

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 536.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64



ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Приведены модели для расчета теплопроводности композиционных материалов на основе полимерных связующих (силикон, полиуретан, эпоксидная смола) с одним или двумя видами мелкодисперсных минеральных наполнителей. Построение моделей основано на теории обобщенной проводимости с учетом эффекта инверсии компонент. Путем сравнения расчетов с экспериментами оценены значения параметров расчетных моделей: теплопроводность агрегатов наполнителей при различных связующих, коэффициенты инверсии связующего-наполнитель в формулах Оделевского и Миснара, параметр влияния отношения теплопроводностей наполнителя и связующего в модифицированной формуле Бургера. Для минеральных порошков в состоянии свободной засыпки (в воздушной среде) зависимость эмпирического коэффициента С в формуле Бургера от отношения теплопроводностей порошка и воздуха имеет некоторые отличия ввиду того, что дисперсная фаза в воздушной среде имеет гораздо больше возможностей по изменению положения частиц в пространстве и образованию контактов и «проводящих каналов», «разрушающих» изолированность твердой фазы и увеличивающих тем самым эффективную проводимость смеси. В представленной работе измерена теплопроводность порошков в состоянии свободной засыпки, для которых был проведен анализ по модифицированной формуле Бургера. Показано, что теплопроводность агрегатов существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц наполнителя, но близка к теплопроводности порошковых керамик или спеченных порошков, что объясняется образованием агрегатов, эффективная теплопроводность которых существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц. Оцененные значения параметров расчетных моделей для широкого круга наполнителей и различных связующих позволяют прогнозировать теплопроводность вновь разрабатываемых композиций функциональных материалов, например по модифицированной формуле Бургера с погрешностью в пределах $\pm 20\%$ ($P=0,95$).

Ключевые слова: композиционный материал, полимерное связующее, мелкодисперсный наполнитель, модель теплопроводности, теория обобщенной проводимости, инверсия компонент, параметры модели, теплопроводность агрегатов частиц наполнителя, эффективная теплопроводность композиции.

© Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А., 2020

Для цитирования

Сулаберидзе В.Ш., Скорнякова Е.А. Оценка параметров расчетных моделей теплопроводности композиционных материалов с полимерным связующим по экспериментальным данным // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY CALCULATION MODEL PARAMETERS FOR COMPOSITE MATERIALS WITH A POLYMER BINDER BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents thermal conductivity calculation models of composite materials based on polymer binders (silicone, polyurethane, epoxy resin) with one or two types of fine mineral fillers. The models are constructed on the theory of generalized conductivity taking into account the effect of component inversion. By comparing the calculations with the experiments, the authors estimated the parameters values of the calculation models: the thermal conductivity of filler aggregates with various binders, the binder-filler inversion coefficients in the Odelevsky and Misnar formulas, the influence of the ratio between the thermal conductivities of the filler and the binder in the modified Burgers equation. Regarding mineral powders in the state of free filling (in air), the dependence of the empirical coefficient C in the Burgers equation on the ratio of the thermal conductivities of the powder and air has some differences due to the fact that the dispersed phase in air has much more possibilities to change the position of particles in space and to form contacts and "conducting channels" that "destroy" the isolation of the solid phase and thereby increase the effective conductivity of the mixture. The presented paper shows the measured thermal conductivity of powders in the state of free filling analyzed according to the modified Burgers equation. It is shown that the thermal conductivity of the aggregates is significantly lower than the thermal conductivity of crystalline filler particles, but close to the thermal conductivity of powder ceramics or sintered powders, which is explained by the formation of aggregates, whose effective thermal conductivity is significantly lower than the thermal conductivity of crystalline particles. The estimated values of the calculation model parameters for a wide range of fillers and various binders make it possible to predict the thermal conductivity of newly developed compositions of functional materials, for example, according to the modified Burgers equation with an error within $\pm 20\%$ ($P = 0.95$).

Keywords: composite material, polymer binder, finely dispersed filler, thermal conductivity model, theory of generalized conductivity, inversion of components, model parameters, thermal conductivity of aggregates of filler particles, effective thermal conductivity of a composition.

For citation

Sulaberidze V.Sh., Skorniakova E.A. Estimation of Thermal Conductivity Calculation Model Parameters for Composite Materials with a Polymer Binder Based on Experimental Data. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 57–64. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-57-64>

Введение

Теоретическое описание теплопроводности, как и других явлений переноса в различных средах – электропроводности, диффузии, диэлектрической и магнитной проницаемости, основывается на сходстве основополагающих уравнений. Теоретические обобщения и их применение для единообразного описания явлений переноса выразилось в появлении теории «обобщенной проводимости», объединившей целый ряд структурно чувствительных свойств физико-механических композиций, зависящих не только от содержания компонентов в композиции (таких, например, как плотность или удельный объем), но и от ее структуры и ориентации границ раздела компонентов. Структурно-чувствительными для композиционных материалов являются диэлектрическая и магнитная проницаемости, теплопроводность, модули сдвига, упругость и т.д. [1].

По результатам теоретических и экспериментальных исследований композиций, обобщенных в работах [1–6], можно сделать следующие выводы:

1) теоретические модели двухкомпонентных смесей: связующее (сплошная среда) и наполнитель (мелкодисперсные частицы), как правило, содержат ряд предположений относительно свойств и характеристик фаз, а именно:

а) упрощенная и правильная геометрия частиц наполнителя;

б) заданное распределение частиц наполнителя в объеме связующего (хаотичное или упорядоченное), при котором возможно выделение типовой элементарной ячейки, характеризующей структуру композиции в целом;

в) изолированность или связность фаз наполнителя и/или связующего;

г) идеальный или обусловленный тепловой

контакт частиц наполнителя со связующим;

д) отсутствие химического взаимодействия компонент (механическая смесь);

е) перенос тепла по основному механизму (в диапазоне средних положительных температур по шкале Цельсия и в оптически непрозрачных средах это кондуктивная теплопроводность);

2) характеристики компонент, а также условия работы материала, такие как площадь контакта частиц, размеры частиц и шероховатость их поверхности, теплопроводность, температура, влажность и др., являются исходными данными, используемыми в качестве основы для расчетов теплопроводности гетерогенного материала по теоретическим моделям.

Следует отметить, что при разработке расчетной модели могут быть допущены некоторые упрощения, необходимость которых обусловлена значительным усложнением расчетных формул для детальных моделей переноса тепла в гетерогенных материалах. Создание детальных моделей не избавляет от необходимости введения эмпирических коэффициентов с целью обеспечения требуемой точности, а даже, наоборот, приводит к недостаточной универсальности разработанной модели и громоздкости расчетных формул, что является неприемлемым на практике [4]. Сказанное выше объясняет актуальность проводимых исследований, нацеленных на создание адекватных моделей, позволяющих наиболее точно описать свойства новых композиционных материалов.

Особый интерес в рамках представленной работы вызывают материалы, в качестве основы которых используется полимерное связующее и мелкодисперсные минеральные наполнители.

В качестве оцениваемых параметров моделей выступают коэффициенты инверсии компонент композиции, а также плотность и теплопроводность агрегатов наполнителя.

Расчетные модели

Известно несколько расчетных моделей теплопроводности подобных материалов:

- Формула Бургера [3] (для сферических частиц):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{V_{\text{cb}} \lambda_{\text{cb}} + C V_{\text{h}} \lambda_{\text{h}}}{V_{\text{cb}} + C V_{\text{h}}} \quad (1)$$

Из нашего опыта следует (далее будет показано на экспериментальных данных), что коэффициент C зависит от характеристик распределения фаз в смеси: $C=1$ – гомогенная смесь,

$C << 1$ – изолированная фаза наполнителя, $C > 1$ – непрерывная фаза наполнителя.

- Формула Максвелла [6]:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{cb}} \left(\frac{\lambda_{\text{h}} + 2\lambda_{\text{cb}} - 2V_{\text{h}}(\lambda_{\text{cb}} - \lambda_{\text{h}})}{\lambda_{\text{h}} + 2\lambda_{\text{cb}} + V_{\text{h}}(\lambda_{\text{cb}} - \lambda_{\text{h}})} \right). \quad (2)$$

- Формула Оделевского [4] (для кубических замкнутых включений):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{cb}} \left(1 - \frac{V_{\text{h}}}{\frac{1}{1 - \lambda_{\text{h}} / \lambda_{\text{cb}}} - \frac{1 - V_{\text{h}}}{3}} \right). \quad (3)$$

- Формула Миснара [2] (для кубических частиц, ориентированных перпендикулярно вектору теплового потока):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{cb}} \left(1 + V_{\text{h}} \frac{1 - \lambda_{\text{cb}} / \lambda_{\text{h}}}{1 - V_{\text{h}}^{1/3} \frac{1 - \lambda_{\text{cb}} / \lambda_{\text{h}}}{1 - \lambda_{\text{cb}} / \lambda_{\text{h}}}} \right). \quad (4)$$

Обозначения в формулах (1)–(4): V_{h} – объемная доля наполнителя; V_{cb} – объемная доля связующего; λ_{h} , λ_{cb} и $\lambda_{\text{эфф}}$ – теплопроводности наполнителя, связующего и эффективная теплопроводность композиции соответственно. При этом под связующим понимается непрерывная фаза, а под наполнителем – прерывистая.

Для случаев, когда соотношения коэффициентов теплопроводности компонент $\lambda_{\text{h}} / \lambda_{\text{cb}}$ составляют значения как меньше, так и больше единицы, расчетные значения эффективной теплопроводности смеси могут быть получены по указанным выше формулам.

В представленных выше расчетных моделях учитываются определенные свойства и содержание компонент смеси. В случае с реальными системами наблюдается влияние агрегации частиц наполнителя, которая приводит к изменению свойств наполнителя, порогового эффекта образования «бесконечного кластера», неидеальности границ раздела фаз и модификации свойств на границе наполнитель/связующее, а также влияние включений неучитываемых компонент, например силиконового масла в силиконовом связующем, наличие технологической пористости и др.

Следует отметить, что наличие эмпирического коэффициента C в формуле Бургера (1) делает ее довольно удобной для оценок теплопроводности двухкомпонентных смесей в широком диапазоне изменения свойств компонент: плотность, объемная доля, теплопроводность. Значение коэффициента C косвенно

учитывает важные характеристики материала: непрерывность или прерывистость фаз каждой из компонент, отношение их коэффициентов теплопроводности и возможно даже форму частиц наполнителя. Тем не менее для каждой конкретной композиции приходится подбирать значение коэффициента C , что снижает универсальность формулы.

Проведенные нами измерения и расчеты по формуле (1) для различных комбинаций мелкодисперсных наполнителей и полимерного связующего выявили устойчивую зависимость коэффициента C от отношения λ_n/λ_{cb} в широком диапазоне значений эффективной теплопроводности гетерогенной смеси λ_{eff} и объемного содержания наполнителя V_n [7, 8]. Принимаемое для дальнейших расчетов теплопроводности композиций по модифицированной формуле Бургера значение коэффициента C в двухкомпонентных и трехкомпонентных композиционных материалах показано на рис. 1.

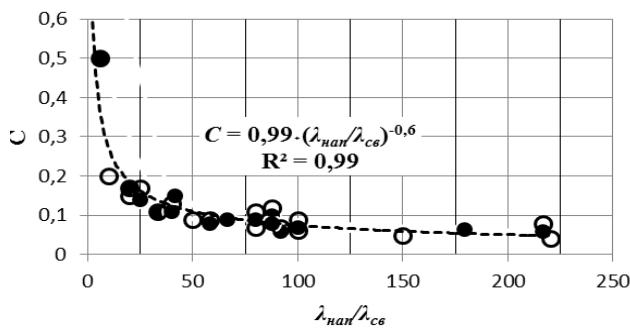


Рис. 1. Характер зависимости коэффициента C в модифицированной формуле Бургера от величины отношения $\lambda_{\text{нап}}/\lambda_{\text{cb}}$ (температура 20°C) для двухкомпонентной (●) и трехкомпонентной (○) композиций

Fig. 1. The nature of the dependence of the coefficient C in the modified Burgers equation on the value of the ratio λ_f / λ_b (temperature is 20°C) for two-component (●) and three-component (○) compositions

Зависимость коэффициента C от отношения λ_n/λ_{cb} универсальна для разных связующих (силикон, полиуретаны, эпоксидная смола) и мелкодисперсных порошковых наполнителей в широком диапазоне изменения значений теплопроводности и объемного содержания наполнителя. Согласие расчетов с экспериментом, с учетом разброса данных, вызванного структурной неоднородностью образцов, можно признать удовлетворительным.

С целью повышения согласия расчетов, которые были получены по формулам (3) и (4), и

измеренных значений теплопроводности при значительной неоднородности компонент по свойству был применен метод конструирования формулы эффективной теплопроводности путем инверсии наполнителя и связующего, опробованный, в частности, на системах «кремнийорганический эластомер – порошкообразный минеральный наполнитель» [9].

При исследованиях двухкомпонентных смесей с использованием метода инверсии компонент проводятся расчеты, когда одна из компонент является связующей (непрерывная фаза), а другая наполнителем (дискретная фаза), а затем их меняют местами в расчетных формулах для вычисления значения теплопроводности исследуемой смеси (композиции).

Соображения о применении в расчетных моделях принципа взаимной замены (инверсии) компонент в структуре элементарной расчетной ячейки и конструирования формулы для вычисления эффективной теплопроводности гетерогенной композиции формулировались давно. Известны предлагавшиеся Лихтенеккером (публикация 1909-го года), Миснаром и другими авторами способы так называемого «смешивания проводимостей» и конструирования формулы для эффективной теплопроводности [4]. Выбранный нами для дальнейших расчетов метод инверсии компонент заключается в определении эффективной теплопроводности гетерогенного материала по формуле

$$\lambda_{\text{eff}} = a_1 \lambda_1 + a_2 \lambda_2, \quad (5)$$

где λ_1 — эффективная теплопроводность смеси: связующее — порошок (твердые частицы); наполнитель — полимер (силикон, полиуретан и др.);

λ_2 — эффективная теплопроводность смеси: связующее — полимер; наполнитель — порошок;

a_1, a_2 — эмпирические коэффициенты, подбираемые по правилу нормировки: $a_1 + a_2 = 1$; $a_1 < a_2$.

Полученные нами результаты расчетов в рамках теории проводимости и инверсии компонент приведены в работах [8, 10]. Расчеты проводились по формулам Оделевского (3) и Миснара (4).

Однако необходимо отметить, что для минеральных порошков в состоянии свободной засыпки (в воздушной среде) зависимость C в формуле Бургера от отношения теплопроводностей порошка и воздуха несколько иная. Полученные нами ранее результаты для таких смесей [7] показали, что основная причина этого заклю-

чается в том, что дисперсная фаза в воздушной среде имеет гораздо больше возможностей по изменению положения частиц в пространстве и образованию контактов и «проводящих каналов», «разрушающих» изолированность твердой фазы и увеличивающих тем самым эффективную проводимость смеси.

В данной работе была измерена теплопроводность порошков в состоянии свободной засыпки, для которых был проведен анализ по модифицированной формуле Бургера и получена несколько иная, по сравнению с показанной на рис.1, зависимость коэффициента C от отношения $\lambda_{\text{пор}} / \lambda_{\text{возд}}$. В условиях измерения теплопроводности исследуемых образцов конвективный перенос тепла незначителен, поскольку разность температур на образцах мала, поэтому основным механизмом переноса тепла является теплопроводность, а не конвективный перенос тепла. В расчетах использованы те же значения теплопроводности агрегатов, что и для композиций на основе полимерных связующих. В целом, по уже указанной причине, значения коэффициента C получились несколько выше для таких же, как в двух и трехкомпонентных материалах, объемных содержаний наполнителя (порошка) (рис. 2).

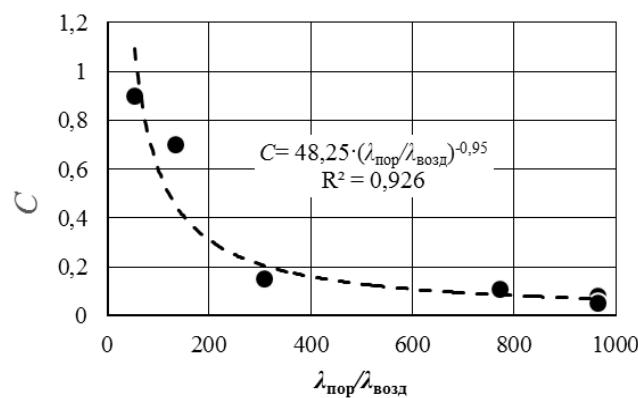


Рис. 2. Характер зависимости коэффициента C в формуле Бургера от величины отношения $\lambda_{\text{пор}} / \lambda_{\text{возд}}$ (температура 20°C)

для различных порошков в воздушной среде
Fig. 2. The nature of the dependence of the coefficient C in the Burgers equation on the value of the ratio $\lambda_{\text{pow}} / \lambda_{\text{air}}$ (temperature is 20°C) for various powders in air

Для всех исследованных композиций значения коэффициентов a_1 и a_2 принимались одними и теми же – 0,1 и 0,9 соответственно, что делало формулу (5) универсальной. Расчетные оценки в целом согласовывались с экспериментальными данными по всей совокупности исследованных

композиций и значений объемных содержаний наполнителей.

Оцененные по результатам сравнения расчетов с экспериментами значения теплопроводности наполнителя соответствуют эффективной теплопроводности агрегатов мелкодисперсных частиц, и они существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц. Это объясняется образованием агрегатов, эффективная теплопроводность которых существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц.

В подтверждение этого предположения нами была измерена теплопроводность порошка AlN (серый) при свободной, но уплотненной засыпке (плотность засыпки указана в таблице), при этом значения теплопроводности засыпок при 20°C находились в диапазоне (0,8–1,15) Вт/(м·К).

По результатам расчетов согласно формулам (3), (4) и (1) для коэффициента теплопроводности твердых частиц 22 Вт/(м·К) были получены следующие значения теплопроводности засыпки: 0,83; 0,90 и 1,15 Вт/(м·К). Полученные результаты согласуются с приведенной выше оценкой теплопроводности наполнителя.

Приведенные выше данные позволяют считать правомерным утверждение о том, что теплопроводность агрегатов порошка AlN в силиконе при 20°C более чем на порядок ниже коэффициента теплопроводности монокристаллического AlN (см. таблицу).

С целью сравнения фаз наполнителя были подобраны два образца с примерно одинаковым содержанием AlN: первый – 30 об.% AlN (серый) ($\lambda = 1,11$ Вт/(м·К)) и второй – 22,5 об.% AlN (белый) ($\lambda = 1,32$ Вт/(м·К)). В результате исследований установлено:

- фаза наполнителя в первом образце состоит преимущественно из включений округлой формы (от 50 до 250 мкм), при этом большая часть наполнителя содержится во включениях размером 70–80 мкм;

- фаза наполнителя второго образца преимущественно состоит из включений округлой формы (от 30 до 150 мкм), большая часть наполнителя содержится во включениях размером 30–50 мкм.

Из этого следует, что эффективная теплопроводность более мелких агрегатов частиц наполнителя выше, чем более крупных. Из этого также следует, что максимально возможное измельчение просушенного порошка из твердых кристаллических частиц позволит увеличить теплопроводность композиции при том же объемном содержании наполнителя [10].

Таблица. Результаты оценки параметров расчетных моделей (плотность и теплопроводность агрегатов частиц наполнителей) эффективной теплопроводности композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных порошковых наполнителей

Table. Assessment of calculation model parameters (density and thermal conductivity of filler particle aggregates) of the effective thermal conductivity of compositions based on polymer binders and fine powder fillers

Свойство	SiO_2 марка Б порошок	SiO_2 (плавл. полые мик- росфера)	ZnO	SiC	Al_2O_3	AlN белый	AlN серый	TiO_2	αBN	SiO_2 кристо- балит	$\text{Al}(\text{OH})_3$	CaSiO_3 волластонит	Примечания
Порошок в состоянии свободной засыпки													
$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	—	0,5	0,4–0,5	0,53	—	—	1,4–1,5*	0,57	0,37–0,40	0,57	0,6–0,8	—	* Засыпка с уплотнением
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ при 20°C	—	0,3	0,38	0,42	—	—	0,8–1,15	0,35	—	0,40	0,33–0,45	—	
Наполнитель в композиции с полимерным связующим (силикон СКТН А, полиуретан СУРЭЛ-7, BASF, эпоксидная смола ЭД 20)													
$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	2,3–2,65	2,2	3,72	3,1–3,23	3,7–3,97	3,26	3,26	4,0– 5,1	2,1	2,3	2,35–2,42	2,78–2,92	Пикнометрическая плотность наполнителя
$\lambda_{\text{нап.}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ при 20°C	СКТН А	7–10	1,38	—	21–25	11–14	48–55	18–25	3,5	50	6–8	18–23	2,5
	СУРЭЛ-7	7–10	1,38	—	—	8–13	37–42	32–39	—	60	—	—	—
	BASF (жидкие образцы)	—	—	—	—	—	≈25	—	—	—	—	≈15	—
	ЭД-20	8–10	1,38	—	—	11–16	37–43	—	—	—	—	—	—
Кристалл/керамика/спеченный порошок													
$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	2,6–2,65	2,5–2,6	5,7 — —	3,23	3,95– 4,02	3,26	3,26	4,0– 5,1	2,1	2,5	3,97–4,42 — 2,42–2,53	2,78–2,92	Невыделенный шрифт – пикнометрическая плотность
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при 20°C	— — 6,82–11,4	1,38	54 15–30 —	490 (α) гекс. 175 29	300 18–34 28–40	200–300 138–200 —	—	— — 7–8	— 180 30	— — 7–13	— 0,5–2,0 0,3–0,5	Данные из различных источников физических свойств материалов	

Оценка параметров моделей

Значение параметров расчетных моделей эффективной теплопроводности композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных порошковых наполнителей были оценены путем сравнения расчетов с полученными авторами экспериментальными данными по теплопроводности гетерогенных композиций на основе полимерных связующих и мелкодисперсных минеральных наполнителей.

Значения теплопроводности наполнителя λ_n оценивали по модели Оделевского (3), Миснара (4) и модифицированной формуле Бургера (1), в которой эмпирический коэффициент С представлял собой параметр композиции, характеризующий неоднородность ее компонент по теплопроводности: $C=f(\lambda_{\text{нап}}/\lambda_{\text{св}})$ или $C=f(\lambda_{\text{пор}}/\lambda_{\text{возд}})$ – для порошков в воздушной среде.

Значение истинной плотности порошка наполнителя определяли пикнометрическим методом.

Значения коэффициентов в формуле инверсии компонент a_1, a_2 принимались постоянными для всех рассмотренных комбинаций компонент и обеспечивающими минимизацию различий в измеренных и рассчитанных значениях эффективной теплопроводности композиции.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что:

- оценки $\lambda_{\text{нап}}$ отличаются незначительно для одних и тех же наполнителей при разных связующих;
- теплопроводность агрегатов наполнителей значительно выше теплопроводности порошковой засыпки, даже с дополнительным прокаливанием и уплотнением порошка;
- теплопроводность агрегатов существенно ниже теплопроводности кристаллических частиц наполнителя, но близка к теплопроводности порошковых керамик или спеченных порошков.

Оцененные значения параметров расчетных моделей для широкого круга наполнителей и различных связующих позволяют, как это показано нами и в работе [11] (рис. 3), прогнозировать теплопроводность вновь разрабатываемых композиций функциональных материалов, например по модифицированной формуле Бургера с погрешностью в пределах $\pm 20\%$ ($P=0,95$).

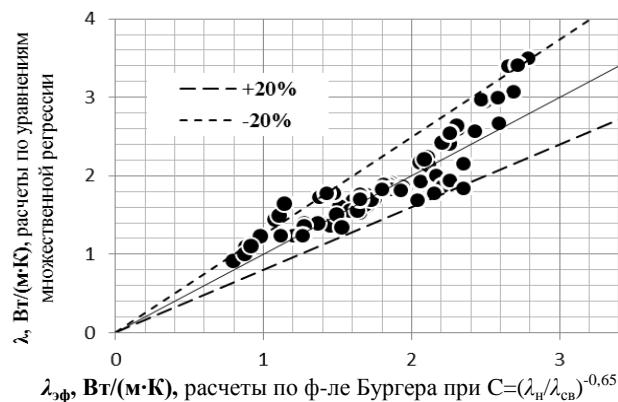


Рис. 3. Сравнение расчетов по формуле Бургера с расчетами по уравнениям множественной регрессии

Fig. 3. Comparison between the calculations using the Burgers equation and the calculations using multiple regression equations

Новизна представленных в работе результатов заключается в оценке (уточнении) параметров расчетных моделей, основанных на известных формулах Оделевского, Миснара, Бургера, что позволяет с приемлемой точностью (в пределах $\pm 20\%$) проводить оценку теплопроводности вновь разрабатываемых композиционных материалов. Эффективность применения выбранного авторами подхода к моделированию теплопроводности подчеркивается и рядом других работ [12–14].

Список литературы

1. Эдвабник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 76.
2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968. 464 с.
3. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
4. Дульнев Г.Н., Заричня Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
5. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1976. 215 с.
6. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов: учебное пособие. М.: МГУ, 2010. 99 с.
7. Сулаберидзе В.Ш., Мушленко В.Д., Михеев В.А. Теплопроводность гетерогенных композиций на основе полимеров с минеральными наполнителями: монография. СПб.: ИПФ «Реноме», 2016. 92 с.
8. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушленко В.Д. Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 59, № 7. 2016. С. 7–14.
9. Кириллов В.Н., Дубинкер Ю.Б. и др. Теплопроводность систем, кремнийорганический эластомер – порошкообразный минеральный наполнитель // ИФЖ. Т. XXIII, №3. 1972. URL: <http://www.viam.ru/public>.

10. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 167–172.
11. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш. Расчетно-экспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // Мир измерений. № 3 (175). 2017. С. 26–28.
12. Agrawal A., Satapathy A. Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers // Intern. J. of Thermal Sciences. 2015. Vol. 89. P. 203–209.
13. Xua J., Gaoa B., Dua H., Kanga F. A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials // Intern. J. of Thermal Sciences. 2016. Vol. 104. P. 348–356.
14. Xu J.Z., Gao B.Z., Kang F.Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 102. N 6. P. 972–979.

References

1. Edvabnik V.G. On the theory of generalized conductivity of mixtures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Current Problems of Science and Education], 2015, no. 1–2, p. 76. (In Russ.)
2. Misnar A. *Teploprovodnost tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ikh kompozitsiy* [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. Moscow: Mir, 1968, 464 p. (In Russ.)
3. Chudnovsky A.F. *Teplofizicheskie kharakteristiki dispersnykh materialov* [Thermophysical characteristics of dispersed materials]. Moscow: Fizmatgiz, 1962, 456 p. (In Russ.)
4. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energiya, 1974, 264 p. (In Russ.)
5. Godovsky Yu.K. *Teplofizicheskie metody issledovaniya polimerov* [Thermophysical methods for studying polymers]. Moscow: Khimiya, 1976, 215 p. (In Russ.)
6. Shevchenko V.G. Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie [Fundamentals of physics of polymer composite materials: the study guide]. Moscow: Moscow State University, 2010, 99 p. (In Russ.)
7. Sulaberidze V. Sh., Mushenko V.D., Mikheev V.A. *Teploprovodnost heterogennykh kompozitsiy na osnove polimerov s mineralnymi napolnitelyami: monografiya* [Thermal conductivity of heterogeneous compositions based on polymers with mineral fillers: the monograph]. Saint Petersburg: Renome, 2016, 92 p. (In Russ.)
8. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh., Mushenko V.D. Modeling of thermal conductivity of three-component compositions. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 7, pp. 7–14. (In Russ.)
9. Kirillov V.N., Dubinker Yu.B. et al. Thermal conductivity of the systems such as organosilicon elastomer – powdered mineral filler. *IFZh* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1972, vol. 23, no. 3. Available at: <http://www.viam.ru/public>.
10. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh., Mushenko V.D. Study on thermal conductivity of composite materials based on silicone with fillers. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2015, vol. 58, no. 7, pp. 167–172. (In Russ.)
11. Mikheev V.A., Sulaberidze V.Sh. Calculation and experimental studies of effective thermal conductivity of composite materials based on polymers. *Mir izmereniy* [The World of Measurements], no. 3 (175), 2017, pp. 26–28. (In Russ.)
12. Agrawal A., Satapathy A. Mathematical model for evaluating effective thermal conductivity of polymer composites with hybrid fillers. *Intern. J. of Thermal Sciences*. 89, 203–209 (2015).
13. Xua J., Gaoa B., Dua H., Kanga F. A statistical model for effective thermal conductivity of composite materials. *Intern. J. of Thermal Sciences*. 104, 348–356 (2016).
14. Xu J. Z., Gao B. Z., Kang F. Y. A reconstruction of Maxwell model for effective thermal conductivity of composite materials. *Applied Thermal Engineering*. 102, 6, 972–979 (2016).

Поступила 14.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020
Submitted 14/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

Сулаберидзе Владимир Шалвович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия. Email: sula_vlad@mail.ru

Скорнякова Елизавета Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: elizavetasina@mail.ru

Vladimir Sh. Sulaberidze – DrSc (Eng.), Senior Research Associate, Professor, Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia. Email: sula_vlad@mail.ru

Elizaveta A. Skorniakova – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia. Email: elizavetasina@mail.ru