

# Лучистая теплопроводность в лёгких утепляющих материалах

Е.Ю. ШАМПАРОВ, И.Н. ЖАГРИНА, С.В. РОДЭ

РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва

E-mail: shamparov@bk.ru, jagrina@mail.ru, rode-s-v@mail.ru

## Аннотация

Приведена оценка рассеивающих и поглощающих способностей лёгких утепляющих материалов в ИК диапазоне спектра. Показана применимость к таким материалам уравнения Фурье в обобщённой форме с учётом лучистой теплопроводности среды. Проведены бесконвекционные измерения тепловых сопротивлений образцов материалов разной толщины. Надёжно подтверждены теоретические обоснования и представления о теплозащитных свойствах материалов. Получены точные значения суммарной теплопроводности материалов и оценены значения лучистой теплопроводности материалов и глубины проникновения в них теплового излучения.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, рассеяние и поглощение в среде, закон Кирхгофа, лучистая теплопроводность, уравнение Фурье, радиационно-кондуктивный перенос тепла, тепловое сопротивление материала.

Задачи по диффузному распространению излучения в оптике встречаются сравнительно редко, и потому относятся к достаточно сложным. Тем не менее иногда их приходится решать, когда учёт диффузного излучения оказывается значимым. В связи с этим в настоящей работе речь пойдёт о распространении теплового излучения в случайно рассеивающей среде.

Как известно, есть три механизма теплопередачи – кондукция, конвекция и тепловое излучение. Последнее вносит существенный вклад в перенос тепла только в прозрачной среде, каковой в природных условиях, по сути, является только воздух. Вклад кондуктивной составляющей существенен при небольшой толщине слоя воздуха – в несколько миллиметров. При большей толщине радиационная составляющая доминирует над кондуктивной. Конвекционный вклад в значительной степени зависит от гео-

метрии передающей тепло системы и крайне сложен для анализа, так что при измерениях мы постарались сделать его несущественным.

Диффузное рассеяние происходит на случайных неоднородностях в среде. Если характерный размер неоднородностей меньше длины волны излучения, то рассеяние частотно зависимо: чем меньше длина волны, тем больше рассеяние. Именно поэтому рассеяние солнечного света на микроскопических пылинках в атмосфере в коротковолновой части спектра происходит интенсивней, и мы видим небо голубым. И наоборот, если размер неоднородностей, как у капель или снежинок в облаках, много больше длины волны излучения, интенсивность рассеяния от частоты не зависит; и, соответственно, облака мы видим белыми.

Современные лёгкие утепляющие материалы имеют в среднем практически изотропную структуру, и для теплового излучения их можно считать случайной рассеивающей средой. Есть два основных типа таких материалов – вспененные и волокнистые. И в том, и в другом случае как характерный размер пузырьков (~100 мкм), так и диаметр волокон (~20 мкм) больше длины волны излучения (~10 мкм). Для наших измерений были выбраны образцы:

- вспененного полиэтилена толщиной 2,2 мм с плотностью 16,5 кг/м<sup>3</sup>, размером пузырьков 0,1–0,3 мм и долей заполненного полиэтиленом объёма 1,74 %;

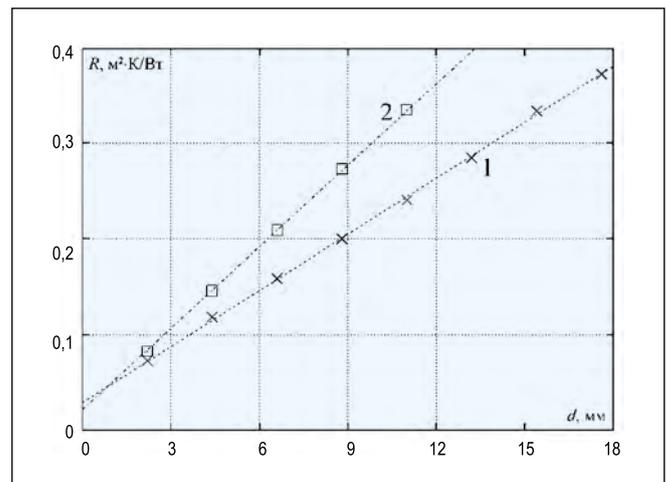
- вспененного полистирола (пенопласта) толщиной 5,0 мм с плотностью 32 кг/м<sup>3</sup>, размером пузырьков 0,05–0,15 мм и долей заполненного полистиролом объёма 2,56 %;

- выпускаемого под маркой «Холлофайбер» нетканого материала толщиной 6,0 мм с плотностью 11,7 кг/м<sup>3</sup>, выполненного из полых волокон полиэтилентерефталата (лавсана) толщиной 32 мкм и долей заполненного им объёма 0,9 %.

Так как размеры неоднородностей во всех образцах много больше длины волны, рассеяние теплового излучения в них должно быть частотно независимым.

И полиэтилен, и полистирол, и полиэтилентерефталат, хотя и имеют ряд линий поглощения, обладают в ИК диапазоне сравнительно высокой прозрачностью (средняя глубина проникновения ~1 мм) [1]. Так как у пористых материалов доля заполненного твёрдым веществом пространства равна всего 1–2 %, их эквивалентная по поглощению толщина должна составлять 5–10 см. По визуальным характеристикам пористых материалов нетрудно оценить, что рассеяние излучения происходит на «толщине» ~5 мм, много меньшей 5 см. При наличии одновременно поглощения и рассеяния глубина проникновения излучения  $a$  определяется двумя параметрами: коэффициентом рассеяния  $\nu$  и коэффициентом поглощения  $\chi$  [2]:  $a = (\nu + \chi)^{-1}$ . У выбранных материалов, очевидно,  $\nu$  много больше  $\chi$ , и, соответственно, можно считать, что  $a$  в ИК диапазо-

Рис. 1. Зависимости теплового сопротивления стоек образцов вспененного полиэтилена от толщины стойки: 1 – без фольги, 2 – для стойки, проложенной сверху, снизу и между всеми слоями зеркальной алюминиевой фольгой



не практически не зависит от длины волны и каждый из материалов можно рассматривать как диффузную среду.

Динамику лучистого распространения тепла в диффузной среде рассматривают на основании закона Кирхгофа для теплового излучения. Радиационную составляющую теплопереноса в такой среде характеризует её лучистая теплопроводность  $L$  [3]

$$L = 16 \cdot \sigma \cdot T^3 \cdot a/3, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана и  $T$  – абсолютная температура. В приближении большой оптической толщины среды на расстояниях от границ, существенно больших глубины проникновения теплового излучения, плотность потока лучистой энергии  $\Phi$  прямо пропорциональна градиенту температуры  $\nabla T$ , как в уравнении Фурье для кондуктивной теплопроводности. Поэтому при радиационно-кондуктивном переносе тепла в таких материалах должно выполняться уравнение Фурье в обобщённой форме:

$$\Phi = - (L + D) \nabla T, \quad (2)$$

где  $D$  – кондуктивная теплопроводность среды. Соответственно тепловое сопротивление слоя материала  $R$  должно быть пропорционально его толщине  $d$ :

$$R = \Delta T / \Phi = d / (L + D), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – разность температур на краях слоя.

На разработанной нами установке для бесконвекционных измерений тепловой проницаемости [4] «в плоскопараллельной геометрии» определены были зависимости теплового сопротивления стопок образцов от числа слоёв материала (толщины), которые представлены на рис. 1–3 (зависимость № 1). Там же для демонстрации наличия лучистой теплопроводности приведены зависимости теплового сопротивления стопок тех же образцов, проложенных тонкой (10 мкм) алюминиевой фольгой, сверху и снизу стопки и между всеми слоями (зависимость № 2).

Особенность данной установки в том, что рабочие плоские элементы, между которыми создаётся разность температур, сделаны из монокристаллического кремния, прозрачного в ИК

Рис. 2. Зависимости теплового сопротивления стопок образцов вспененного полистирола от толщины стопки: 1 – без фольги, 2 – для стопки, проложенной сверху, снизу и между всеми слоями зеркальной алюминиевой фольгой

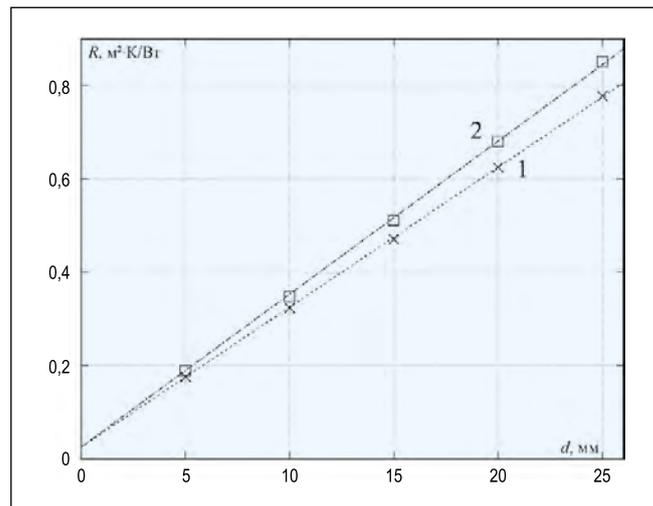
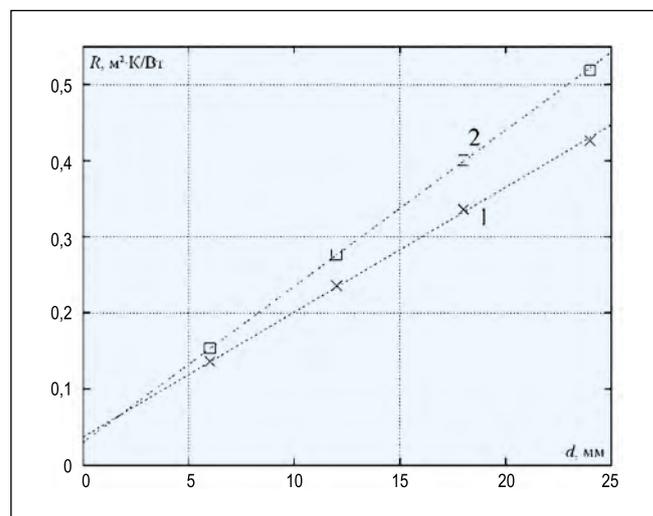


Рис. 3. Зависимости теплового сопротивления стопок образцов «Холлофайбера» от толщины стопки: 1 – без фольги, 2 – для стопки, проложенной сверху, снизу и между всеми слоями зеркальной алюминиевой фольгой



диапазоне. Это существенно ослабляет поверхностные эффекты, из-за чего влияние границ среды почти незаметно.

Тот факт, что для всех материалов зависимость теплового сопротивления от толщины среды с высокой точностью (~1 %) легла на прямую линию, с глубокой очевидностью подтверждает правильность наших представлений (3) о свойствах исследуемых материалов. Приближение лучистой теплопроводности (2) вполне применимо к такой среде. Величина, обратная коэффициенту наклона прямых, равна суммарной теплопроводности среды  $L + D$ . Соответствующие её значения для вспененных полиэтилена и полистирола и для «Холлофайбера» –  $0,0514 \pm 0,0003$ ,  $0,0333 \pm 0,0005$  и  $0,0610 \pm 0,0005$  Вт/(м·К).

Алюминиевая фольга практически полностью (на 99 %) отражает тепловое излучение. А при столь малой толщине её вклад в кондуктивный перенос тепла пренебрежимо мал.

Соответственно, результатом добавления фольги между слоями материалов должно быть уменьшение только радиационной составляющей переноса тепла. Различия зависимостей для образцов с фольгой и без фольги (рис. 1–3) показывают, что вклад радиационной составляющей сравним с вкладом кондуктивной. Как и в случае с образцами без фольги, во втором случае ставилось последовательно несколько образцов с одинаковым тепловым сопротивлением. Поэтому графики зависимости теплового сопротивления от толщины стопки с фольгой тоже явились прямыми линиями. При этом наклон графиков вырос, а «теплопроводность» снизилась. Суммарная теплопроводность материалов с фольгой составила  $0,0353 \pm 0,0003$  для вспененного полиэтилена,  $0,0305 \pm 0,0005$  для вспененного полистирола и  $0,0490 \pm 0,0005$  Вт/(м·К) для «Холлофайбера». Чем меньше расстояние между экранами из фольги, тем существенней должно быть уменьше-

ние радиационной составляющей переноса тепла. Поэтому для вспененного полиэтилена с толщиной 2,2 мм относительное изменение «теплопроводности» (31,3 %) оказалось существенно большим, чем для вспененного полистирола с толщиной 5 мм (8,4 %) и «Холлофайбера» с толщиной 6 мм (19,7 %).

Кондуктивная теплопроводность полимеров сравнительно невысока. Поэтому в исследованных материалах основную роль в кондуктивной передаче тепла играет занимающий 99 % объёма воздух, теплопроводность которого при средней температуре измерений составляет 0,0272 Вт/(м·К) [5]. Лучистые теплопроводности вспененного полиэтилена и «Холлофайбера» примерно равны кондуктивным. По формуле (1) нетрудно оценить глубину проникновения теплового излучения в эти материалы:  $a \approx 3,5$  мм. Это неплохо согласуется и с визуально наблюдаемой прозрачностью материалов, и с результатами измерений для стопок образцов с фольгой. Более плотный и мелкодисперсный вспененный полистирол существенно менее прозрачен для теплового излучения. Его лучистая теплопроводность в 3–5 раз меньше, чем у двух других материалов. И, соответственно,  $a \approx 1$  мм. Поэтому, несмотря на меньшую толщину (5 мм), чем у «Холлофайбера» (6 мм), у него (образцов с фольгой) относительное изменение «теплопроводности» (8,4 %) оказалось значительно меньшим, чем у «Холлофайбера» (19,7 %).

Таким образом, результаты наших измерений наглядно показывают роль лучистой теплопроводности в лёгких утепляющих материалах. Сформированные представления и корректные измерения позволяют достаточно точно находить характеристики теплозащитных свойств материалов. Причём делать это можно и по визуальным характеристикам материалов. В стремлении максимально облегчить утепляющие материалы, производители уже достигли уровня их изготовления, при котором вклад радиационной составляющей оказывается сравнимым с вкладом кондуктивной составляющей теплового переноса. Модификация материалов в плане уменьшения радиационной составляющей теплопроводности – важный резерв улучшения их теплозащитных свойств и важное направление развития соот-

ветствующих производств в ближайшем будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кристаллические полиолефины: Сборник моногр. статей / Под ред. Р.А. Раффа и К.В. Дака. Том 2. Строение и свойства. – М.: Химия, 1970.– 469 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975.– 934 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979.– 416 с.
4. Шампаров Е.Ю., Жагрина И.Н. Установка для прецизионных бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов при температурах, близких к комнатной / Полезная модель РФ № 166709. 2016. Бюл. № 34.
5. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.– 1232 с.



**Шампаров Евгений Юрьевич,**

кандидат техн. наук, доцент. Окончил в 1994 г. факультет общей и прикладной физики МФТИ. Доцент кафедры физики РГУ им. А.Н. Косыгина.

Область научных интересов: физическая оптика, материаловедение производств текстильной и лёгкой промышленности



**Жагрина Инна Николаевна,**

кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 1993 г. факультет технологии и конструирования изделий из кожи МТИЛП. Доцент кафедры матери-

аловедения и товарной экспертизы РГУ им. А.Н. Косыгина. Область научных интересов: физическая оптика, материаловедение производств текстильной и лёгкой промышленности, управление качеством



**Родз Сергей Витальевич,**

доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1964 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Заведующий кафедрой физики РГУ им. А.Н. Косыгина. Область научных ин-

тересов: физическая оптика, материаловедение производств текстильной и лёгкой промышленности

## СПб ГУП «Ленсвет» сэкономило 6,8 млн рублей бюджетных средств на приобретении отечественных аналогов импортного оборудования

Экономический эффект СПб ГУП «Ленсвет» от приобретения отечественных аналогов импортного оборудования за 2017 г. составил 6,8 млн руб. Доля отечественного оборудования, используемого в настоящее время при реконструкции и строительстве наружного освещения, составляет 100 %, при эксплуатации в 2017 году – 99,1 %. Закупаемое отечественное оборудование для наружного функционального и архитектурно-художественного освещения на 65 % является петербургским.

В 2017 г. «Ленсветом» для обеспечения импортозамещения проводилась работа по поиску патентов и разработок на основе достижений фундаментальных наук. В результате найдено и проанализировано 1463 патента (599 патентов на промышленный образец, 663 патента на полезную модель, 201 патент на изобретение). Из всех проанализированных патентов, косвенно касающихся деятельности СПб ГУП «Ленсвет», отобран для изучения возможности применения в наружном освещении Санкт-Петербурга 21 патент.

СПб ГУП «Ленсвет» продолжает также работу по взаимодействию с предприятиями, выпускающими светотехническую продукцию, и усовершенствующими её на основании рационализаторских предложений.

Не остаются без внимания тема внедрения в наружное освещение города отечественных защитных антикоррозионных, огнезащитных, антивандальных покрытий и изделий из композиционных материалов (продолжена опытная эксплуатация опор наружного освещения из композитных материалов, а также вместо металлического несущего троса тестируется синтетический композиционный трос на двух объектах Северного и Приморского эксплуатационных подразделений СПб ГУП «Ленсвет»). На прошедшем заседании сотрудники СПб ГУП «Ленсвет» ознакомились с инновационными разработками ООО «Уральский завод многогранных опор» и ООО «Техноком». Вниманию были представлены изготовленные методом горячего оцинкования металлоконструкции и подземные распределительные системы, которые могли бы применяться в наружном освещении Санкт-Петербурга.

Для «Ленсвета» остаётся актуальным вопрос замещения импортных ламп и светильников для художественного освещения на аналоги российских производителей, а так же поиск отечественных расходных материалов для текущей эксплуатации установок наружного освещения Санкт-Петербурга. По-прежнему востребованными для СПб ГУП «Ленсвет» остаётся изготовление изделий из композитных полимерных материалов: шкаф ШРУ 400, опоры освещения, несущий трос для подвесной сети и др.

lensvet.spb.ru  
02.03.2018