

На правах рукописи



**Григорьева Муза Михайловна**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАБЕЛЬНЫХ  
ИЗДЕЛИЯХ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ**

05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация теплоэнергетических процессов»  
Энергетического института Государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Национального исследовательского Томского политехнического университета»

**Научные руководители:** доктор физико-математических наук,  
профессор Кузнецов Гений Владимирович  
  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Стрижак Павел Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Анненков Юрий Михайлович  
  
доктор технических наук,  
Богомолов Александр Романович

**Ведущая организация:** Сибирский федеральный университет

Защита состоится «24» декабря 2010 г. в 10-00 ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете».

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО НИ ТПУ.

Автореферат разослан «22» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.10  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник



А.В. Кабышев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Обеспечение надежности, работоспособности и безопасной эксплуатации электропроводок и кабельных линий в условиях электрической перегрузки традиционно является наиболее острой и актуальной проблемой. Ежегодно в России происходит около 50000 пожаров, источниками которых являются электротехнические изделия, что составляет около четверти от общего числа пожаров в стране. Электрические кабели и провода занимают первое место в ранге пожарной опасности среди электротехнических изделий по основным критериям оценки (количество возгораний, размер материального ущерба, число погибших).

Различные аспекты проблемы обеспечения работоспособности кабельных коммуникаций при электрической перегрузке достаточно активно изучаются, потому что, как показывает практика, полностью исключить такие режимы не удастся даже при использовании специальных устройств контроля и автоматического регулирования. Так, например, большое внимание уделяется созданию новейших термостойких материалов, применяемых в кабельной промышленности, и изучению их свойств. Достаточно хорошо исследованы процессы термического разложения и горения полимерных материалов, а также методы снижения их горючести. Однако известно, что снижение горючести материала зачастую сопровождается ухудшением его физико-механических, диэлектрических и других эксплуатационных и технологических свойств. Это значительно сужает область применения кабелей с оболочкой из пожаростойких материалов.

При электрической перегрузке происходит перегрев токоведущих частей кабельного изделия, термическая деструкция и воспламенение материалов оболочки, в результате чего кабель выходит из строя. Поэтому прогнозирование работоспособности кабельных коммуникаций невозможно без анализа температурных полей.

Теоретические исследования в данной области в основном ограничиваются предложением слишком упрощенных эмпирических выражений и одномерных математических моделей для расчета температуры кабеля при электрической перегрузке [1, 2, 3], не учитывающих в полной мере всех значимых факторов.

- 
1. Мисюкевич Н.С. Теоретические и экспериментальные исследования времятоковых характеристик электрических проводов // Материалы девятнадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности» – СБ-2010. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – С. 234–237.
  2. Болодьян И.А., Третьяков В.А. О термической деструкции полимерной изоляции электрического проводника при токовой перегрузке // Вопросы горения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах. Сборник трудов ВНИИПО, вып. 1. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1981. – С. 75–80.
  3. Keski-Rahkonen O., Mangs J., Turtola A. Ignition of and fire spread on cables and electronic components. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 387. Espoo, 1999. – 112 p.

В частности, не учитывается: влияние на процессы тепломассопереноса условий теплообмена, которые имеют место при использовании специальных устройств для монтажа кабельных коммуникаций или при пересечении кабельной линией строительных конструкций, стенок, переборок; экзотермическое окисление продуктов термического разложения в окружающем кабель воздухе, оказывающее значительное влияние на температуру оболочки кабеля. Такие подходы позволяют лишь приблизительно оценить работоспособность кабельных изделий при электрической перегрузке на основании анализа температурного поля проводника и сравнения его максимальных значений с длительно допустимыми.

Для обеспечения работоспособности кабельных изделий в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена с окружающей средой необходимо более полное и глубокое изучение комплекса протекающих при этом физико-химических процессов (распределения тепловых полей, термического разложения, воспламенения и горения электроизоляционных материалов). Создание методов прогноза термической деструкции и воспламенения кабельных изделий позволит продлить их срок службы и сократить количество возгораний, что свидетельствует об актуальности диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы** – оценка работоспособности кабельных изделий при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене с окружающей средой посредством математического моделирования комплекса протекающих при этом физико-химических процессов с учетом тепловыделения в жиле, двумерного тепло- и массопереноса, термического разложения оболочки кабеля, диффузии продуктов разложения в среде окислителя и воспламенения горючей смеси.

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые применен новый подход к анализу работоспособности кабельных изделий в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена с окружающей средой. Подход отличается от известных использованием модели, учитывающей тепловыделение в жиле, двумерный тепло- и массоперенос, термическое разложение оболочки кабеля, диффузию продуктов термического разложения в среде окислителя и воспламенение горючей смеси. Задача не имеет аналогов по постановке и полученным результатам.

2. Показано, что перегородка, пересекаемая кабельной линией, создает градиент температуры по длине кабеля при электрической перегрузке.

3. Установлено, что воспламенение происходит в воздушной области, на расстоянии нескольких миллиметров от перегородки и поверхности кабеля, так как в этой области достигается максимум температуры и концентрации продуктов термического разложения оболочки кабеля.

**Практическая значимость работы.** Представленные математические модели, алгоритм и метод численного решения задач диссертации могут быть использованы для оценки работоспособности кабельных изделий в условиях

электрической перегрузки и ограниченного теплообмена с окружающей средой. Возможна оценка работоспособности кабельных изделий относительно термического разложения материала оболочки и воспламенения при их тепловом старении, исходя из условий теплообмена и токовых нагрузок.

Даны рекомендации по обеспечению работоспособности и снижению пожарной опасности кабельных коммуникаций при электрической перегрузке.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается проверками на последовательностях сгущающихся сеток, результатами оценки аппроксимационной сходимости применяемой разностной схемы, сравнения с известными результатами других авторов и имеющимися экспериментальными данными, тестированием на большой группе примеров менее сложных задач. В частности, максимальное отклонение результатов решения тестовых задач от результатов других авторов не превышает  $\pm 0,11\%$ , отклонение результатов расчета от экспериментальных данных сопоставимо с погрешностями средств измерений.

#### **Защищаемые положения.**

1. Новый подход к анализу работоспособности кабельных изделий в условиях электрической перегрузки, отличающийся от известных использованием математической модели, учитывающей тепловыделение в жиле, двумерный тепло- и массоперенос, термическое разложение оболочки кабеля, диффузию и окисление продуктов разложения в воздухе и воспламенение горючей смеси.

2. Наличие перегородки не снижает работоспособности кабельной линии, так как условия термической деструкции достигаются на участках кабеля, окруженных воздухом.

3. Использование двумерной нестационарной модели тепломассопереноса в кабельной линии обеспечивает получение более достоверных результатов по температурным полям и работоспособности изделия по сравнению с известными моделями, так как перегородка, пересекаемая кабельной линией, создает градиент температуры по длине кабеля при электрической перегрузке.

**Личный вклад автора** состоит в участии в постановке задачи, выборе методов и разработке алгоритма и программы для её решения, проведении численного анализа исследованных процессов, обработке и обобщении результатов теоретических исследований, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке основных выводов и заключения по диссертации.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. VII Международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», г. Санкт-Петербург, 2009 г.;

2. XVI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, г. Алушта, 2009 г.;

3. Региональная научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2009 г.;

4. VI Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике, г. Красноярск, 2009 г.;

5. XVI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии», г. Томск, 2010 г.;

6. VIII Международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», г. Санкт-Петербург, 2010 г.;

7. Всероссийская научно-практическая конференция «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2010 г.;

8. V Российская конференция по теплообмену, г. Москва, 2010 г.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 2 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований: «Известия Томского политехнического университета», «Пожаровзрывобезопасность».

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 16 таблиц, библиография включает 97 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен аналитический обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов (распределения тепловых полей, термического разложения, воспламенения и горения электроизоляционных материалов), протекающих в кабельных изделиях при электрической перегрузке. Проведен анализ известных математических моделей указанных процессов. Обоснована необходимость разработки нового подхода к оценке работоспособности кабельных изделий при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене с окружающей средой, которые имеют место при монтаже кабельных коммуникаций в специальных коробах и кабель-каналах, с учетом всего комплекса протекающих при этом физико-химических процессов.

**Во второй главе** представлена математическая и физическая модель нагрева и термического разложения материалов оболочки кабельного изделия в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена с окружающей средой. Приведено описание используемых численных методов и алгоритма

решения задачи. Для оценки достоверности полученных результатов при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс, приведен алгоритм проверки консервативности разностной схемы.

### Физическая постановка задачи

Монтаж кабельных коммуникаций, как правило, проходит в условиях пересечения кабельной линией стен строительных конструкций или внутренних перегородок транспортных средств с использованием кабельных проходок. Поэтому задача решена для системы «кабель – стена – воздух». При постановке задачи принималось, что кабель проходит из одного помещения в другое, часть его замурована в стену (перегородку) с использованием заделочного материала (герметика). Геометрия области решения задачи приведена на рис. 1.

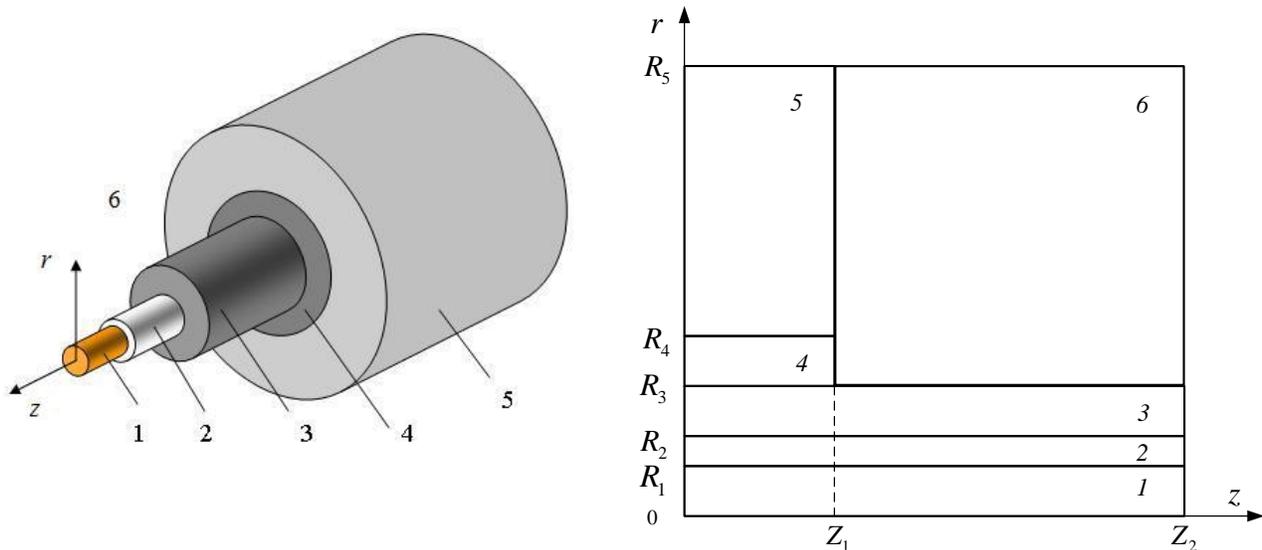


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – токопроводящая жила, 2 – изоляция, 3 – оболочка, 4 – герметик, 5 – перегородка (стена), 6 – смесь продуктов термического разложения оболочки и герметика с воздухом,  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$  – радиусы соответствующих слоев системы,  $Z_1, Z_2$  – полутолщина стенки и полудлина кабеля

Рассматривалась следующая схема процесса. Принималось, что в начальный момент времени на кабельное изделие скачкообразно подается напряжение. Под воздействием тока перегрузки происходит разогрев токопроводящей жилы, изоляции, оболочки кабеля, герметика кабельной проходки и перегородки. При достижении определенной температуры, характерной для каждого материала, начинаются химические реакции термического разложения и газификации материала оболочки кабеля и герметика кабельной проходки. Образующиеся при этом продукты термического разложения нагреваются и смешиваются с воздухом, происходит термическое окисление. При достижении критических значений концентрации продуктов термического разложения в воздухе и температуры газовой смеси происходит воспламенение. Время с момента начала воздействия на кабельное изделие токовой нагрузки до воспламенения газовой смеси считается временем задержки воспламенения.

Численный анализ комплекса исследуемых процессов выполнен при следующих допущениях:

1. Величина силы тока остается постоянной во времени.
2. Контакт между слоями рассматриваемой системы идеален.
3. Изоляционный материал кабельной линии является более термостойким, чем оболочка и в рассматриваемом диапазоне температур не подвергается термическому разложению.
4. Кабельная линия находится в специальном кабельном сооружении (коробе или тоннеле), где скорость движения окружающего воздуха незначительна, поэтому принимается, что перенос продуктов термического разложения материалов оболочки кабеля и герметика кабельной проходки в окружающем воздухе происходит только за счет диффузии. Конвекция горючей смеси в среде окислителя не учитывается.
5. В результате химической реакции термического разложения образуется одно горючее вещество с известными характеристиками.
6. Теплофизические характеристики материалов исследуемой системы (рис. 1) не зависят от температуры.

Приняты следующие условия воспламенения:

1. Температура газовой смеси больше температуры жилы.
2. Тепло, выделяющееся в результате химической реакции окисления горючей компоненты кислородом воздуха, больше тепла, выделяемого в жиле в условиях электрической перегрузки.

#### Математическая постановка задачи

Система нестационарных дифференциальных уравнений, соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид.

Уравнение энергии для жилы ( $0 < r < R_1$ ,  $0 < z < Z_2$ ) с учетом тепловыделения, вызванного электрической перегрузкой:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + Q_1, \quad (1)$$

Здесь  $Q_1 = \frac{I^2 \cdot \gamma}{S}$  - тепловыделение в жиле,  $\gamma = \frac{\gamma_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)] \cdot Z_2}{F}$ .

Уравнение теплопроводности для изоляции ( $R_1 < r < R_2$ ,  $0 < z < Z_2$ ):

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Уравнение энергии для оболочки кабеля с учетом термического разложения материала ( $R_2 < r < R_3$ ,  $0 < z < Z_2$ ):

$$\rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + Q_3 \cdot W_3, \quad (3)$$

где  $W_3 = \varphi_3 \cdot \rho_3 \cdot k_3^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_3}{R_i \cdot T_3}\right)$  - скорость реакции термического разложения материала оболочки кабеля.

Уравнение энергии для кабельной проходки ( $R_3 < r < R_4$ ,  $0 < z < Z_1$ ):

$$\rho_4 \cdot c_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right) + Q_4 \cdot W_4, \quad (4)$$

где  $W_4 = \varphi_4 \cdot \rho_4 \cdot k_4^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_4}{R_i \cdot T_4}\right)$  - скорость реакции термического разложения материала герметика кабельной проходки.

Уравнение теплопроводности для перегородки ( $R_4 < r < R_5$ ,  $0 < z < Z_1$ ):

$$\rho_5 \cdot c_5 \cdot \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

Уравнение энергии для смеси окислителя с компонентами термического разложения ( $R_3 < r < R_5$ ,  $Z_1 < z < Z_2$ ):

$$\rho_6 \cdot c_6 \cdot \frac{\partial T_6}{\partial t} = \lambda_6 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_6}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_6}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} \right) + Q_6 \cdot W_6. \quad (6)$$

Уравнение диффузии компонентов термического разложения в среде окислителя ( $R_3 < r < R_5$ ,  $Z_1 < z < Z_2$ ):

$$\rho_6 \cdot \frac{\partial C_r}{\partial t} = \rho_6 \cdot D_6 \cdot \left( \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_r}{\partial z^2} \right) - W_6. \quad (7)$$

Массовая скорость химической реакции окисления определяется из выражения:

$$W_6 = \rho_6 \cdot C_o \cdot C_r \cdot k_6^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_6}{R_i \cdot T_6}\right).$$

Уравнение баланса смеси окислителя с компонентами термического разложения ( $R_3 < r < R_5$ ,  $Z_1 < z < Z_2$ ):

$$C_r + C_o = 1. \quad (8)$$

В системе уравнений приняты следующие обозначения:  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $S$  – площадь сечения жилы, м<sup>2</sup>;  $I$  – сила тока, А;  $\gamma$  – электрическое сопротивление, Ом;  $\gamma_0$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $F$  – площадь сечения жилы, мм<sup>2</sup>;  $T$  – текущее значение температуры, К;  $T_0$  – начальная температура, К;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления меди, К<sup>-1</sup>;  $t$  – время, с;  $k_3^0$ ,  $k_4^0$ ,  $k_6^0$  – предэкспоненциальные множители, с<sup>-1</sup>;  $E_3$ ,  $E_4$  – энергии активации химической реакции термического разложения, кДж/моль;  $Q_3$ ,  $Q_4$  – теплота газификации, МДж/кг;  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$  – текущие значения объемных долей

компонентов, подверженных термическому разложению;  $W_3, W_4$  – массовая скорость химической реакции термического разложения, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $Q_6$  – тепловой эффект химической реакции окисления, МДж/кг;  $W_6$  – массовая скорость химической реакции окисления, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $E_6$  – энергия активации химической реакции окисления, кДж/моль;  $D_6$  – коэффициент диффузии компонентов термического разложения в воздухе, м<sup>2</sup>/с;  $R_t$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $C_r$  – массовая концентрация компонентов термического разложения ( $0 < C_r < 1$ ),  $C_o$  – массовая концентрация окислителя;  $r, z$  – координаты цилиндрической системы координат; индексы «1», «2», «3», «4», «5», «6» соответствуют жиле, изоляции, оболочке, герметику, стенке и смеси воздуха с продуктами термического разложения.

Начальные условия для системы уравнений (1) – (8):

$$T = T_0, \quad 0 \leq r \leq R_5, \quad 0 \leq z \leq Z_2;$$

$$\varphi = \varphi_0, \quad R_2 \leq r \leq R_3, \quad 0 \leq z \leq Z_2; \quad R_3 \leq r \leq R_4, \quad 0 \leq z \leq Z_1;$$

$$C_r = 0, \quad R_3 \leq r \leq R_5, \quad Z_1 \leq z \leq Z_2.$$

Граничные условия:

1. На оси симметрии и внешних границах области решения приняты условия равенства нулю градиентов соответствующих функций:

$$z = 0, \quad 0 < r < R_5; \quad z = Z_2, \quad 0 < r < R_5: \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

$$z = Z_2, \quad R_3 < r < R_5: \quad \frac{\partial C_r}{\partial z} = 0;$$

$$r = 0, \quad 0 < z < Z_2; \quad r = R_5, \quad 0 < z < Z_2: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R_5, \quad Z_1 < z < Z_2: \quad \frac{\partial C_r}{\partial r} = 0.$$

2. Тепловое взаимодействие между слоями рассматриваемой системы описывается условиями четвертого рода:

$$r = R_1, \quad 0 < z < Z_2: \quad T_1 = T_2, \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r};$$

$$r = R_2, \quad 0 < z < Z_2: \quad T_2 = T_3, \quad \frac{\partial T_2}{\partial r} = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r};$$

$$r = R_3, \quad 0 < z < Z_1: \quad T_3 = T_4, \quad \frac{\partial T_3}{\partial r} = \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial r};$$

$$r = R_4, \quad 0 < z < Z_1: \quad T_4 = T_5, \quad \frac{\partial T_4}{\partial r} = \frac{\lambda_5}{\lambda_4} \cdot \frac{\partial T_5}{\partial r}.$$

3. Условия на границе «стена – воздух»:

$$z = Z_1, \quad R_4 < r < R_5: \quad T_5 = T_6, \quad \frac{\partial T_5}{\partial z} = \frac{\lambda_6}{\lambda_5} \frac{\partial T_6}{\partial z}, \quad -\frac{\partial C_r}{\partial z} = 0.$$

4. Так как термическое разложение происходит не только на границе «материал – воздух», а по всей толщине разлагающихся слоев, то на поверхности кабеля и герметика в зоне контакта с окислителем записываются условия:

$$r = R_3, \quad Z_1 < z < Z_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} T_3 = T_6, \\ -\rho_6 \cdot D_6 \cdot \frac{\partial C_r}{\partial r} = \int_{R=R_2}^{r=R_3} \rho_3 \cdot \varphi_3 \cdot k_3^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_3}{R_i \cdot T_3}\right) dr, \\ \frac{\partial T_3}{\partial r} = \frac{\lambda_6}{\lambda_3} \cdot \frac{\partial T_6}{\partial r}; \end{array} \right.$$

$$Z = \frac{Z_1}{Z_2}, \quad R_3 < r < R_4 \quad \left\{ \begin{array}{l} T_4 = T_6, \\ -\rho_6 \cdot D_6 \cdot \frac{\partial C_r}{\partial z} = \int_{z=0}^{z=Z_1} \rho_4 \cdot \varphi_4 \cdot k_4^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_4}{R_i \cdot T_4}\right) dz, \\ \frac{\partial T_4}{\partial r} = \frac{\lambda_6}{\lambda_4} \cdot \frac{\partial T_6}{\partial r}. \end{array} \right.$$

Уравнения (1) – (8) впервые используются для расчета температурных полей кабельного изделия. Учет вышеперечисленных физико-химических процессов, протекающих при электрической перегрузке, значительно усложняет математическую постановку и решение задачи, так как типовые дифференциальные уравнения теплопроводности становятся нелинейными.

Для решения системы уравнений (1) – (8) использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально одномерным методом. Для решения нелинейных одномерных уравнений применен метод итераций. Система одномерных разностных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы.

Рассчитывались температурные поля исследуемой системы, скорость вдува продуктов разложения в воздушную среду, объемная доля разложившегося вещества, концентрация продуктов разложения в воздухе, время задержки воспламенения.

**Третья глава** посвящена численному решению тестовых задач для верификации используемого алгоритма и выбранных численных методов решения основной задачи. Представлены результаты решения одномерных и двумерных нестационарных, нелинейных задач теплопроводности с учетом внутренних источников тепловыделения, химических реакций в материале,

фазовых переходов при испарении материала на границе. Решение тестовых задач показало удовлетворительное соответствие полученных теоретических следствий результатам других авторов. В частности, максимальное отклонение результатов решения тестовых задач от результатов других авторов не превышает  $\pm 0,11\%$  [4].

**В четвертой главе** приведены результаты численного моделирования процессов нагрева и термического разложения материалов оболочки кабельных изделий, работающих в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена с окружающей средой. Выполнен анализ зависимостей времени задержки воспламенения от геометрических размеров и теплофизических характеристик материалов кабеля и перегородки, длительности и интенсивности электрической перегрузки. Даны рекомендации по выбору режимов работы и условий теплообмена кабельных изделий.

При постановке комплекса задач предпринята попытка создания нескольких моделей разной степени сложности для многовариантного прогноза работоспособности кабельных изделий. Решены три задачи: в одномерной постановке для двухслойного провода, находящегося на открытом воздухе; в двумерной постановке для трехслойного кабеля, проходящего через перегородку, без учета процессов, протекающих в воздухе, окружающем кабель, и сопряженная задача в двумерной постановке.

В рамках решения одномерной задачи (рис. 2) численные исследования проведены для провода марки ФД-100, который в 70-х годах получил массовое применение в спецтехнике, особенно в ракетно-космической, и являлся в течение нескольких десятилетий основой бортовой кабельной сети всех космических аппаратов. Жила провода сечением  $0,35 \text{ мм}^2$  выполнена из меди, а оболочка – из фторопласта-4.

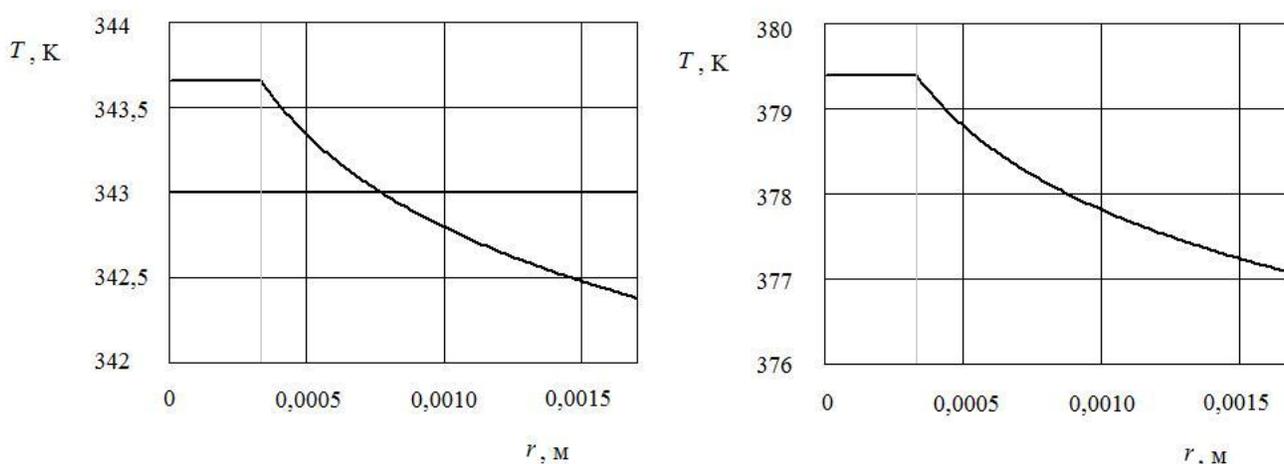


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу кабеля при силе тока 12 и 16 А  
 — граница между жилой и оболочкой

В рамках решения двумерной задачи (рис. 3) принималось, что кабель имеет дополнительный слой изоляции из композиционного материала и закреплен в металлической перегородке с помощью того же материала, что и его оболочка.

Анализ результатов проведенных численных исследований показал, что при длительной электрической перегрузке, допускаемой защитными устройствами (автоматическими выключателями, предохранителями), возможны достижения значений температур, превышающих длительно допустимые. Так, для проводов с резиновой изоляцией допускается длительная температура нагрева жил, не превышающая 338 К, а для проводов с пластмассовой изоляцией – 343 К. При электрической перегрузке допустимое значение температуры проводов составляет 363 К.

Математические модели температурного поля кабельного изделия в одномерной и двумерной постановке являются упрощенными и могут использоваться лишь для приближенного расчета его температурного поля. Оценка работоспособности кабельного изделия при электрической перегрузке в рамках предложенных моделей может быть проведена только на основании сравнения максимальной температуры жилы проводника с длительно допустимой. Однако такой подход не позволяет с достаточной точностью определить температуру оболочки проводника, так как не моделируется экзотермическое окисление продуктов разложения кислородом воздуха.

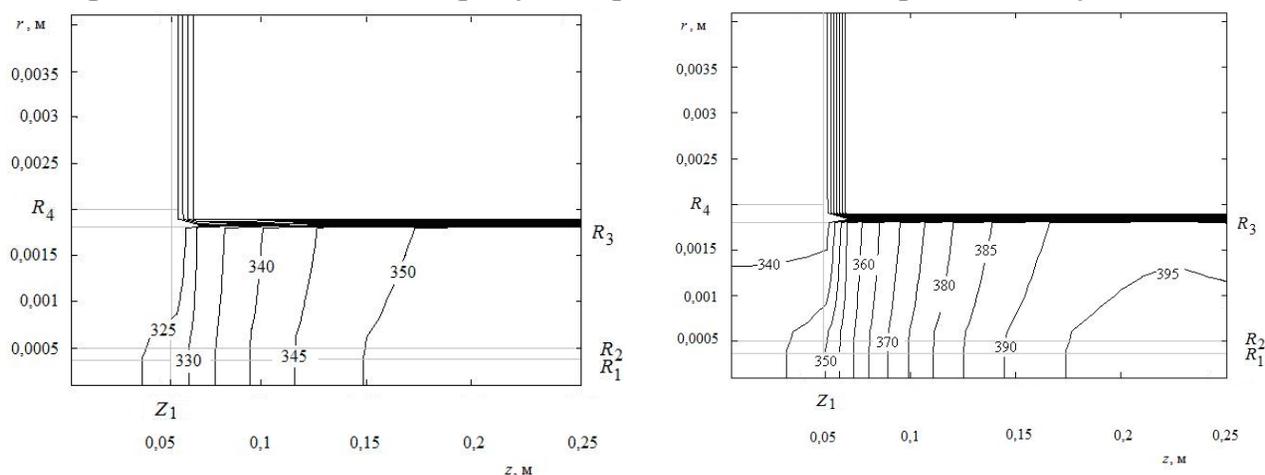


Рис. 3. Распределение температуры в системе «жила-изоляция-оболочка-кабельная проходка-стена» при токовых нагрузках 12 и 16 А

Задача численных исследований в рамках двумерной математической модели, учитывающей процессы, происходящие в окружающем кабель воздухе, состояла в определении возможности воспламенения смеси продуктов термического разложения оболочки и герметика. На рис. 4 приведены результаты численного моделирования для типичного кабельного изделия с медной жилой сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ , изоляцией из композиционного материала и оболочкой из поливинилхлоридного пластика при токовой нагрузке 10 А.

Для типичного кабельного изделия и условий его теплообмена пороговой является токовая нагрузка 25 А. Температура смеси продуктов термического разложения с воздухом через 10 ч. воздействия на кабельную линию указанной нагрузки достигает условий воспламенения, но концентрация горючей компоненты в воздухе при этом все же недостаточна для реализации воспламенения.

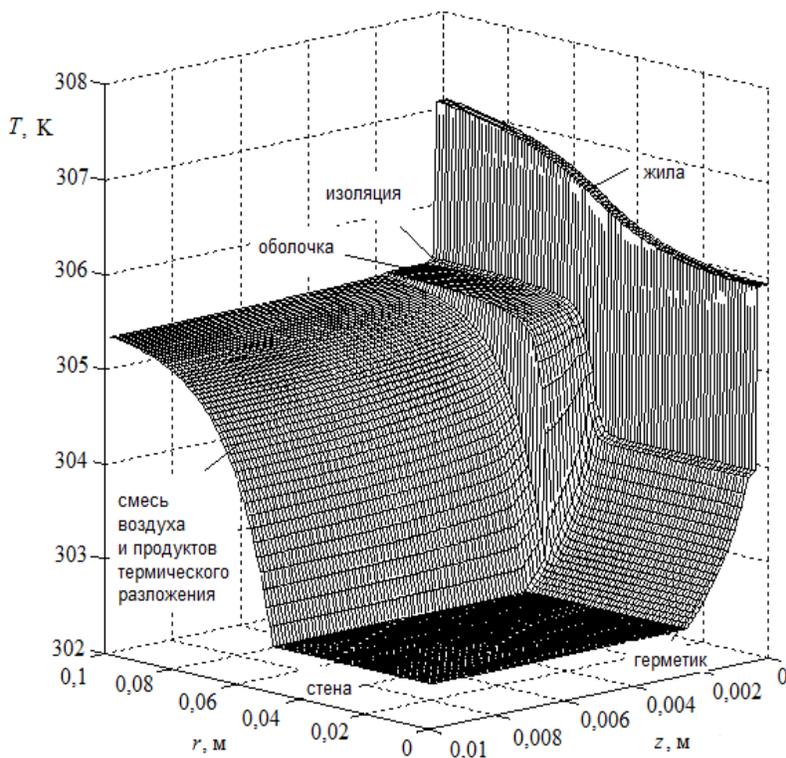


Рис. 4. Распределение температуры в исследуемой системе при токовой нагрузке 10 А при  $t = 3600$  с

Известно, что химические реакции термического разложения полимерных материалов протекают достаточно интенсивно лишь при достижении температуры около 400 – 430 К. Как видно из рис. 5, в диапазоне электрических нагрузок до 25 А температура жилы не превышает 400 К, следовательно, химическая реакция термического разложения протекает недостаточно интенсивно, в окружающем воздухе практически не содержится горючей компоненты и температура воздуха недостаточно высока. В связи с этим условия воспламенения кабельного изделия не реализуются. При токовых нагрузках, превышающих 25 А, температура материала оболочки кабельного изделия достигает значений, при которых химические реакции термического разложения начинают протекать с заметной скоростью. Происходит газификация материала оболочки кабеля. Выделяющиеся продукты реакции перемешиваются в воздухе. При дальнейшем увеличении температуры формирующейся газовой смеси химические реакции окисления ускоряются. В результате и температура, и

концентрация продуктов термического разложения в воздухе достигают критических значений, при которых происходит воспламенение горючей компоненты. Типичная зависимость времени задержки воспламенения от силы тока приведена на рис. 6.

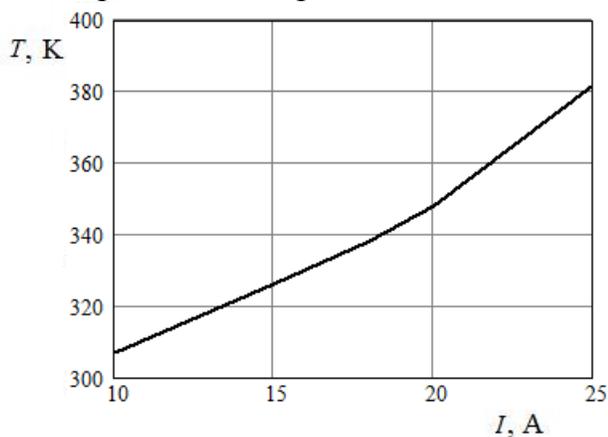


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры жилы от силы тока

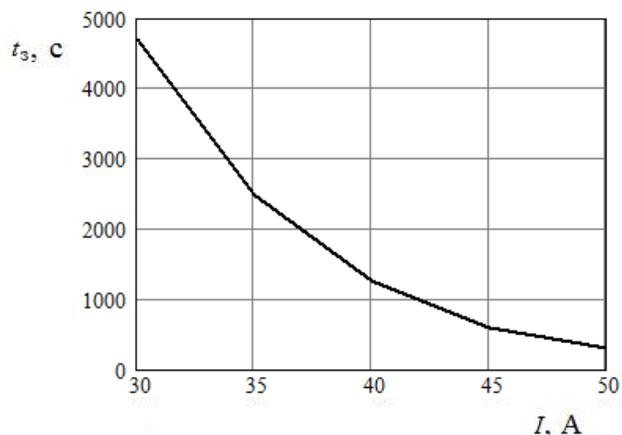


Рис. 6. Зависимость времени задержки воспламенения от токовой нагрузки

Результаты решения сопряженной задачи прогрева и термического разложения материалов оболочки кабельного изделия в виде типичных распределений температуры в рассматриваемой системе и концентрации компонентов термического разложения материала оболочки и герметика в окружающем воздухе в момент воспламенения приведены на рис. 7.

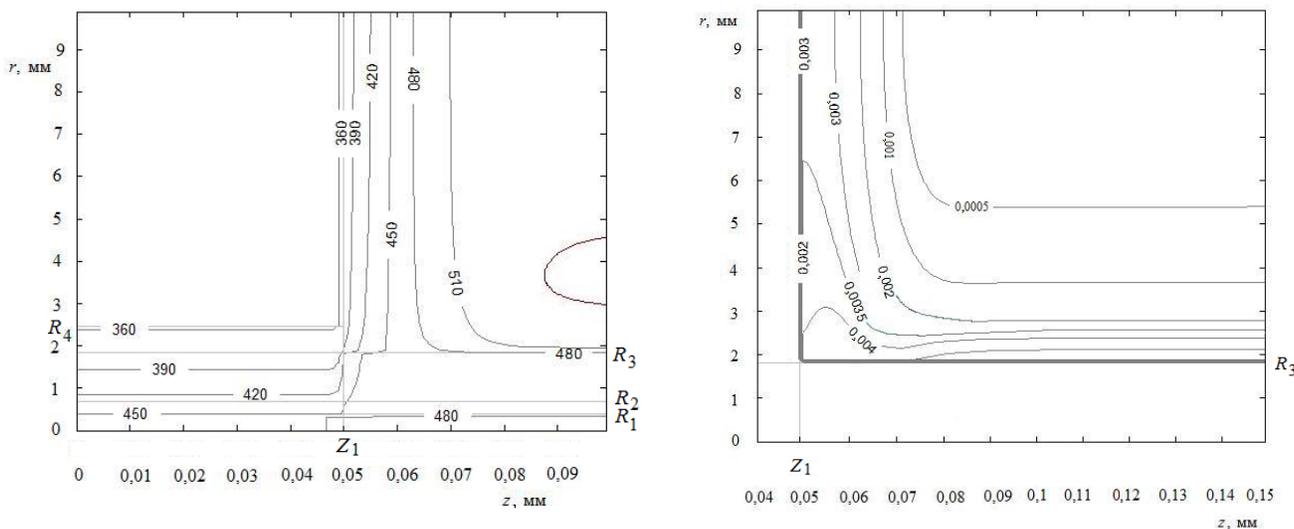


Рис. 7. Изотермы и линии постоянной концентрации компонентов термического разложения оболочки кабельного изделия в воздухе в момент воспламенения при токовой нагрузке 40 А

Установлено, что максимум температуры достигается в области, расположенной на расстоянии нескольких миллиметров от перегородки и поверхности кабеля. Там же наблюдается максимум концентрации горючей компоненты. Результаты исследований хорошо согласуются с общей теорией

горения полимерных материалов, согласно которой поверхность полимера значительно холоднее области газового пламени, которая является достаточно узкой и отстоит от поверхности полимера на расстояние порядка нескольких миллиметров.

Анализ влияния основных факторов на температурное поле и характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке показал, что они зависят, в большей мере, от величины тепловыделения в жиле, вызванного электрической перегрузкой, и от продолжительности перегрузок, а также от геометрических размеров перегородки и теплофизических характеристик материала, из которого она выполнена. Чем ниже теплопроводность этого материала, тем быстрее достигаются условия, при которых начинается термическое разложение материала оболочки кабеля. Увеличение толщины перегородки при постоянной токовой нагрузке приводит к увеличению времени задержки воспламенения кабельного изделия. Можно сделать вывод, что наличие теплопроводной стенки не увеличивает, как можно предположить, а уменьшает вероятность выхода на режим термического разложения и воспламенения при электрической перегрузке.

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что снижение вероятности выхода на режим термического разложения и воспламенения кабельных изделий в условиях электрической перегрузки возможно лишь за счет уменьшения температуры и концентрации горючей компоненты в воздухе, окружающем разогретый до высоких температур кабель. На практике этого можно достичь, например, с помощью принудительной вентиляции кабельных каналов, коробов и тоннелей. Использование принудительной вентиляции кабельных коммуникаций позволит предотвратить накопление продуктов термического разложения оболочки кабеля в условиях электрической перегрузки вблизи его поверхности и снизить температуру кабеля и окружающего воздуха. При отсутствии или недостаточной концентрации горючих газов вблизи поверхности кабельных линий невозможна реализация условий воспламенения, даже при достаточно высоких температурах.

Для подтверждения достоверности полученных результатов проведены экспериментальные исследования термического разложения и воспламенения фрагмента кабельного изделия при электрической перегрузке. В качестве фрагментов использованы отрезки шнура типа ШВВП длиной 500 мм с площадью сечения жилы  $0,5 \text{ мм}^2$  (оболочка была удалена, исследовалась 1 жила с изоляцией). Проводник находился в воздушной среде (без использования перегородки). Фиксировалась температура поверхности проводника, сила тока, время появления летучих продуктов термического разложения (дыма). Результаты проведенных исследований показали, в частности, что в условиях электрической перегрузки при силе тока 40 А (номинальная токовая нагрузка 4 А) уже через 5 с. начинается размягчение материала изоляции проводника. Время появления дыма, свидетельствующее о начале термического разложения

материала изоляции составило, в среднем, 15 с. Через 22 с. материал изоляции начинал разрушаться и отделяться от токопроводящей жилы, поэтому время задержки воспламенения зафиксировать не удалось, однако была измерена температура изоляции.

Проведено сравнение результатов экспериментов и численных исследований, проведенных для того же проводника, с использованием двух математических моделей: без учета процессов, протекающих в окружающем кабельное изделие воздухе (модель 1); с учетом диффузии и окисления продуктов термического разложения материала изоляции в воздухе (модель 2). Результаты сравнения численных и экспериментальных данных приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований при  $t = 22$  с

Параметр	Эксперимент	Модель 1	Модель 2
Температура поверхности изоляции, К	378,6	374	383,9
Относительная погрешность, %	-	- 1,2	1,4
Абсолютная погрешность, К	-	- 4,6	5,3

Из табл.1 видно, что отклонение результатов численных исследований от результатов экспериментов составляет около 5 К, а относительная погрешность не превышает  $\pm 1,5$  %, что сопоставимо с погрешностями средств измерений, используемых в экспериментальных исследованиях (погрешность амперметра  $\pm 1$  %, общая погрешность комплекта средств измерения температуры  $\pm 1,5$  %).

Можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии результатов численных исследований результатам экспериментов. Из этого следует, что математическая постановка, метод и алгоритм решения задач диссертации можно считать приемлемыми и обеспечивающими достоверность полученных результатов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Впервые поставлена и решена задача нагрева и термического разложения материалов оболочки кабельного изделия в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена, учитывающая двумерный тепло- и массоперенос, термическое разложение оболочки кабеля, диффузию и окисление продуктов термического разложения в воздухе.

2. Разработана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ для расчета температурного поля и характеристик воспламенения кабельной линии при электрической перегрузке.

3. Установлены основные закономерности физико-химических процессов (распределения тепловых полей, термического разложения и воспламенения), протекающих в кабельном изделии в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена.

4. Температурное поле кабельного изделия существенно нестационарно, наблюдается значительный градиент температуры по длине кабеля в окрестности пересекаемой им перегородки.

5. Выделены режимы электрической перегрузки, при которых достигаются условия воспламенения типичных кабельных изделий. Так, например, для кабельного изделия с медной жилой сечением  $0,5 \text{ мм}^2$ , изоляцией из композиционного материала и оболочкой из поливинилхлоридного пластика, пересекающего металлическую стенку, пороговой является токовая нагрузка 25 А. При меньших значениях силы тока условия воспламенения не достигаются.

6. В результате численного моделирования физико-химических процессов, протекающих в кабельном изделии в условиях электрической перегрузки и ограниченного теплообмена, определено положение зоны воспламенения в газовой области над поверхностью кабеля на расстоянии нескольких миллиметров от перегородки.

7. Представленные в работе математические модели можно использовать для прогнозирования работоспособности кабельных изделий в условиях электрической перегрузки и определения характеристик их воспламенения.

8. Разработанные математические модели, алгоритм решения задачи и программа для ЭВМ также могут быть использованы для определения условий теплообмена и режимов работы кабельных линий, обеспечивающих их работоспособность при длительной эксплуатации.

9. Возможна оценка работоспособности кабельных изделий относительно термического разложения и воспламенения при их тепловом старении, исходя из условий теплообмена и токовых нагрузок.

10. Применение принудительной вентиляции кабельных коммуникаций позволит предотвратить накопление продуктов термического разложения оболочки кабеля в условиях электрической перегрузки вблизи его поверхности и снизить температуру кабеля и окружающего воздуха. При отсутствии или недостаточной концентрации горючих газов вблизи поверхности кабельных линий невозможно воспламенение.

11. Использование невентилируемых кабель-каналов повышает риск возникновения пожара за счет накопления горючих продуктов термического разложения оболочки кабеля при электрической перегрузке вблизи его разогретой до высоких температур поверхности.

**ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Прогностическое моделирование процесса воспламенения кабельных линий в условиях перегрузки // Сборник трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2009. – С. 324
2. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Оценка условий воспламенения кабельных линий в зоне с ограниченным теплоотводом на основе анализа температурных полей // Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике. – Красноярск: ИТ СО РАН, 2009. – С. 23
3. **Григорьева М.М.** Математическое моделирование процесса воспламенения кабельных линий транспортных средств // Материалы XVI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – Алушта: МАИ, 2009. – С. 230–231
4. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Оценка пожарной опасности режимов перегрузки кабельных линий на основе анализа температурных полей // Материалы региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: Изд. ТПУ, 2009. – С. 300–304
5. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Численное моделирование температурных полей в условиях, предшествующих процессу воспламенения кабельных линий // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург: Изд. СПбГПУ, 2010. – С. 221–222
6. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – № 4. – Т. 316.— С. 34–38
7. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Численное моделирование температурных полей кабельных линий в условиях электрической перегрузки // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 174–175
8. **Григорьева М.М., Стрижак П.А.** Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в кабельных линиях при электрических перегрузках // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 118–122
9. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Оценка пожарной опасности режимов электрической перегрузки кабельных линий // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 9. – С. 9–13
10. **Григорьева М.М., Кузнецов Г.В.** Тепломассоперенос при воспламенении кабельных линий в условиях электрической перегрузки // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. – М: Издательский дом МЭИ, 2010. – Т. 7. – С. 83–86