

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.: СУИ, 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 (десять 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].

Целью данной работы является численное моделирование температурных полей кабельных изделий в условиях вулканизации при учете основных значимых факторов.

Постановка задачи

В общем случае кабельные изделия представляют собой многослойные цилиндры, у которых число слоев изоляции может достигать пяти [4]. Но т. к. в большинстве практически значимых случаев теплофизические свойства материалов различных изоляционных слоев отличаются очень незначительно, можно рассматривать все слои изоляции как один с эффективными теплофизическими характеристиками. Наличие в «изоляционном пакете» одного или двух слоев, изготовленных из металлов, не может приводить к масштабным изменениям температур из-за их высокой (по сравнению с типичными изоляционными материалами кабельной промышленности) теплопроводностью [7]. При постановке задачи не учитывалось возможное влияние на исследуемые процессы конфигурации свода вулканизационной печи.

Не учитывалась при постановке задачи также и возможная неидеальность контакта между металлом жилы и слоем изоляционного материала. Последний перед вулканизацией представляет собой размягченный полуфабрикат, который вследствие своего состояния достаточно плотно прилегает к поверхности металла.

При реализации технологий вулканизации кабельных изделий они продвигаются через нагреваемое пространство печи в течение времени, необходимого для полного завершения процесса полимеризации. Соответственно интенсивность конвективного теплообмена может несколько отличаться от условий свободной конвекции. Но масштабы этого отличия весьма незначительны, т. к. скорость движения изделия через камеру составляет единицы мм/с. По этим причинам возможный эффект интенсификации конвективного теплообмена не рассматривался. Значение коэффициента теплоотдачи от нагретого газа к поверхности изолятора принималось адекватным условиям свободной конвекции.

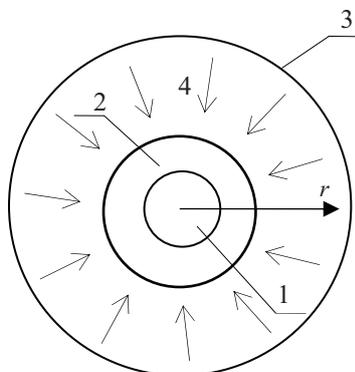


Рис. 1. Область решения задачи: 1) металлическая жила; 2) изоляционный слой; 3) свод печи; 4) окружающая среда (нагретый до высоких температур воздух)

Область решения рассматриваемой задачи представлена на рис. 1. Кабель состоит из двух слоев: внутреннего — меди и наружного — резины. Изделие с начальной температурой T_0 нагревается при существенно более высокой температуре в печи T_B . В результате резиновый слой вулканизуется. Решение задачи осуществлялось в цилиндрической системе координат. Не учитывалась форма свода печи, т. к. диаметр кабельного изделия намного меньше диаметра вулканизационной камеры. Начало координат совпадает с осью симметрии системы «металл — изолятор».

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 [8].

Математическая модель

Математическая модель теплопроводности для кабельных изделий в процессе вулканизации в цилиндрической системе координат может быть сформулирована в виде системы нестационарных уравнений теплопроводности для внутреннего цилиндра (металл) и внешнего (изоляция):

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + Q_{II} w_{II}, \quad (2)$$

где $w_{II} = \rho_2 \frac{d\varphi}{dt}$; $\frac{d\varphi}{dt} = (1 - \varphi) k_0 \exp(-E/RT)$.

Начальные условия ($t = 0$):

$$T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = T_0;$$

$$\varphi_0 = 0.$$

Граничные условия:

$$r = 0; \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0;$$

$$r = r_1; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2;$$

$$r = r_2; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha (T_B - T_2) + \sigma \varepsilon_{np} (T_B^4 - T_2^4).$$

Обозначения: c_1, c_2 — теплоемкость, соответственно, медной жилы и резиновой оболочки, Дж/(кг·К); t — время, с; r — радиус изделия, мм; r_1, r_2 — радиусы жилы и оболочки, мм; ρ_1, ρ_2 — плотность жилы и оболочки, кг/м³; T_1, T_2 — температуры жилы и оболочки соответственно, К; λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности жилы и оболочки, Вт/(м·К); α — коэффициент теплообмена с окружающей средой, Вт/(м²·К); σ — постоянная Боль-

цмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты; $Q_{\text{п}}$ – теплота химической реакции полимеризации, $\text{Дж}/\text{кг}$; $w_{\text{п}}$ – скорость полимеризации, $1/\text{с}$; φ – степень полимеризации; k_0 – предэкспонент химической реакции; E – энергия активации химической реакции, $\text{Дж}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Система нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности для двухслойного цилиндра «медь – резина» (1, 2) с нелинейными граничными условиями на поверхности раздела сред решена методом конечных разностей [9]. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений решены методом итераций с применением неявной четырехточечной разностной схемы [10].

Результаты и обсуждение

Численные исследования проведены с целью анализа масштабов влияния трех значимых факторов: формы изделия, излучения и эффекта полимеризации. При моделировании шаг по времени составлял 10^{-5} с, шаг по пространственной координате – $5 \cdot 10^{-6}$ м. На рис. 2 приведены типичные распределения температуры по радиусу цилиндра для основных рассмотренных вариантов.

При проведении численных расчетов использовались следующие значения параметров: $T_0=303 \text{ К}$; $\rho_1=1200 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda_1=0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $c_1=1380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_2=8700 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda_2=400 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $c_2=385 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{\text{в}}=500 \text{ К}$; $\alpha=1 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $E=6600 \text{ Дж}/\text{моль}$; $k_0=500000$; $\varepsilon_{\text{пр}}=0,5$; $t=1200 \text{ с}$.

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей позволяет говорить о влиянии рассматриваемых факторов на температурные поля изделия.

Видно значительное отличие распределений температуры по радиусу кабеля в декартовых и цилиндрических координатах (разница в 10 К). Теплообмен излучением увеличивает температуру изделия еще почти на 10 К. В то же время тепло, выделяемое в процессе полимеризации, не влияет на температурное поле изоляции кабеля.

Исходя из рис. 3, можно сделать вывод, что процесс полимеризации при учете теплообмена излучением заканчивается на 5 мин раньше, чем в цилиндрической системе координат в условиях конвективного теплообмена.

Полученные результаты показывают, что при моделировании процесса вулканизации типичных кабельных изделий необходимо учитывать реальную конфигурацию и теплообмен излучением изделий кабельной промышленности. Учет реальной конфигурации изделия и теплообмена излучением приводит к достаточно масштабному (на 10...22 К) росту температур изоляционного материала. Такое значительное изменение температуры нельзя не учитывать при разработке технологий вулканизации, потому что скорости вулканизационных процессов экспоненциально зависят от температуры. Соответственно пренебрежение фактором формы и теплообмена излучением должно приводить к значимому повышению энергозатрат на реализацию рассматриваемого технологического процесса. Интенсивность этого процесса может быть не очень высокой, но важно то, что он будет протекать в приповерхностном слое изолятора и приводить к дефектам поверхности (трещинам, вздутиям), которые в дальнейшем повлекут за собой негативные последствия при эксплуатации изделия.

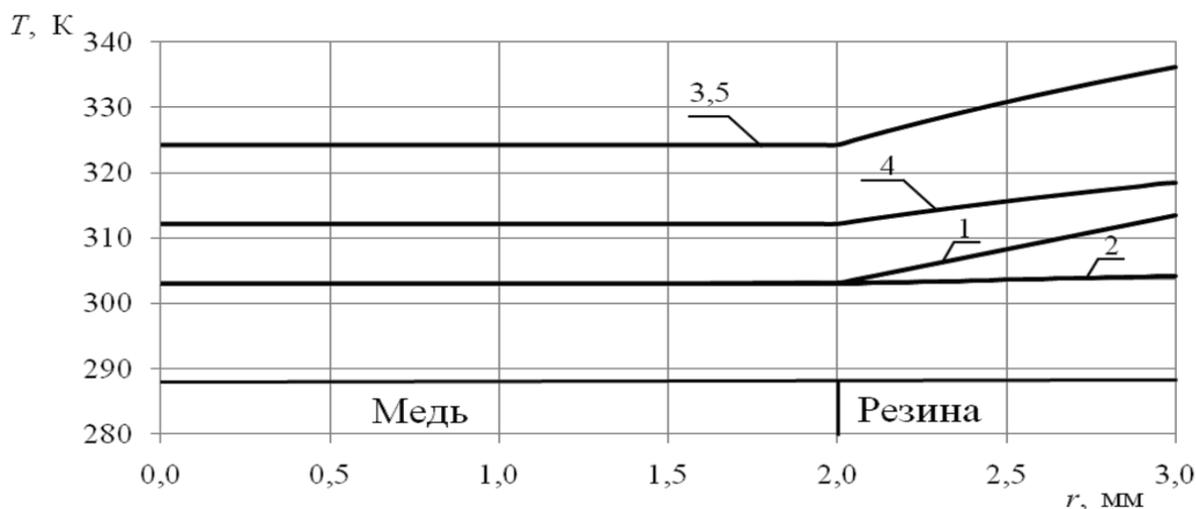


Рис. 2. Распределение температуры в момент времени $t=100 \text{ с}$: 1, 2) в декартовой системе координат для бесконечной пластины (с учетом и без излучения); 3, 4, 5) в цилиндрической системе координат (с учетом и без учета излучения, с учетом эффекта полимеризации)

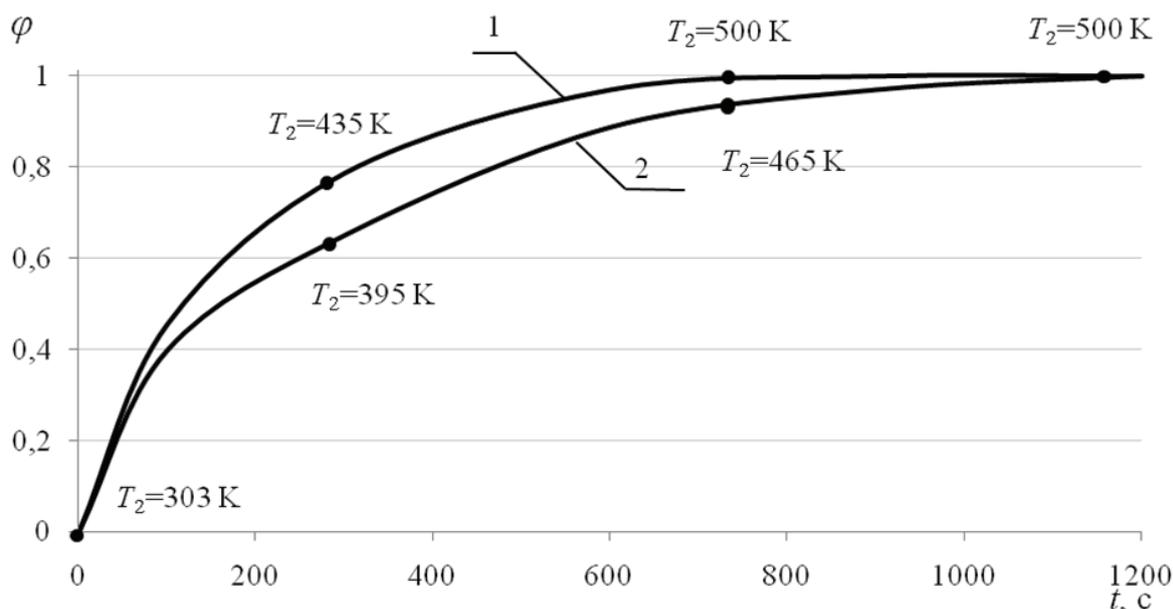


Рис. 3. Степень полимеризации: 1) с учетом теплообмена излучением; 2) в цилиндрической системе координат без учета излучения

Заключение

1. Проведено математическое моделирование температурных полей кабельных изделий при их вулканизации.
2. Решена задача теплопроводности процесса вулканизации кабельного изделия, имеющего форму двухслойного цилиндра, в условиях сложного теплообмена с учетом эффекта полимеризации.
3. Показано, что в процессе вулканизации кабельных изделий необходимо учитывать их реаль-

ную конфигурацию, теплообмен с внешней средой за счет излучения и конвекции, а также изменение степени полимеризации. Тепловой эффект процесса полимеризации на температуру кабельного изделия не влияет.

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

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. Шеин В.С., Шутилин Ю.Ф., Гриб А.П. Основные процессы резинового производства. — Л.: Химия, 1988. — 159 с.
4. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники — М.: Издат. центр «Академия», 2006. — 432 с.
5. Аваев А.А., Осипов Ю.Р., Павлов В.В. Математическая модель нагрева двухслойной пластины в системе металл-эластомер в процессе термической вулканизации эластомера // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2008. — № 7. — С. 3–4.
6. Пешков И.Б. Основы кабельной техники. — М.: Академия, 2006. — 432 с.
7. Гузий В.Г., Борисова А.Ф., Бондаренко Т.В., Олексюк В.И., Юсуфов М.А. Модель нестационарной теплопроводности отверждаемых оболочек из полимерных материалов // Механика композитных материалов. — 1988. — Вып. 2. — С. 272–278.
8. 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 — г. Томск, 4–8 мая 2009 г. — Томск, 2009. — Т. 4. — С. 274–275.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.

Поступила 07.04.2010 г.