

УДК 699.82

# ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Г. ГАГАРИН, П.П. ПАСТУШКОВ, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН

Ключевые слова: теплопроводность, полимер, теплоизоляция, газовый состав, поры  
Keywords: thermal conductivity, polymer, thermal insulation, gas composition, pores

**Настоящая статья посвящена описанию исследований изменения с течением времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов вследствие изменения газового состава в порах.**

Известно, что теплопроводность непористых пластмасс составляет 0,17-0,35 Вт/(м·°С) [1], при этом воздуха в спокойном состоянии – от 0,025 до 0,028 Вт/(м·°С) [1]. Газонаполненные пластмассы могут обладать теплопроводностью меньшей, чем воздух, только в том случае, если они наполнены газом с теплопроводностью ниже воздуха. По данным [2], теплопроводность пенополиуретана (PUR) составляет от 0,02 до 0,03 Вт/(м·°С). Согласно [3] теплопроводность этого же материала может быть от 0,024 до 0,04 Вт/(м·°С). Согласно [4] теплопроводность PUR, применяемого для утепления трубопроводов, достигает 0,055 Вт/(м·°С). Эти данные свидетельствуют, во-первых, о том, что в порах материала содержится газ с меньшей теплопроводностью, чем воздух, а во-вторых, о том, что теплопроводность одного и того же газонаполненного материала может значительно изменяться.

## Теплопроводность газонаполненных полимерных материалов

Газонаполненную пластмассу можно представить как композиционный материал, состоящий из двух материалов с различной теплопроводностью. При теоретических исследованиях теплопроводности строительных материалов применяют формулу теплопроводности композиционных материалов – впервые, по-видимому, предложенную J.C. Maxwell [5]. При выводе таких формул используют аналогию между тепло- и электропроводностью и представляют структуру материала в виде параллельных и последовательных соединений различных сопротивлений. При этом подходе для материала, состоящего из двух компонентов: скелета и газовых включений, максималь-

ное значение теплопроводности будет в том случае, когда тепловой поток направлен параллельно соединению слоя газа и слоя твердого материала, из которого состоит скелет.

Теплопроводность полимерных теплоизоляционных материалов определяется теплопроводностью материала скелета и теплопроводностью смеси газов (дисперсной фазы), заполняющей поры [6]. Если объемная доля дисперсной фазы в материале будет составлять  $\zeta_d$ , доли ед., то объемная доля скелета будет составлять  $1-\zeta_d$ , доли ед. Тогда формулу для зависимости теплопроводности газонаполненного материала  $\lambda$ , Вт/(м·°С) от теплопроводности составляющих его веществ можно записать в виде:

$$\lambda = (1-\zeta_d) \cdot \lambda_c + \zeta_d \cdot \lambda_d, \quad (1)$$

где  $\lambda_c$  – теплопроводность материала скелета, Вт/(м·°С);  $\lambda_d$  – теплопроводность дисперсной фазы, Вт/(м·°С).

Формула (1) предполагает, что слои однородных материалов идут параллельно друг другу и параллельно тепловому потоку. Реальная теплопроводность будет меньше, чем оцениваемая по формуле (1). Минимальное же значение теплопроводности будет в том случае, когда тепловой поток направлен перпендикулярно параллельному соединению слоя воздуха и слоя твердого материала, из которого состоит скелет:

$$\lambda = \lambda_c \cdot \lambda_d / (\lambda_c \zeta_d + \lambda_d (1-\zeta_d)). \quad (2)$$

Значения, полученные по формулам (1) и (2), хотя и отличаются, но близки между собой. Иногда используют комбинацию значений (1) и (2) [1]. Однако, учитывая наличие не вполне определенной величины  $\zeta_d$ , предполагается, что использование формулы (1) обеспечит достаточную точность.

## Математическая модель изменения теплопроводности с течением времени

В статье была рассмотрена задача определения функции изменения теплопроводности

ти газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов с течением времени. Поступающий при производстве в поры полимерных теплоизоляционных материалов газ с течением времени замещается на воздух. Если обозначить за  $\zeta_1$  – объемную долю газа в материале, доли ед., а за  $\zeta_2$  – объемную долю воздуха в материале, доли ед., то  $\zeta_{\text{д}} = \zeta_1 + \zeta_2$ .

Процесс замещения газа в порах на воздух описывается изменением слагаемого  $\zeta_{\text{д}}\lambda_{\text{д}}$  в уравнении (1) от значения  $\zeta_{\text{д}}\lambda_1$  до значения  $\zeta_{\text{д}}\lambda_2$ , при этом  $\zeta_1$  изменяется от  $\zeta_{\text{д}}$  до 0, а  $\zeta_2$  изменяется от 0 до  $\zeta_{\text{д}}$ . В любой момент времени слагаемое  $\zeta_{\text{д}}\lambda_{\text{д}}$  в уравнении (1) можно представить в виде:

$$\zeta_{\text{д}}\lambda_{\text{д}} = \zeta_1\lambda_1 + \zeta_2\lambda_2 = \zeta_1\lambda_1 + (\zeta_{\text{д}} - \zeta_1)\lambda_2. \quad (3)$$

Теплопроводность материала зависит от объемной доли газа в порах материала. Естественно предположить, что скорость изменения объемной доли газа в материале  $\zeta_1$ , пропорциональна этой доле:

$$\frac{d\zeta_1}{dt} = -s \cdot \zeta_1. \quad (4)$$

Знак минус в правой части уравнения означает то, что величина  $\zeta_1$  является убывающей. Начальным для решения уравнения (4) является следующее условие:  $\zeta_1 = \zeta_{\text{д}}$  при  $t=0$ . Решением дифференциального уравнения (4) с указанным начальным условием является следующее выражение:

$$\zeta_1 = \zeta_{\text{д}} \cdot \exp(-s \cdot t) \quad (5)$$

Для вывода уравнения изменения теплопроводности газонаполненного материала со временем, по причине замещения газа в порах на воздух, уравнение (1) дифференцируется с подстановкой в него выражений (3) и (5):

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{d}{dt} [(1 - \zeta_{\text{д}})\lambda_{\text{с}} + \zeta_1\lambda_1 + (\zeta_{\text{д}} - \zeta_1)\lambda_2] = \lambda_1 \frac{d\zeta_1}{dt} - \lambda_2 \frac{d\zeta_1}{dt} = \\ &= (\lambda_1 - \lambda_2) \frac{d\zeta_1}{dt} = (\lambda_1 - \lambda_2)(-s \cdot \zeta_1) = (\lambda_1 - \lambda_2)(-s \cdot \zeta_{\text{д}} \cdot \exp(-s \cdot t)). \end{aligned}$$

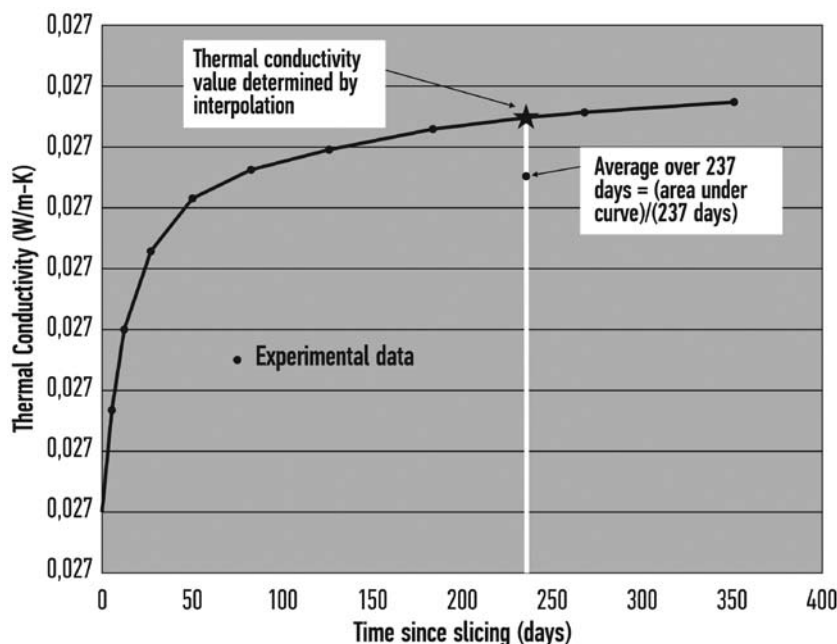


Рис. 1. Изменение теплопроводности вспененного изоляционного материала согласно [7]

Таким образом:

$$\frac{d\lambda}{dt} = (\lambda_1 - \lambda_2)(-s \cdot \zeta_{\text{д}} \cdot \exp(-s \cdot t)). \quad (6)$$

Учитывая начальное условие, что  $\lambda = \lambda_0$  при  $t=0$ , интегрирование уравнения (6) и дает искомое уравнение изменения теплопроводности газонаполненного материала с течением времени:

$$\lambda = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1) \zeta_{\text{д}}] \cdot [1 - e^{-st}] \quad (7)$$

или

$$\lambda - \lambda_0 = [(\lambda_2 - \lambda_1) \zeta_{\text{д}}] \cdot [1 - e^{-st}]. \quad (7a)$$

Уравнение (7) также позволяет ответить на вопрос, каково будет значение установившейся теплопроводности материала, т.е. теплопроводности в тот момент, когда закончится процесс диффузии газа из пор материала. Для этого находится значение теплопроводности при предельном переходе  $t \rightarrow \infty$ :

$$\lambda_{\infty} = \lambda_0 + [(\lambda_2 - \lambda_1) \zeta_{\text{д}}]. \quad (8)$$

Таким образом, из уравнения (7) следует, что теплопроводность газонаполненного полимерного материала в процессе эксплуатации увеличится на величину  $(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \zeta_{\text{д}}$ . Этот параметр не зависит от времени, а определяется свойствами газа, поступающего в поры при производстве, и структурой материала.

В целом теплопроводность полимерных теплоизоляционных материалов, для вспенивания которых применяется газ с теплопроводностью ниже воздуха, изменяется по графику, соответствующему рис. 1, приведенному в [7].

### Экспериментальное определение параметров уравнения изменения теплопроводности

Уравнения (7) и (7a) содержат два параметра:  $(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \zeta_{\text{д}}$  – разность теплопроводности воздуха и газа, поступающего в поры при производстве материала, помноженная на долю дисперсной фазы в материале, и  $s$  – параметр, характеризующий скорость замены газа воздухом, имеющий размерность  $\text{с}^{-1}$ . Эти параметры можно определить экспериментальным путем.

Для экспериментального определения параметров уравнения изменения теплопроводности газонаполненных полимерных материалов (7) проводится ряд измерений теплопроводности образцов материала сразу после производства и через произвольные, но известные моменты времени. Результаты этих экспериментов обрабатываются с использованием уравнения (7a). Для этого набор экспериментальных значений  $\{t_i, \lambda_i\}$ ,  $i=0, 1, \dots, n$  представляется в виде набора данных  $\left\{ t_i, \frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}} \right\}$ ,  $i=2, 3, \dots, n$ . Каждый элемент этого набора должен удовлетворять уравнению (7a). Таким образом, получается система уравнений вида:

$$\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\lambda_{i-1} - \lambda_0} = \frac{1 - e^{-st_i}}{1 - e^{-st_{i-1}}}, \quad i=2, 3, \dots, n. \quad (9)$$

Таблица 1. Изменение теплопроводности образцов плит PIR после производства

| Номер образца    | Теплопроводность в сухом состоянии при 25°С, $\lambda_0$ , Вт/(м·°С) |                      |                       |                       |                       | Примечание        |
|------------------|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
|                  | 30 суток после пр-ва   | 90 суток после пр-ва | 150 суток после пр-ва | 270 суток после пр-ва | 360 суток после пр-ва |                   |
| 1                | 0,024  | 0,026                | 0,026                 | 0,027                 | 0,027                 | край              |
| 2                | 0,022  | 0,024                | 0,025                 | 0,026                 | 0,027                 | центр             |
| 3                | 0,023  | 0,024                | 0,025                 | 0,025                 | 0,026                 | край              |
| 4                | 0,022  | 0,024                | 0,025                 | 0,025                 | 0,026                 | центр             |
| 5                | 0,023  | 0,024                | 0,025                 | 0,026                 | 0,027                 | край, без фольги  |
| 6                | 0,022  | 0,024                | 0,025                 | 0,025                 | 0,026                 | центр, без фольги |
| Среднее значение | 0,023  | 0,024                | 0,025                 | 0,026                 | 0,0265                |                   |

Уравнение (9) преобразуется к виду:  $\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\lambda_{i-1} - \lambda_0} = \frac{e^{s t_i} - 1}{e^{s t_{i-1}} - 1} \cdot \frac{e^{s t_{i-1}}}{e^{s t_i}}$ , который при предельном переходе  $t \rightarrow \infty$  сводится к:

$$\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\lambda_{i-1} - \lambda_0} \approx e^{s(t_{i-1} - t_i)}. \quad (10)$$

Логарифмирование (10) приводит к выражению:

$$\ln\left(\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\lambda_{i-1} - \lambda_0}\right) = s(t_{i-1} - t_i). \quad (11)$$

Далее, построением аппроксимирующей прямой для полученных экспериментальных данных в координатах  $\left\{\ln\left(\frac{\lambda_i - \lambda_0}{\lambda_{i-1} - \lambda_0}\right), (t_{i-1} - t_i)\right\}$  из уравнения (11) находится параметр  $s$  как угловой коэффициент.

Затем по уравнению (7а), построением аппроксимирующей прямой в координатах  $\{(\lambda_i - \lambda_0), (1 - e^{-s t_i})\}$  находится параметр  $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_d$ .

### Изменение теплопроводности пенополиизоцианурата (PIR) с течением времени

Распространенным на современном строительном рынке видом полимерных теплоизоляционных материалов, при производстве которого в поры поступает смесь газов с теплопроводностью ниже воздуха, является пенополиизоцианурат (PIR). Для экспериментальных исследований изменения теплопроводности с течением времени по причине замещения газа, поступающего в поры материала при производстве, на воздух, а также апробации разработанной математической модели, в лабораторию строительной теплофизики НИИСФ РААСН поступили плиты PIR с облицовкой из фольги с известной датой производства (апрель 2016 г.).

Испытания проводились по методике ГОСТ 7076 на 6 образцах плит PIR размерами 0,25x0,25x0,04 м на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 «250» (свидетельство о поверке №20536/16, действительно до 3.10.2018 г.) при средней температуре 25°С в образце. Образцы были вырезаны из трех плит по два образца – один с краю плиты (нечетные номера), другой из центра плиты (четные номера). С образцов под номерами 5 и 6 была снята облицовка из фольги для

определения важности наличия облицовки на скорость замещения газа в порах. Испытания теплопроводности были проведены спустя 30, 90, 150, 270 и 360 суток от даты производства. Между испытаниями образцы хранились в естественных условиях, но без прямого попадания солнечного света. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Для использования разработанной математической модели изменения теплопроводности были найдены необходимые параметры уравнения (7) по алгоритму, описанному выше. При этом за начальную точку было принято испытание спустя 30 суток от даты производства, что соответствует ситуации с началом эксплуатации материала спустя месяц от даты производства.

По уравнению (11) найден параметр  $s=0,0048 \text{ с}^{-1}$ , характеризующий скорость замещения газа в порах на воздух. А затем по уравнению (7а) найден параметр  $(\lambda_1 - \lambda_2)\zeta_d = 0,045 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ . После подставления рассчитанных параметров в уравнение (7) выведен закон изменения теплопроводности испытанного материала в зависимости от времени:  $\lambda = 0,023 + 0,0045 \cdot [1 - e^{-0,0048 t}] \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ .

На рис. 2 представлено сравнение изменения теплопроводности PIR с течением времени, полученное экспериментальным путем и рассчитанное по разработанной математической модели.

Как видно из представленного на рис. 2 графика, результаты расчетов по формуле (7) хорошо коррелируются с результатами экспериментов, что говорит об адекватности предложенной математической модели.

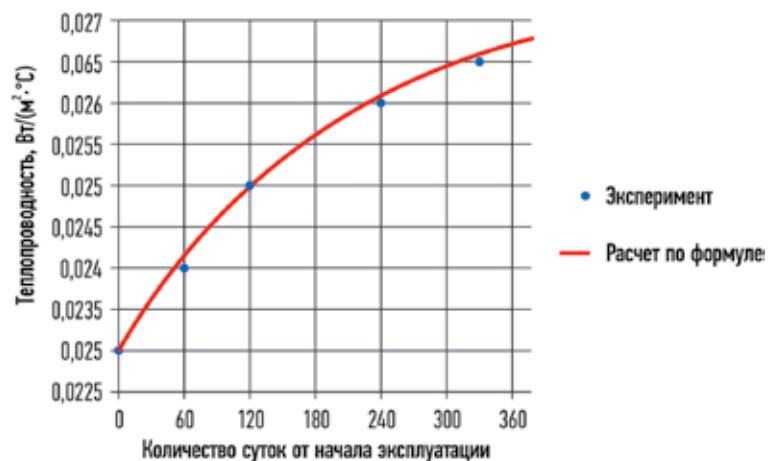


Рис. 2. Изменение теплопроводности PIR с течением времени

По найденным параметрам также можно найти значение установившейся теплопроводности PIR по формуле (8). Оно составляет:  $\lambda_{\infty}=0,023+0,0045=0,0275$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Именно это значение теплопроводности следует учитывать при расчете теплопроводности в условиях эксплуатации А и Б по СП 50.13330, а также при расчете энергоэффективности данного теплоизоляционного материала по методике [8].

#### Выводы:

По результатам проведенных исследований предложена математическая модель, описывающая изменение теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов во времени. Применимость математической модели проверена на примере пенополиизоцианурата (PIR). Определение параметров материала в рамках разработанной модели позволяет прогнозировать теплопроводность материала в эксплуатационных условиях, т.е. после ряда лет эксплуатации. Применение модели к обработке экспериментальных данных по определению теплопроводности газонаполненного полимерного материала позволяет существенно сократить время проведения эксперимента для определения эксплуатационных свойств материала в конструкции. По проведенному циклу экспериментальных исследований с применением разработанной математической модели получены новые важные для практики результаты: уравнение изменения теплопроводности PIR с течением времени по причине замещения смеси газов, поступающей при производстве, на воздух, а

также значение установившейся теплопроводности PIR, составляющее 0,0275 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

#### Библиографический список

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. 5-е изд. – М.: АВОК-ИРЕСС, 2006. – 252 с.
2. Bjørn Petter Jelle. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities // *Energy and Buildings*. 2011. V. 43. P. 2549-2563.
3. K. Dämmstoffe im Bauwesen // *In Bauphysik Kalender*. 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren. Herausgegeben von Nabil A. Fouad. – Berlin. 2015. S. 33-110.
4. Немова Т.Н., Лежнева Ю.А., Цветков Н.А., Алексеева Е.Г. Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016, №5(58). С. 151-160.
5. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 3rd ed. – Oxford, 1904.
6. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. – Москва. 2000. – 396 с. (<http://dlib.rsl.ru/01000300256>)
7. ASTM Standard C1303/C1303M – 12. Standard Test Method for Predicting Long-Term Thermal Resistance of Closed-Cell Foam Insulation. March 2012.
8. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий // *Строительные материалы*. 2013. №6. С. 7-9.

## ВЫСТАВКА КРЫМ. СТРОЙИНДУСТРИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ОСЕНЬ-2017

9-11 ноября

г. Ялта, ул. Дражинского, 50  
Гостиничный комплекс  
«ЯЛТА-ИНТУРИСТ»

#### Разделы экспозиции:

- Современные строительные материалы и технологии.
- Краски, лаки.
- Строительные машины и механизмы.
- Окна, двери, кровли, фасады.
- Металлические конструкции.
- Сантехника.
- Экология. Системы очистки воды.
- Системы отопления, вентиляции и кондиционирования.
- Электротехническое и осветительное оборудование.
- Кабельно-проводниковая продукция.
- Энергосбережение и использование нетрадиционных экологически чистых источников энергии.
- Системы автоматизации. Программное обеспечение предприятий строительной, энергетической, электротехнической отраслей промышленности.

**ФОРУМ** КРЫМСКИЕ  
ВЫСТАВКИ

Оргкомитет: Республика Крым, г. Симферополь, ул. Горького, 8, оф. 27,  
моб.: +7 978 78 178 83, т./ф.: +7(3652) 54-60-66, +7(3652) 54-67-46,  
E-mail: [marketing@expoforum.biz](mailto:marketing@expoforum.biz), <http://expoforum.biz/>

