

УДК 621.315.211;616.7;536.6.001.24

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ К КАБЕЛЬНЫМ РЕЗИНАМ

И.В. Флеминг, В.С. Ким

Томский политехнический университет

E-mail: flash2506@yandex.ru

Для расчета теплоемкости и коэффициента теплопроводности кабельных резин применена математическая модель прогнозирования теплофизических характеристик композиционных материалов Г.Н. Дульнева. Показано, что для промышленных марок резин расхождение теоретических значений, учитывающих содержание каучуков и наполнителя, с данными, полученными экспериментальным путем, не превышает 10 %. Точность может быть повышена, если при расчете учитывать большее количество ингредиентов резиновой смеси. Предложено использовать данную методику при расчете конструкции кабельных изделий и исследовании процессов термического старения резин.

Ключевые слова:

Старение резин, коэффициент теплопроводности, теплоемкость.

Key words:

Rubber aging, coefficient of heat conductivity, heating capacity.

Одним из наиболее часто наблюдающихся механизмов старения кабельных резин, приводящих к ухудшению эксплуатационных характеристик кабелей, является термическое старение. Реакциями, ведущими к изменению структуры вулканизатов в процессе старения, являются деструкции полимерной цепи, деструкция поперечных связей, сшивание полимерных цепей, изменение структуры поперечных связей и окисление. Несмотря на то, что первые работы в этой области появились давно, вопросы старения полимерных материалов не потеряли своей актуальности [1–3].

Исследование процессов старения резины осложняется тем, что резина является многокомпонентным материалом и, как правило, содержит несколько типов каучуков, механизмы старения которых могут значительно отличаться. Для понимания процессов старения резин необходимо знать теплофизические свойства. В частности, интенсивность распада цепей, узлов сетки и образования новых связей при термическом старении будет зависеть от распределения температуры по толщине материала. Интегральными характеристиками, определяющими ход процессов старения являются теплоемкость C и коэффициент теплопроводности λ , которые могут значительно отличаться в зависимости состава и неизвестны для большинства рецептур резиновых смесей. Экспериментальное определение теплофизических характеристик каждой резиновой смеси требует существенных материальных и временных затрат. Аналитический расчет дает возможность оценивать теплофизические характеристики резин на стадии разработки рецептур резиновых смесей и упрощает исследование процесса старения.

В связи с актуальностью применения моделирования теплопроводности композиционных материалов, существует большое количество теоретических моделей для прогноза теплофизических характеристик [4–6]. Наиболее распространенной является простая модель эффективной теплопро-

водности, предложенная К. Лихтенеккером, а также более поздняя модификация, предложенная М. Асаадом. Однако использование модели Лихтенеккера–Асаада для прогнозирования теплопроводности резин не дает хорошей сходимости с экспериментальными данными. Область применимости этой модели ограничена теплофизическими характеристиками мелкодисперсных смесей при близких концентрациях компонентов [4], что не выполняется в случае резиновых смесей.

В [6] Г.Н. Дульневым предложена методика приближенного определения коэффициента теплопроводности композиционного материала, состоящей более чем из двух компонентов. Г.Н. Дульнев предположил, что эффективные коэффициенты обобщенной теплопроводности систем с хаотичной и упорядоченной структурой (с дальним порядком) равны друг другу, если эти структуры эквивалентны, а свойства компонент и их объемные концентрации одинаковы.

В [6] композиционные материалы по характеру структуры разделены на три основные группы: смеси с замкнутыми включениями, смеси с взаимопроникающими компонентами и комбинированные структуры с взаимопроникающими компонентами и вкраплениями. Структура с вкраплениями, состоит из связующего материала, в котором хаотически распределены не контактирующие между собой включения одной или нескольких компонент. Отличительной особенностью структуры с взаимопроникающими компонентами является непрерывная протяженность вещества любой компоненты во всех направлениях.

Расчет теплофизических характеристик ведется путем последовательного приведения структуры многокомпонентной смеси к структуре двухкомпонентной смеси. То есть при расчете эффективного коэффициента теплопроводности, производится последовательное рассмотрение бинарных систем и анализ изменения коэффициента теплопроводности от введения каждого последующего ингре-

диента в смесь (или исходный основной компонент) с предполагаемой однородной структурой и свойствами, рассчитанными на предыдущем этапе. При этом каждый раз объемная концентрация ингредиента определяется не по отношению к объему смеси всех ингредиентов, а к объему смеси, рассматриваемой на данном этапе.

Методика расчета

При расчете учитывается лишь содержание каучуков и наполнителей, т. к. тип и количество этих ингредиентов в наибольшей степени оказывают влияние на теплофизические свойства резиновой смеси [6]. Будем рассматривать резину, как структуру с взаимопроникающими компонентами (вулканизированный каучук). Также предполагаем, что резина обладает достаточно высокой степенью однородности, позволяющей применить для расчета упорядоченную модель ортогональной двухмерной решетки с кубической симметрией. В этом случае для расчета теплофизических характеристик кабельных резин можно применить методику Г.Н. Дульнева.

Коэффициент теплопроводности. Так как резина представляет собой смесь с взаимопроникающими компонентами, то при адиабатическом дроблении элементарной ячейки, выражение для расчета коэффициента теплопроводности смеси:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = x^2 + \frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}}(1-x)^2 + \frac{2\nu x}{\nu x + 1 - x};$$

$$2x^3 - 3x^2 + 1 = \theta,$$

где x – промежуточная переменная, зависящая от объемной концентрации, определяется путем подбора; λ_0, λ – соответственно коэффициенты теплопроводности основного компонента и ингредиента; $\nu = \lambda/\lambda_0$. Объемная концентрация каждого i -го ингредиента в смеси n ингредиентов, находится по формуле:

$$\theta_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}} \frac{m_i}{\rho_i}.$$

Теплоемкость. Для определения удельной теплоемкости материала необходимо найти объемную концентрацию в смеси основных компонентов, после чего рассчитать объемную теплоемкость резины.

$$\rho c = \sum \frac{\lambda_i}{a_i} \theta_i,$$

где a_i, λ_i – справочные значения коэффициента температур- и теплопроводности каждого ингредиента смеси соответственно. Плотность резиновой смеси ρ определяется как сумма плотностей отдельных ингредиентов, взятых с весовыми множителями, равными их процентному содержанию [7].

Методика эксперимента

Экспериментальное определение C и λ кабельных резин проведено методом регулярного теплового режима [8, 9] на измерителе теплопроводности ИТ- λ -400 и измерителе теплоемкости ИТ-С-400.

При исследовании использовался метод динамического калориметра. Нагрев образцов производился до температуры 100 °С. Неадиабатичностью процесса можно пренебречь, т. к. в процессе монотонного разогрева измеряется разность мощностей, необходимых для разогрева двух образцов с заданной скоростью, при этом теплоемкость одного из образцов известна.

Теплопроводность. Измерение коэффициента теплопроводности λ в режиме монотонного разогрева тонкой пластины сводится к измерению теплового потока и истинного градиента температуры в основном слое пластины. Образцы выполняются в виде таблеток с диаметром $d=15\pm 0,3$ мм и высотой $h=5\pm 0,3$ мм. Для определения коэффициента теплопроводности необходимо предварительно определить постоянные прибора: тепловую проводимость тепломера K_t , и тепловое сопротивление контакта P_k . Тепловая проводимость тепломера определяется на образцах кварцевого стекла:

$$K_t = \frac{n_{\text{окб}} \lambda}{n_{\text{кв}} h} S(1 + \sigma_c),$$

где $n_{\text{окб}}, n_{\text{кв}}$ – значения перепадов температур на образце кварца и на пластине тепломера соответственно; S – площадь поперечного сечения образца, м²; σ_c – поправка, учитывающая теплоемкость образца:

$$\sigma_c = \frac{C_o}{2(C_o + C_c)},$$

где C_o – полная теплоемкость испытуемого образца: $C_o = c_o m_o$; c_o – удельная теплоемкость образца; C_c – полная теплоемкость стержня измерителя: $C_c = c_m m_c$; c_m – удельная теплоемкость материала стержня (меди); m_o и m_c – масса образца и масса медного стержня соответственно, кг.

Тепловое сопротивление контакта определяется на эталонных медных образцах:

$$P_k = \frac{n_{\text{ом}} S(1 + \sigma_c)}{n_{\text{м}} K_t} - \frac{h_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}},$$

где $n_{\text{ом}}, n_{\text{м}}$ – значения перепадов температур на образце меди и на пластине тепломера соответственно; $h_{\text{м}}$ – высота медного образца, м; $\lambda_{\text{м}}$ – теплопроводность медного образца, Вт/(м·К).

Тепловое сопротивление исследуемого образца:

$$P_o = \frac{n_{\text{оп}} S(1 + \sigma_c)}{n_{\text{р}} K_t} - P_k,$$

где $n_{\text{оп}}, n_{\text{р}}$ – значения перепадов температур на образце резины и на пластине тепломера соответственно.

Коэффициент теплопроводности образца:

$$\lambda = \frac{h}{P_o},$$

где h – высота образца, м.

Теплоемкость. Для определения теплоемкости используются образцы в виде таблеток с диаметром $d=15\pm 0,3$ мм и высотой $h=10\pm 0,3$ мм. В рам-

ках, используемого в данной работе, метода расчет теплоемкости образца C проведен по времени запаздывания температуры τ_0 на тепломере. Значение C рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{K_T}{m_0} (\tau_0 - \tau_T),$$

где τ_T – среднее значение времени запаздывания на тепломере в экспериментах с пустой ампулой, с; K_T – постоянная прибора:

$$K_T = \frac{C_m}{\tau_{ом} - \tau_T},$$

где C_m – теплоемкость медного образца, Дж/(кг·К); $\tau_{ом}$ – среднее значение времени запаздывания на тепломере в экспериментах с медным образцом, с.

Обсуждение результатов

Для часто используемых при производстве гибких кабелей марок резин ТСШ-33 и ТСШМ-35, по методике Г.Н. Дульнева проведен расчет C и λ . Данные о содержании каучуков (НК – натуральный каучук; СКИ – синтетический изопреновый каучук; СКС – синтетический бутадиен-стирольный каучук, СКД – синтетический бутадиеновый каучук) и наполнителя (мел) в рецептуре этих резин представлены в табл. 1 (рецептуры резин предоставлены ЗАО «Сибкабель»). Также приведены характеристики ([7] для 25 °С) ингредиентов резиновых смесей, необходимые для расчета. Значения C и λ определялись как среднее по пяти измерений.

Таблица 1. Свойства и содержание основных компонентов резиновых смесей ТСШ-33 и ТСШМ-35

Компоненты	Содержание компонентов		Свойства компонентов		
	m	$q, \%$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a, 10^{-8} \text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
ТСШ-33					
НК	12,2	10	0,15	8,6	920
СКИ	7,58	8	0,15	9	920
СКС	24,24	16	0,18	11,5	910
Мел	63,64	42	0,35	15,6	2680
ТСШМ-35					
НК	18,5	16,1	0,15	8,6	920
СКИ	6,5	8,6	0,15	9	920
СКД	10	12,5	0,19	11	910
Мел	56,29	52,86	0,35	15,6	2680

m – количество весовых частей ингредиента на 100 частей каучука; q – содержание компонента от общей массы смеси в %.

Перед экспериментальным измерением C и λ образцов резин определялись постоянные приборов. Для ИТ-С-400 среднее время запаздывания на тепломере (с пустой ампулой) $\tau_0=14,24$ с и $K_T=0,51$ Вт/град. Для ИТ- λ -400 тепловая проводимость тепломера $K_T=0,150$, тепловое сопротивление контакта $P_k=4,76 \cdot 10^{-4} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Сравнение экспериментально найденных и рассчитанных значений теплопроводности λ и теплоемкости C резин марок ТСШ-33 и ТСШМ-35 проведено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в целом отклонение рассчитанных по методике Г.Н. Дульнева значений теплофизических характеристик резин от значений, определенных экспериментально, не превышает 10 %. Теоретические значения C в среднем, по рассмотренным маркам резин, отличаются от экспериментально найденных на 3 %, а для λ среднее отклонение составило 8 %. Возможно, что различие в отклонении расчетных значений от экспериментально измеренных связано с разной погрешностью приборов. Максимальная погрешность прибора ИТ-С-400 составляет 6 %, а максимальная погрешность ИТ- λ -400 составляет 10 %.

Таблица 2. Экспериментальные (Э) и расчетные (Т) значения λ и C резин при 25 °С

Теплофизические характеристики	Э	Т	$\Delta, \%$
ТСШ-33			
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$0,318 \pm 0,0094$	0,298	6,3
$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$1156 \pm 5,1$	1153	1,7
ТСШМ-35			
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$0,336 \pm 0,001$	0,303	9,9
$c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$1369 \pm 6,4$	1311	4,2

Δ – отклонение рассчитанных значений от экспериментальных.

Рассчитанные значения C и λ систематически занижены по сравнению с найденными экспериментально. Данное расхождение является следствием того, что при аналитическом расчете теплофизических характеристик учитывались только основные ингредиенты (каучуки и наполнитель), которые составляют ~70...80 % от состава смеси. Точность расчета можно повысить, если учитывать все ингредиенты резиновой смеси. Поскольку в данной модели учет ингредиентов происходит аддитивно, то при учете большего количества ингредиентов возрастет не только точность расчета, но и абсолютные значения C и λ .

Выводы

Сходимость экспериментально найденных и теоретически рассчитанных значений теплоемкости и теплопроводности кабельных резин показывает, что методика Г.Н. Дульнева применима для определения теплофизических характеристик реальных резиновых смесей с достаточно высокой точностью.

Точность расчета может быть увеличена путем учета большего количества компонентов резиновой смеси. Для расчетов используются только табличные значения теплофизических характеристик основных ингредиентов резиновой смеси; не требуется измерения эмпирических коэффициентов, дорогостоящее оборудование, специальное программное обеспечение.

Методику можно использовать для расчета теплофизических характеристик, при исследовании и прогнозировании процессов старения резин, а также при тепловом расчете кабельных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Робертс А. Натуральный каучук. – М.: Мир, 1990. – 695 с.
2. Zheng P., Chen W. Thermooxidative degradation natural rubber // Applied Polymer Science. – 2003. – № 6. – P. 227–232.
3. Roger P., Brown T. Ageing of Rubber – Accelerated Heat Ageing Test Results. – Shropshire: Rapra technology Ltd, 2001. – 155 p.
4. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.
5. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Энергия, 1968. – 464 с.
6. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. – М.: Атомиздат, 1989. – 484 с.
8. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973. – 144 с.
9. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. – Л.: Машгиз, 1957. – 240 с.

Поступила 15.04.2010 г.

УДК 620.179.15:621.391:621.396.96:535.317.25

АПЕРТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ТЕНЕВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ. Ч. I. ОДНОМЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

В.И. Солодушкин, В.А. Клименов, В.А. Удод, А.К. Темник

Томский политехнический университет
E-mail: vi_s@mail.ru

Предложен алгоритм одномерной коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений в радиометрических системах контроля, Отмечено его преимущество по сравнению с алгоритмом, основанным на применении известной формулы инверсии апертурных искажений, и приведены примеры, иллюстрирующие эффективность его использования.

Ключевые слова:

Апертура, алгоритм коррекции искажений, радиометрическая система, неразрушающий контроль, теневое радиационное изображение.

Key words:

Aperture, algorithm correction of distortions, radiometric system, non-distruction control, shadow radiation image.

Введение

Теневое радиационное изображение, возникающее в результате просвечивания объекта контроля пучком ионизирующего излучения, несет в себе информацию о состоянии внутренней структуры контролируемого объекта. Осуществляемое в радиометрических системах контроля преобразование радиационного изображения в электрический сигнал неизбежно сопровождается апертурными искажениями, обусловленными, в частности, конечными размерами апертуры детектора излучения [1–5]. Вследствие этого информация об объекте контроля поступает на конечное регистрирующее устройство в искаженной форме.

Известные в настоящее время методы коррекции апертурных искажений, как правило, реализуются в частотной области, вследствие чего полная коррекция апертурных искажений оказывается принципиально невозможной из-за наличия нулей у передаточной функции апертуры детектора излучения [4, 6, 7].

Апертурные искажения порождают систематическую погрешность результатов измерения излучения в радиометрии. Данные искажения вызваны усредняющим свойством апертуры детектора излучения, что приводит к понижению контраста и «размытию» теневых радиационных изображений. Вследствие чего возникает необходимость

разработки эффективных алгоритмов коррекции апертурных искажений теневых радиационных изображений в радиометрических системах контроля.

Алгоритм одномерной коррекции апертурных искажений

Применительно к радиометрическим системам контроля апертурную трансформацию (искажение) одномерной функции (сигнала) можно описать уравнением [1, 2, 4]:

$$\int_{x-a}^x s(t) dt = y(x), \quad (1)$$

где a – размер апертуры детектора излучения в направлении сканирования; $s(t)$ – строка теневых радиационных изображений по направлению сканирования объекта контроля детектором излучения (входной сигнал); $y(x)$ – строка искаженного теневых радиационных изображений по направлению сканирования объекта контроля (выходной сигнал). Для наглядности описания апертурной трансформации в радиометрических системах контроля на рис. 1 приведена схема радиометрического контроля объекта, содержащего семь инородных включений, на рис. 2 – график входного сигнала, а на рис. 3, 4 – графики выходных сигналов для апертур различных размеров.