УДК 536.21

Мацевитый Ю.М., Лушпенко С.Ф., Ведь В.Е., Иванов В.А.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДБОР ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наиболее эффективным способом изоляции теплотехнических объектов от воздействия высоких температур является применение теплоизоляционных покрытий. Оценка качества такой теплоизоляции опирается на результаты определения теплопроводности теплоизоляционного материала и ее зависимости от температуры. Для этих целей предлагается схема теплофизического эксперимента и алгоритм обработки его результатов, опирающийся на методологию решения обратных задач теплопроводности.

Решение обратных задач теплопроводности предполагает многократное моделирование температурного поля исследуемого образца с одновременным подбором параметров искомой зависимости теплопроводности от температуры. Примененный нами ранее [1] метод исследований керамических материалов с более высокими коэффициентами теплопроводности опирался на предварительную линеаризацию математической модели исследуемого процесса теплопроводности с последующей численно-аналитической процедурой моделирования и определения параметров аналитического представления искомой зависимости. Для идентификации температурной зависимости керамических теплоизоляционных материалов более эффективным должен являться предлагаемый нами метод автоматизированного подбора параметров чебышевского приближения такой зависимости с регуляризацией.

Его использование предполагает следующую формализацию постановки обратной задачи. Имеется математическая модель исследуемого физического явления. Среди данных, которые могут служить исходной информацией для моделирования этого явления (краевых условий, геометрических параметров и свойств объекта) имеется одна (в некоторых случаях не одна) физическая величина (в общем случае – функция переменных модели), которая требует количественного уточнения своих значений. Обозначим ее, как $A(X)$, где под X будем понимать одну или несколько переменных, среди которых могут быть как независимые (время и пространственные координаты), так и зависимые переменные (температура, давление и т. п.). Вид такой зависимости заранее задается в форме аналитической функции с параметрами

$$A(X) = \sum_{j=1}^{n} a_j \cdot f_j(X), \qquad (1)$$

где a_j – постоянные параметры; $f_j(X)$ – некоторые известные базисные функции, например, полиномы Чебышева или сплайны.

Тогда искомыми величинами при решении обратной задачи будет вектор параметров $a = (a_1, a_2, \ldots, a_n)^T$ или часть его компонент, а также число параметров n. Определение этих величин дает решение обратной задачи.

Таким образом, по сравнению с прямой задачей, обратная среди условий однозначности имеет некоторый пробел. Для его заполнения, т.е. для обеспечения однозначного решения обратной задачи необходимы дополнительные исходные данные.

Ими являются реперные точки и условия регуляризации решения. В задачах идентификации реперные точки задаются на основе экспериментальных данных об исследуемом процессе. В задачах оптимизации и управления они являются отражением рабочих критериев достижения цели процесса оптимизации или управления. В общем случае каждая реперная точка представляет собой совокупность известного значения рассматриваемого поля (температуры, давления и т. п.), координат пространства и времени, к которым это значение относится, и погрешности измерения δ. Назовем набор реперных значений вектором $\Psi = (\psi_1, \psi_2, ..., \psi_m)^T$. Число компонент этого вектора для обеспечения однозначности решения обратной задачи не должно быть меньшим числа искомых параметров, т.е. должно быть $m \geq n$. Причем, для обеспечения большей точности решения, что особенно важно в задачах идентификации, разница между этими числами должна быть как можно большей.

О качестве решения обратной задачи следует судить по тому, насколько мало среднее значение отклонений реперных значений ψ_i от значений ϕ_i, полученных для i-ой реперной точки путем моделирования исследуемого процесса при данных значениях вектора искомых параметров a. Другими словами, цель решения обратной задачи методом автоматизированного подбора состоит в том, чтобы выбрать такой вектор a, при котором достигается минимум среднего отклонения Ψ от Φ (являющейся функцией от a), например, средне квадратичного

$$\Delta(a) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (\psi_i - \phi_i(a))^2 / m}. \qquad (2)$$

При этом нельзя забывать о необходимости согласования величины Δ с уровнем погрешности δ. Так, соблюдение условия

$$\Delta \geq \delta \qquad (3)$$

в значительной мере гарантирует получение устойчивого или наиболее устойчивого решения из возможных его вариантов и, когда будет достигнут оптимум функции Δ и это условие соблюдается, можно не заботиться о регуляризации. С другой стороны, стремление получить еще и наиболее точный результат заставляет уменьшать Δ (естественно, если такая возможность есть, например, за счет увеличения n), и условие (3) превращается в равенство

$$\Delta = \delta, \qquad (4)$$

выполнение которого при обязательном обеспечении максимально возможной в этих условиях гладкости искомой функции $A(X)$ может служить сигналом получения окончательного решения.

Алгоритм предполагает последовательное изменение количества базовых функций n от единицы до его равенства числу реперных точек m, если до этого не произойдет нарушения условия (3), вызывающего прекращение варьирования числом n из-за достижения необходимой точности решения обратной задачи. Для каждого значения n решается задача нахождения такого вектора параметров a, который обеспечивает оптимальное приближение вектора реперных значений Ψ вектором Φ, т.е. выполнение условия $\Phi \approx \Psi$.

Когда выбор n будет сделан, подключается блок алгоритма, осуществляющий регуляризацию решения путем поиска такого набора параметров a, который обеспечит

выполнение условия (4) при максимальной гладкости аппроксимирующей функции $A(X)$. Максимально гладкой, как известно, будет та кривая из семейства кривых одного порядка, длина вектора коэффициентов которой минимальна.

Блок оптимизации $A(X)$ при каждом значении n осуществляет минимизацию в общем случае нелинейной функции (1). Поэтому он может быть построен на основе одного из методов нелинейного программирования. Опыт решения обратных задач подсказал выбор для этой цели метода деформируемых многогранников (Нелдера и Мида). А для соблюдения регуляризирующих условий привлекается метод штрафных функций. Этот подход оказывается плодотворным и при минимизации модуля вектора a во время окончательной регуляризации решения.

Необходимая для решения обратной задачи термометрическая информация была получена проведением эксперимента на специально сконструированной для этой цели установке, схема которой приведена на рис. 1. В состав установки входят следующие блоки: нагреватель 1, образец материала с известной теплопроводностью – эталон 2, образец материала с неизвестной теплопроводностью 3, холодильник 4, теплозащитный экран 5, вакуумная камера 6, устройство для регистрации термометрической информации 7, коммутатор 8 и блок для задания температурного режима 9. Установка создана на базе вакуумного универсального поста ВУП–5.

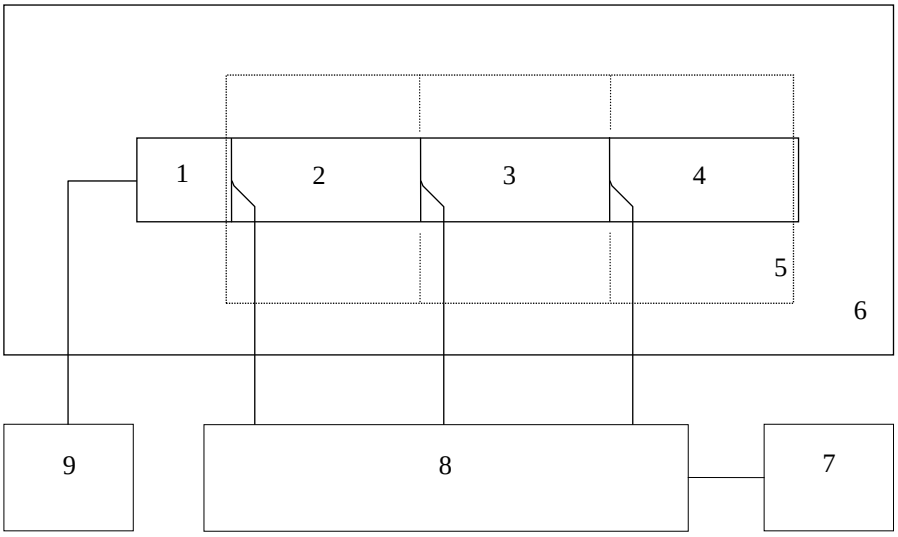

Рисунок 1 – Схема установки для проведения эксперимента

Нагреватель 1 представляет собой полый металлический цилиндр, внутри которого расположена вольфрамовая спираль. Управление нагревателем осуществляется посредством блока 9, который позволяет задавать температуру с дискретностью ±0,1 °С, а также изменять темп нагрева в достаточно широком диапазоне при использовании нестационарного режима измерения теплопроводности. Эталонный и исследуемый образцы выполнены в виде цилиндров диаметром 10 и длиной 30 мм. В качестве холодильника используется полый медный цилиндр с внутренним водяным охлаждением. Теплозащитный цилиндрический экран, изготовленный из металлической фольги, предназначен для уменьшения лучистой составляющей боковых утечек теплоты. Надежным заслоном для конвективной составляющей этих утечек служит разряжение в испытательной камере ВУП-5 до уровня $\cdot 10^{-4}$ Па. Это позволяет создать направленный

тепловой поток и рассматривать систему “эталон - образец” как двухслойную плоскую полубесконечную пластину.

В процессе проведения экспериментов термометрическая информация фиксируется с помощью регистрирующего устройства, которое поочередно подключается через коммутатор к трем термодатчикам.

Описанная экспериментальная установка позволяет осуществлять нагрев исследуемых материалов до 1500 °С и определять температуры в трех точках системы “эталон – образец”, что дает возможность, решая обратную задачу, получать достоверную информацию о температурной зависимости теплопроводности в важном для практики диапазоне температур.

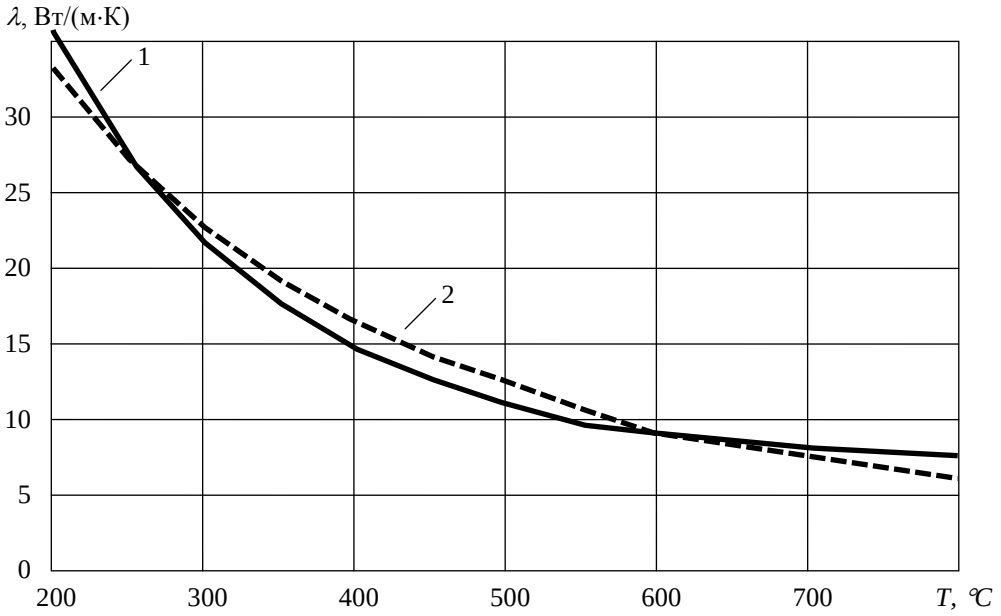

Рисунок 2 – Температурные зависимости теплопроводности α-Al_2O_3 (1 – эксперимент, 2 – известные данные [2])

С целью оценки точности предложенного экспериментально-расчетного метода проведено исследование теплопроводности спеченного до нулевой открытой пористости образца из α-Al_2O_3 удельного веса 3880 кг/м^3 (рис. 2). Полученные данные сравнивались с известными [2] для аналогичных образцов плотностью 3970 кг/м^3. Сравнение показывает, что теплопроводность этих материалов отличается незначительно во всем температурном интервале проведенных исследований.

Оксид алюминия сообщает покрытиям хорошие электроизолирующие свойства, высокую прочность, однако композиции на его основе отличаются невысоким термическим коэффициентом линейного расширения. Этот недостаток отсутствует в механических смесях α-Al_2O_3 и β-SiO_2 [3]. В этой связи нами были исследованы температурные зависимости теплопроводностей этих порошковых материалов (рис. 3), каждый из которых был сформирован в компактный образец с помощью алюмофосфатного связующего (30 % масс.). При этом α-Al_2O_3 брался с дисперсностью менее 2 мкм, а β-SiO_2 – менее 50 мкм. Приведенные зависимости показывают, что теплопроводности испытанных материалов близки между собой во всем температурном интервале измерений.

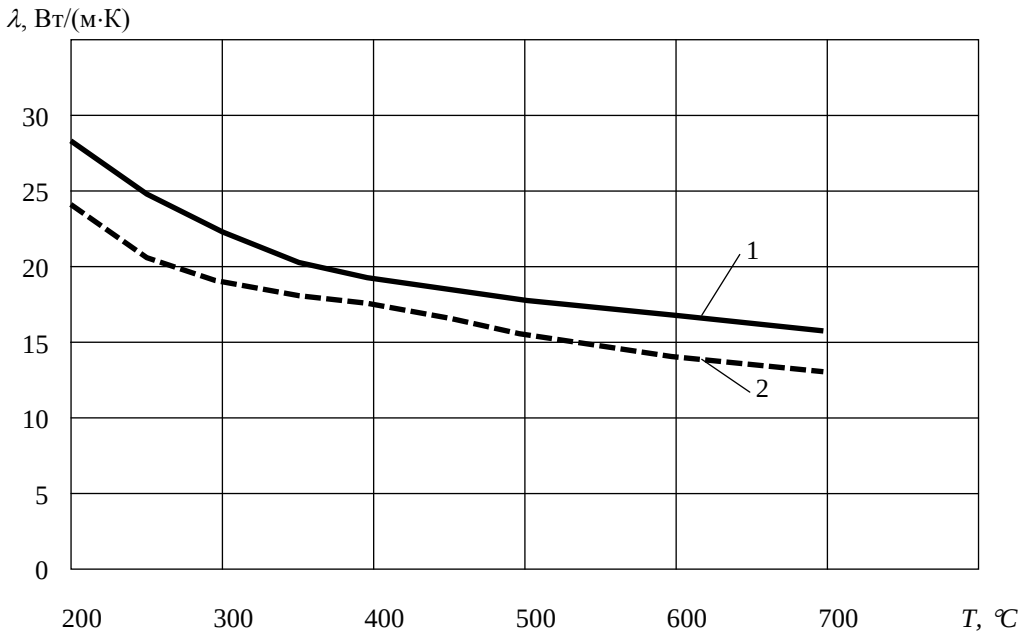

Рисунок 3 – Температурная зависимость теплопроводности (1 – α-Al_2O_3, 2 – β-SiO_2)

Причем, теплопроводность α-Al_2O_3, связанного фосфатом (кажущаяся плотность образцов 2650 кг/м^3, открытая пористость 12 %), в начале температурного диапазона несколько меньше теплопроводности спеченного α-Al_2O_3 (рис. 2), однако при повышении температуры становится более высокой, чем у сравниваемого образца.

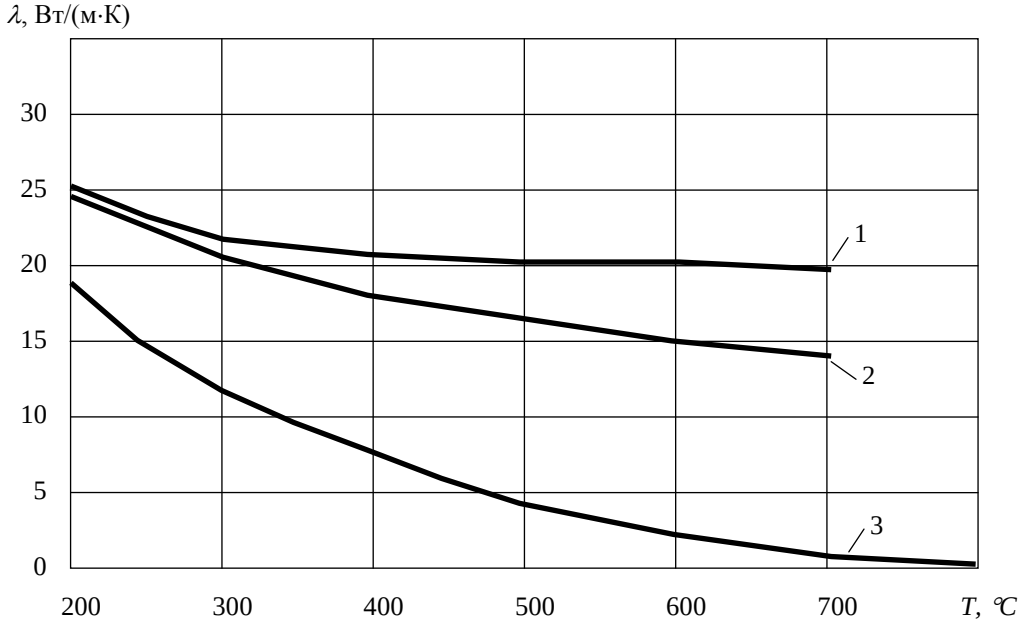

Рисунок 4 – Теплопроводность состава, содержащего волокна нитевидного графита (длина волокон: 1 – 4-6 мм, 2 – 2-4 мм, 3 – менее 2 мм)

Тем ни менее, наблюдаемый у этих материалов минимальный уровень теплопроводности не является достаточным для материалов покрытий, предназначенных к использованию в качестве теплозащитных. В связи с этим было проведено варьирование фактором, в наибольшей степени влияющим на исследуемое свойство, а именно, концентрацией волокнистых составляющих.

Влияние нитевидного графита различной длины на температурную зависимость теплопроводности состава, содержащего корунд и кварц в равных пропорциях и алюмофосфатное связующее, приведено на рис. 4. Как следует из рисунка, с уменьшением размера волокон теплопроводность существенно уменьшается. При температурах, превышающих 600 °С теплопроводность образцов с мелковолокнистой добавкой достигает значений, измеряемых сотыми долями Вт/(м·К), что позволяет рассматривать полученные материалы как весьма эффективные для целей высокотемпературной тепловой изоляции.

В заключение отметим, что предложенная экспериментально-расчетная схема определения теплопроводности теплоизоляционных материалов позволила исследовать изменение этой характеристики для различных теплоизоляционных материалов в широком интервале температур.

Сравнение полученных экспериментальных значений теплопроводности различных теплоизоляционных материалов со справочными данными показало их совпадение в пределах 5 % во всем температурном интервале измерений.

Литература

1. Ведь В. Е., Иванов В. А., Лушпенко С. Ф., Мацевитый Ю. М. Определение теплопроводности керамических материалов с помощью решения обратной задачи теплопроводности // Инж.-физ. журн. – 1991. – 61. – № 5. – С. 816-822.

2. Kingery W. D., Francl J., Coble R. L., Vasilos T. Thermal Conductivity: X, Data for Several Pure Oxide Materials Corrected to Zero Porosity // Amer. Ceram. Soc. J.1954.– 37. – №2. – P. 107-110.

3. Ведь В. Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров ДВС // Інтегровані технології та енергозбереження – 1999. – №2. С. 81-85.

УДК 536.21

Мацевитий Ю.М., Лушпенко С.Ф., Ведь В.Є., Іванов В.А.

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПІДБІР ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Запропоновано реалізацію проблеми ідентифікації теплофізичних характеристик рішенням оберненої задачі теплопровідності методом автоматизованого підбору. Об’єктом дослідження використана температурна залежність теплоізоляційних керамічних композитів. Для її ідентифікації розроблено схему теплофізичного експерименту та алгоритм обробки його результатів, який опирається на регулюючий алгоритм підбору знаходжуваних коефіцієнтів функції теплопровідності від температури, що виражена поліномами Чебишєва.