

УДК 629.73-03-419(0432.2)

ББК 0 52 - 016.39 + 0 52 - 036,063.3 - 01-076733.2 +  
0 563.42

В.М. Синеглазов, В.В. Ключ

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Рассмотрены модели, имитирующие воздействие молнии на диэлектрические конструкционные материалы с элементами молниезащиты. Описаны модели растекания тока в многослойном материале и термической деструкции волокнистых полимерно-композитных материалов от воздействия тока молнии, протекающего по этим материалам.*

В современной авиации в качестве обшивки летательных аппаратов широкое распространение получили волокнистые полимерно-композитные материалы (ПКМ) - углепластики, стеклопластики и другие материалы, имеющие высокие прочностные характеристики и малую массу. Однако их существенным недостатком является большая степень разрушения при воздействии термических и электрических эффектов молнии.

Различные конструкции средств защиты от указанных эффектов молнии находятся в стадии разработки. Однако проведение испытаний по имитации воздействия эффектов молнии на конструкции с элементами защиты является очень дорогостоящим и занимает много времени.

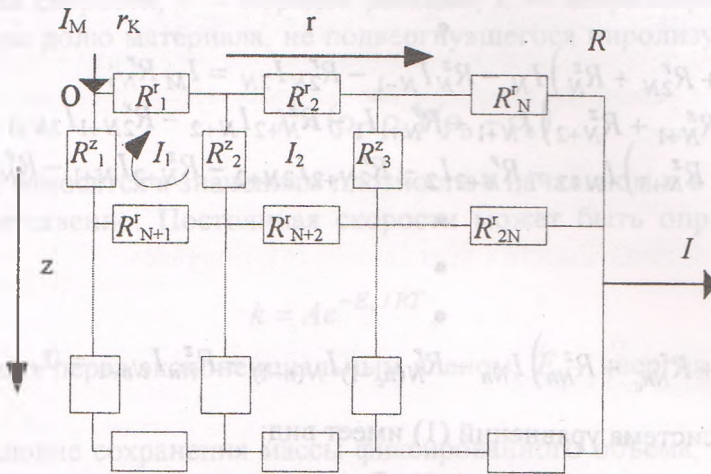
Решению задачи молниезащиты для твердых диэлектрических материалов с элементами защиты посвящено ряд работ. Так, в работе [1] рассмотрен метод координации изоляции для выбора системы молниезащиты. Для упрощения расчетов рассмотрена расчетная модель системы, обладающая осевой симметрией. Молниеприемник выполнен в виде заземленного кольцевого электрода, расположенного на поверхности диэлектрика. Высоковольтный электрод, имитирующий канал молнии, находится на некотором расстоянии над поверхностью диэлектрика. Заземленный электрод, имитирующий заземленный объект, находится на некотором расстоянии под диэлектриком. Для данной схемы на основе расчета электрического поля многоэлектродной системы были выведены условия для оптимального расположения системы молниезащиты. Однако при расчете электрического поля многоэлектродной системы не был учтен реальный канал пробоя воздушного промежутка между высоковольтным электродом и диэлектриком или заземленным электродом. В расчетах было принято допущение, что высоковольтный электрод касается поверхности диэлектрика.

В работе [2] с помощью метода координации изоляции рассматривалась молниезащищенность диэлектрических конструкционных материалов с сеточной молниезащитой. Описываются результаты испытаний образцов с сеточной защитой. На основе этих данных определяется надежность сеток, выполненных из различных металлов. Однако при испытаниях оба электрода (высоковольтный и заземленный) располагались с двух сторон образца вплотную к его поверхности. Данная схема испытаний исключает наличие канала пробоя воздуха, существующего при реальном поражении объекта молнией.

В работах [1] и [2] оценивается только эффективность молниезащиты и не оценивается степень повреждения диэлектрических конструкционных материалов, что очень важно в авиации, так как авиационные волокнистые ПКМ используются в качестве обшивки. И не-

значительные повреждения могут привести к потере прочности конструкции и как следствие – к снижению безопасности полетов.

Для определения степени повреждения конструкций из волокнистых ПКМ воспользуемся электрической схемой замещения (см. рисунок) в виде параллельно-последовательной цепочки сопротивлений, предложенной в работе [3].



Электрическая схема замещения

Проанализируем растекание тока по пластине конечных размеров, в центр которой втекает ток на радиусе  $r_k$  (радиус пробоя воздушного промежутка или радиус канала молнии). Поскольку ток втекает в центр пластины, то растекание тока по пластине будет симметричным. Поэтому рассмотрим только половину схемы замещения (см. рисунок). Каждая последовательно-продольная цепь сопротивлений моделирует сопротивление слоя. Поперечные сопротивления определяются контактами между слоями. Число элементарных сопротивлений вдоль оси  $Oz$  в этой схеме замещения считается конечным и равным  $N$ , а число элементарных поперечных сопротивлений в любом сечении по оси  $Oz$  равно  $n$ . Цепочка продольных сопротивлений начинается от границы  $r=r_k$  и заканчивается на торцах образца  $r=R$  (радиус пластины).

$$N = \frac{R - r_k}{\Delta r}, \quad n = n_c - 1,$$

где  $\Delta r$  – шаг по оси  $or$ ,  $\Delta r \rightarrow 0$ ;  $n_c$  – число слоев материала.

Элементарные сопротивления выражаются следующим образом:

$$R_i^r = \frac{\rho_k^r \Delta r}{(2\pi r \delta_k)}, \quad R_j^z = \frac{\rho_p^z \delta_k}{(2\pi r \Delta r)}, \quad i = 1, \dots, Nn_c, \quad j = 1, \dots, Nn,$$

где  $\rho_k^r$  – удельное сопротивление  $k$ -го слоя в продольном направлении;  $\rho_p^z$  – удельное сопротивление  $p$ -го контакта между слоями  $p=1, \dots, k-1$ ;  $\delta_k$  – толщина  $k$ -го слоя.

Поперечные сопротивления под каналом:

$$R_j^r = \frac{\rho_p^z \delta_k}{(\pi r_k^2)}$$

Для определения токов, протекающих в слоях, использовался метод контурных токов.

Исходная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases}
 (R_1^r + R_{N+1}^r + R_1^z + R_2^z)I_1 - R_2^z I_2 - R_{N+1}^r I_{N+1} = I_M R_1^r; \\
 (R_2^r + R_{N+2}^r + R_2^z + R_3^z)I_2 - R_2^z I_1 - R_{N+2}^r I_{N+2} - R_3^z I_3 = I_M R_2^r; \\
 \vdots \\
 (R_N^r + R_{2N}^r + R_N^z)I_N - R_N^z I_{N-1} - R_{2N}^r I_{2N} = I_M R_N^r; \\
 (R_{N+1}^r + R_{2N+1}^r + R_{N+1}^z + R_{N+2}^z)I_{N+1} - R_{N+1}^r I_1 - R_{N+2}^z I_{N+2} - R_{2N+1}^r I_{2N+1} = 0; \\
 (R_{N+2}^r + R_{2N+2}^r + R_{N+2}^z + R_{N+3}^z)I_{N+2} - R_{N+2}^r I_2 - R_{2N+2}^r I_{2N+2} - R_{N+2}^z I_{N+1} - R_{N+3}^z I_{N+3} = 0; \\
 \vdots \\
 (R_{N(n_c-1)}^r + R_{Nn_c}^r + R_{Nn}^z)I_{Nn} - R_{N(n_c-1)}^r I_{N(n-1)} - R_{Nn}^z I_{Nn-1} = 0.
 \end{cases} \quad (1)$$

В матричном виде система уравнений (1) имеет вид:

$$MX=G,$$

где  $M$  – симметричная ленточная матрица коэффициентов;  $X$  – матрица-столбец неизвестных контурных токов;  $G$  – матрица-столбец свободных членов.

Поскольку  $M$  – симметричная ленточная матрица, то система уравнений (1) решалась на ЭВМ модифицированным методом Гаусса для симметричных ленточных матриц, что позволило экономить память ЭВМ и время расчета.

На основе распределения силы тока по слоям и закона Джоуля-Ленца для каждого слоя материала определяется функция  $Q(x, t)$  — функция распределения тепловыделения по слою. Далее для упрощения рассмотрим распределение температуры для отдельного слоя.

Распределение температуры в теле можно найти, решая неоднородное уравнение теплопроводности, которое имеет вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \rho Q(x, t) + \rho H,$$

где  $\rho$  – плотность;  $C$  – теплоемкость;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $x$  – координата;  $k_x$  – коэффициент теплопроводности;  $H$  – теплота реакции.

В общем случае характеристики материала  $\rho$ ,  $C$  и  $k_x$  зависят от температуры. Слагаемое, содержащее теплоту реакции, характеризует теплоту, поглощаемую в процессе фазовых изменений, включая пиролиз.

Во многих полимерах (особенно в полимерах, находящих применение в конструкциях летательных аппаратов), включая эпоксидные и фенольные смолы и полиамиды, при нагреве происходят реакции пиролиза. Хотя подробный анализ химических реакций, происходящих при пиролизе, выходит за рамки данного исследования, рассмотреть продукты пиролиза интересно и полезно. В результате пиролиза таких полимеров образуются газообразные вещества и твердые обуглившиеся остатки. В тех случаях, когда энергия выделяется в глубине материала или когда вследствие теплопроводности температура в глубине материала повышается, реакции пиролиза происходят, по-видимому, и во внутренних порах материала, и на его поверхности. Если скорость пиролиза превышает скорость возможного газонакопления или снижения давления газа вследствие диффузии, то повышение давления газа может привести к вздутию материала.

Скорость пиролиза зависит от кинетики реакции и от показателя роста реакции. Скорость реакции может быть описана следующим соотношением:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -k\lambda^n, \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная скорости;  $n$  — порядок реакции;  $\lambda$  — безразмерная плотность, характеризующая массовую долю материала, не подвергнувшегося пиролизу, которая определяется в виде:

$$\lambda = (\rho - \rho_c) / (\rho_0 - \rho_c). \quad (3)$$

Индексы 0, с относятся к значениям плотности в начальном и в полностью обугленном состояниях соответственно. Постоянная скорости может быть определена соотношением Аррениуса в виде:

$$k = Ae^{-E_v/RT}, \quad (4)$$

где  $A$  — коэффициент перед экспоненциальным членом;  $E_v$  — энергия активации;  $R$  — газовая постоянная.

Учитывая условие сохранения массы фиксированного объема, получаем соотношение между средней плотностью сплошной среды  $\rho$ , плотностью газа в порах  $\rho_\xi$  и потоком газа через этот объем. Скорость изменения плотности среды —  $\partial\rho/\partial t$ . Скорость изменения плотности газа —  $(\partial/\partial t)(\rho_\xi\varepsilon)$ , а  $(\partial/\partial x)(\rho_\xi v_\xi)$  — поток газа через объем. Из условия баланса получаем:

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\xi\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_\xi v_\xi), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — объемная доля пор;  $\rho_\xi$  — плотность газа;  $v_\xi$  — скорость движения газа.

Плотность газа можно выразить через давление и температуру с предположением выполнения условия локального равновесия и с использованием уравнения состояния идеального газа вида:

$$\rho_\xi = P/RT. \quad (6)$$

Кроме того, зависимость потока газа через пористый материал связана с градиентом давления законом Дарси:

$$v_\xi = -K/\mu \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (7)$$

где  $K$  — проницаемость,  $\mu$  — абсолютная вязкость.

Используя соотношения (6) и (7), условие (3) можно переписать в виде:

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P}{RT} \right) + \left( \frac{P}{RT} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{RT} \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (8)$$

Введем следующее дополнительное соотношение между объемом пор и изменением плотности:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} (1 - \varepsilon_0). \quad (9)$$

Отметим, что уравнение (8) можно считать нелинейным уравнением диффузии давления.

Аналитическое решение этой задачи сопряжено с большими трудностями из-за нелинейности уравнения (8) и связи этой задачи с задачей теплопроводности. Таким образом, для опре-

деления давления в данной области потребовалось бы численное решение. Однако уравнение (8) можно использовать и для определения решения, дающего нижнюю границу давления, т.е. для определения минимума энергии, соответствующего образованию газов при пиролизе со скоростями, достаточными для того, чтобы внутреннее давление обусловило "вздутие".

Поскольку проницаемость существенно зависит от пористости, проницаемость не подвергнутого пиролизу материала может быть на несколько порядков меньше проницаемости полностью обугленного материала. При этом соотношение, соответствующее условию сохранения массы, сведется к равенству скорости уменьшения массы твердого вещества и скорости накопления газа в порах:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\xi} \varepsilon).$$

Используя это соотношение вместе с уравнением (6), получаем:

$$(4) \quad \frac{P}{RT} \varepsilon = - \int_0^t \frac{\partial \rho}{\partial t'} dt' = \rho_0 - \rho.$$

На основании уравнения (3) имеем:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho_0 - \rho) \frac{\partial \lambda}{\partial t}.$$

Используя соотношения (2) и (4), это выражение можно переписать в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -A e^{-E_0/RT} (\rho_0 - \rho_c)^{1-n} (\rho - \rho_c)^n. \quad (10)$$

Интегрируя соотношение (10), находим:

$$\rho = \rho_c + (\rho_0 - \rho_c) \left[ 1 - (1-n) A \int_0^t e^{-E_0/RT} dt' \right]^{\frac{1}{1-n}}.$$

Отсюда с учетом равенства (10) получаем следующее выражение для давления:

$$P = \frac{RT}{\varepsilon} (\rho_0 - \rho_c) \left\{ 1 - \left[ 1 - (1-n) A \int_0^t e^{-E_0/RT} dt' \right]^{\frac{1}{1-n}} \right\}. \quad (11)$$

В случае, если  $n=1$ , этот результат принимает вид:

$$P = \frac{RT}{\varepsilon} (\rho_0 - \rho_c) \left\{ 1 - \exp \left[ 1 - A \int_0^t e^{-E_0/RT} dt' \right] \right\}. \quad (12)$$

Соотношения (11) или (12) можно использовать для численного определения функции, характеризующей изменение давления в порах при заданном изменении температуры  $T(x, t)$ .

Применение данных моделей совместно с методом координации изоляции позволяет произвести расчет воздействия молнии на конструкции из волокнистых ПКМ с элементами молниезащиты, оценивая не только надежность молниезащиты, но и степень термической деструкции волокнистых ПКМ. Данные модели могут быть применены при проектировании новых авиационных конструкций из волокнистых ПКМ с элементами молниезащиты.

#### Список литературы

1. Аронов М.А. Применение метода координации изоляции при выборе систем молниезащиты // Известия вузов: Энергетика. – 1989. – №5. – С. 38–42.
2. Авруцкий В.А. Оптимизация сеточной молниезащиты изделий из диэлектрических конструкционных материалов // Электричество. – 1992. – №1. – С. 27–31.
3. Kung J.T., Amason M.P. Electrical conductive characteristics of graphite composite structures // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., Washington, D.C., 1977. – P. 403–408

Стаття надійшла до редакції 30 грудня 1999 року.