

О. М. Алифанов, В. В. Черепанов (Москва, МАИ). **Математическое моделирование и идентификация характеристик легких высокопористых материалов.**

Легковесные высокопористые материалы, такие, как волокнистые теплоизоляционные материалы и вспененные материалы, представляют большой интерес для многих технических приложений. Сама возможность определения и прогнозирования многих их характеристик либо весьма ограничена, либо фактически исключена без привлечения средств математического моделирования. При этом нерегулярность, сильная локальная неоднородность, а часто и глобальная анизотропия таких материалов практически не оставляют альтернативы их прямому моделированию. Вместе с тем, каждый из упомянутых материалов обладает свойством локальной регулярности. Это позволяет разбить сложную систему на стохастические регулярные элементы и перейти к описанию свойств таких систем на основе статистических моделей.

В рамках предложенного подхода для ряда материалов созданы прямые статистические модели на основе систем случайных ортогональных неоднородных элементов, подобных использованным в [1]. Каждый из вновь сгенерированных представительных элементов считался погруженным в пористую среду, характеристики которой определяются по какой-либо из теорий для пористых сред (например, [2]), значения параметров которой корректируются по результатам предшествующих генераций. Радиационные процессы описывались на основе теории Ми [3]. Рассматривались как высокопористые теплоизоляционные материалы типа ТЗМК и VALOX на основе ультратонких волокон, так и вспененные материалы типа RVC (Reticulated Vitreous Carbon Foam) на основе стеклоуглерода. Выявлены как ключевые характеристики глобальных и локальных моделей, так и основные условия, влияющие на их адекватность. Например, для волокнистых материалов ключевыми характеристиками модели являются свойства материалов, образующих волокна каркаса, показатели $a_{1,2}$ анизотропии материала в координатных направлениях, ортогональных теплопереносу, и размер x представительного элемента в направлении теплопереноса, удовлетворяющий уравнению

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\langle D \rangle^2} \left\{ bx^2 - \frac{\pi}{12} \left(x \sum_{nt=1}^{nft} P_{nt} \sum_{nd=1}^{nfd} P_{nt,nd} \sum_{nl=1}^{nlf} P_{nt,nd,nl} \right)^{-1} \right. \\ & \times \sum_{nt=1}^{nft} P_{nt} \rho_{nt} \sum_{nd=1}^{nfd} P_{nt,nd} (D_{nt,nd+1}^2 + D_{nt,nd+1}^2 D_{nt,nd}^2 + D_{nt,nd}^2) \\ & \left. \times \sum_{nl=1}^{nlf} \frac{P_{nt,nd,nl}}{l_{nt,nd,nl+1} - l_{nt,nd,nl}} \sum_{k=1}^3 \int_{l_{nt,nd,nl}}^{l_{nt,nd,nl+1}} l \left(\left[\frac{l}{a_k x} \right] + 1 \right)^{-1} dl \right\} = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

в котором ρ_{nt} , ρ — плотность nt -го материала и композита в целом, $b = a_1 a_2 \rho$, $\langle D \rangle$ — средний диаметр волокон. Остальные величины в (1) характеризуют распределение волокон по материалам (их nft), диаметрам D (их nfd в рамках одного материала) и длинам l (их nlf для волокон одного диаметра и материала), P — соответствующие вероятности.

Предложен ряд приемов, используемых при объединении локальных элементов в единый комплекс и обеспечивающих высокую повторяемость средних значений характеристик генерируемых статистических ансамблей элементарных фрагментов модельной системы, которые и интерпретируются в предлагаемом подходе как характеристики исследуемого материала. Например, в случае волокнистых материалов теплофизические характеристики модельной системы очень чувствительны к значению x . Его небольшое увеличение достаточно сильно снижает вычисленную плотность, а уменьшение может чрезмерно увеличить плотность модельной системы по сравнению с желаемым значением. Выбор x из (1) еще не гарантирует получение

удовлетворительных результатов моделирования, поскольку величины, характеризующие элементы генерируемых серий, все-таки выбираются случайным образом. Так, в случае материалов с сильным разбросом волокон одного типа по диаметрам практически невозможно в двух последовательно сгенерированных сериях элементарных объемов получить одинаковые средние значения теплофизических характеристик, используя одно и то же значение x . Поэтому в процессе генерации мы допускаем относительно небольшие (в пределах 10-процентного «коридора») вариации значений x , корректируя среднюю плотность системы сгенерированных объемов так, чтобы она приближалась бы к плотности моделируемого композита. При этом изменение объема элемента учитывается через значение соответствующего ему статистического веса. Подобные приемы открывают широкие возможности по включению моделирующих программных комплексов в глобальные программные оболочки, позволяющие решать как вопросы прогнозирования свойств материалов, так и обратные задачи по определению их эффективных характеристик. В частности, разработанные модели позволяют получать такие эффективные характеристики, как кондуктивная и радиационная компоненты теплопроводности, коэффициент аккомодации энергии, комплексные показатели преломления, индикатрисы рассеяния, коэффициенты рассеяния и поглощения излучения и т. д. Эти характеристики материалов являются весьма затратными при экспериментальном определении, поскольку их значения определяются процессами, имеющими сугубо локальный или спектральный характер. В предлагаемом подходе эти характеристики либо вычисляются непосредственно, либо, когда они являются параметрами используемой модели пористой среды, получаются при сопоставлении результатов моделирования с экспериментальными данными. На рис. 1 показаны вычисленные для ТЗМК-10 кривые температурных зависимостей, как эффективной теплопроводности λ_{ef} , так и ее радиационной λ_r и кондуктивной λ_c составляющих при давлении $P = 1$ атм. Там же показаны имевшиеся в нашем распоряжении результаты эксперимента, проведенного в ВИАМ. Температурные зависимости $A(T)$ эффективного коэффициента аккомодации энергии, извлеченные из экспериментальных результатов, полученных в МАИ и ВИАМ, приведены на рис. 2.

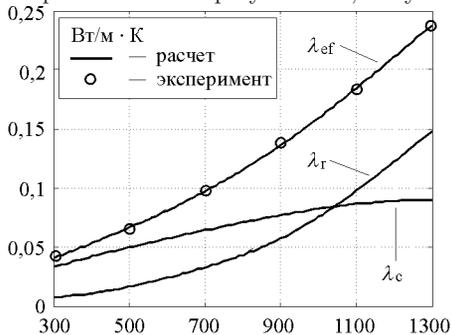


Рис. 1

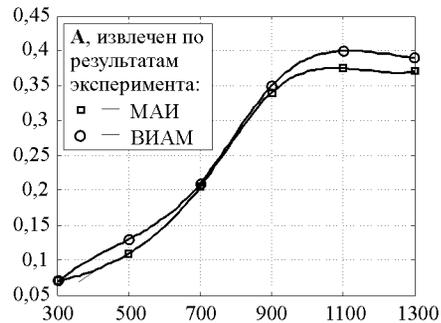


Рис. 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alifanov O. M., Vojkov N. A.* Les Methodes des Previsions In Formatiquers des Materaux Composites de Haute Porosite et de L'analyse des Systems de la Protection Thermique a leur Basc. — In: Proceedings of Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing. ESA SP-386, June 1996, p. 73–85.
2. *Прасолов Р. С.* Тепло- и массоперенос в топочных устройствах. М.: Энергия, 1964, 236 с.
3. *Bohren G. F., Huffman D. R.* Absorbtion and scattering of light by small particles. New York: Willey, 1983, 652 p.