Григорьева, Муза Михайловна. Математическое моделирование физико-химических процессов в кабельных изделиях при электрической перегрузке : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.02, 01.04.14 / Григорьева Муза Михайловна; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т].- Томск, 2010.- 114 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/844

**Содержание к диссертации**

Введение

**ГЛАВА 1. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов в кабельных изделиях при электрической перегрузке 13**

ГЛАВА 2. Математическое моделирование физико химических превращений в кабельных изделиях в условиях электрической перегрузки. метод решения 30

2.1 Физическая постановка задачи 30

2.2 Математическая постановка задачи 33

2.3 Метод решения 39

2.4 Решение уравнений энергии 39

2.5 Решение уравнений теплопроводности 46

2.6 Решение уравнения диффузии 49

2.7 Оценка достоверности получаемых результатов 51

2.8 Алгоритм решения задачи 53

**ГЛАВА 3. Решение тестовых задач 56**

3.1 Одномерный теплоперенос в бесконечном цилиндре 56

3.2 Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с внутренними источниками тепла 58

3.3 Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с химической реакцией в материале (термическое разложение) з

3.4 Одномерный теплоперенос в плоской двухслойной бесконечной пластине 63

3.5 Двумерный теплоперенос в пластине с фазовым переходом на

двух границах (испарение материала) 65

3.6 Двумерный теплоперенос в пластине с излучением на границах... 67

**ГЛАВА 4. Численное исследование физико-химических процессов в кабельных изделиях в условиях электрической перегрузки 71**

4.1 Одномерный теплоперенос в двухслойном проводе при электрической перегрузке 72

4.2 Двумерный теплоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене

4.3 Сопряженный тепломассоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене до реализации условий термического разложения материала оболочки 84

4.4 Сопряженный тепломассоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене с реализацией условий термического разложения материала оболочки 88

4.5 Анализ влияния основных факторов на температурное поле, характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене 91

4.5.1 Анализ влияния длительности и интенсивности электрической перегрузки на температурное поле, характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия 0

4.5.2 Анализ влияния теплофизических характеристик материала перегородки на характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене 95

4.5.3 Анализ влияния полутолщины перегородки на характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене 96

4.6 Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований физико-химических процессов в кабельных изделиях в условиях электрической перегрузки 97

4.7 Обобщение результатов выполненных исследований. Рекомендации по дальнейшему использованию и развитию разработанного подхода к анализу протекающих в электротехнических материалах и изделиях процессов 100

Заключение 103

Литература

* [Математическая постановка задачи](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/matematicheskoe-modelirovanie-fiziko-himicheskih-processov-v-kabelnyh-izdelijah-pri.html#4593821)
* [Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с внутренними источниками тепла](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/matematicheskoe-modelirovanie-fiziko-himicheskih-processov-v-kabelnyh-izdelijah-pri.html#4593822)
* [Двумерный теплоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/matematicheskoe-modelirovanie-fiziko-himicheskih-processov-v-kabelnyh-izdelijah-pri.html#4593823)
* [Анализ влияния теплофизических характеристик материала перегородки на характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене](http://www.dslib.net/elektrotex-materialy/matematicheskoe-modelirovanie-fiziko-himicheskih-processov-v-kabelnyh-izdelijah-pri.html#4593824)

## Математическая постановка задачи

Следует особо отметить приведенные в таблице 1.5 сведения о причинах возникновения возгораний и пожаров на АЭС. Из таблицы хорошо видно, что более половины пожаров не идентифицированы по своим причинам, которые в целом можно условно назвать электрическими. Если не подвергать сомнению достоверность источников, использовавшихся авторами [54-56], то можно сделать вполне обоснованный вывод о том, что причины пожаров просто не установлены. Но так как распределение в целом по таблице 1.5 причин пожаров показано хорошо, то можно предположить, что не идентифицированные причины можно распределить по шести основным пропорционально их доле в точно идентифицированных случаях. Тогда можно утверждать, что электрические перегрузки приводят не менее чем к 35 % пожаров на АЭС. Кроме того нельзя не отметить, что АЭС являются объектами с особым статусом пожарной безопасности, которым традиционно уделяется повышенное внимание. Поэтому возникновение десятков возгораний и пожаров на АЭС (или даже сотен) является, очевидно, следствием не столько халатности персонала, сколько объективных причин, являющихся следствиями реальных условий эксплуатации энергонасыщенного технологического оборудования. Но, несмотря на свою актуальность, проблема обеспечения работоспособности и безопасной эксплуатации кабельных изделий при электрической перегрузке плохо изучена. Исследования по данной тематике можно условно разделить на несколько направлений. Одним из них является изучение «электротехнической составляющей» указанной проблемы [2, 10, 17-19,50-51].

Так, известно [2, 17-18], что при соблюдении требований ПУЭ по выбору типа и сечения проводников, а также аппаратов, предназначенных для защиты кабельных изделий от перегрузок и коротких замыканий, возможны такие режимы работы, при которых проводник может длительное время работать со значительной электрической перегрузкой, в связи с чем его температура будет существенно превышать длительно допустимую. Для приближенного расчета температуры проводника в [18] предлагается использовать эмпирическое выражение, учитывающее его начальную температуру и интенсивность электрической перегрузки. Это выражение является слишком упрощенным и не учитывает многих факторов, которые оказывают существенное влияние на температуру проводника: длительность воздействия перегрузки, свойства материала проводника, а также физико-химические процессы, протекающие в кабеле в указанном режиме работы.

Предложено [51] эмпирическое выражение для расчета нагрева экранов контрольных кабелей при коротких замыканиях, учитывающее теплоотвод от экрана к изоляции кабеля, увеличение удельного сопротивления материала экрана при нагревании. Для расчета температуры экрана необходимо знать лишь длину кабеля, приложенное к нему напряжение и продолжительность периода приложения напряжения. При этом отмечено, что погрешность расчета для температур нагрева экрана от 283 до 1273 К составляет от - 10 до + 20 %. Но выражение [51] не позволяет адекватно оценить температуру кабеля в режиме электрической перегрузки.

Исследование процесса воспламенения изоляции кабеля в результате протекания токов утечки в месте повреждения изоляции с последующим возгоранием дуги приведено в [50]. Установлено, что для появления микродуги, вызывающей воспламенение изоляции, необходимо выделение мощности от 40 до 60 Вт, что возможно при снижении сопротивления изоляции в месте дефекта. Отмечено, что горение электрической дуги имеет природу, отличную от горения смеси продуктов термического разложения изоляции с окружающим воздухом. В связи с этим в диссертации случай повреждения изоляции и горения дуги не рассматривается.

Монтаж электрической проводки предполагает пересечение инженерных сооружений и естественных препятствий [10]. При этом кабель проходит из одного помещения в другое через стены и перегородки с использованием кабельной проходки, замуровывается в штукатурку или помещается в специальные короба, кабель-каналы, стальные трубы [57, 58]. При таких способах прокладки условия теплообмена значительно отличаются условий, при которых кабель распложен на открытом воздухе [10]. Известно, что условия прокладки оказывают существенное влияние на температурный режим эксплуатации кабельных изделий. Показано [10], что проектирование прокладки кабеля без соответствующего анализа условий теплообмена может с течением времени спровоцировать возникновение аварийной ситуации, связанной с его тепловым разрушением. Приведены [10] результаты расчета температурного поля в плоскости сечения кабеля, проложенного в стальной трубе. Установлено [10], что дополнительным источником тепла при такой прокладке являются вихревые токи, протекающие в трубе. При проведении расчетов учтены температурные зависимости теплопроводности воздуха и электропроводности медной жилы и экрана. Показано [10], что прокладка в одной трубе одновременно трех кабелей в вершинах равнобедренного треугольника приводит к снижению их рабочей температуры. При этом наиболее нагретым является верхний кабель. В указанной статье не рассмотрены режимы электрической перегрузки кабельной линии.

Другое направление исследований в области обеспечения работоспособности и безопасной эксплуатации кабельных лизделий нацелено на разработку новых изоляционных материалов пониженной горючести [23-24, 31]. Работоспособность кабельного изделия при электрической перегрузке определяется горючестью материалов изоляции и оболочки, дымовыделением, огнестойкостью, токсичностью продуктов горения и пиролиза. В свою очередь, горючесть — комплексная характеристика материала, включающая температуру воспламенения, скорость выгорания и распространения пламени по поверхности, кислородный и температурный индексы. Перечисленные характеристики являются взаимосвязанными, и улучшение одной из них зачастую сопровождается ухудшением других. Введение, например, добавок, снижающих горючесть полимерных материалов, приводит к ухудшению физико-механических, диэлектрических и других эксплуатационных и технологических свойств, а также повышению стоимости материалов [24]. Кроме того, однозначно установлено, что попадание указанных добавок в атмосферу вредит здоровью человека и способствует разрушению озонового слоя Земли [24, 59]. Следует отметить, что в большинстве случаев невозможно добиться того, чтобы органический полимер стал абсолютно негорючим материалом и не сгорал в интенсивном огне. Кабели пониженной горючести и огнестойкие предназначены для эксплуатации в первую очередь на тех объектах, где концентрация людей или дорогостоящего оборудования требует повышенного уровня безопасности. Их применяют, например, при строительстве метрополитена, электростанций, АЭС, крупных промышленных объектов, компьютерных и телекоммуникационных центров, торговых центров, при строительстве судов и буровых платформ [36, 60-62]. Несмотря на это, кабели пониженной горючести с изоляцией и оболочкой из полимерных композиций находят все более широкое применение не только в атомной энергетике и в промышленности, но и на транспорте и в быту [34].

## Одномерный теплоперенос в плоской бесконечной пластине с внутренними источниками тепла

На первом полушаге по времени из граничных условий на левой границе области решения уравнения диффузии вычислялись прогоночные коэффициенты а0 и pV Далее прямой прогонкой определялись коэффициенты а,- и р/ в каждом узле сетки. После нахождения значений температуры на правой границе области решения уравнения диффузии из соответствующего граничного условия выполнялась обратная прогонка, в ходе которой определялись значения температуры в каждом узле сетки. Таким образом решалась система уравнений (2.6.4), (2.6.6) - (2.6.9). На втором полушаге по времени аналогично решалась система уравнений (2.6.5), (2.6.10) - (2.6.13). 2.7 Оценка достоверности получаемых результатов

При решении задачи, количество узлов расчетной сетки выбиралось из условия неизменности результатов вычислений при уменьшении шага по пространственной координате. Шаг по времени задавался в соответствии с критерием Куранта. где Ки - число Куранта; а - температуропроводность материала, м2/с; At шаг по времени, h — шаг по пространственной координате.

Приемлемое соотношение «точность вычислений — вычислительные затраты» обеспечивается при числах Куранта от 1 до 10. При больших значениях Ки точность вычислений значительно снижается, а при Ки \ существенно увеличиваются вычислительные затраты. При выборе шага по времени учитывалось максимальное значение температуропроводности в исследуемой системе.

Кроме того, в каждом узле координатной сетки выполнялась проверка точности получаемых результатов на каждом шаге по времени. Из-за отсутствия экспериментальных данных, полученных при условиях, рассматриваемых в диссертационной работе, оценка достоверности результатов численных исследований выполнялась проверкой консервативности используемой разностной схемы. Вычислялась точность выполнения закона сохранения энергии в выделенной области решения задачи (рис. 2.1.1).

Здесь T(i,j,k-l) — температура на (&-1)-ом временном слое; T(i,j,k) — температура на -ом временном слое; і и у — номера узлов координатной сетки по г и z соответственно; NrnMz — число узлов координатной сетки по г и z соответственно; At— шаг по времени; К— число шагов по времени.

Численный анализ показывает, что при уменьшении шага по времени значительно уменьшается погрешность по балансу энергии в рассматриваемой системе. Для получения достаточно высокой точности вычислений можно использовать шаг по времени порядка At=lO с. Следует отметить, что при шаге по времени менее 1 мкс наблюдается значительное увеличение вычислительных затрат и незначительное уменьшение погрешности вычислений.

Анализ влияния шага по пространственным координатам на погрешность выполнения баланса энергии показал, что она уменьшается с увеличением числа узлов пространственной сетки Nr и М2. Анализ установил, что при шаге по времени Лґ=10 с для области решения задачи размерами Ry=l00 мм и Zf= 250 мм сетка 200x250 дает приемлемый результат. Дальнейшее измельчение сетки не влечет за собой существенного отклонения в результатах вычислений. Необходимо отметить, что определяющую роль при выборе расчетной сетки играет шаг по времени, а не пространственным координатам.

1. На первом шаге по времени строился итерационный цикл для определения температурного поля в рассматриваемой системе (рис. 2.1.1). В качестве начального приближения задавалось значение сеточной функции на предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивался при выполнении условия:

Если в результате итерационного цикла требуемая точность вычислений не достигалась, то полученное приближение 7 задавалось в качестве начального в систему разностных аналогов уравнений энергии и теплопроводности для определения очередного приближения Т Ч При достижении заданной точности вычислений выполнялся переход к следующему временному слою.

В выполняемых расчетах точность вычисления температуры принималась 8 = 0,5 К при минимально возможной в такой постановке температуре Т= 273 К. 2. Поле концентраций горючей газовой компоненты определялось аналогично температурному полю. 3. Для контроля точности проводимых вычислений в каждом узле расчетной сетки выполнялась оценка достоверности полученных результатов по методике, изложенной в п. 2.7. 4. Далее проверялись условия окончания вычислений по превышению температурой газовой смеси максимальной температуры жилы и превышению теплом, выделяющимся в результате химической реакции окисления горючей компоненты, тепла, выделяющегося в жиле. В случае невыполнения условий окончания вычислений выполнялся переход на следующий временной слой, определялись температурные поля и распределение концентрации горючей компоненты в воздухе, выполнялась оценка достоверности результатов и проверка условий окончания вычислений по п. 1 - 3 данного алгоритма

## Двумерный теплоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене

Проведены численные исследования для кабеля с сечением медной жилы 0,35 мм2, изоляцией из композиционного материала на основе кремнийорганического каучука [61] и оболочкой из фторопласта-4 [53]. Предполагается, что кабельные коммуникации пересекают элементы конструкции транспортного средства, поэтому в качестве материала перегородки выбрана сталь. Кабельная проходка также выполнена из фторопласта-4. Температурное поле перегородки рассчитывается для участка, равного четырем радиусам оболочки кабеля, так как на большем расстоянии от поверхности кабеля температура перегородки практически не изменяется.

Исследования проведены для тех же токовых нагрузок, что и в п. 4.1: а) 8 А — номинальный режим; б) 12 А - перегрузка (сила тока больше длительно допустимой на 30 %); в) 16 А - значительная перегрузка (сила тока больше длительно допустимой на 75 %). Теплофизические характеристики слоев рассматриваемой системы [53, 80-81]: Pi=8800 кг/м3, d=381 Дж/(кг-К), =384 Вт/(м-К); р2=2300 кг/м3, с2=1200 Дж/(кг-К), Х2=1 Вт/(м-К); р3=2200 кг/м3, с3=1 Дж/(кг-К), А,3=0,25 Вт/(м-К); р4=2200 кг/м3, с4=1 Дж/(кг-К), і4=0,25 Вт/(м-К); р5=1500 кг/м3, с5=750 Дж/(кгК), і5=0,7 Вт/(м-К). Геометрические размеры кабеля и перегородки: І?! = 0,00033 м, R2= 0,0005 м, R3= 0,0017 м, Д4= 0,002 м, R5= 0,01 м, Z! = 0,05 м, Z2 = 0,25 м. Параметры термического разложения фторопласта-4 [53]: А=3-1019 с"1, =1,86 МДж/кг, ф0=0,4, і?г=8,31 Дж/(моль-К), =347 кДж/моль. Условия теплообмена с окружающей средой: Г0=300 К, Те =300 К, а=5 Вт/(м2.К). Длительность перегрузки: /=3600 с.

Результаты численных исследований приведены на рис. 4.2.2, 4.2.3. Установлено, что для выбранных значений параметров, характеризующих работу кабельных изделий, возможны достижения температур, существенно превышающих указанные выше предельно допустимые значения.

Согласно [21], допускаемая токовая нагрузка по условиям пожарной безопасности для проводника такого сечения составляет 9 А. При номинальном значении силы тока 8 А, температура кабеля остается в допустимых пределах.

На рисунке 4.2.2 показано температурное поле исследуемой системы при токовой нагрузке 12 А. Допустимое значение температуры длительного нагрева жил (343 К) превышено, однако допустимый температурный предел для аварийных режимов в 363 К не достигнут. г, м

Распределение температуры в системе «жила-изоляция-оболочка-кабельная проходка-стена» при токовой нагрузке 12 А

Распределение температуры в рассматриваемой системе при силе тока 16 А приведено на рисунке 4.2.3. Видно, что все допустимые температурные пределы существенно превышены.

Следует подчеркнуть, что максимальный нагрев кабеля происходит на расстоянии нескольких миллиметров от перегородки. Это объясняется тем, что разные участки кабеля находятся в различных условиях теплообмена. Перенос тепла от нагретой до высоких температур жилы на участке кабеля, заключенном в перегородку, осуществляется более интенсивно по сравнению с участком, непосредственно контактирующим с окружающей средой. Такой эффект достигается за счет высокой температуропроводности стальной перегородки. г, м

Полученные распределения температуры в рассматриваемой системе для режимов повышенных электрических нагрузок на кабельную линию позволяют сделать вывод, что для типичных диапазонов изменения параметров, характеризующих работу кабельных изделий (токи, длительности перегрузок, условия теплообмена) возможны достижения температур, существенно превышающих предельно допустимые температуры их эксплуатации [84].

Следует отметить, что математическая модель (4.2.1) - (4.2.16) процесса теплопереноса при электрической перегрузке кабельного изделия, пересекающей строительную конструкцию, также как и приведенная выше, позволяет лишь приближенно оценить работоспособность кабельного изделия при электрической перегрузке на основании анализа температурного поля исследуемой системы и сравнения его максимальных значений с длительно допустимыми.

Схема области решения задачи: 1 - токопроводящая жила, 2 - изоляция, 3 - оболочка, 4 - герметик, 5 - перегородка (стена), 6 — смесь воздуха с компонентами термического разложения материала оболочки и герметика, R\, Ri, R3, R4, R5 — радиусы соответствующих слоев системы, Zi,Z2 — полутолщина стенки и полудлина кабеля Проведены численные исследования для кабеля с сечением медной жилы 0,5 мм, изоляцией из композиционного материала на основе кремнийорганического каучука и оболочкой из ПВХ-пластиката [61]. Кабели из указанных материалов находят широкое применение на морском транспорте, при строительстве жилых и промышленных объектов. В качестве материала перегородки выбрана сталь. Принимается, что кабельная проходка, с помощью которой кабель закреплен в перегородке, выполнена из ПВХ-пластиката. Температурное поле стены рассчитывается для участка, равного четырем радиусам оболочки кабеля, так как на большем расстоянии от поверхности кабеля температура перегородки практически не изменяется.

Начальная температура исследуемой системы: Го=300 К. Задача численных исследований в рамках сформулированной математической модели (см. п. 2.2) состояла в определении возможности воспламенения смеси продуктов термического разложения оболочки и герметика типичного кабельного изделия при различных токовых нагрузках.

Зависимость максимальных температур нагрева жилы при длительности перегрузки 1 ч от силы тока приведена на рис. 4.3.3. Для типичного кабельного изделия и условий его теплообмена пороговой является токовая нагрузка 25 А, так как температура смеси продуктов термического разложения с окислителем через 10 ч воздействия на кабельную линию указанной нагрузки достигает условий воспламенения, приведенных в п. 2.1, но концентрация горючей компоненты в воздухе при этом все же недостаточна для реализации воспламенения [90]. 400

Известно, что химические реакции термического разложения протекают достаточно интенсивно лишь при достижении определенной температуры. Для полимерных материалов эта температура составляет около 400 - 430 К. Как видно из рис. 4.3.3, 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. 4.4 Сопряженный тепломассоперенос в трехслойном кабеле при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене с реализацией условий термического разложения материала оболочки

Проведены численные исследования для кабельного изделия с теми же характеристиками и условиями теплообмена, что и в п. 4.3, но при более интенсивной электрической перегрузке [84, 90]. Исследования показали, что 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 ускоряются химические реакции окисления, протекающие с выделением тепла. В результате и температура, и концентрация продуктов термического разложения в воздухе достигают критических значений, при которых происходит воспламенение. Зависимость времени задержки воспламенения t3 от силы тока приведена на рис. 4.4.1.

## Анализ влияния теплофизических характеристик материала перегородки на характеристики процессов термического разложения и воспламенения кабельного изделия при электрической перегрузке и ограниченном теплообмене

Подводя итог выполненным при написании диссертации исследованиям, необходимо отметить, что разработанный новый подход к анализу и моделированию физико-химических процессов, протекающих в электротехнических материалах d изделиях, существенно расширяет возможности прогностического моделирования для технологов, конструкторов и проектировщиков. Сформулированные автором диссертации основные положения являются теоретической основой для выбора, например, толщин слоев изоляции и оболочки, условий установки кабельных изделий на реальных объектах, условий охлаждения кабельных линий, режимов и сроков проведения регламентных работ, выбора материалов для изготовления изоляционных слоев и оболочки и др. При этом, для проведения прогностического моделирования изучаемых процессов и оценки влияния самых различных факторов на работоспособность материалов кабельных изделий не надо проводить специальных экспериментов в условиях работы рассматриваемых объектов. Для получения необходимых теоретических следствий достаточно информации по теплофизическим свойствам материалов изделия и параметрам процессов их термического разложения. Эти характеристики в настоящее время являются в большинстве случаев паспортными для конструкционных, изоляционных и специальных материалов любого назначения.

Также можно отметить, что разработанный подход и математическая модель могут использоваться в широком диапазоне изменения параметров, характеризующих как само кабельное изделие, так и условия его работы (значения токов и напряжений, толщины отдельных слоев и электропроводной жилы, интенсивность теплообмена с внешней средой, условия установки кабельных линий, продолжительность работы изделия в целом и режимов электрической перегрузки, состав внешней газовой среды). По всем этим параметрам, характеристикам и режимам нет ограничений при использовании разработанной математической модели и метода решения задачи. В частности, переход на большее (по сравнению с рассмотренным в диссертации) число слоев не представляет каких-либо методологических или даже технических проблем. Любые варианты усложнения задачи (например, увеличение толщины отдельных слоев или их числа, переход к многослойным кабельным изделиям с отличающимися в 100 и более раз коэффициентами теплопроводности) приведут только к повышению продолжительности вычислительного процесса, обусловленной необходимостью изменения параметров разностной сетки (в частности, уменьшения шага разностной сетки по времени).

Важным, по мнению автора диссертации, является также и то, что разработанный в диссертации подход обладает большим потенциалом дальнейшего развития и выхода на новые приложения по анализу условий работоспособности электротехнических материалов и изделий. Наиболее очевидными являются следующие.

Процессы старения большинства электротехнических материалов при длительной эксплуатации являются следствием, как правило, термической или окислительной деструкции, протекающих даже при изменении температуры окружающей среды. Моделирование этих процессов и оценка работоспособности и надежности материалов каждого из слоев изделия возможна при использовании математического аппарата, представленного в диссертации. Для его применения необходимы только сведения по кинетике процессов термической или окислительной деструкции. Эти кинетические параметры могут быть определены для любого материала путем достаточно простых экспериментов.

Во многих практически важных случаях кабельные изделия выходят из строя не только в результате возгораний. При нагреве термопластичных и термореактивных полимерных материалов (или композитов на их основе) до температур, существенно меньших температур начала термического разложения, происходит размягчение (или даже оплавление) этих материалов. В результате резко ухудшаются изоляционные свойства отдельных слоев или всей оболочки жилы в целом. Разработанный в диссертации математический аппарат позволяет с высокой точностью рассчитывать температурные поля любого слоя и оценивать времена достижения условий размягчения материалов в зависимости от режимов работы электротехнического изделия. Температуры размягчения аморфных полимеров или плавления кристаллических хорошо известны. Поэтому оценка работоспособности кабельного изделия по критерию размягчения материала какого-либо из слоев является существенно менее сложной задачей по сравнению с решенной в диссертации. Но для практики такие оценки, несомненно, являются важными.