МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНОМ КАБЕЛЬНОМ ИЗДЕЛИИ

Иванова Е.В.
Научный руководитель: Стрижак П.А., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: zhenya1@tpu.ru

Процесс производства кабельных изделий очень сложный и многостадийный, что требует больших затрат энергии и ресурсов. Для производства кабельных изделий требуется большое количество материалов, часто дефицитных и дорогостоящих. В процессе изготовления различные элементы конструкции накладываются на «внутри лежащие» элементы при непрерывном движении изделия через узлы кабельного оборудования. Для уменьшения себестоимости изготавливаемой продукции, необходимо минимизировать затрат. В первую очередь, затраты энергии [1, 2].

Оболочка кабеля может состоять из одного и более герметизирующих и армирующих слоёв, в качестве этих слоёв могут применяться различные материалы: ткань, пластмассы, металл, резина и проч. Кабели для передачи электрических сигналов могут быть снабжены экраном из металлической сетки, листового металла (фольги) или полимерной плёнки с тонким металлическим покрытием [3].

Следовательно, при моделировании процесса вулканизации кабельных изделий необходимо учитывать как форму получаемой продукции, так и материал, и химические процессы, происходящие в нем. Следовательно, необходимо установить, влияет ли количество жил на процесс полимеризации.

Область решения рассматриваемой задачи представлена на рис. 1. Кабель состоит из нескольких слоев: 7 скрученных между собой жил и покрытых общей оболочкой. Изделие с начальной температурой T_0 нагревается при существенно более высокой температуре в печи T_v. В результате внешний резиновый слой вулканизуется. Решение задачи осуществлялось в цилиндрической системе координат.

При постановке задачи принималось, что:

- кабель имеет правильную цилиндрическую форму и не ограничен по длине;
- коэффициенты теплопроводности металла (меди) и резины не зависят от температуры;
- энергия активации не изменяется в пределах рассматриваемых температур [4].

Математическая модель теплопроводности для кабельных изделий в процессе вулканизации в цилиндрической системе координат может быть сформулирована в виде системы нестационарных уравнений теплопроводности «печь – воздух – резиновая оболочка – 7 жил» (рис. 1), соответствующая сформулированной постановке задачи, имеет следующий вид.

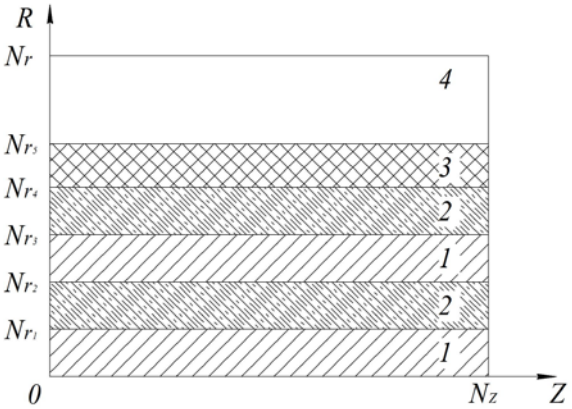

Рис. 1. Область решения задачи: 1) металлическая жила; 2) резиновая оболочка жилы; 3)оболочка кабеля; 4) окружающая среда (нагретый до высоких температур воздух)

Уравнение теплопроводности для жилы кабеля ($0<r<R_1$, $R_2<r<R_3$, $0<z<Z_1$):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Уравнение энергии для изоляционной оболочки кабеля ($R_1<r<R_2$, $R_3<r<R_5$, $0<z<Z_1$):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + q_2 \rho_2 \frac{d\varphi_2}{dt}, \quad (2)$$

где

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = (1-\varphi_2) k_2^0 \exp\left(-\frac{E_2}{R_t T_2} \right). \quad (3)$$

Уравнение Пуассона для воздуха ($R_5<r<R_6$, $0<z<Z_1$):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r\omega. \quad (4)$$

Уравнение завихренности для воздуха ($R_5<r<R_6$, $0<z<Z_1$):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u\frac{\partial \omega}{\partial r} + v\frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{\omega u}{r} = \nu_3 \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{\omega}{r^2} \right) + g\beta \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad (5)$$

Уравнение энергии для воздуха ($R_5<r<R_6$, $0<z<Z_1$):

$$\rho_3 C_3 \left(\frac{\partial T_3}{\partial t} + u\frac{\partial T_3}{\partial r} + v\frac{\partial T_3}{\partial z} \right) = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

С начальными (t=0) условиями:

$T=T_0$ при $0<r<R5$, $0<z<Z1$; (7)

$T=T_v$, $\psi=\omega=0$ при $R5<r<R6$, $0<z<Z1$; (8)

$\varphi=0{,}99$ при $R1<r<R2$, $R3<r<R4$, $0<z<Z1$. (9)

$\varphi=\varphi_0$ при $R4<r<R5$, $0<z<Z1$. (10)

Граничные условия при $0<t<t_p$:

$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, при z=0, z=L, 0<r<R6; (11)

$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{u}{r}$, $\frac{\partial \psi}{\partial r} = -\frac{v}{r}$ при z=0, z=L, R5<r<R6 (12)

$\frac{\partial \omega}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0$ при z=0, z=L, R5<r<R6 (13)

$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$, $\psi = 0$ при z=L, 0<r<R6 (14)

$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ при r=0, r=R6, 0<z<Z1; (15)

$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}$, $T_1 = T_2$ при r=R1, 0<z<Z1; (16)

$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}$, $T_2 = T_3$, $\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{u}{r}$, $\frac{\partial \psi}{\partial r} = -\frac{v}{r}$ при r=R2, 0<z<Z1; (17)

$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}$, $T_1 = T_2$ при r=R3, 0<z<Z1; (18)

$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}$, $T_2 = T_3$, $\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{u}{r}$, $\frac{\partial \psi}{\partial r} = -\frac{v}{r}$ при r=R4, 0<z<Z1; (19)

$T = T_P$, $\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0$, $\omega = 1$, $\psi = 0$ при r=R5, 0<z<Z1; (20)

$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$, $\psi = 0$, $T = T_v$ при r=R6, 0<z<Z1. (21)

Численное моделирование выполнено при следующих значениях параметров [5. 6]: ρ_1=8700 кг/м^3; λ_1=400 Вт/(м·К); C_1=385 Дж/(кг·К); ρ_2=1200 кг/м^3; λ_2=0,16 Вт/(м·К); C_2=1380 Дж/(кг·К); ρ_3=1,161 кг/м^3; λ_3=0,026 Вт/(м·К); C_3=1190 Дж/(кг·К); $\nu_3=1\cdot10^{-5}$ м^2/с; T_0=303 К; T_v=450 К; φ_0=0; $k_0=5\cdot10^5$ с$^{-1}$; $E=5\cdot10^4$ Дж/моль; $q=1\cdot10^3$ Дж; φ_0=0,4; R1=0,002 м; R2=0,004 м; R3=0,006; R4=0,008; R5=0,01 м; Z1=0,1 м.

Температурное поле, вектор скорости и функция тока, полученные при решении поставленной задачи, представлены на рис. 2 – 5.

Полимеризация резиновой оболочки многослойного кабельного изделия продолжается в 1,5 раза дольше, чем однослойного. Следовательно, уменьшать время вулканизации нецелесообразно без прогнозирования минимального времени полимеризации. Также рассматривать все изоляционные слои кабельного изделия как один неверно из-за достаточно большой разницы во времени полимеризации.

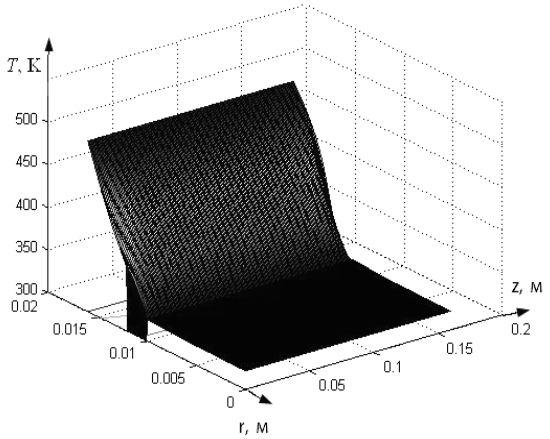

Рис. 2. Температурное поле для многослойного кабеля

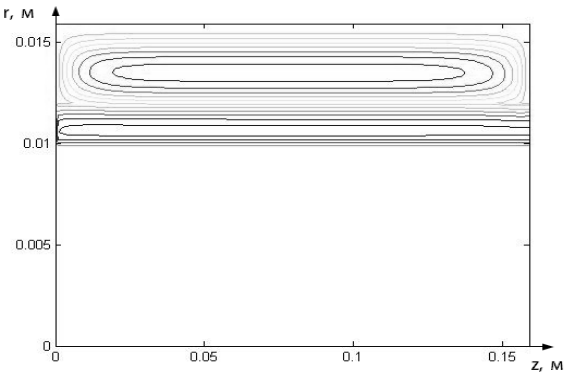

Рис. 3. Распределение функции тока воздуха в вулканизационной камере

Список литературы:

1. Кошелев Ф.Ф., Корнев А.Е., Климов Н.С. Общая технология резины. М.: Химия. 1968. 560 с.
2. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. М.: Химия. 1972. 359 с.
3. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники - М.: Издат. центр «Академия», 2006. - 432 с.
4. Иванова Е.В., Кузнецов Г.В. Об одном подходе к выбору технологических параметров процесса вулканизации при изготовлении кабелей // Современная техника и технологии: Матер. XV Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Томск, 2009. -Т. 4. - С. 274-275.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО «Старс», 2006. 720 с.
6. Тепломассообмен: справочник / Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1978. 479 с.