

УДК 536.21

к.т.н., профессор Керш В.Я., Колесников А.В.,  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ

*Анализируются результаты экспериментальных исследований физических моделей теплоизолирующих материалов методами электротепловой аналогии с применением теории перколяции. Обнаружено скачкообразное изменение проводимости материалов при определенной концентрации изоляционного компонента.*

**Ключевые слова:** теплоизоляция, теплоизоляционное покрытие, теплопроводность, электротепловая аналогия, перколяция, структура.

Повышение требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций зданий и сооружений предполагает использование энергоэффективных строительных и отделочных материалов. Актуальными становятся разработка и совершенствование теплоизоляционных покрытий – штукатурок и красок.

В зависимости от конкретного назначения, теплоизоляционные материалы должны отвечать, кроме собственно теплоизолирующих, ряду других требований, например по адгезии, паропроницаемости, прочности и др. Проектирование таких составов должно проводиться на основе многокритериальной оптимизации. Однако основным нормируемым свойством теплоизоляционных материалов остается низкая теплопроводность.

Основу любой теплоизоляционной композиции составляют теплопроводное связующее (цементное, гипсовое, полимерное) и теплоизолирующий наполнитель минерального или органического происхождения. Количественное соотношение компонентов с высокой и низкой теплопроводностью определяет теплозащитные свойства материала. Подбор составов осуществляется исключительно эмпирическим путем, что, на наш взгляд, ограничивает возможности по созданию максимально эффективных теплоизоляторов.

Представления об особенностях теплопереноса в двухкомпонентных системах, полученные методами технической теплофизики [1,2], могут быть полезными при проектировании теплоизоляционных материалов с заданными свойствами. Исходя из них, можно констатировать, что тепловой поток в материале распространяется не сплошным фронтом, а, преимущественно, по

теплопроводящему компоненту, например в ячеистом бетоне – по твердой составляющей [3], огибая нетеплопроводные включения – воздушные поры (в полистиролбетоне – гранулы пенополистирола, в сферогипсобетоне – полые микросферы).

Аналогично процесс теплопередачи происходит в теплоизоляционных покрытиях на полимерной основе.

Представим материал упрощенно в виде двухкомпонентной системы, в которой один из компонентов является хорошим проводником тепла, а другой – плохим. В зависимости от соотношения компонентов, такая система имеет два крайних состояния: 1–система состоит только из теплопроводящего компонента (обычно связующая матрица), 2–система состоит только из теплоизолирующего компонента (заполнитель).

Первый случай можно рассматривать как сплошную проводящую среду (или в терминах теории перколяции – проводящий перколяционный кластер). Второе состояние (абсолютный изолятор) нереализуемо в практике, однако может быть обеспечено в модельных средах.

Внедрение в проводящую среду нетеплопроводных элементов уменьшает теплопроводность системы в целом. Причем, в соответствии с теорией перколяции, при достижении определенной (пороговой) концентрации теплоизолирующего заполнителя следует ожидать скачкообразного изменения теплопроводности, что объясняется нарушением сплошности проводящей среды (разрушением перколяционного кластера). Именно при этой пороговой концентрации заполнителя материал приобретает высокие теплоизоляционные свойства.

Значение порога перколяции для трехмерных решеточных задач узлов, так же, как и для перколяции твердых сфер получено, в основном, с помощью компьютерных и физических экспериментов [4,5]. Так, для объемной доли проводящего материала (отношение объема проводящего компонента к объему смеси) порог перколяции составляет  $X_c$  пр = 0,15 - 0,17 (соответственно, для изолирующего компонента  $X_c$  из = 0,85 - 0,83); с учетом коэффициента плотности упаковки  $f = 0,637$ ,  $X_c$  пр составляет 0,25. Для реальных материалов  $X_c$  может значительно изменяться главным образом за счет коэффициента заполнения  $f$  по ряду причин:

1. Плотность упаковки зависит от степени уплотнения материала.
2. Гранулометрическое распределение частиц компонентов, как правило, имеет сложный характер. Так, для микросфер характерно ассиметричное мономодальное распределение.
3. Форма частиц может отличаться от сферической. Микроскопическое исследование микросфер [6] показало наличие небольшого количества

микросфер - сростков и разрушенных микросфер – наблюдаются оболочки полусферической формы.

4. Представление о невзаимодействующих частицах, предполагаемое в рассматриваемом варианте теории перколяции, является достаточно грубым приближением.

5. Процесс усложняется за счет адсорбции соединений из атмосферы и поглощения влаги.

Определение порога перколяции для теплозащитных покрытий теплофизическими методами является очень сложным из-за отсутствия надежных прямых методов измерения теплопроводности тонкослойных материалов. Поэтому в данной работе исследования проводились на модельных системах, используя принцип электротепловой аналогии [7], согласно которому тепловая проводимость эквивалентна электрической. Электрическое сопротивление материала с различным объемным содержанием проводящей фазы будет эквивалентно его тепловому сопротивлению.

В ходе экспериментов необходимо было определить порог перколяции модельных сред и сравнить экспериментальные значения с теоретическими, а также выяснить, влияет ли на величину порога перколяции порядок заполнения среды: введение в проводящую среду непроводящего компонента и, наоборот, введение в непроводящую среду проводящего компонента.

Теплоизоляционные покрытия на основе минеральных и полимерных вяжущих вполне адекватно моделируются сухой смесью, в которой проводящей фазой является измельченный угольный порошок, а непроводящей – микросферный наполнитель. Выбор компонентов представляется удачным, учитывая, что обладающий малым удельным сопротивлением мелкодисперсный уголь более полно моделирует жидкую проводящую среду, а микросферы, как реальный теплоизоляционный наполнитель, к тому же обладают высокими электроизоляционными свойствами.

Проведены две серии экспериментов. В первой серии микросферы добавлялись в проводящую угольную массу с исходным удельным сопротивлением 5,08 кОм·см. Второй компонент добавлялся в первый (исходный) равными объемными порциями с шагом дозирования 5% от начального объема исходного компонента. После тщательного перемешивания смесь помещалась в измерительную прямоугольную ячейку из оргстекла с медными пластинчатыми электродами размерами 2,46 x 1,76см с расстоянием между электродами 2,87см. Смесь уплотнялась десятикратным встряхиванием, процедура уплотнения фиксирована для всех измерений. Полученное значение сопротивления пересчитывалось в удельное сопротивление с учетом площади электродов ячейки и межэлектродного расстояния.

При невысокой степени заполнения смеси микросферами взаимный контакт их друг с другом практически отсутствует, проводящая среда является сплошной. С увеличением объемного содержания микросфер сплошная проводящая среда начинает разобцаться, сечение проводящих участков уменьшается. До определенной степени заполнения микросферами электрическое сопротивление смеси растет незначительно. При некоторой концентрации микросфер, соответствующей порогу перколяции, смесь скачкообразно становится электроизоляционной. Зависимость удельного сопротивления от объемной доли микросфер по результатам первой экспериментальной серии (микросферы – в уголь) приведена на графике (рис. 1). Очевидно наличие перколяционного скачка сопротивления при объемной доле микросфер 0,8 (или можно сказать, что порог разрыва перколяционного кластера для микросфер  $X_c \text{ мкс} = 0,8$ ). Достаточно незначительно превысить концентрацию микросфер в 80%, чтобы смесь стала фактически изолятором. Соответственно, порог перколяции для угля в этом случае  $X_c \text{ угля} = 0,2$ .

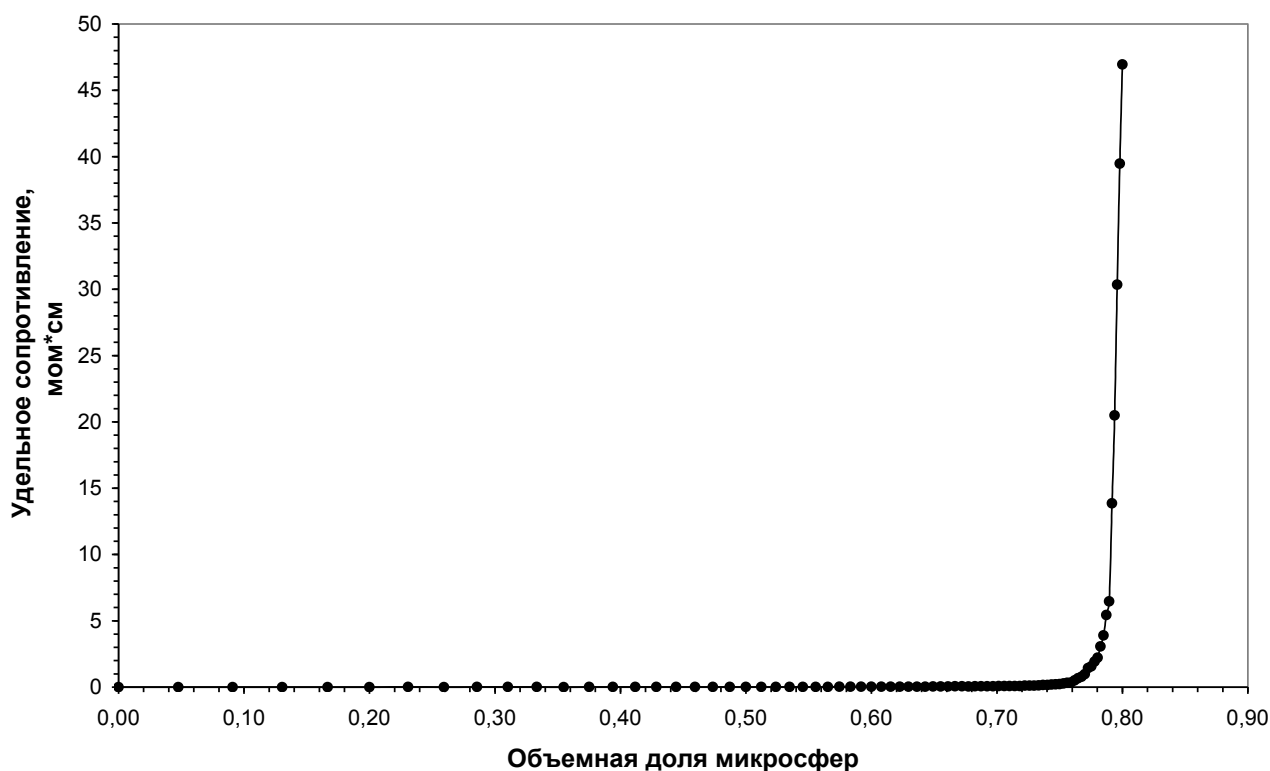


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления от объемной доли микросфер в смеси.  
Серия 1. Микросферы добавляются в угольную смесь

Во второй серии угольный порошок вводился в микросферы. Значение порога потери электропроводимости смеси для микросфер во второй серии (уголь - в микросферы)  $X_c \text{ мкс} = 0,85$ , а порог перколяции для угля, соответственно  $X_c \text{ угля} = 0,15$  (рис. 2).

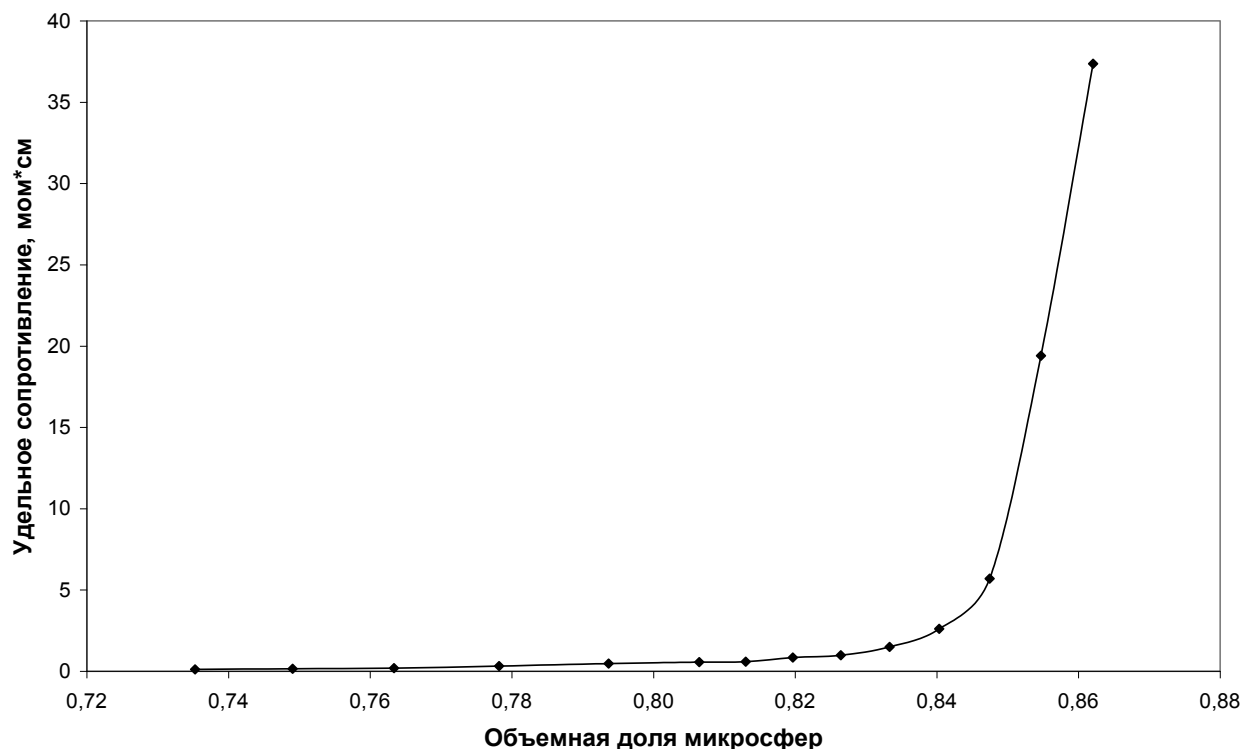


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления от объемной доли микросфер в смеси.  
Серия 2. Уголь добавляется к микросферам

Колебания значений порогов перколяции электропроводимости (сопротивления) в 5%, в зависимости от порядка добавления компонентов, находятся в пределах ошибки эксперимента. С точки зрения теории перколяции сходимость результатов можно считать вполне удовлетворительной. Следует отметить, что во второй опытной серии использован активированный уголь с большей тонкостью помола, чем в первом случае. Влияние granulometрии компонентов смеси на рассматриваемые эффекты составляет предмет дальнейших исследований.

На основании полученных данных можно сделать следующие **выводы**:

1. Экспериментально подтверждено наличие перколяционного порога проводящих свойств в двухкомпонентных модельных средах. Величина порога перколяции проводящей фазы 15-20% согласуется с теоретическими значениями.
2. В соответствии с принципом электротепловой аналогии, можно заключить, что объемное содержание теплоизоляционного компонента должно быть не менее 80%. Даже незначительное снижение количества теплоизоляционного заполнителя от указанного резко ухудшает теплозащитные свойства материала.
3. Индивидуальные свойства материалов и методика измерения проводимости играют важную роль, предстоит изучить влияние дисперсности компонентов на условия формирования перколяционного кластера.

4. Полученная информация может быть использована при проектировании составов теплоизоляционных покрытий.

### Литература

1. Фокин В. И., Бойков Г.П., Юдин Ю.В. Основы технической теплофизики. Москва, «Машиностроение», 2004. - 172 с.,
2. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов, Москва, Изд. физ.-мат. литературы, 1962. - 456с.
3. Керш В.Я., Чабаненко П.Н., Выровой В.Н. Теплозащитные свойства ячеистых материалов. / В сб. научн. трудов “Современные строительные конструкции из металла и древесины”, ч.І.- Одесса: ОГАСА, 2006.- С. 89 - 95.
4. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. Москва, «Эдиториал УРСС», 2002. - 112 с.
5. Эфрос А. Л. Физика и геометрия беспорядка. Библиотечка «Квант», вып.19, Москва, «Наука», 1982. - 264 с.
6. Керш В.Я., Колесников А. В., Керш Д. В. Изучение теплофизических свойств многокомпонентных материалов методом аналогий, Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури, вип. 47, частина 1, 2012. - С. 129-134.
7. Гутенмахер Л. И. Электрические модели, Киев, «Техника», 1975. - 171 с.

### Анотація

У статті аналізуються результати експериментальних досліджень фізичних моделей теплоізолюючих матеріалів методами електротеплової аналогії з застосуванням теорії перколяції. Виявлено стрибкоподібну зміну провідності матеріалів з визначеною концентрацією ізолюючого компоненту.

**Ключові слова:** теплоізоляція, теплоізолююче покриття, теплопровідність, електротеплова аналогія, перколяція, структура.

### Summary

The results of experimental researches of physical models of the heat-insulating materials are analyzed in the article by the methods of electro-thermal analogy with the use of percolation theory. A saltatory change conductivity of materials during the certain concentration of isolating component found out.

**Keywords:** heat-insulation, heat-insulation coverage, heat conductivity, electro-thermal analogy, percolation, structure.