

УДК 536.2

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

М.М. Григорьева, Г.В. Кузнецов

Томский политехнический университет

E-mail: grigoryeva@tpu.ru

Решена двумерная задача теплопроводности для трехслойного кабеля в зоне с ограниченным теплоотводом. Произведена оценка пожарной опасности режимов перегрузки кабельных линий в условиях ограниченного теплообмена.

Ключевые слова:

Кабельные линии, электрические перегрузки, температурное поле, пожарная опасность, численное моделирование.

Key words:

Cable lines, electrical overload, temperature field, fire danger, numerical modeling.

Введение

Ежегодно в России от электротехнических изделий происходит около 50 тыс. пожаров, что составляет 20...25 % от общего их числа в стране [1].

Традиционно наиболее пожароопасными из года в год (более 60 % от общего числа пожаров от электроустановок) являются кабельные изделия [2], для которых характерно неблагоприятное сочетание наличия горючих материалов с возникновением в аварийных режимах эксплуатации источников зажигания: электрических искр; дуг; контактных соединений и токоведущих жил, нагретых до температур, превышающих допустимые. Пожарная опасность перегрева токоведущих жил заключается в воспламенении изоляции, а также горючих материалов, находящихся в непосредственном контакте с электрическим кабелем.

«Первенство» кабельных изделий по пожарной опасности среди всех электротехнических изделий особенно наглядно подтверждает интегральный показатель — ранг пожарной опасности, который включает три основных статистических показателя: число пожаров, наносимый ущерб и число погибших на пожаре людей [1].

До настоящего времени оценка пожарной опасности кабельных изделий проводилась при допущении, что температура по сечению проводника не изменяется и важным является лишь изменение температуры поверхности кабеля во времени [3]. Решение типичной задачи [3] сведено к решению уравнения теплопроводности с учетом тепловыделения в жиле и термического разложения изоляции кабеля в виде:

$$(\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2) \frac{dT}{dt} = \frac{I^2 \gamma}{S_1} - \alpha F (T - T_0) + q \frac{dm}{dt},$$

где $-\frac{dm}{dt} = m k^0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$. Здесь ρ_1, ρ_2 — плот-

ность материала жилы и оболочки; c_1, c_2 — удельная теплоемкость материала жилы и оболочки; S_1, S_2 — сечение жилы и оболочки; T — температура проводника; t — время; I — сила тока; γ — удельное

электрическое сопротивление жилы; α — коэффициент теплообмена; F — длина окружности изоляции; T_0 — начальная температура; q — теплота газификации материала изоляции; m — масса изоляции для единицы длины проводника; k^0, E — предэкспонента и энергия активации химической реакции термического разложения оболочки; R — универсальная газовая постоянная.

Модель [3] является слишком упрощенной и используется для определения временных характеристик пиролиза и воспламенения изоляции при перегрузке кабельных линий. Недостатком модели [3] является то, что она не учитывает условий, когда теплообмен с окружающей средой затруднен (кабель замурован в стену или помещен в короб). До настоящего времени отсутствуют методики прогнозирования пожарной опасности кабельных линий в условиях ограниченного теплообмена и перегрузки.

1. Постановка задачи

Целью настоящей работы является математическое моделирование температурных полей в кабельных линиях и оценка пожарной опасности режимов их перегрузки в условиях ограниченного теплообмена.

Кабельная промышленность изготавливает кабели и провода в широком ассортименте: одно- и многожильные, с одним слоем изоляции и с несколькими [4].

Для решения поставленной задачи был выбран одножильный кабель с двумя слоями изоляции. Выбор обусловлен тем, что наличие нескольких жил не может значительно повлиять на изменение температуры ввиду высокой теплопроводности металлов, из которых они изготавливаются. Многослойная изоляция может быть представлена одним слоем при решении задачи, т. к. большинство изоляционных материалов имеют близкие по значению теплофизические характеристики.

Решена двумерная задача теплопроводности для одножильного трехслойного электрического кабеля, часть которого находится в воздушной сре-

де, а другая замурована в стену (рис. 1), т. к. возгорание зачастую происходит на границе контакта кабеля с электрооборудованием или на участках с ограниченным теплоотводом [5]. Геометрия области решения задачи приведена на рис. 1.

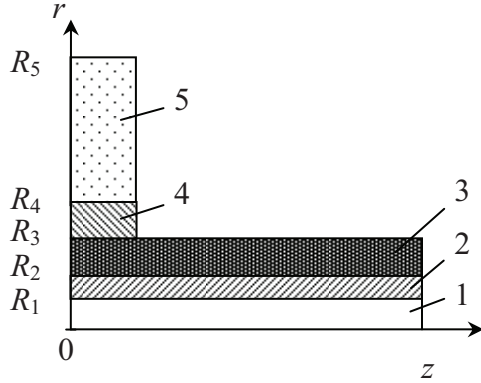


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1) жила; 2) изоляция; 3) оболочка кабеля; 4) кабельная проходка; 5) переборка (стена)

Математическое моделирование исследуемого процесса сведено к решению системы уравнений теплопроводности для системы «токопроводящая жила — изоляция — оболочка — кабельная проходка — стена» с нелинейными граничными условиями.

2. Математическая модель

Температурное поле в каждом слое описывается дифференциальным уравнением теплопроводности. Так как кабели в большинстве случаев представляют собой многослойные цилиндры, система уравнений теплопроводности записывается в цилиндрических координатах.

Учтено тепловыделение в жиле, вызванное электрической перегрузкой. Изменение электрического сопротивления жилы при изменении температуры не учитывалось.

Термическое разложение материала оболочки кабеля и герметика, которым кабель закреплен в стене, описывается уравнением Аррениуса [6]. Разложение полимеров протекает с заметной скоростью только при достижении определенной, характерной для каждого материала, температуре, близкой к температуре воспламенения [3]. В указанном диапазоне температур энергия активации термического разложения остается неизменной. Изменение теплофизических свойств материалов в процессе термического разложения не учитывалось.

Математическая постановка задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + \frac{I^2 \gamma}{S}, \\ 0 < r < R_1, \quad 0 < z < L; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \\ R_1 < r < R_2, \quad 0 < z < L; \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + q_3 \rho_3 \frac{d\varphi_3}{dt}, \\ R_2 < r < R_3, \quad 0 < z < L; \\ -\frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_3 k_3^0 \exp \left(-\frac{E_3}{RT_3} \right); \\ \rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right) + q_4 \rho_4 \frac{d\varphi_4}{dt}, \\ R_3 < r < R_4, \quad 0 < z < L; \\ -\frac{d\varphi_4}{dt} = \varphi_4 k_4^0 \exp \left(-\frac{E_4}{RT_4} \right); \\ \rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right), \\ R_4 < r < R_5, \quad 0 < z < L. \end{array} \right.$$

Здесь ρ_i , λ_i , c_i — плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость материала i -го слоя системы; R_i — радиус i -го слоя системы; S — сечение жилы; Z — толщина стены; L — длина кабеля; T_i — текущее значение температуры; k_i^0 , E_i — предэкспонента и энергия активации химической реакции термического разложения i -го слоя системы; q_i — теплота газификации материала i -го слоя системы; φ_i — текущее значение объемной доли компонента, подверженного термическому разложению.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{array}{l} t = 0: \quad T_i = T_0, \quad \varphi = \varphi_0, \quad 0 \leq r \leq R_5, \quad 0 \leq z \leq L; \\ r = 0: \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad t > 0; \\ z = 0: \quad \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, \quad 0 < r \leq R_5, \quad t > 0; \\ z = L: \quad \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, \quad 0 < r \leq R_5, \quad t > 0. \end{array}$$

Здесь φ_0 — объемная доля компонента, способная термически разложиться; T_0 — начальная температура системы.

На поверхности кабеля и стены происходит теплообмен с окружающей средой, который описывается граничными условиями третьего рода:

$$r = R_3 : -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T^e - T_3), Z < z < L, t > 0;$$

$$r = R_5 : -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} = \alpha(T^e - T_5), 0 < z < Z, t > 0;$$

$$z = Z : \begin{cases} -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = \alpha(T^e - T_4), R_3 < r \leq R_4, t > 0; \\ -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = \alpha(T^e - T_5), R_4 < r \leq R_5, t > 0. \end{cases}$$

Здесь T^e – температура окружающей среды.

Тепловое взаимодействие между слоями рассматриваемой системы описывается граничными условиями четвертого рода:

$$\begin{cases} T_1(t, r, z) = T_2(t, r, z), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad \text{при } r = R_1, \quad 0 < z < L; \\ T_2(t, r, z) = T_3(t, r, z), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad \text{при } r = R_2, \quad 0 < z < L; \\ T_3(t, r, z) = T_4(t, r, z), \\ -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}, \quad \text{при } r = R_3, \quad 0 < z < Z; \\ T_4(t, r, z) = T_5(t, r, z), \\ -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r}, \quad \text{при } r = R_4, \quad 0 < z < Z. \end{cases}$$

Система дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей. Шаг по времени $\tau=10^{-3}$ с, шаг по пространственным координатам $\Delta r=10^{-4}$ м, $\Delta z=10^{-3}$ м. Полученные разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [7].

3. Численные исследования

Проведены численные исследования для кабеля с сечением медной жилы 0,5 мм², фарфоровой изоляцией и оболочкой из фторопласта-4 [3]. Материал стены – сталь. Кабельная проходка, с помощью которой кабель закреплен в перегородке (стене), также выполнена из фторопласта-4. Температурное поле перегородки рассчитывалось для участка, равного четырем радиусам оболочки кабеля, т. к. на большем расстоянии от поверхности кабеля температура перегородки практически не изменяется.

Исследования проводились для токовых нагрузок: а) 10 А – номинальный режим; б) 15 А – перегрузка; в) 20 А – значительная перегрузка.

Теплофизические характеристики слоев рассматриваемой системы [8]:

$\lambda_1=384$ Вт/м·К, $\lambda_2=1$ Вт/м·К, $\lambda_3=0,25$ Вт/м·К, $\lambda_4=0,25$ Вт/м·К, $\lambda_5=46$ Вт/м·К, $\rho_1=8800$ кг/м³, $\rho_2=2300$ кг/м³, $\rho_3=2200$ кг/м³, $\rho_4=2200$ кг/м³, $\rho_5=7800$ кг/м³, $c_1=381$ Дж/кг·К, $c_2=1200$ Дж/кг·К, $c_3=1$ Дж/кг·К, $c_4=1$ Дж/кг·К, $c_5=460$ Дж/кг·К.

Геометрические размеры кабеля и перегородки:

$R_1=0,0004$ м, $R_2=0,0007$ м, $R_3=0,0019$ м, $R_4=0,0025$ м, $R_5=0,01$ м, $Z=0,05$ м, $L=0,25$ м.

Параметры термического разложения фторопласта-4 [3]:

$k^0=3 \cdot 10^{19}$ 1/с, $q=-1,86 \cdot 10^6$ Дж/кг, $\varphi_0=0,4$, $R=8,31$ Дж/моль·К, $E=347$ кДж/моль.

Условия теплообмена с окружающей средой:

$T_0=300$ К, $T^e=300$ К, $\alpha=5$ Вт/м²·К.

Длительность перегрузки: $t=3600$ с.

Согласно [9], для проводов с резиновой изоляцией допускается длительная температура нагрева жил, не превышающая 338 К, а для проводов с пластмассовой изоляцией – 343 К. В аварийных режимах работы (при перегрузке) допустимое значение температуры проводов составляет 363 К.

Установлено, что для типичных значений параметров, характеризующих работу кабельных линий, возможны достижения температур, существенно превышающих указанные выше предельно допустимые значения. Результаты численных исследований в виде полей изотерм приведены на рис. 2, 3.

Согласно [10], допускаемая токовая нагрузка по условиям пожарной безопасности для проводника такого сечения составляет 11 А. При номинальном значении силы тока 10 А температура кабеля остается в допустимых пределах. Максимальное значение температуры составляет 321 К.

На рис. 2 показано температурное поле исследуемой системы при токовой нагрузке 15 А. Допустимое значение температуры длительного нагрева жил (343 К) превышено, однако допустимый температурный предел для аварийных режимов в 363 К не достигнут.

Распределение температуры в рассматриваемой системе при силе тока 20 А приведено на рис. 3. Видно, что все допустимые температурные пределы существенно превышены.

Результаты численного анализа показывают, что максимальный нагрев кабеля наблюдается на некотором расстоянии от перегородки. Это объясняется тем, что участки кабеля находятся в различных условиях теплообмена.

Выводы

1. Решена двумерная задача теплопроводности для трехслойного силового кабеля в условиях ограниченного теплообмена. Предложена математическая модель температурных полей в кабельных линиях в условиях перегрузки и ограниченного теплообмена.

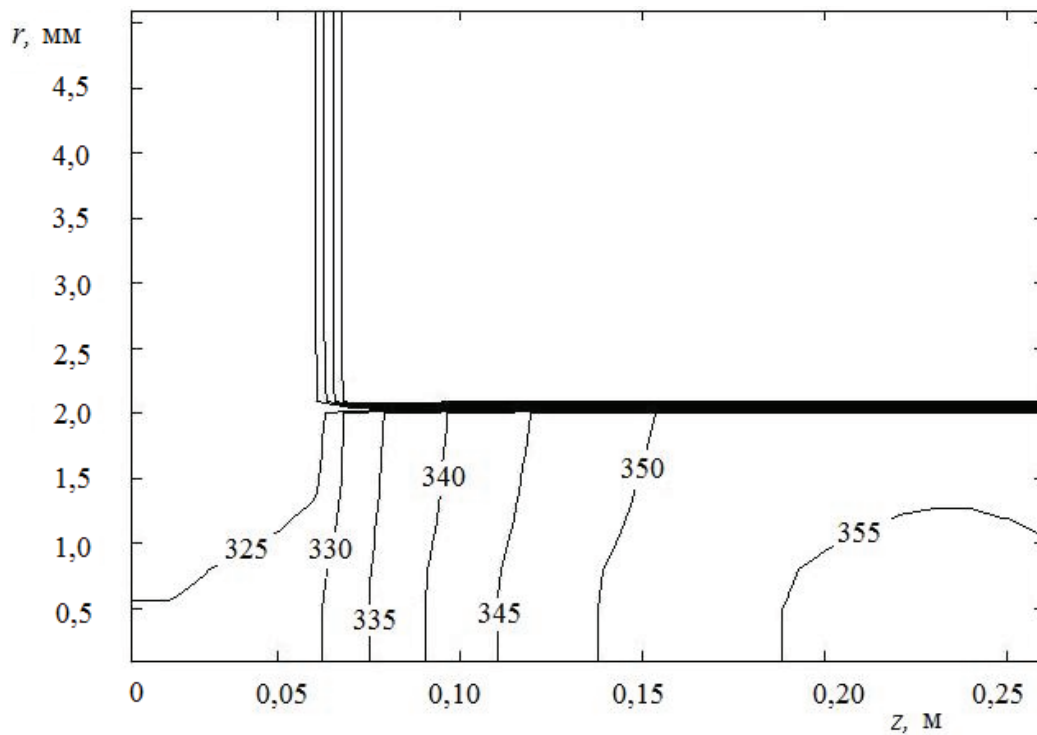


Рис. 2. Распределение температуры в исследуемой системе при токовой нагрузке 15 А

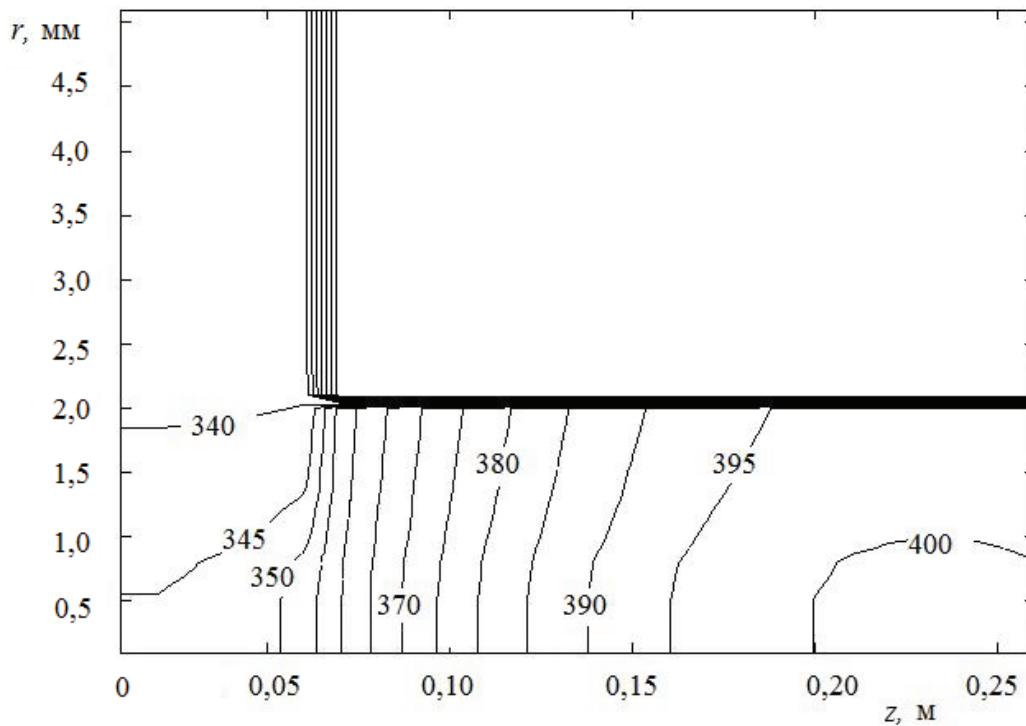


Рис. 3. Распределение температуры в исследуемой системе при токовой нагрузке 20 А

2. Показана возможность прогнозирования достижения условий воспламенения кабельных линий с использованием разработанной математической модели и оценка условий теплообмена кабельных изделий, при которых выполняются условия пожарной безопасности.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П2225).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И. Проблемы обеспечения пожарной безопасности кабельных потоков // Кабели и провода. – 2005. – № 2. – С. 8–14.
2. Определение вероятности пожара от кабелей и проводов электрических сетей / Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. – 40 с.
3. Болодьян И.А., Третьяков В.А. О термической деструкции полимерной изоляции электрического проводника при токовой перегрузке // В кн.: Вопросы горения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах. Сборник трудов ВНИИПО, вып. 1. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1981. – С. 75–80.
4. Каменский М.К., Пешков И.Б. Состояние и перспективы производства электрических кабелей с повышенными показателями пожарной безопасности // Кабели и провода. – 2003. – № 6. – С. 3–8.
5. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. Справочное руководство. – М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит-ры, 1959. – 356 с.
9. Нормы пожарной безопасности. Кабели и провода электрические. Показатели пожарной опасности. Методы испытаний. НПБ 248-97. – М., 1998. – 31 с.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Все действующие разделы ПУЭ-7. 6-й вып., стер., – М.: СUI, 2007. – 512 с.

Поступила 25.03.2010 г.

УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ВУЛКАНИЗАЦИИ ТИПИЧНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Г.В. Кузнецов, Е.В. Иванова

Томский политехнический университет
E-mail: zhenya1@tpu.ru

Проведено математическое моделирование температурных полей кабельных изделий при их вулканизации. Представлены результаты анализа температурных полей кабелей при учете их реальной конфигурации, теплообмена с внешней средой за счет излучения и конвекции, а также эффекта полимеризации.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, вулканизация, кабельные изделия, температурное поле.

Key words:

Mathematical modeling, vulcanization, cable's product, temperature field.

Введение

Наложение изоляции кабелей производится, как правило, методом экструзии за один проход через специальные вулканизационные печи с их полимеризацией в беспаровой среде (сухим методом) при температуре 453...473 К, что обеспечивает отсутствие влаги и газовых включений в изоляционном покрытии [1, 2].

Вулканизация – процесс энергозатратный. Для выбора оптимальных по энергозатратам и качеству изделия технологических параметров необходимо моделирование теплового состояния изделия в процессе его полимеризации [3]. Тепловой режим изделия должен быть таким, чтобы вулканизация завершилась по всей толщине изоляционного слоя. Т. к. все изоляционные материалы обладают низкими коэффициентами теплопроводности, то прогрев до полного завершения вулканизации даже относительно тонких (несколько мм) слоев продолжается достаточно большие промежутки времени (десятки минут). Кроме того интенсивность нагре-

ва должна быть такой, чтобы температура поверхности изоляционного слоя не превышала температуру начала термического разложения материала. Энергетическая эффективность рассматриваемого технологического процесса во многом зависит от точности прогностического моделирования нестационарных температурных полей изоляционных слоев в процессе их вулканизации [4].

Для крупных изделий, нагреваемых в печах в процессе вулканизации, обоснованным является использование при моделировании декартовых координат [5]. Однако при анализе закономерностей процесса изготовления достаточно типичных кабельных изделий, диаметр которых не превышает 20 мм в поперечном сечении, целесообразным представляется использование цилиндрической системы координат для повышения достоверности прогноза. Кроме того, при высоких температурах в камерах вулканизации теплообмен излучением и эффект полимеризации могут играть важную роль в формировании тепловых режимов изделий [6].