл. № 10. – 2 с.

2. Назиров, Р. А. Обоснование с помощью комплексных энергетических показателей значения допустимого уровня снижения требуемого сопротивления теплопередаче при расчетах долговечности ограждающих конструкций [Текст] / Р. А. Назиров, **Е. Н. Захарьин**, Д. Р. Назиров // Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск : НГАСУ, 2010. – № 10. – С. 106–111 (из списка ВАК).

3. Назиров, Д. Р. Теоретическое обоснование экспоненциальной модели теплопроводности строительных материалов [Текст] / Д. Р. Назиров, **Е. Н. Захарьин**, О. В. Соловьева // Academia. Архитектура и строительство. – М. : НИИСФ РААСН, 2009. – № 5 – С. 508–509 (из списка ВАК).

4. **Захарьин, Е. Н.** Моделирование поровой структуры пенополистирольных утеплителей с целью определения теплоизоляционных свойств [Текст] / **Е. Н. Захарьин**, Р. А. Назиров // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. Четырнадцатой Международ. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, докторантов и аспирантов. – М. : МГСУ, 2011. – С. 512–515.

5. **Захарьин, Е. Н.** / Методика определения допустимого уровня снижения теплозащитных свойств утеплителей в наружных ограждающих конструкциях [Текст] / **Е. Н. Захарьин**, Р. А. Назиров // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. Четырнадцатой Международ. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, докторантов и аспирантов. – М. : МГСУ, 2011. – С. 277–279.

6. **Захарьин, Е. Н.** Повышение энергоэффективности теплоизоляционного слоя на основе пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий [Текст] / **Е. Н. Захарьин**, А. Ф. Фалкинберг, Р. А. Назиров // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXVI регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск : СФУ, 2008. – С. 81–82.

7. Назиров, Р. А. Тепловизионное обследование ограждающих конструкций зданий и сооружений. Оценка адекватности теоретических расчетов с результатами тепловизионного обследования [Текст] / Р. А. Назиров, **Е. Н. Захарьин** // Меня оценят в XXI веке: сб. тез. докл. участников IV Всерос. молодежного фестиваля. – М., 2007 – С. 399–400.

8. **Захарьин, Е. Н.** Применение компьютерных программ при обследовании наружных ограждающих конструкций тепловизионным методом [Текст] / **Е. Н. Захарьин**, Д. А. Михеев // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXIV регион. науч.-техн. конф. сту-

дентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск : КрасГАСА, 2006. – С. 218–219.

9. Назиров, Р. А. Теплотехнический расчет стыков железобетонных конструкций по программе *TEMPER-3D* [Текст] / Р. А. Назиров, **Е. Н. Захарьин** // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXIV регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск : КрасГАСА, 2006. – С. 216–217.

10. **Захарьин, Е. Н.** Теплотехнические показатели панелей на жестких и гибких связях [Текст] / **Е. Н. Захарьин**, Д. А. Михеев // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXIV регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск : КрасГАСА, 2005. – С. 128–129.

Подписано в печать 09.09.2011  
Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1,2  
Тираж 100 экз. Заказ № 4832

Отпечатано:  
Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82 а