

том сил трения и инерции подвижных частей расходомера могут быть использованы в корректорах для учета погрешностей расходомеров как в стационарных, так и переходных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Полубинский А.С., Круковский П.Г., Тонконогий Ю.Л.* CFD-анализ частотных характеристик турбинного расходомера в трехмерной постановке. // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, №2. – С. 93-99.
2. *Тонконогий Ю.Л., Пядишюс А.* Погрешность средств измерения, применяемых для учета газа // Измерительная техника. – 1999. – №5. – С. 35–38.
3. *R.C.Baker*, Turbine flow meters: II. Theoretical and experimental published information // Flow Meas. Instrum. – 1993. – 4(3). – P. 123–144.

4. *K.N. Atkinson*. A software tool to calculate the over-registration error of a turbine meter in pulsating flow // Flow Meas. Instrum. – 1992. – 3(3). – P.167–172.

5. *R Cheesewright and C Clark*. Step Response Tests on turbine flow meters in liquid flows. // Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy. – V. 211. – P. 321 – 330.

6. *R Cheesewright; K.N. Atkinson, C Clark, C.ter Horst*. Field tests of correction procedures for turbine flow meters in pulsate flows // Flow Meas. Instrum. – 1996. – 7(1). – P. 7–17.

7. *W.F.Z.Lee, M.J.Kirik, J.A.Bonner*. Gas turbine flow meter measurement of pulsating flow. // J. Eng Power. Trans. ASME, Oct. – 1975. – P. 531–539.

8. *J.W.Bronner and R.J.McKee*. Cogen pulsation effects on turbine metering // AGA, Oper. sect., Proc. – 1991. – P. 625–638.

Получено 07.05.2007 г.

УДК 536.2

**КОРНИЄНКО Я. М., НОВІКОВ В. В.,
ПІВЕНЬ О. Н., УДОВЕНКО Л. М.**

Інститут технічної теплофізики НАН України

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ І РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ХАОТИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

Разроблено метод розрахунку ефективної теплопровідності композиційних полімерних матеріалів різного складу з різними значеннями провідності полімерних матриць наповнювача міжфазного шару при різних температурах і тисках.

Метод ґрунтується на ітераційному розрахунку ефективної теплопровідності на основі фрактальної моделі хаотичної структури неоднорідного середовища. Він дозволяє прогнозувати узагальнену провідність неоднорідних матеріалів при будь-яких значеннях

Разработан метод расчета эффективной теплопроводности композиционных полимерных материалов разных составов с различными значениями проводимости полимерных матрицы наполнителей межфазного слоя при различных температурах и давлениях.

Метод базирується на ітерационном расчете эффективной теплопроводности на основе фрактальной модели хаотической структуры неоднородной среды. Он позволяет прогнозировать обобщенную проводимость неоднородных материалов при любых значениях

The method of calculation of effective heat conductivity of composite polymeric materials of different structures is developed at various temperatures and pressure.

The method is based on iterative calculation of effective heat conductivity on a basis fractal models of chaotic structure of the non-uniform environment. The method allows to predict the generalized conductivity of non-uniform materials in all a range of change of its concentration.

Results of calculation of effective heat conductivity of a composite and their com-

провідності фаз композита у всьому діапазоні змінення його концентрації.

Представлено результати розрахунку ефективної теплопровідності композита та їх порівняння з одержаними експериментально величинами.

проводимости фаз композита во всем диапазоне изменения его концентрации.

Представлены результаты расчета эффективной теплопроводности композита и их сравнение с полученными экспериментально величинами.

parison with the sizes received experimentally are submitted.

Вступ

Задача визначення теплопровідності неоднорідних середовищ розглядається в багатьох літературних джерелах. Наприклад в [1–6] було запропоновано декілька аналітичних методів визначення ефективної теплопровідності (узагальненої провідності [1, 2]), таких як: метод самоузгодженого поля [5], метод ансамблевого усереднення [6] та ін. Однак задачу аналітичного прогнозування теплопровідності полімерних композитів від тиску до цього часу не було вирішено.

У цій статті ми спробували розв'язати задачу прогнозування теплопровідності композиційних матеріалів (КМ) з хаотичною структурою, спираючись на ідею метода ренормгрупових перетворень і теорію фракталів. Нижче в рамках даного підходу представлено метод прогнозування залежності теплопровідності полімерних композитів з хаотичною структурою від тиску.

Структурна модель

Розглянемо КМ, що складається з матриці, в якій розподілено частки наповнювача. Кожна частка розглядається як двофазна, тобто така, що складається з твердого ядра та полімеру з вихідними властивостями. Ядро і полімер розділені міжфазним шаром (МФС).

Зміну структури дисперсного середовища зі збільшенням об'ємної концентрації часток наповнювача можна якісно описати наступним чином. Спочатку в неперервному зв'язуючому (полімері) утворюються ізольовані кластери (ІК) з часток наповнювача. Далі, зі збільшенням об'ємної концентрації наповнювача ІК об'єднуються та переходять в так званий нескінчений кластер з агрегованих часток.

Моделювання хаотичної структури неоднорідного середовища було проведено на базі решітки з випадковим розподіленням її пара-

метрів. Вузли решітки моделювались мікронеоднорідностями (компонентами системи) в просторі, а зв'язки між вузлами – їх контактами між собою. Визначаючий вплив на макровластивості неоднорідного середовища мають умови контакту між його компонентами, тому нижче буде розглянута задача зв'язків.

Фрактальну множину зв'язків $\Omega(L_0, p_0)$ було одержано за допомогою ітераційного процесу, коли на початковому кроці ($k = 0$) розглядається скінчена решітка в просторі розмірністю $d_f = 2$ або $d_f = 3$ з ймовірністю p_0 того, що зв'язок між сусідніми вузлами решітки цілий або «пофарбований» у визначений колір. Зв'язки, «пофарбовані» в один колір, будуть означати, що вони мають однакові властивості. На наступному кроці кожний зв'язок у решітці замінюється решіткою, одержаною на попередньому кроці (рис. 1).

Ітераційний процес закінчується тоді, коли властивості решітки вже не залежать від номера ітерації ($k = n$). Таким чином, було одержано решітки з лінійними розмірами L_0 (L_0 – набагато більше довжини кореляції), на яких визначались ефективні фізичні властивості. Одержана за допомогою ітераційної процедури множина зв'язків (рис. 2) залежить від розміру початкової решітки L_0 та ймовірності p_0 [7, 8].

Узагальнена провідність

Розглянемо двофазну систему з функцією розподілу:

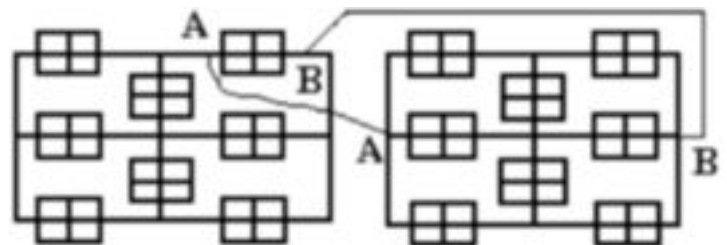


Рис. 1. Схема ітераційної процедури ренормгрупового перетворення.

$$P(C) = (1 - p)\delta(C - C_2^{(0)}) + p\delta(C - C_1^{(0)}),$$

де $\delta(x)$ – функція Дірака;

p – ймовірність того, що дана локальна область має властивість $C_1^{(0)}$,

$(1 - p)$ – ймовірність того, що дана локальна область має властивість $C_2^{(0)}$.

Після k кроків перетворень функція густини має вигляд:

$$P_k(C) = (1 - p_k)\delta(C - C_2^{(k)}) + p_k\delta(C - C_1^{(k)}).$$

Визначення ефективних властивостей структурної моделі в загальному випадку можна вести за наступною схемою: на першому етапі знаходяться початкові властивості різних конфігурацій, проводиться їх усереднення, далі ці властивості передаються на наступний етап [7–13]. Визначення властивостей можливих конфігурацій множини зв'язків призводить до досить громіздких обчислень. Тому скористаємось наближеним методом, який дозволяє не розраховувати властивості можливих конфігурацій цілих зв'язків решітки, а виділити два види множин конфігурацій зв'язків: зв'язану множину (ЗМ) і не зв'язану множину (НЗМ).

В якості моделі властивостей структури ЗМ і НЗМ використовувались комірки «куля в однорідному масиві». Тобто ЗМ – це неперервний масив з «провідної» фази з включенням кулі з «не провідної» фази, а НЗМ – це неперервний масив із «не провідної» фази з включенням кулі з «провідної» фази. Провідність комірки «куля в однорідному масиві» була визначена в [5]. Одержані результати для комірки, в якій куля з провідністю λ_2 (провідність НЗМ) знаходиться в масиві з провідністю λ_1 (провідність ЗМ) можна записати у такому вигляді: для провідності ЗМ:

$$\lambda_{ЗМ}^{(k)} = \lambda_{ЗМ}^{(k-1)} + \frac{(1 - \rho_{k-1})\lambda_{ЗМ}^{(k-1)}(\lambda_{НЗМ}^{(k-1)} - \lambda_{ЗМ}^{(k-1)})}{\lambda_{ЗМ}^{(k-1)} + \frac{\rho_{k-1}(\lambda_{НЗМ}^{(k-1)} - \lambda_{ЗМ}^{(k-1)})}{3}}, \quad (1)$$

а для провідності НЗМ:

$$\lambda_{НЗМ}^{(k)} = \lambda_{НЗМ}^{(k-1)} + \frac{\rho_{k-1}\lambda_{НЗМ}^{(k-1)}(\lambda_{ЗМ}^{(k-1)} - \lambda_{НЗМ}^{(k-1)})}{\lambda_{НЗМ}^{(k-1)} + \frac{(1 - \rho_{k-1})(\lambda_{ЗМ}^{(k-1)} - \lambda_{НЗМ}^{(k-1)})}{3}}, \quad (2)$$

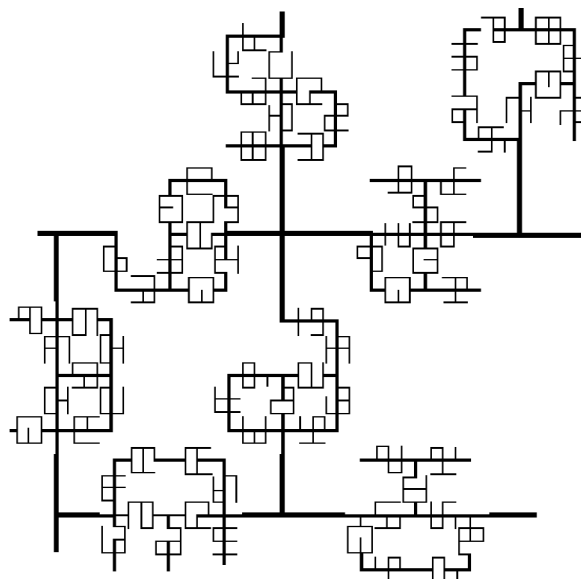


Рис. 2. Множина зв'язків, одержана за допомогою ітераційної процедури ренормгрупового перетворення для випадку $L_0 = 2, \rho_0 = 2$.

де $\lambda_{ЗМ}^{(0)} = \lambda_1, \lambda_{НЗМ}^{(0)} = \lambda_2$; $k = 1, 2$; ρ_0 – об'ємна концентрація фази з провідністю λ_1 .

Результати розрахунків

Розрахунки провадились для двофазного (двокомпонентного) середовища (композита), де один з компонентів – поліефірна смола, а другий – скловолокно (наповнювач). Розрахунок теплопровідності композитного матеріалу провадився за наступним алгоритмом:

1. Розрахунок теплопровідності частки, що складається з наповнювача і МФШ, провадився за формулою:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_{мфш}(\lambda_{мфш} + \rho_{мфш}^{1/2}(\lambda_n - \lambda_{мфш}))}{\lambda_{мфш} + \rho_{мфш}^{1/2}(1 - \rho_{мфш}^{1/2})(\lambda_n - \lambda_{мфш})},$$

де $\lambda_{мфш}$ – теплопровідність МФШ;

λ_n – теплопровідність наповнювача;

$\rho_{мфш}$ – концентрація МФШ.

2. Розрахунок ефективної теплопровідності композиту провадиться за допомогою ітераційної процедури. Теплопровідність ЗМ розраховувалась за формулою (1), де $\lambda_{ЗМ}^{(0)} = \lambda_k, \lambda_{НЗМ}^{(0)} = \lambda_m$; λ_m – теплопровідність зв'язуючого (матриці). Теплопровідність НЗМ розраховувалась за формулою (2).

Таблиця 1.

№ зразка	Експеримент		МФШ			Концентрація наповнювача
	$\lambda_0, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$B \cdot 10^{-4}$	$\lambda_0, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$y \cdot 10^{-4}$	z	
1	0,178	2,6				Смола ПН-1
2	0,158	7,8	0,178	2,5	0,59	0,167
3	0,216	12,9	0,178	1,9	1,25	0,363
4	0,218	3,1	0,178	2,5	1,18	0,471
5	0,248	2,1	0,178	2,1	1,32	0,534
6	0,276	7,8	0,178	5,5	1,48	0,555
7	0,271	8,8	0,178	6,0	1,44	0,561

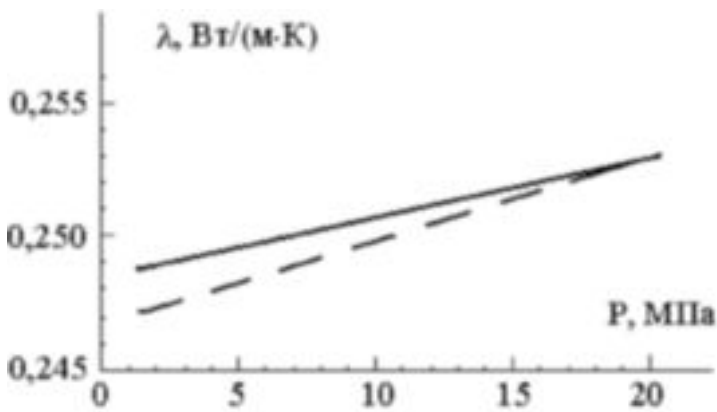


Рис. 3. Залежність ефективної теплопровідності від тиску ($\lambda = 0,248 + 0,0021x$):
 - - - - розрахунок; — — — експеримент.

Функція ймовірності:

$$R(\rho) = \rho^2(4 + 8\rho - 14\rho^2 - 40\rho^3 + 16\rho^4 + 288\rho^5 - 655\rho^6 + 672\rho^7 - 376\rho^8 + 112\rho^9 - 14\rho^{10}),$$

де при розрахунку λ_{3M} і λ_{H3M} значення ρ_k визначалося у вигляді: $\rho_k = R(\rho_{k-1})$; $\rho_0 = \rho$ – об’ємна концентрація наповнювача.

3. Ітераційний розрахунок закінчується, якщо $\lambda_{3M}^{(k)}$ і $\lambda_{H3M}^{(k)}$ незалежать від номера ітерації, тобто:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_{3M}^{(k)} = \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_{H3M}^{(k)} = \lambda. \quad (3)$$

Якщо умова (3) виконується, то розрахунок закінчуємо, якщо не виконується, то розрахунок повторюємо, використовуючи значення, що одержані на попередньому кроці.

Результати розрахунку теплопровідності міжфазного шару $\lambda_{\text{мфш}}$ від тиску x ($x = 0,7 \dots 20$ МПа) для семи зразків наведено у таблиці 1. При розрахунках використовувались наступні вирази:

$\lambda_{\text{експ}} = \lambda_0 + Bx$ – аналітична обробка експериментальних даних ефективної теплопровідності в залежності від тиску;

$\lambda_{\text{мфш}} = z(\lambda_0 + yx)$ – залежність теплопровідності МФШ від параметрів композита.

На основі запропонованої методики розрахунку ефективної теплопровідності композиту можна провести пошук значень теплопровідності наповнювача, при яких розрахункове значення ефективної теплопровідності композиту буде відрізнятися від експериментальних значень з заданою похибкою.

Для зразка № 6 на рис. 3 представлено залежність ефективної теплопровідності від тиску.

Залежність ефективної теплопровідності від концентрації наповнювача наведено на рисунку 4. Розрахунок проводився при наступних початкових даних: $\lambda_{\text{н}} = 1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_{\text{м}} = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\lambda_{\text{мфш}} = 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\rho_0 = 0,6 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{\text{мфш}} = 0,35 \text{ кг}/\text{м}^3$.

ВИСНОВКИ

Розроблений ітераційний метод розрахунку теплопровідності можна використовувати для прогнозування узагальненої провідності неоднорідних матеріалів з хаотичною структурою при будь-яких значеннях провідності фаз λ_2 та λ_1 у всьому діапазоні концентрацій $0 \leq \rho \leq 1$.

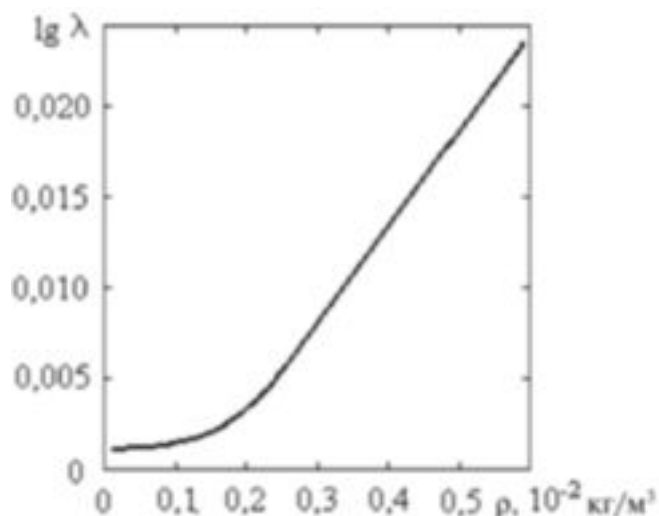


Рис. 4. Залежність ефективної теплопровідності від концентрації наповнювача ρ .

ЛІТЕРАТУРА

1. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 276 с.
2. Привалко В.П., Новиков В.В., Яновский Ю.Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. – Киев: Наукова думка, 1991. – 232 с.
3. Privalko V.P., Novikov V.V. The Science of Heterogeneous Polymers // Structure and Thermophysical Properties. – Wiley – Chichester – New-York – Brisbane – Toronto – Singapore, 1995. – P. 235 – 241.
4. Пивень А.Н., Новиков В.В. Методы расчета тепло- и температуропроводности полимерных материалов. – К.: УМК ВО, 1989. – 108 с.
5. Одолевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. – 1951. – В. 21, № 6. – С. 667 – 685.
6. Бувич Ю.А., Корнев Ю.Ф. Методы определения обобщенной проводимости // ИФЖ. – 1976. – В. 31, № 4. – С. 607 – 612.
7. Новиков В.В., Войцеховский К.В. Отрицательный коэффициент Пуассона фрактальных структур // ФТТ, 1999. – В. 41. – С. 2147 – 2153.
8. Novikov V.V., Wojciechowski K.W., Privalko V.P., Belov D.V. Elastic properties of inhomogeneous media with chaotic structure // Physical Review, E. – 2001. – V. 63, № 3. – P. 981 – 996.
9. Stauffer D. Introduction to the Percolation Theory. – London.: Phyladelphia, 1985. – 237 p.
10. Sahimi M. Applications of Percolation Theory. – Taylor and Francis, London, 1994. – 256 p.
11. Новиков В.В., Белов В.П. Обратное ренормгрупповое преобразование в задаче протекания по связям // ЖЭТФ. – 1994. – В. 106. – С. 780 – 789.
12. Reynolds P.J., Stanley H.E., Klein W. Large-cell Monte Carlo renormalization group for percolation // Physical Review, E. – 1980. – V. 21, № 4. – P. 1223 – 1245.
13. J. Bernasconi J. Real-space renormalization of bond-disordered conductance lattices // Physical Review, B. – 1978. – V. 18, № 5. – P. 2185 – 2191.

Получено 02.07.2007 г.