

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Х.М. БЕРБЕКОВА»**

На правах рукописи

ДЖАНКУЛАЕВА МАДИНА АМЕРХАНОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В
МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗОЛЯЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА
ОСНОВЕ ПВХ-ПЛАСТИКАТОВ**

Специальность 02.00.06 – высокомолекулярные соединения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Ошхунов Муаед Музафарович

Нальчик – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПВХ-ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	11
1.1. Кабели и провода с поливинилхлоридной изоляцией.....	11
1.2. Поливинилхлоридный пластикат, его свойства.....	12
1.3. Поливинилхлоридная композиция, процесс ее получения.....	15
1.4. Основные компоненты поливинилхлоридной композиции	16
1.4.1. Пластификаторы и их свойства	18
1.4.2. Стабилизаторы и их свойства	20
1.4.3. Наполнители и их свойства.....	22
1.4.4. Смазки и красители.....	23
1.5. Физические свойства ПВХ.....	24
1.5.1. Физико-механические свойства ПВХ	24
1.5.1.1. Деформационные свойства ПВХ.....	26
1.5.1.2. Прочностные свойства ПВХ	28
1.5.2. Теплофизические свойства ПВХ.....	31
1.6. Основные причины повреждения изоляций из ПВХ-пластиката	33
1.7. Математическое моделирование процессов, связанных с эксплуатацией кабельных систем	34
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	37
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОСЛОЙНОЙ И ТРЕХСЛОЙНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ ПВХ-ПЛАСТИКАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	38
2.1. Постановка задачи.....	38
2.2. Метод конечных элементов как универсальное средство численного анализа математических моделей.....	41

2.3. Алгоритм метода конечных элементов для решения пространственных задач теории упругости	42
2.4. Моделирование НДС в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластикатов	46
2.4.1 Анализ НДС однослойного покрытия электрического кабеля при действии всестороннего давления.....	48
2.4.2. Анализ НДС трехслойного покрытия электрического кабеля при действии всестороннего давления.....	56
2.4.3. Оптимальный выбор параметров многослойной изоляции электрических кабелей, обеспечивающих наибольшую устойчивость по прочности к действиям внешних механических нагрузок.....	62
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	65
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ОДНО- И ТРЕХСЛОЙНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ПВХ-ИЗОЛЯЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК	66
3.1. Оптимальный выбор закона изменения коэффициента линейного расширения в кабельных ПВХ-изоляциях	66
3.2. Моделирование температурных нагрузок в однослойных кабельных изоляциях	69
3.3. Вычисление оптимального закона изменения коэффициента линейного расширения в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластиката.....	76
3.4. Моделирование температурных нагрузок в трехслойных кабельных изоляциях	77
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3	84
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА НДС ПО СВОДУ КАБЕЛЬНОЙ ПВХ-ИЗОЛЯЦИИ	86
4.1. Статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов	86
4.2. Метод обработки экспериментальных данных кусочно-линейными функциями	90

4.3. Общие принципы построения программного комплекса для обработки экспериментальных данных	92
4.4. Построение функциональных зависимостей $\sigma \sim \varepsilon$ и $\alpha \sim r$	94
4.5. Оценка степени влияния модуля упругости и коэффициента Пуассона на значения напряжений и деформаций в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластиката	96
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
ВЫВОДЫ.....	100
Список литературы	102

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ПВХ – поливинилхлорид

НДС – напряженно-деформированное состояние

МКЭ – метод конечных элементов

ПДК – предел допустимой концентрации

ПМ – полимерный материал

ДОФ – диоктилфталат

ДОА – диоктиладипинат

ДАФ – диалкилфталат

СИ – Международная система единиц

МДГТ – механика деформируемого твердого тела

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В последнее время наблюдается интенсивное использование изделий из полимерных материалов в машиностроении, текстильной промышленности, сельском хозяйстве, медицине, автомобиле- и судостроении, авиастроении, в быту и т.д. Кабельная промышленность также не стала исключением, широко используя полимерные оболочки на основе поливинилхлоридного пластика для защиты кабелей и проводов от механических повреждений, действий света, влаги и тепловых нагрузок, приводящих к нарушению их долговечности и работоспособности. С каждым годом все более жесткими становятся требования, предъявляемые к их качеству и, особенно, к прочностным характеристикам кабельной продукции.

В связи с этим особый интерес представляет разработка новых универсальных методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) и температурного поля кабельных покрытий на основе ПВХ-пластиката и создание на базе этих исследований рецептур новых изоляций, более устойчивых к различным внешним механическим и температурным воздействиям и, следовательно, более долговечных в эксплуатации. По указанным выше причинам выбранная тема диссертационных исследований является весьма актуальной.

Основная цель работы – моделирование температурного поля и напряженно-деформированного состояния в одно- и многослойных изоляциях электрических кабелей на основе ПВХ-пластикатов с учетом их реальных физико-механических свойств. Анализ указанных характеристик на основе математических моделей позволит разработчикам кабельных сетей на стадии виртуального проектирования наиболее приемлемые свойства ПВХ-слоев, обеспечивающие их долговременное функционирование в процессе эксплуатации, в том числе в экстремальных условиях.

Поставленная цель определила необходимость решения следующих **задач**:

1. анализ конструкционных особенностей и физико-механических свойств наиболее распространенных ПВХ-пластиков, используемых в кабельной промышленности России;
2. проведение комплекса теоретических исследований для изучения термостойкости ПВХ-пластиков с учетом реальных физико-механических свойств однослойных и трехслойных изоляций;
3. разработка новых методов исследования НДС и других свойств ПВХ-пластиков, связанных с различными условиями их эксплуатации;
4. построение математической и на ее основе компьютерной модели многослойных кабельных изоляций из ПВХ-пластиков для анализа термостойкости, а также изоляций, наиболее устойчивых к температурным и механическим нагрузкам в процессе эксплуатации;
5. разработка практических рекомендаций по подбору свойств ПВХ-пластика на основе численных исследований.

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- разработке компьютерных и математических моделей теплопередачи в кабельных слоях, учитывающих реальные свойства ПВХ-пластиков, в частности, зависимости коэффициентов теплопередачи от температуры, а также изменчивость и анизотропию тепловых свойств ПВХ-пластиков;
- разработке на основе методов теории упругости и пластичности математических моделей по определению НДС в однослойных и многослойных ПВХ-покрытиях при действии на кабель механических и тепловых нагрузок;
- разработке на базе метода конечных элементов комплекса программ для решения трехмерных задач теплопроводности и задач по определению напряжений и деформаций с учетом указанных выше реальных свойств ПВХ-покрытий;
- разработке алгоритма и компьютерной программы по анализу статистических данных, которые имеют наименьшую дисперсию, т.е.

наилучшим образом аппроксимируют экспериментальные данные, связанные с определением физико-механических свойств ПВХ-пластиков;

- выработке научно-практических рекомендаций по увеличению долговечности и работоспособности кабельной продукции на стадии виртуального проектирования.

Практическая и теоретическая значимость работы заключаются в:

- разработке программно-алгоритмической модели по анализу реальных свойств кабельных покрытий из ПВХ-пластиката в различных условиях эксплуатации (в том числе при действии тепловых и механических нагрузок), позволяющей конструкторам кабельных сетей выбрать наиболее приемлемые их свойства на стадии проектирования;

- выработке практических рекомендаций по подбору теплофизических и физико-механических свойств ПВХ-пластиков в многослойных кабельных покрытиях, обеспечивающих их оптимальное функционирование в экстремальных условиях;

- разработке компьютерной программы, позволяющей эффективно обработать экспериментальные данные, а также в подборе аналитических зависимостей, имеющих наименьшую дисперсию (отклонение) от опытных данных;

- создании трехмерных компьютерных моделей для однослойных и трехслойных изоляций электрических кабелей на основе ПВХ-пластиков и анализ НДС и температурного поля с использованием тетраэдральных конечных элементов.

Методология и методы диссертационного исследования. Для расчета температурного поля и НДС одно- и многослойных кабельных изоляций на основе ПВХ-пластиков использовался метод конечных элементов (МКЭ). Для статистической обработки данных применялся метод наименьших квадратов, а также его модификации.

Положения, выносимые на защиту:

- создание комплекса программ по расчету напряжений и деформаций в одно- и трехслойных кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластикатов при действии механических и температурных нагрузок с учетом реальных свойств материала покрытия;
- разработка математической модели и компьютерных программ по расчету теплопередачи в кабельных покрытиях из ПВХ-пластиката с учетом неоднородных свойств коэффициентов теплопроводности в слоях;
- разработка компьютерных программ для 3d-проектирования многослойных систем кабельной ПВХ-изоляции, предназначенных для расчетов НДС и температурных полей методом конечных элементов;
- создание и использование комплекса компьютерных программ по одновременному расчету трехмерного температурного поля и возникающих ввиду этого напряжений и деформаций;
- разработка нового метода по подбору коэффициентов температурного расширения по своду кабельной ПВХ-изоляции, при котором кольцевые напряжения, зависящие от радиуса, испытывают минимальные колебания;
- разработка модифицированного метода наименьших квадратов по нахождению аналитических зависимостей для описания физико-механических свойств ПВХ-изоляции, имеющих наименьшую дисперсию.

Обоснованность и достоверность полученных данных и выводов определяется использованием численных методов анализа математических моделей на базе метода конечных элементов для расчета НДС и теплопроводности, а также применением проверенных на практике моделей для описания теплопередачи и перемещений в деформируемых средах, основанных на законе Гука, законе Дюгамеля-Неймана и т.д.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на X и XI Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы» (Нальчик, 2014 г., 2015 г.), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2015» (Нальчик, 2015 г.), Всероссийской научной конференции «Алгебра, анализ и смежные вопросы математического моделирования» (Владикавказ, 2015 г.).

Личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении основных этапов перечисленных выше работ (создании математических моделей, реализации численных методов, разработке алгоритмов и комплекса программ, анализе полученных результатов, подготовке публикаций и научных докладов). Соавторы публикаций участвовали в обсуждении полученных результатов. Математические модели и численные методы их анализа разрабатывались и обсуждались совместно с научным руководителем профессором Ошхуновым Муаедом Музафаровичем. Практическая значимость работы и возможные пути их использования при производстве кабельной продукции обсуждались с профессорами Микитаевым Абдулахом Касбулатовичем, Лигидовым Мухамедом Хусеновичем, Борукаевым Тимуром Абдуловичем, а также специалистами ЗАО «Кавказкабель».

Публикации. Содержание диссертации изложено в десяти статьях, из которых три в журналах, рекомендованных ВАК, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы. Работа изложена на 121 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 22 таблицы, список литературы включает 202 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПВХ-ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Кабели и провода с поливинилхлоридной изоляцией

Кабельная продукция предназначена для передачи и распределения электрической энергии, сигналов связи и информации, выполнения электрических соединений в различных электротехнических приборах, изготовления обмоток электрических машин и устройств [1].

Изоляция электрического кабеля должна обладать достаточной электрической надежностью, которая полностью исключает вероятность электрического пробоя при напряжении, на которое рассчитан данный кабель.

Изоляция выполняет множество функций, среди которых можно выделить следующие [2]:

- обеспечение прочности кабеля при воздействии на него деформирующих факторов;
- защита проводника от негативных условий окружающей среды (воздух, солнце, тепло, вода);
- предотвращение электрического контакта двух располагающихся рядом проводников в многожильном кабеле или при прокладке сразу нескольких рядом идущих проводов;
- защита людей и животных от поражения электрическим током, который течет в проводнике.

Допускается классификация кабельных изделий по различным признакам: по группам однородной продукции, составу конструктивных компонентов, использованному материалу изоляции, назначению, сфере использования и т.д. [3].

По разновидности изоляции кабельную продукцию можно подразделить на следующие категории [4-9]:

- неизолированные провода;

- с пластмассовой изоляцией;
- с резиновой изоляцией;
- с бумажной изоляцией;
- эмалированные провода;
- с волокнистой и комбинированной изоляцией.

Классификация по данному признаку используется при рассмотрении технологии производства кабельной продукции, в соответствии с которой осуществляется специализация кабельных заводов.

В настоящее время наибольшее распространение получили марки электропроводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией.

ПВХ-изоляция представляет собой соединение поливинилхлоридной смолы и стабилизаторов, пластификаторов и прочих химических элементов. Используя в производстве добавки, можно добиться повышения срока службы кабеля, его стойкости к перепадам температур и других характеристик [10, 11].

1.2. Поливинилхлоридный пластикат, его свойства

ПВХ по своему внешнему виду представляет собой белый порошок, каждое зерно которого обладает размером от 50 до 150 мкм, в свою очередь, каждая частица включает в себя примерно 200000 еще более мелких сферических элементов размером примерно 1-3 мкм [12, 13]. Из этого порошка производят прочные изделия, стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам.

Порошкообразный ПВХ получают в результате реакции полимеризации газообразного вещества – винилхлорида в присутствии перекиси водорода

$$H_2C = CH - Cl.$$

Из порошка ПВХ путем смешения с пластификаторами, стабилизаторами, наполнителями, красителями и некоторыми другими добавками (полученную смесь пропускают несколько раз между нагретыми стальными вальцами) получают гибкий, эластичный материал – поливинилхлоридный пластикат в

виде лент, а также в виде крошки (гранулы) [11, 14], основные свойства которого представлены в таблице 1.1 [15].

Таблица 1.1. Основные свойства ПВХ-пластиката

Свойство	Единица измерения	Значение
Плотность	г/см ³	1,18-1,30
Прочность при растяжении	МПа	10-25
Прочность при сжатии	МПа	6-7
Прочность при статическом изгибе	МПа	4-20
Относительное удлинение	%	20-44
Модуль упругости при растяжении	МПа	7-8
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,12
Удельная теплоемкость	кДж/(кг·К)	1,47
Температурный коэффициент линейного расширения	·10 ⁻⁶ °С ⁻¹	100-250
Удельное объемное электрическое сопротивление при 20°С	Ом·см	10 ⁹ -10 ¹⁴
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 Гц	-	0,1
Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц	-	4,2-4,5
Электрическая прочность при 20°С	МВ/м	25-40

При добавлении к поливинилхлоридной смоле пластификаторов, стабилизаторов и других компонентов повышаются ее физико-механические и технологические свойства, но снижаются диэлектрические свойства ПВХ-пластиката [16].

ПВХ-пластикат широко используется в качестве основной изоляции монтажных проводов, а также для изготовления защитных оболочек кабелей. Обычно он окрашен в черный, синий, желтый, красный и другие цвета. ПВХ-пластикат без красителей – прозрачный материал с желтоватым оттенком.

Молекулярная масса ПВХ 50000-200000. ПВХ является стойким к кислотам и щелочам, негорючим материалом, характерной особенностью которого является то, что, будучи вынесен из пламени, он перестает гореть. Для кабельных пластикаторов используют ПВХ, молекулярная масса которого равна 60000-100000 [17].

Поливинилхлоридные пластикаты, используемые в кабельной индустрии, по своим свойствам и предъявляемым к ним требованиям можно разбить на три основные категории:

- изоляционные, обладающие высокими электрическими характеристиками в диапазоне рабочих температур;
- шланговые, защищающие основные конструктивные элементы кабеля от воздействия внешней среды;
- полупроводящие, занимающие по своим электрическим характеристикам промежуточное место между диэлектриком и проводником [18].

Физико-механические параметры ПВХ-пластикатов в основном определяются процентным содержанием в рецептуре пластификаторов.

ГОСТ 5960-72 «Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей» [19] регламентирует основные характеристики наиболее распространенных марок пластиката.

При температуре 70-80°C ПВХ разлагается с выделением хлористого водорода (HCl), а при температуре 150-180°C на воздухе резко возрастает скорость процесса разложения полимера. По этой причине его необходимо хранить на достаточном расстоянии от отопительных приборов и в местах, которые не подвергаются воздействию прямых солнечных лучей [20]. Хлористый водород обладает резким запахом, оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки глаз и органы дыхания, может вызвать охриплость голоса, удушье, кашель, потерю сознания. Предельно допустимая концентрация (ПДК) HCl в воздухе производственных помещений составляет 5 мг/м³ [21].

Для переработки чистого ПВХ следует его нагреть вплоть до температуры плавления, близкой к температуре, при которой происходит выделение хлористого водорода. Для снижения интенсивности выделения HCl применяют термостабилизаторы. Но при сильных перегревах (при превышении температуры переработки 220°C) даже применение термостабилизаторов не

спасает ПВХ от разложения [20]. Подобная отличительная черта (практическая нереальность обработки в чистом виде и его разложение при термическом влиянии) считается его существенным минусом [22]. Из достоинств ПВХ можно выделить то, что, смешивая его с различными добавками, можно получать материалы с различными свойствами.

1.3. Поливинилхлоридная композиция, процесс ее получения

Получение ПВХ-композиций осуществляется в ходе технологического процесса, который состоит из нескольких этапов [23]:

- подготовка сырья;
- приготовление суспензии;
- приготовление композиции;
- экструзия композиции.

Подготовка сырья реализуется с целью формирования требуемых запасов материала на определенный временной технологический период в удобном для производства виде.

Данный этап охватывает [23]:

- прием ПВХ в силос;
- прием пластификатора в емкости;
- прием стабилизаторов и иных добавок на склад;
- размещение сырья в производственных помещениях;
- затир пигментов (изготовление паст пигментов) и стабилизаторов.

Приготовление суспензии осуществляется для [24]:

- обеспечения хорошего распределения стабилизаторов и других добавок;
- достижения максимальной дисперсности стабилизаторов и других добавок;

- создания условий для удобной транспортировки и дозировки стабилизаторов в смеситель композиции.

Процесс приготовления композиции включает в себя поглощение пластификатора поливинилхлоридом и равномерное распределение всех ингредиентов рецептуры. Весь процесс по изготовлению композиции складывается из нескольких одинаковых циклов, каждый из которых содержит [23, 25]:

- загрузку компонентов в определенной последовательности;
- перемешивание компонентов в течение определенного промежутка времени или до определенной температуры;
- охлаждение и выгрузку композиции.

При изготовлении композиции следует осуществить две задачи [25]:

- получить однородную смесь ПВХ и иных компонентов рецептуры;
- добиться того, чтобы данная смесь хорошо поглотила пластификатор (получить так называемую «сухую» смесь).

Экструзия композиции производится с целью формирования из порошка ПВХ-композиции гранул путем плавления композиции и выдавливания ее через специальную экструзионную головку, снабженную решеткой с круглыми отверстиями (фильерой) [23-26].

1.4. Основные компоненты поливинилхлоридной композиции

В последнее время наблюдается интенсивное увеличение области применения изделий из полимерных материалов (ПМ). Широкое использование и высокие темпы роста производства полимеров обусловлены разнообразием их физических, химических и механических свойств. С каждым годом предъявляемые к условиям их переработки и эксплуатации требования становятся все жестче. На сегодняшний день актуальными являются задачи продления срока службы полимерных изделий, в частности, изделий из ПВХ, а также улучшения их прочностных характеристик.

Для решения данных задач при производстве полимерной продукции используют различные добавки (модификации). Полимер является составной частью изделий из ПМ, но в их состав также могут входить пластификаторы, стабилизаторы, наполнители, смазки, красители и др. [11, 15, 27-30].

Добавки, называемые также химикатами для полимерных материалов, – это, в основном, органические или минеральные вещества, которые вводятся в полимеры в относительно небольших количествах, но в некоторых случаях их содержание может превышать 60%.

Добавки для полимерных материалов могут существенно изменить его первоначальные физико-химические свойства: плотность, устойчивость к действию теплоты, света, кислот, диэлектрические свойства, прочность теплопроводность, эластичность и др. [11]. Добавки придают изделиям необходимые технические свойства.

Производство химических добавок для полимеров возникло в 20-х годах 20-го века. С ростом производства ПМ расширяется также и ассортимент добавок.

Можно выделить три основных направления использования добавок [31]:

1. стабилизация качества при обработке и использовании: антиоксиданты, термо- и светостабилизаторы, которые замедляют старение пластмасс при производстве или повышают их рабочие характеристики;
2. регулирование переработки: смазки, антиадгезивы (разделяющие агенты), которые предотвращают нежелательные побочные эффекты при изготовлении;
3. придание новых свойств: антипирены, пигменты, красители, антистатика или оптические отбеливатели, которые модифицируют различные свойства конечных полимеров.

1.4.1. Пластификаторы и их свойства

Пластификаторы – это вещества, которые вводят в состав полимерных материалов для придания (или повышения) эластичности и (или) пластичности при переработке и использовании, а также для изменения других важных эксплуатационных свойств [32-34]. К ним предъявляют следующие требования: чистота, бесцветность, химическая стабильность, минимальная летучесть, высокие диэлектрические свойства, отсутствие запаха, токсичности и раздражающего действия на кожу и слизистые оболочки, морозостойкость, невысокая температура плавления, высокая температура кипения (выше 200°C), устойчивость к действию света [11, 35, 36], а также совместимость с полимером, который должен растворяться в нем [37, 38]. Действие пластификаторов основано на их способности снижать силы межмолекулярного притяжения между макромолекулами полимера.

При смешении с пластификатором полимеры набухают в нем, причем этот процесс сопровождается проникновением молекул низкомолекулярного вещества между макромолекулами полимера. При этом увеличивается расстояние между макроцепями и снижаются силы их взаимодействия. Одновременно возникают связи между молекулами пластификатора и звеньями полимерных молекул. Результат данных процессов представляет собой снижение температуры стеклования и вязкости полимерного материала [11]. Например, если чистый ПВХ становится хрупким при 70-80°C, т.е. имеет температуру стеклования 70-80°C, то, добавляя в него различные пластификаторы в различных пропорциях, можно получить вещества с температурой стеклования -40°C и ниже [39].

Наиболее распространенным в России считается пластификатор диоктилфталат (ДОФ). Цвет ДОФ меняется от светло-желтого до темно-коричневого в зависимости от качества, при этом цвет самого пластификатора оказывает влияние на цвет готовой продукции. ДОФ темного окраса не прошел дорогостоящей специальной очистки. ДОФ с хорошими показателями по

цветности не всегда обладает хорошими диэлектрическими характеристиками (величиной удельного объемного электрического сопротивления), что также является важным признаком качества пластификатора. По сравнению с ДОФ у другого пластификатора диоктиладипината – ДОА достаточно низкие диэлектрические свойства (удельное объемное электрическое сопротивление хуже в 10 раз), в связи с чем он становится совершенно непригодным для производства изоляционных марок пластика. Тем не менее многие импортные пластификаторы ДОФ в смеси с ДОА могут быть использованы в производстве пластиков для изготовления оболочек кабелей.

Другим достаточно распространенным в России пластификатором является диалкилфталат (ДАФ). Он подобен ДОФ по своим свойствам, однако обладает более низкими диэлектрическими показателями.

На практике при отсутствии хорошо оборудованной лаборатории бывает сложно отличить пластификаторы друг от друга. В этом случае самым простым способом распознавания является измерение плотности пластификатора при температуре 20°C (значения плотностей приведены в таблице 1.2).

Другим существенным признаком качества пластификатора считается его способность образовывать так называемые «сухие смеси», т.е. на поверхности зерен ПВХ не должно содержаться пластификатора после смешивания в смесителе. Следует отметить, что чем выше скорость поглощения пластификатора, тем меньше время перемешивания до получения «сухой смеси». При этом нужно помнить, что при неправильно проводимой процедуре смешения в смесителе большая скорость поглощения пластификатора может привести к комкованию композиции.

Пластификаторы являются токсичными веществами, ПДК паров ДОФ в воздухе рабочей зоны составляет 1,0 мг/м³ [40], но вследствие небольшой летучести вероятность достижения подобной концентрации паров в воздухе достаточно мала.

Пластифицированный ПВХ является самым распространенным полимерным изоляционным материалом [41-43]. В композициях кабельных

пластикатов используются различные пластификаторы, причем количество пластификатора составляет 25-40% от общего объема [43]. От типа пластификатора зависит получение кабелей с высокими механическими характеристиками [44], с оптимальными свойствами [45], морозостойких композиций ПВХ [46]. На эффект пластификации полимеров влияет строение пластификаторов и их химическая природа [34, 47-50].

Физико-химические свойства некоторых пластификаторов приведены в таблице 1.2. [40].

Таблица 1.2. Физико-химические свойства пластификаторов

Свойство	Единица измерения	ДОФ	ДАФ-789	ДОА
Внешний вид		прозрачная жидкость без механических примесей		
Плотность при 20°C	г/см ³	0,982-0,986	0,975-0,98	0,923-0,93
Динамическая вязкость при 20°C	МПа·с	80-85	32-38	12-16
Динамическая вязкость при 25°C	Па·с	80-85	32-38	12-16
Температура вспышки	°С	205	200	190
Температура застывания	°С	-50	-40	-70
Температура кипения	°С	380	-	-
Температура воспламенения	°С	249	238	215
Удельное объемное электрическое сопротивление	Ом·см	1,0·10 ¹¹	5,0·10 ¹⁰ -8,0·10 ¹⁰	-
Растворимость в воде при 25°C	%	0,005	-	0,01
Массовая доля летучих веществ	%	0,1	0,2	-
Массовая доля влаги	%	0,007	0,007	0,1

1.4.2. Стабилизаторы и их свойства

Совокупность физических и химических изменений в ПМ, которые приводят к ухудшению их качества и сокращают срок службы полимерной продукции, называют старением полимеров [51, 52]. Это процесс можно замедлить введением в полимер определенного количества стабилизаторов – специальных химических веществ, заметно повышающих стойкость к внешним

воздействиям, расширяющих области применения изделий из ПМ и удлиняющих сроки их эксплуатации.

Как отмечалось выше, одним из недостатков ПВХ является то, что он не является термостабильным полимером [53-55], другими словами, при термическом воздействии он разлагается с выделением хлористого водорода. Для замедления термической деструкции смесей ПВХ применяют специальные термостабилизаторы, предотвращающие отщепление хлористого водорода от полимера или улавливающие отщепившийся HCl . Они обеспечивают термостойкость смеси ПВХ не только в ходе переработки, но и в процессе эксплуатации, т.к. в некоторых случаях продукция из ПВХ подвергается термическому нагреву, например, электрические кабели и провода.

Без использования светостабилизаторов, защищающих полимер от солнечного воздействия, использование ПВХ для изготовления изделий во многих случаях становится невозможным вследствие их быстрого старения под действием солнечных лучей [56]. Для ПВХ в качестве светостабилизатора рекомендуется топанол КА. Также для ПВХ достаточно эффективными стабилизаторами, наиболее распространенными в России, являются соли стеариновой кислоты, соли свинца, эпоксидные соединения [11].

Важным свойством термостабилизаторов является синергизм – взаимное усиление их действия, поэтому часто используется не один, а несколько видов термостабилизаторов.

Число стабилизаторов зависит от их эффективности и от некоторых побочных воздействий, которые они могут оказывать на свойства полимеров. Основные стабилизаторы могут занимать вплоть до 5% объема композиции. Для придания полимеру определенного комплекса свойств применяют смеси стабилизаторов [57-63].

Некоторые стабилизаторы токсичны и могут оказывать вредоносное воздействие на организм человека. ПДК пыли термостабилизаторов в воздухе производственных помещений, содержащих соли свинца и кадмия, составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$.

1.4.3. Наполнители и их свойства

Наполнители – это вещества, которые вводят в состав полимера для придания ему специальных свойств, улучшения его характеристик, а также для уменьшения расхода связующих материалов в целях снижения стоимости изделия [64].

Введение в ПВХ различных наполнителей приводит к улучшению его физико-механических свойств [65-67], снижению горючести [68-73], к усилению эксплуатационных характеристик [74], увеличению ударной прочности и вязкости изделий [75-77], получению устойчивой к царапинам поверхности, а также при их использовании можно придать жесткость ПВХ [78].

В полимере наполнители должны быть устойчивы к рабочим температурам производства, стойки к другим химическим добавкам композиции, кроме того они не должны содержать посторонних включений. Но главное требование к качеству наполнителей – это дисперсность. Размер их частиц не должен превышать 10 мкм, а в некоторых случаях требуется еще меньший размер [79, 80]. Чем меньше размер частиц, тем больше дисперсность, т.е. дисперсность является обратной величиной к размеру частиц [81].

Наполнитель стараются добавлять в ПВХ в больших количествах, т.к. он гораздо дешевле. Следует отметить, что увеличение количества наполнителя выше максимального допустимого уровня приведет к потере прочности конечного продукта. Как правило, наполнитель занимает не более 50% от массы ПВХ.

Наиболее распространенными наполнителями являются мел и каолин (применяют для снижения стоимости ПВХ-композиций), гидроксид алюминия и трехокись сурьмы (используют для снижения горючести ПВХ), аэросил (улучшает диэлектрические свойства ПВХ).

Большинство наполнителей нетоксичные вещества, но их пыль в больших концентрациях может привести к негативным последствиям для здоровья человека.

1.4.4. Смазки и красители

Смазки – это вещества, которые предназначены для облегчения съема изделий с рабочих поверхностей оборудования и для снижения внутреннего трения ПВХ-композиции. Они эффективны в малых количествах. Как правило, в полимере содержится не более 1%, но, тем не менее, они оказывают существенное воздействие на физико-химические свойства ПВХ.

Смазки условно делят на внешние (выделяются из расплава на поверхность изделия, образуя защитный слой) и внутренние (остаются в расплаве).

Внешние смазки (парафин, воск и др.) необходимы для предотвращения прилипания изделия к поверхности оборудования, достижения гладкости поверхности полимерных изделий, уменьшения коэффициента трения готовых изделий; внутренние (моноэфиры глицерина, стеараты металлов и др.) предназначены для влияния на вязкость расплава. Для достижения максимального эффекта используют различные комбинации смазок. Смазки нетоксичны, но являются горючими веществами.

Пигменты – это вещества, которые используют для окрашивания ПВХ-композиций в различные цвета для придания им приятного внешнего вида, при этом прозрачность ПМ может сохраняться [11]. Применяют красители неорганического (сажа, свинцовые кроны, железно-окисные пигменты и др.) и органического (фталоцианиновые, антрахиноновые пигменты и др.) происхождения. От пигмента требуется, чтобы он не выцветал на солнце и не менял свой цвет при воздействии высоких температур [11].

Некоторые наполнители также обладают красящим эффектом.

Выбор типа смазки и пигмента зависит от рода полимера, его физического состояния или формы, а также от его совместимости с добавками.

Неорганические пигменты являются негорючими веществами, органические – горючими.

1.5. Физические свойства ПВХ

При эксплуатации изделия из ПВХ-пластиката подвергаются различным внешним воздействиям, которые оказывают влияние на физические свойства полимеров, определяемые их структурой и физическим состоянием [82].

Физические свойства подразделяют на механические, электрические, тепловые и др.

1.5.1. Физико-механические свойства ПВХ

Механические свойства, основные из которых представлены в таблице 1.3 [83], определяют степень изменения структуры, размеров, формы изделий из ПВХ при воздействии на них механических сил [82].

Таблица 1.3. Физико-механические свойства ПВХ-пластиков

Свойство	Единица измерения	Значение
Плотность	кг/м ³	1380-1400
Удельный вес	г/ см ²	1,4
Модуль упругости	МПа	2410
Модуль сдвига	МПа	867
Коэффициент Пуассона	-	0,3825
Разрушающее напряжение при растяжении	МПа	40-60
Разрушающее напряжение при сжатии	МПа	80-160
Деформация при разрыве	%	10-50

При приложении силы F к образцу с поперечным сечением площадью S возникает напряжение σ (мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием различных факторов [84]), которое выражается формулой

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1.1)$$

За единицу механического напряжения в СИ принят паскаль (Па).

Напряжение вызывает деформацию ε – изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга [85].

Существует три основных вида деформации: деформация растяжения, сдвига и всестороннего сжатия [86]. Их схематическое изображение представлено на рисунке 1.1.

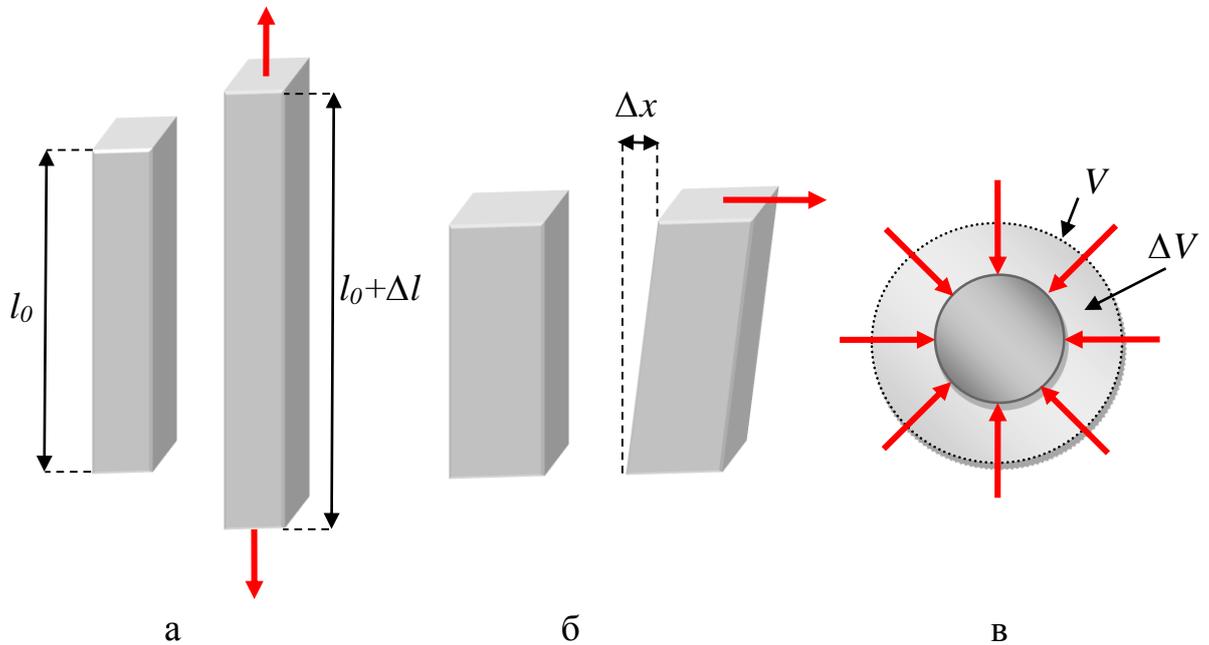


Рис. 1.1. а) деформация растяжения; б) деформация сдвига; в) деформация всестороннего сжатия

Простейшим видом деформации является деформация растяжения или сжатия. Она характеризуется абсолютным удлинением Δl , которое возникает под действием внешней силы F . Связь между Δl и F зависит как от механических свойств полимера, так и от геометрических размеров изделия (его толщины и длины).

Отношение Δl под действием приложенной силы F к первоначальной длине l_0 изделия называется осевой деформацией ε (относительным удлинением)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (1.2)$$

При растяжении $\varepsilon > 0$, при сжатии $\varepsilon < 0$.

Чем сильнее деформация полимера, тем больше изменений структуры и свойств материала она вызывает.

В зависимости от величины и продолжительности действия механических сил ПМ подвергаются деформации или разрушению, следовательно, механические свойства ПВХ-пластиков можно разделить на деформационные (характеризуют способность полимера деформироваться) и прочностные (характеризуют способность сопротивляться разрушению) [82, 86-89].

1.5.1.1. Деформационные свойства ПВХ

Важнейшими из деформационных характеристик любого полимерного материала является упругость и пластичность.

Под упругостью понимают способность полимерных материалов восстанавливать свои размеры и форму после прекращения действия внешних сил [90, 91]. Противоположным понятием является пластичность – свойство тела не возвращаться к исходному состоянию после снятия действующих на него сил [90-92].

Упругие свойства образца из ПВХ-пластика количественно оцениваются модулем упругости E (модулем Юнга), определяемым в случае действия закона Гука формулой [85, 93-96]

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (1.3)$$

Зависимость между напряжениями σ и деформациями ε является важнейшей характеристикой механических свойств ПВХ-пластиков. Графическое изображение этой зависимости – кривая деформации – является наглядной характеристикой деформационных свойств полимерных материалов. Типичные примеры зависимости $\sigma \sim \varepsilon$ для ПВХ-образцов представлены на рисунке 1.2 [82].

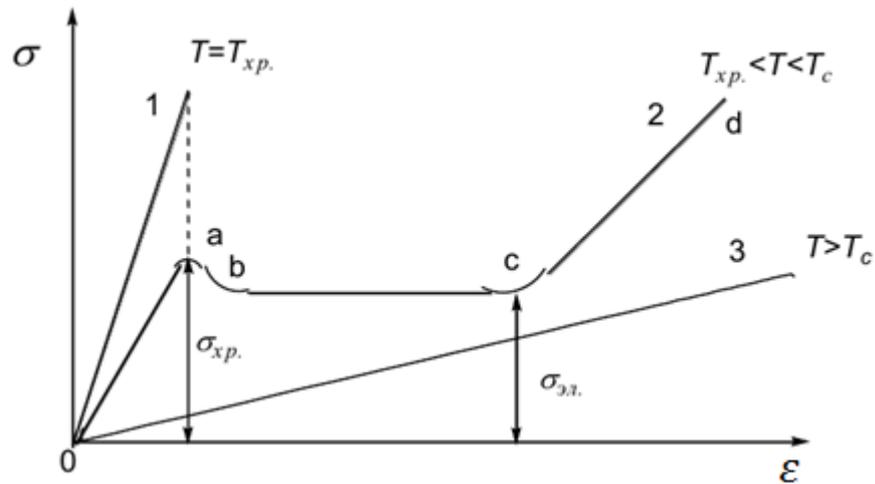


Рис. 1.2. Кривая деформации при постоянной скорости растягивания образца при разных температурах

Как видно из графика при температурах T ниже $T_{хр.}$ (температуры хрупкости) разрушению изделия из ПВХ-пластиката предшествуют небольшие деформации, которые связаны с проявлением упругости и большим значением модуля E (кривая 1). При $T_{хр.} < T < T_c$ (температура стеклования) на участке Oa полимер деформируется упруго, закон Гука соблюдается (кривая 2). Непосредственно за этим участком начинается область bc сильных растяжений образца при незначительном изменении напряжения. В части c напряжение снова начинает расти, полимер растягивается равномерно до достижения предела прочности (до разрыва в d). Таким образом, для участков Oa и cd характерна невысокая обратимая упругая деформация, для области bc – вынужденная эластичность (возникновение больших необратимых деформаций в полимере под действием механического напряжения). При этом деформация вынужденной эластичности при $T < T_c$ необратима, а при $T > T_c$ (кривая 3) образец восстанавливает форму и размеры.

Температура хрупкости и интервал вынужденной эластичности ПВХ приведены в таблице 1.4 [97].

Таблица 1.4. Температура хрупкости и интервал вынужденной эластичности ПВХ

Обозначение	Единица измерения	Значение
T_{xp}	°C	-90
T_c		81
$T_c - T_{xp}$		171

По значению величины ε полимеры делят на пластичные и эластичные [82]. Пластичные сохраняют приданные формы после снятия деформирующей силы, а эластичные возвращаются к первоначальным габаритам.

1.5.1.2. Прочностные свойства ПВХ

Прочность – это свойство материала сопротивляться разрушению под действием механического напряжения [82].

Количественно прочность оценивается значениями напряжений и деформаций при нагружении изделия из полимера, при этом рассчитываются следующие параметры:

- предел прочности – напряжение, при котором происходит хрупкое разрушение или необратимая деформация образца из ПВХ-пластиката;
- предельная деформация – максимальная деформация образца из ПВХ-пластиката перед разрушением;
- долговечность – время, в течение которого при постоянном напряжении полимер сохраняет свои прочностные свойства.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его эксплуатации. Чаще всего это разрушающее напряжение, которое рассчитывают по формулам

$$\sigma_p^{усл} = \frac{F_p}{S_0},$$

$$\sigma_p^{ист} = \frac{F_p}{S_p},$$
(1.4)

Здесь $\sigma_p^{усл}$ – условное разрушающее напряжение; $\sigma_p^{ист}$ – истинное разрушающее напряжение; F_p – сила, при которой произошло разрушение; S_0 – первоначальная площадь поперечного сечения; S_p – площадь поперечного сечения в момент разрушения.

Из-за легкости определения условных разрушающих напряжений на практике в основном их и используют.

Различают техническую (экспериментальную) и теоретическую прочность [98, 99].

Теоретическая прочность ($\sigma_{теор}$) – это прочность сплошной среды с идеальной структурой (без дефектов и повреждений) при заданной температуре (без учета теплового движения) при однородной статической деформации растяжения или сдвига, обеспечивающей равную нагруженность всех связей и их одновременный разрыв по поверхности разрушения [82]. Эта величина определяется по формуле

$$\sigma_{теор} = N \cdot E_{св} , \quad (1.5)$$

где N – число атомов или связей, приходящихся на единицу площади разрушаемого сечения полимера; $E_{св}$ – энергия связи (сила взаимодействия) двух соседних атомов.

Количественным критерием оценки технической прочности ПВХ-образцов является разрушающее напряжение σ_p , которое определяют, как правило, по деформационным кривым как предельное напряжение, при котором образец разрывается [100].

Разрушающее напряжение при растяжении (предел прочности при растяжении) определяют обычно по формуле [101]

$$\sigma_{pp} = \frac{F_p}{S_0}, \quad (1.6)$$

где F_p – нагрузка, при которой ПВХ-образец разрушился; S_0 – первоначальное поперечное сечение образца.

Аналогично разрушающее напряжение при сжатии находят по формуле [102]

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{F_p}{S_0}, \quad (1.7)$$

где F_p – нагрузка, при которой происходит разрушение или появление трещин; S_0 – первоначальное поперечное сечение ПВХ-образца.

Если из рассчитываемого материала из ПВХ-пластиката изготовить образец и разрушить его, то можно получить значение экспериментальной прочности. Как правило, экспериментальная прочность полимеров ниже теоретической [98]. Это различие объясняется дефектностью структуры материала и наличием в нем трещин. Влияние дефектов и трещин на распределение напряжений были рассмотрены в работах [103-106].

Разрушающее напряжение, возникающее в полимере перед разрывом, вызывает предельную деформацию, которая определяется по формуле (1.2), где Δl – изменение расчетной длины образца при растяжении (сжатии) в момент разрыва, l_0 – его первоначальная длина.

Зависимость долговечности многих полимеров от температуры и напряжения определяется уравнением Журкова [107-109]

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}}, \quad (1.8)$$

где τ – долговечность при постоянном растягивающем напряжении σ и постоянной температуре T ; k – постоянная Больцмана; τ_0 – период тепловых колебаний атома (лежит в пределах $10^{-12} - 10^{-13}$ с); U_0 – приблизительно равна энергии химической связи разрушающегося материала; γ – константа, определяемая из экспериментально полученных значений долговечности; σ – напряжение.

Журков С.Н. сформулировал кинетическую концепцию разрушения твердых тел. Она рассматривает разрушение как результат больших тепловых флуктуаций (случайных отклонений величин от их средних значений),

разрывающих химическую связь в полимерной цепи, а напряжение препятствует ее повторному образованию [107].

1.5.2. Теплофизические свойства ПВХ

К теплофизическим свойствам ПВХ-пластиков относят теплоемкость, тепло- и температуропроводность, тепловое расширение. Эти свойства и другие представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Теплофизические свойства ПВХ

Свойство	Единица измерения	Значение
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	1355
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·К)	0,147
Коэффициент температуропроводности	$\cdot 10^8$ м ² /с	8
Температурный коэффициент линейного расширения	$\cdot 10^{-5}$ К ⁻¹	4,6-5,2

Теплоемкость определяет количество тепла, необходимого для изменения температуры ПВХ на 1 К. Измеряется в Дж/К и находится по формуле [82]

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (1.9)$$

где ΔQ – количество теплоты, подведенной к телу для повышения температуры на величину ΔT .

Существует три вида теплоемкости [110, 111]:

- удельная – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 К, единица измерения – Дж/(кг·К);
- молярная – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моль вещества на 1 К, единица измерения – Дж/(моль·К);
- объемная – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 м³ вещества на 1 К, единица измерения – Дж/(м³·К).

Теплопроводностью называют способность полимера к выравниванию температуры путем переноса теплоты от более нагретых частей материала к менее нагретым. Характеризуется коэффициентом теплопроводности λ (удельной теплопроводностью), который определяется уравнением Фурье [112]

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (1.10)$$

где q – плотность теплового потока, ∇T – градиент температуры.

Размерность λ имеет вид Вт/(м·К).

Температуропроводность – это физическая величина, численно равная отношению коэффициента теплопроводности полимера к произведению его плотности ρ на удельную теплоемкость при постоянном давлении C_p [113, 114]. Данный параметр характеризует скорость изменения температуры в нестационарных тепловых процессах, выражается в м²/с и определяется коэффициентом a [112]

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}, \quad (1.11)$$

При изменении температуры изделия из ПВХ-пластиката изменяются также его линейные размеры и формы тела. Этот процесс называют тепловым расширением [113, 115], количественной характеристикой которого служат коэффициенты объемного α и линейного β теплового расширения при постоянном давлении

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (1.12)$$

$$\beta = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p. \quad (1.13)$$

Для изотропных тел $\alpha = 3\beta > 0$ [82]. α и β имеют размерность обратной температуры (К⁻¹, °С⁻¹).

Теплофизические свойства имеют важное значение, т.к. от них зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов из ПВХ. При создании полимерных материалов часто появляется необходимость в регулировании их теплофизических свойств. Применение различных добавок

позволяет создавать полимерные материалы, у которых эти свойства отличаются в десятки и сотни раз.

1.6. Основные причины повреждения изоляций из ПВХ-пластиката

Надежность любой кабельной продукции определяется не только заводскими характеристиками, но и его состоянием при последующей эксплуатации. Следует отметить, что при профилактических испытаниях не всегда выявляются все дефекты продукции. Очень часто кабельные линии повреждаются, что, естественно, ухудшает показатели их прочности и долговечности.

Причиной повреждения изоляции кабелей из ПВХ-пластиката может стать заводской брак, связанный, в основном, с уменьшением содержания пластификатора в пластикате. Кроме того, к неисправности кабеля могут привести механические повреждения, которые могут быть нанесены при транспортировке, хранении, прокладке или других строительных работах.

Естественное старение ПВХ, сопровождаемое потерями пластификатора, увеличением плотности и усадкой изоляции, также способствует выходу из строя кабельной линии [116]. В процессе старения ПВХ-изоляции наблюдается ухудшение показателей холодостойкости кабелей, от чего зависит их дальнейшая работоспособность. При дальнейшем использовании подобной продукции при малейших механических воздействиях на провод при температурах ниже -15°C происходит растрескивание изоляции. Помимо этого, при длительной эксплуатации электропроводов происходит изменение геометрических размеров оболочки.

Еще одной причиной повреждения кабеля может быть токовая перегрузка в электрической сети, которая может наступить, в основном, в двух случаях: при коротком замыкании вследствие контакта оголенных проводов и при механических повреждениях изоляции или по причине ее старения [9].

Помимо перечисленных причин повреждения ПВХ-изоляции кабелей еще можно отметить воздействие агрессивных условий окружающей среды, т.е.

- плохие погодные условия;
- воздействие влаги;
- перегрев от внешних источников;
- повышенное загрязнение;
- действия грызунов;
- воздействие химических веществ;
- насыщенность воздуха помещений ядовитыми газами и др.

1.7. Математическое моделирование процессов, связанных с эксплуатацией кабельных систем

На сегодняшний день применяют большое количество математических моделей для расчета различных процессов, протекающих в кабельных системах. В частности, нелинейное моделирование применяется для совершенствования качества продукта, управления процессом изготовления и эксплуатации или контроля качества выпускаемой кабельной продукции [117-123].

В работах [124-125] приведены расчеты токовой нагрузки кабельной системы, опирающиеся на методику с использованием электромагнитных и тепловых схем замещения. Анализ допустимых токовых нагрузок с использованием метода конечных элементов приведен в статье [126].

Начиная с 1970-х годов исследователи начинают активно использовать метод конечных элементов (МКЭ) для расчета температурного поля кабельных линий [125, 127-132]. В работе [129] предложена методика расчета допустимых токовых нагрузок в трехфазной системе с учетом тепловыделений в медном экране и проволочной броне из алюминиевого сплава. В статье [130] приводятся расчеты потерь температурного режима кабельной линии с применением МКЭ, при этом учитывались электромагнитное и тепловое взаимное влияние

токопроводящих жил друг на друга, особенности прокладки линий и присутствие поблизости металлических конструкций, а также расчеты для различных нестационарных, в том числе аварийных, режимов работы кабельных систем.

Немало исследований посвящено тепловым, электрическим, электромагнитным процессам в кабелях [130, 133-138]. Для проверки расчетов численные результаты сравниваются с экспериментальными данными. В работе [137] предложен способ выравнивания распределения электрического поля в муфтах силовых кабелей, основанный на сочетании геометрического и рефлексионного методов, а также приведены требования к свойствам электропроводящих материалов и конструкциям, которые обеспечивают такое выравнивание в изоляции кабельных муфт высокого напряжения. В публикациях [139-140] приводятся расчеты температурных полей электрических кабелей при воздействии полей различной физической природы.

Особое место занимают работы, в которых приводятся математические модели, описывающие процессы теплопереноса в кабельных системах [141-153]. В статье [145] разработаны двумерные стационарные математические модели для совместной задачи процессов тепломассообмена и электродинамики, возникающих в кабельных линиях, проложенных в подземном кабельном канале. Для решения использовалась теория тепломассопереноса и электромагнитодинамики, а численное моделирование проводилось в современных инженерных пакетах с помощью МКЭ. Авторы неоднократно публиковали результаты исследований в данном направлении [146-152], более полно они представлены в диссертации [153].

В отдельную категорию можно отнести работы, которые посвящены математическому моделированию процесса горения в кабельных системах [154-156]. Авторами статьи [154] предложена физико-математическая модель процесса горения электрических кабелей при групповой прокладке в тоннеле для идеализированной ситуации, но, тем не менее, с известной долей приближения отражающая общие закономерности данного явления, позволяющая оценить

ширину первоначальной области и начальную скорость движения горения в зависимости от различных параметров, таких как диаметр кабелей, их количество, толщина полимерной оболочки, скорость воздуха в тоннеле.

Следует отметить, что применение электронных вычислительных машин является важнейшим этапом развития математического моделирования. Применение компьютеров дает возможность создавать новые методы исследования кабельных систем, а также протекающих в них процессов и явлений, с учетом взаимного влияния многих одновременно действующих факторов. Следовательно, можно получать новые качественные и количественные зависимости и выявлять новые возможности для повышения эксплуатационных характеристик кабельной продукции [157-158].

Основным этапом в развитии математического моделирования стало появление и распространение современных универсальных численных методов и программных комплексов на их основе. Наиболее широко используемым в настоящее время математическим методом прочностного расчета конструкций различной природы является МКЭ. Именно он лежит в основе большинства программных комплексов, используемых при моделировании различных процессов, протекающих в кабельных системах.

Решение проблем, возникающих при расчете на прочность конструкций, выполненных из ПВХ, приводится в работе [159]. Построенные в ней определяющие законы, выбранные модели деформаций и используемые методы последовательных приближений для решения нелинейных краевых задач могут быть применены и к кабельным изоляциям, в том числе и численный расчет на прочность изделий методом конечных элементов.

Одним из показателей работоспособности кабельных изделий является устойчивость к механическим и термическим воздействиям, следовательно, к одной из таких актуальных проблем можно отнести задачу расчета температурных полей и напряженно-деформированного состояния (НДС) электрических кабелей и проводов различной конфигурации [160-162].

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

В последнее время все более жесткими становятся требования, предъявляемые к прочностным характеристикам кабельной продукции. Уделяется много внимания проблемам защиты кабелей и проводов от различных повреждений, которые могут привести к нарушению работоспособности. Возникает необходимость в разработке и использовании новых методов исследований, создания по их результатам рецептур более долговечных в эксплуатации изоляций. Важное значение приобретает разработка моделей, наиболее полно учитывающих физико-механические факторы, непосредственно влияющие на прочностные характеристики кабельной продукции. Экспериментальное изучение зачастую требует дорогостоящих, сложных и длительных испытаний, поэтому на сегодняшний день актуальным является их численное моделирование.

Достаточно перспективным направлением является использование МКЭ в исследовании свойств полимерных материалов. Проведение численных экспериментов на основе данного метода позволяет значительно сократить время исследований, а также уменьшить финансовые затраты, что является немаловажным фактором при изучении и моделировании свойств полимеров и изделий из них.

Таким образом, из анализа литературы следует, что оценка результатов воздействия реальных нагрузок на виртуальную модель кабельного покрытия при помощи численного эксперимента на стадии проектирования, а также подбор таких параметров изоляций на основе ПВХ-пластиката, при которых кабельная продукция будет более работоспособной и долговечной, на сегодняшний день является весьма актуальной задачей.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОСЛОЙНОЙ И ТРЕХСЛОЙНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ ПВХ-ПЛАСТИКАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

2.1. Постановка задачи

Перечисленные в первой главе факторы эксплуатации кабельных проводов и возможные угрозы его повреждения позволяют смоделировать наиболее опасные с точки зрения их работоспособности ситуации. Как отмечалось выше, одним из основных факторов разрушения кабельной изоляции является достижение предельных значений напряжений и деформаций в процессе эксплуатации. В связи с этим рассмотрим наиболее известные модели механики деформируемого твердого тела (МДТТ), основанные на законе упругости Гука и простых законах пластического течения [163-176], позволяющие находить эти важные параметры.

Как известно, напряженно-деформированное состояние для кабельных покрытий представляет собой совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на кабельное покрытие внешних нагрузок, температурных полей и других факторов [177]. Знание количественных значений этих параметров для кабельной изоляции позволяет сделать заключение о возможности эксплуатации такой системы.

Хорошо известно, что задача определения НДС пространственной конструкции при действии статических нагрузок является краевой задачей МДТТ, которая сводится к решению системы классических уравнений теории упругости Коши-Навье [93], состоящей из:

- трех дифференциальных уравнений равновесия (уравнений Навье)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = 0, \quad i, j = 1, 2, 3; \quad (2.1)$$

- шести уравнений, устанавливающих связь между перемещениями и деформациями (уравнения Коши) при малых значениях деформаций

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2.2)$$

- шести определяющих уравнений, связывающих значения тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} в рамках закона Гука

$$\sigma_{ij} - K\theta\delta_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} - \frac{\theta}{3} \delta_{ij} \right). \quad (2.3)$$

В приведенных выше выражениях и далее по повторяющимся индексам ведется суммирование от 1 до 3.

Здесь σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно; X_i – компоненты вектора объемных (массовых) сил; u_i – компоненты вектора перемещений; K , G – константы, характеризующие способность упругой среды сопротивляться всестороннему сжатию (растяжению) и сдвигу (изменению формы); $\frac{\theta}{3} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3}$ – средняя деформация; δ_{ij} – тензор Кронекера; $i, j = 1, 2, 3$.

Система (2.1)-(2.3) полностью определяет статическое НДС трехмерной модели кабельной изоляции. Однако она весьма неудобна для исследования конкретных задач по определению НДС кабельных сетей. По этой причине из системы (2.1)-(2.3) исключим все неизвестные, кроме перемещений $u_i = u_i(x_1, x_2, x_3)$. В результате вычислений получим следующую систему из трех дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения Ляме) вида

$$G\Delta u_i + (\lambda + G) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + X_i = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.4)$$

Здесь

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2};$$

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G > 0;$$

$$\theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}.$$

Для решения системы (2.4) необходимо задать граничные условия, соответствующие типичным нагрузкам кабельной изоляции. Наиболее приемлемыми для расчета НДС кабельных покрытий являются граничные условия смешанного типа

$$\begin{aligned} u_i &= u_i^0, x \in S_1; \\ \sigma_{ij}n_j &= \sigma_i^0, x \in S_2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Здесь u_i^0 – заданные перемещения на границе области S_1 ; n_j – компоненты единичного вектора нормали к граничной поверхности S_2 ; σ_i^0 – заданные напряжения на границе той же области S_2 ; x – точка в трехмерном пространстве; $S = S_1 \cup S_2$ – полная поверхность тела.

Таким образом, задача определения НДС кабельных сетей под действием внешних нагрузок сводится к решению системы трех дифференциальных уравнений (2.4) и граничных условий (2.5). При этом следует учитывать, что для некоторых полимеров (материалов с явно выраженными пластическими свойствами) закон Гука нарушается даже при малых деформациях. Для расчета НДС таких изоляций, предложенная модель непригодна и требуются ее видоизменения, учитывающие пластические (нелинейные) свойства ПВХ материалов. Последнее обстоятельство, т.е. наличие пластических свойств, характерно при эксплуатации кабельных систем при высоких температурах.

Выделим отдельно постановку температурных задач теории упругости, т.к. тепловые нагрузки на кабель являются наиболее актуальными. Если справедлив экспериментальный закон Дюгамеля-Неймана о линейном расширении объема сплошной среды в результате действия температуры, то закон Гука в этих условиях видоизменяется и запишется в виде [178]

$$\sigma_{ij} - K(\theta - 3\alpha T)\delta_{ij} = 2G \left(\varepsilon_{ij} - \frac{\theta}{3} \delta_{ij} \right). \quad (2.6)$$

Здесь α – коэффициент линейного расширения упругой сплошной среды под действием температурного поля $T=T(x_1, x_2, x_3)$.

Подставляя выражения (2.6) в уравнения (2.4), получим систему трех дифференциальных уравнений в частных производных с правой частью, зависящей от градиента температурного поля T и коэффициента линейного расширения α .

2.2. Метод конечных элементов как универсальное средство численного анализа математических моделей

При современном уровне развития математических методов получение аналитических решений для практически интересных пространственных задач типа (2.4)-(2.5) возможно только в специальных случаях и поэтому для их решения чаще используют численные методы.

Одним из самых распространенных и универсальных современных методов численного решения задач механики сплошных сред является метод конечных элементов (МКЭ), ставший за последние десятилетия основным методом решения всех задач, допускающих математическое моделирование [179].

Идея МКЭ заключается в следующем [179-183]. Область, в которой ищется решение, разбивается на конечное число подобластей (элементов). В каждом элементе задают аппроксимирующую функцию (как правило, это полином), равную нулю вне этого элемента и выражающую значения неизвестного решения через значения решения в узлах сетки конечных элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений, количество которых совпадает с числом неизвестных значений разыскиваемой функции в узлах. Количество конечных элементов ограничивается только техническими возможностями ЭВМ и в современных задачах достигает иногда нескольких миллионов. Это позволяет представить реальные физико-механические свойства ПВХ-изоляций наиболее полно, что делает МКЭ универсальным инструментом для анализа различных условий эксплуатации сетей.

Следует отметить, что МКЭ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими численными методами, а именно [183]:

- свойства материалов смежных элементов могут быть различными, благодаря чему этот метод может быть применен к составным, т.е. составленным из различных материалов объектам;
- размеры сетки конечных элементов по мере необходимости можно сгустить в тех областях, где требуется наиболее точный анализ НДС изоляции;
- алгоритм метода конечных элементов позволяет создать общие программы для решения задач различных по сложности классов;
- можно использовать нерегулярные расчетные сетки, позволяющие покрывать конечными элементами области со сложной геометрической формой и, следовательно, с большими градиентами решений;
- можно учесть индивидуальные физико-механические свойства каждого конечного элемента (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности и т.д.), что очень важно при расчете многослойных кабельных ПВХ-покрытий.

Недостатком МКЭ является необходимость использования больших ресурсов ЭВМ для достижения требуемой точности численного решения, однако быстрое развитие вычислительной техники делает этот недостаток не таким актуальным.

2.3. Алгоритм метода конечных элементов для решения пространственных задач теории упругости

Алгоритм решения задачи (2.4)-(2.5) осуществляется в несколько этапов. На первом этапе для системы (2.4) строится функционал вида [178]

$$\begin{aligned} \Phi(u, v, w) = & \iiint_V \frac{K\theta^2 + 2Ge_{ij}e_{ij}}{2} dV - \iiint_V (Xu + Yv + Zw) dV \\ & - \iint_{S_2} (\sigma_1^0 u + \sigma_2^0 v + \sigma_3^0 w) dS, \end{aligned} \quad (2.7)$$

для которого уравнения (2.4) являются уравнениями типа Эйлера-Лагранжа.

В выражении (2.7) e_{ij} – девиатор тензора деформаций; σ_i^0 – заданные напряжения на поверхности S_2 ; X, Y, Z – компоненты объемных сил по осям координат соответственно.

Функционал (2.7) имеет смысл упругой энергии деформации (первое слагаемое (2.7)) и потенциала объемных и поверхностных сил (второе и третье выражения в (2.7)).

На втором этапе ищется минимум функционала (2.7) методом конечных элементов, для чего область разбивается на тетраэдральные конечные элементы. В этом случае (2.7) может быть представлен как сумма функционалов, построенных на каждой пространственной конечной области, занимаемой элементом. Для вычисления значения функционала в каждом элементе задают аппроксимирующую функцию.

Обычно, внутри тетраэдрального элемента неизвестные функции u, v, w задаются в виде полинома первой степени [172, 182].

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z, \\ v = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 z, \\ w = \gamma_1 + \gamma_2 x + \gamma_3 y + \gamma_4 z. \end{cases} \quad (2.8)$$

Неизвестные константы $\alpha_1, \dots, \alpha_4, \beta_1, \dots, \beta_4, \gamma_1, \dots, \gamma_4$ можно определить из решения систем алгебраических уравнений

$$\begin{cases}
 u_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i, \\
 u_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j, \\
 u_k = \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k + \alpha_4 z_k, \\
 u_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 z_m, \\
 \\
 v_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 y_i + \beta_4 z_i, \\
 v_j = \beta_1 + \beta_2 x_j + \beta_3 y_j + \beta_4 z_j, \\
 v_k = \beta_1 + \beta_2 x_k + \beta_3 y_k + \beta_4 z_k, \\
 v_m = \beta_1 + \beta_2 x_m + \beta_3 y_m + \beta_4 z_m, \\
 \\
 w_i = \gamma_1 + \gamma_2 x_i + \gamma_3 y_i + \gamma_4 z_i, \\
 w_j = \gamma_1 + \gamma_2 x_j + \gamma_3 y_j + \gamma_4 z_j, \\
 w_k = \gamma_1 + \gamma_2 x_k + \gamma_3 y_k + \gamma_4 z_k, \\
 w_m = \gamma_1 + \gamma_2 x_m + \gamma_3 y_m + \gamma_4 z_m.
 \end{cases} \quad (2.9)$$

Здесь

$(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k), (x_m, y_m, z_m)$ – координаты вершин тетраэдра (рис. 2.1);

$(u_i, v_i, w_i), (u_j, v_j, w_j), (u_k, v_k, w_k), (u_m, v_m, w_m)$ – значения неизвестного решения в узлах i, j, k, m (вершинах тетраэдра).

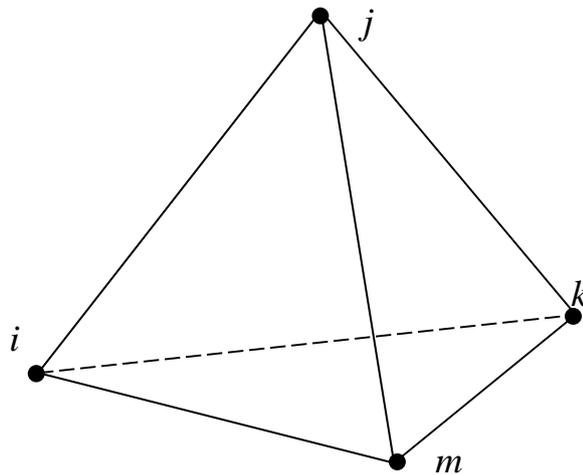


Рис. 2.1. Разбиение трехмерной области тетраэдральными конечными элементами

Из уравнений (2.9) следует, что определитель системы пропорционален объему тетраэдра и, следовательно, при разбиении области на элементы тетраэдр

не должен быть «вырожденным», т.е. точки i, j, k, m не должны располагаться на одной плоскости. Заметим, что разбиение области на пространственные элементы производится автоматически с использованием специальных программ, однако исследователю приходится часто вмешиваться в этот процесс. Например, если в каких-то областях решение меняется быстро, т.е. градиент решения имеет большие значения, то необходимо сгущать в этих местах сетку конечных элементов.

На третьем этапе решения строятся матрицы жесткости каждого конечного элемента, которые связывают узловые перемещения элемента с узловыми внешними силами этого же элемента

$$k \cdot z = r, \quad (2.10)$$

где $k = k_{ij}$ – матрица жесткости, $z = z_i$ – вектор узловых перемещений и $r = r_i$ – вектор узловой нагрузки отдельного конечного элемента, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, n$, n – число степеней свободы системы.

Каждый элемент матрицы k_{ij} обозначает реакцию в i -той связи от перемещения j -той связи.

Матрица k – симметричная, т.е.

$$k_{ij} = k_{ji}. \quad (2.11)$$

Глобальная матрица жесткости – матрица K – формируется для нахождения узловых перемещений всей рассматриваемой области при заданной внешней нагрузке по формуле

$$K \cdot Z = R. \quad (2.12)$$

Перед этим этапом получают матрицу жесткости системы – результат непосредственного суммирования матриц жесткостей всех конечных элементов, на которые была разбита рассматриваемая область.

Следующий шаг – это задание граничных условий, в результате учета которых глобальная система разрешающих уравнений (2.12) сформируется в виде, достаточном для получения искомого решения. В результате решения

системы (2.12) заданные граничные перемещения узлов сохраняются и при этом порядок системы (2.12) не меняется [179].

Решение полученной системы разрешающих алгебраических уравнений, результатом которого будет вычисление вектора узловых перемещений, завершает алгоритм нахождения решения задачи (2.4)-(2.5) методом конечных элементов.

2.4. Моделирование НДС в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластикатов

Использование современных программных пакетов для расчета НДС методом конечных элементов позволяет учесть практически все факторы, оказывающие воздействие на НДС кабельной изоляции, в том числе повысить точность аппроксимации краевых условий задачи. Кроме того, реализация МКЭ на компьютере позволяет полностью автоматизировать формирование исходных данных в соответствии с типом решаемой задачи. В настоящее время существует ряд программных комплексов, предназначенных для трехмерного проектирования изделий любой сложности и различного назначения. На современном этапе развития вычислительной техники в класс решаемых задач таких систем входит инженерный анализ изделий – их прочность, устойчивость, теплопередача, частотный и термический анализы и т.д. Указанные выше комплексы позволяют конструктору кабельных сетей выбрать наиболее оптимальные свойства изоляции на стадии ее виртуального проектирования.

Математическое моделирование и оценка НДС кабельной изоляции на основе ПВХ-пластиката проводились с применением программного комплекса «Solid Works». При этом следовали следующей последовательности действий:

1. формулировка цели и предмета исследования;
2. проектирование трехмерной модели исследуемого кабеля (задание не только геометрических размеров, но и подбор физико-механических характеристик материалов);

3. создание на ее основе конечно-элементной модели с автоматическим разбиением области на множество пространственных тетраэдров; вмешательство, если это необходимо, в этот процесс и сгущение сетки конечных элементов в местах быстрого изменения решения;
4. задание внешних нагрузок и граничных условий для виртуальной модели;
5. проведение расчетов по определению НДС и анализ полученных результатов;
6. уточнение первоначальной модели по результатам численного анализа.

Используя данный алгоритм можно решать оптимизационные задачи, в том числе и многокритериальные, т.е. задачи, в которых преследуется не одна, а несколько целей.

Следует отметить, что проектируемые трехмерные модели должны обладать следующими необходимыми свойствами:

- универсальностью, т.е. наиболее полно отображать характеристики реальных кабельных изделий;
- адекватностью, т.е. отражать нужные свойства кабельной изоляции с погрешностью не выше заданной;
- экономичностью, т.е. требовать разумных затрат ресурсов ЭВМ: памяти и времени при ее численном анализе.

Численные эксперименты с использованием математического моделирования и вычислительной техники обладают рядом преимуществ перед традиционными методами исследования, а именно, имеет место:

- достаточно широкий диапазон условий, в которых исследуется кабельная система: на компьютере можно смоделировать такие условия эксплуатации, которые в реальном эксперименте реализовать практически невозможно;
- сокращение продолжительности испытаний кабельной продукции, расходов на дорогостоящее оборудование, количества пробных

экспериментов: можно в короткий период времени с минимальными финансовыми затратами получить необходимую информацию об оптимальных эксплуатационных характеристиках и прочностных параметрах исследуемых изделий при различных вариантах нагружения, в том числе – экстремальных;

- исключение влияния некоторых побочных явлений, которые нельзя устранить в реальном эксперименте.

Таким образом, анализ литературы по теме показал, что математическое моделирование с помощью вычислительной техники является мощным теоретическим средством исследования, а зачастую и единственным способом получения информации, например, в случаях, когда по каким-либо объективным причинам реализация физического эксперимента не представляется возможным.

2.4.1 Анализ НДС однослойного покрытия электрического кабеля при действии всестороннего давления

Рассмотрим наиболее важные с практической точки зрения типы ПВХ-изоляций, начиная с однослойных покрытий. В качестве типичной нагрузки выберем внешнее давление, которое имитирует гидростатическую нагрузку на ПВХ-изоляцию в процессе ее практической эксплуатации.

Напряженно-деформированное состояние, как отмечалось выше, представляет собой совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на кабельное покрытие внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

НДС определяется расчетными и экспериментальными методами в виде распределения напряжений, деформаций и перемещений и является основанием для оценки статической прочности кабеля на протяжении всего срока его эксплуатации.

При исследовании НДС однослойной кабельной изоляции при действии на нее всестороннего давления использовался метод конечных элементов, который

дает возможность достаточно полно учесть реальные условия работы, распределение внешних нагрузок, физико-механические свойства используемых материалов.

В качестве примера рассмотрим силовую кабель с использованием слоя поливинилхлорида в качестве оболочки для медных жил и отсутствием соответствующего защитного покрова в виде металлической брони поверх оболочки.

Характеристики моделируемого кабельного покрытия приведены в таблице 2.1. [184]

Таблица 2.1. Геометрические параметры виртуальной модели
ПВХ-изоляции

Параметр	Единицы измерения	Значение
Напряжение	кВ	0,66
Сечение жилы	мм ²	16
Номинальная толщина изоляции из ПВХ-пластиката	мм	0,9

При построении конечно-элементной модели однослойное кабельное покрытие было заменено эквивалентным цилиндром (рис. 2.2), параметры которого приведены в таблице 2.2 [185-186].

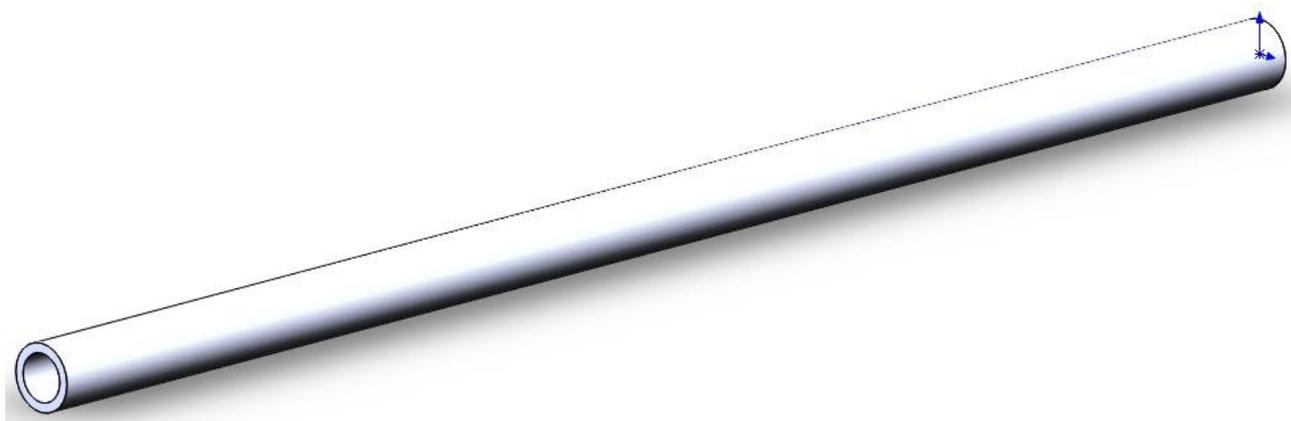


Рис. 2.2. Модель однослойной изоляции кабеля

Таблица 2.2. Параметры виртуальной трехмерной модели однослойной ПВХ-изоляции кабеля

Свойство	Единицы измерения	Значение
Сечение жилы	мм ²	16
Номинальная толщина ПВХ изоляции	мм	0,9
Модуль упругости	·10 ⁹ Н/м ²	24,1
Коэффициент Пуассона	-	0,3825
Массовая плотность	кг/м ³	1300
Модуль сдвига	·10 ⁶ Н/м ²	866,7
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,147
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	1355

После создания виртуальной модели объекта она автоматически разбивается на тетраэдральные конечные элементы. Результаты такого разбиения представлены на рисунке 2.3.

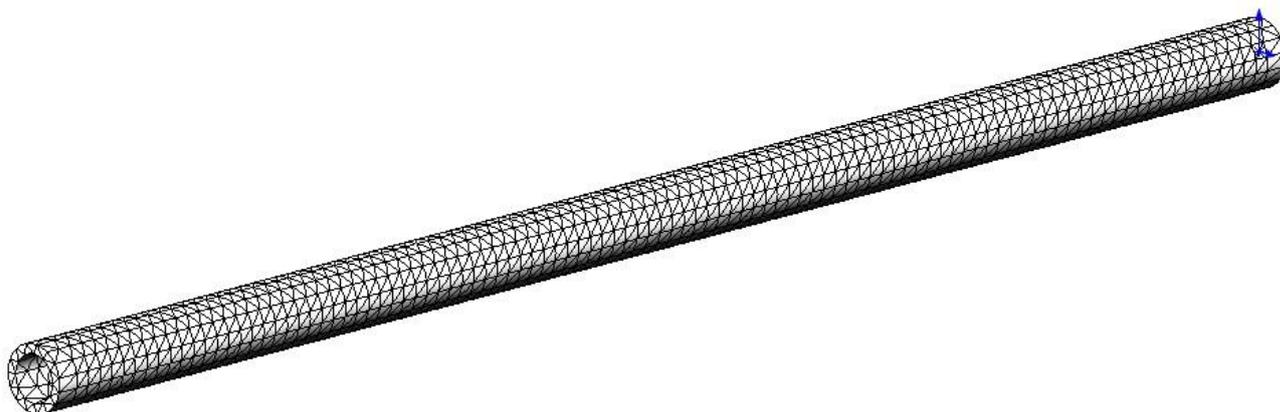


Рис. 2.3. Трехмерная модель однослойной ПВХ-изоляции кабеля с нанесенной сеткой конечных элементов

Информацию о конечно-элементной сетке можно получить из таблицы 2.3.

Применительно к этому объекту была смоделирована ситуация гидростатического сжатия (в данном примере к внешней границе прикладывалось давление в 500 кПа, примерное давление, испытываемое кабелем при погружении на глубину около 40 метров [187]). В ходе решения поставленной задачи методом конечных элементов были получены результаты, показанные на нижеследующих рисунках.

Таблица 2.3. Параметры сетки конечных элементов

Тип сетки	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка
Точки Якобиана	4 Точки
Размер элемента, мм	1,43286
Качество сетки	Высокое
Всего узлов	15254
Всего элементов	7622
Максимальное соотношение сторон	5,6504
% элементов с соотношением сторон < 3	98,7
% элементов с соотношением сторон > 10	0
% искаженных элементов (Якобиан)	0

Из рисунка 2.4 видно, что напряжение в однослойном покрытии постепенно увеличивается ближе к внутренней границе, что также продемонстрировано на следующем графике (рис. 2.5), из которого видно, что кольцевые напряжения убывают в направлении от внутреннего радиуса к внешнему приблизительно равномерно по линейному закону.

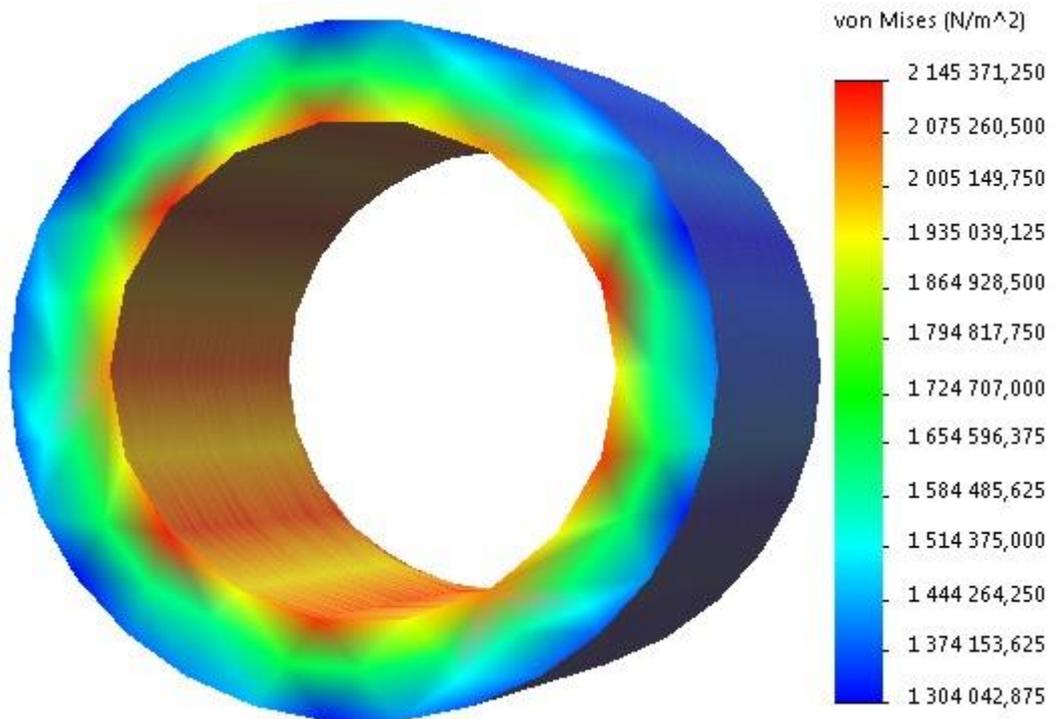


Рис. 2.4. Распределение кольцевых напряжений в однослойной ПВХ-изоляции при действии гидростатического сжатия

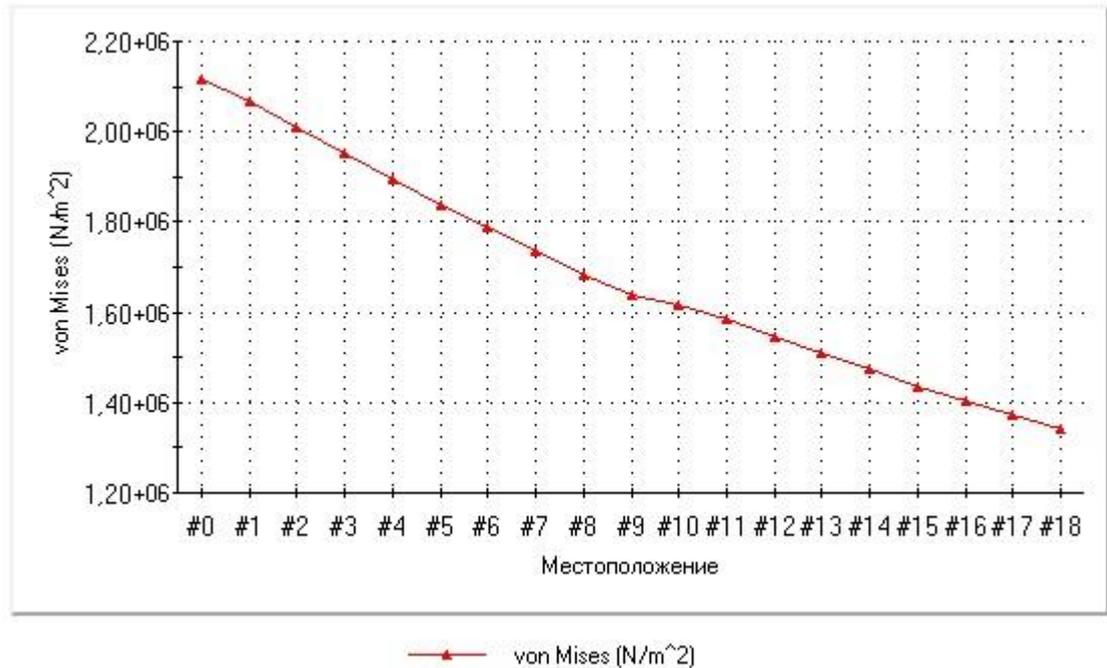


Рис. 2.5. График распределения кольцевых напряжений по радиусу однослойной ПВХ-изоляции при действии гидростатического сжатия

Из рисунков 2.6 и 2.7 видно, что деформация меняется приблизительно по аналогичному закону.

Усредненное значение перемещений по толщине изоляции, вызванные такими деформациями, приблизительно равно $1,821 \cdot 10^{-3}$ мм.

На рисунках 2.8-2.11 соответственно показаны сечения моделей ПВХ-изоляции кабелей и графики распределения напряжений и деформаций при увеличении внешнего давления в 1,5 раза. При этом наблюдается увеличение значений указанных характеристик, а также перемещений изоляции относительно первоначального размера примерно в 1,5 раза. Это связано с линейностью задачи, т.е. упругими свойствами ПВХ-изоляции и является подтверждением правильности используемого программного комплекса.

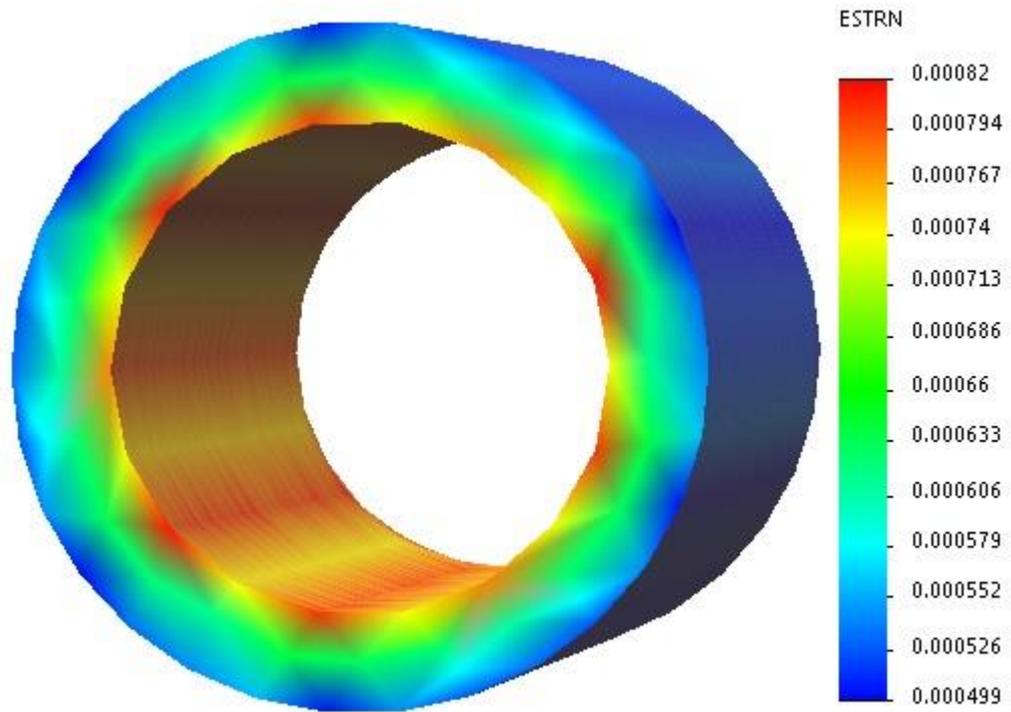


Рис. 2.6. Распределение кольцевых деформаций в однослойной ПВХ-изоляции при действии гидростатического сжатия

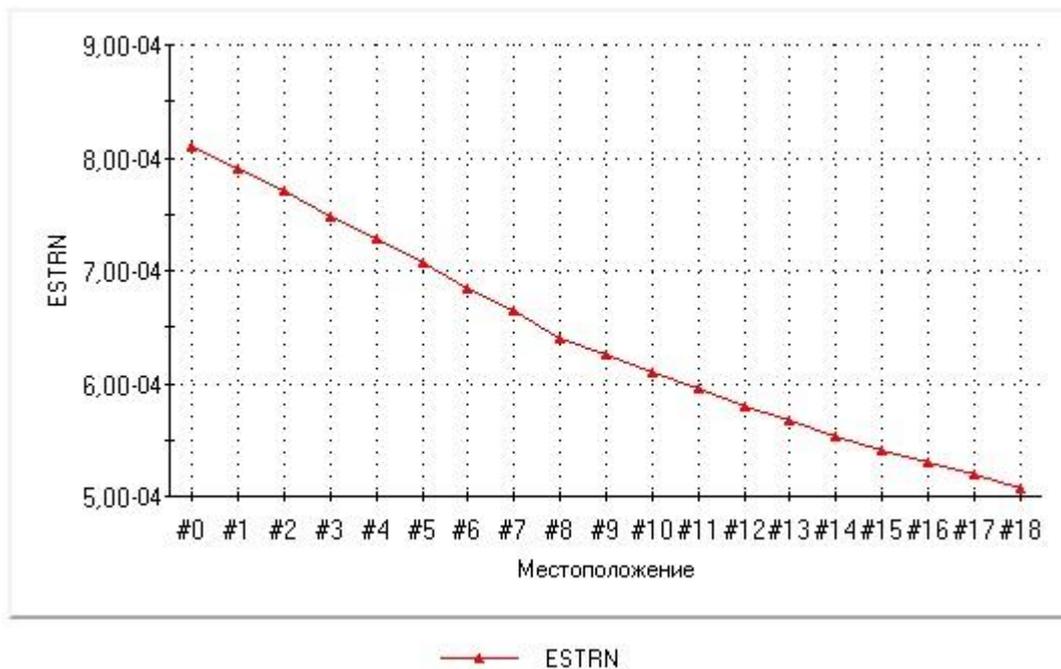


Рис. 2.7. График распределения кольцевых деформаций по радиусу однослойной ПВХ-изоляции при действии гидростатического сжатия

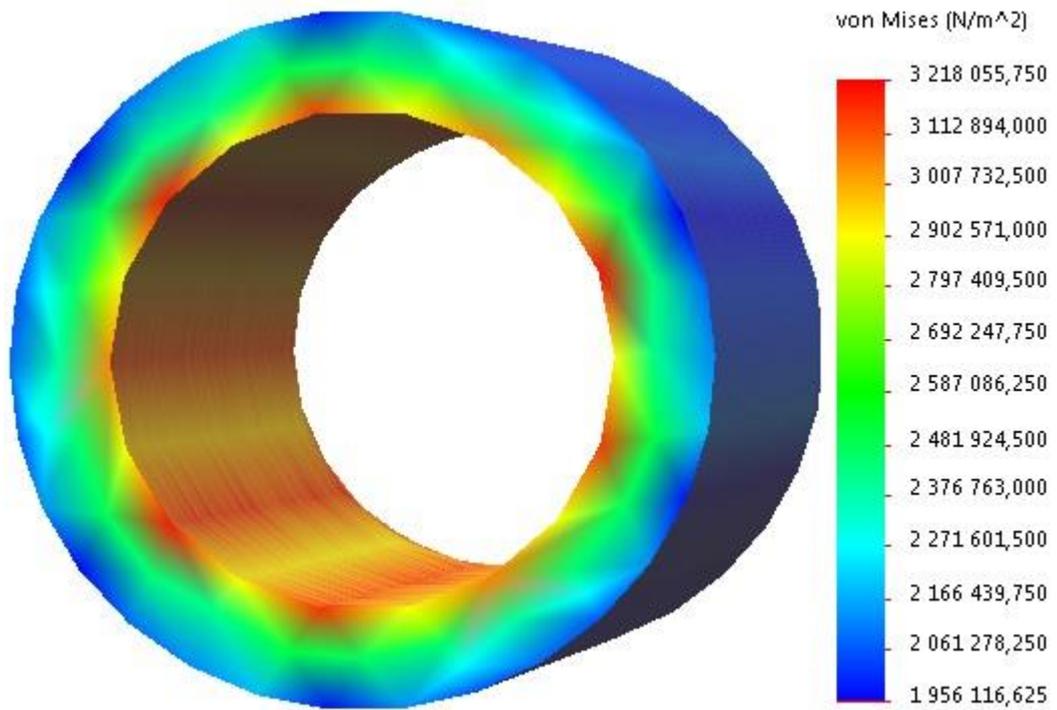


Рис. 2.8. Распределение кольцевых напряжений в однослойной ПВХ-изоляции при увеличении гидростатической нагрузки в 1,5 раза

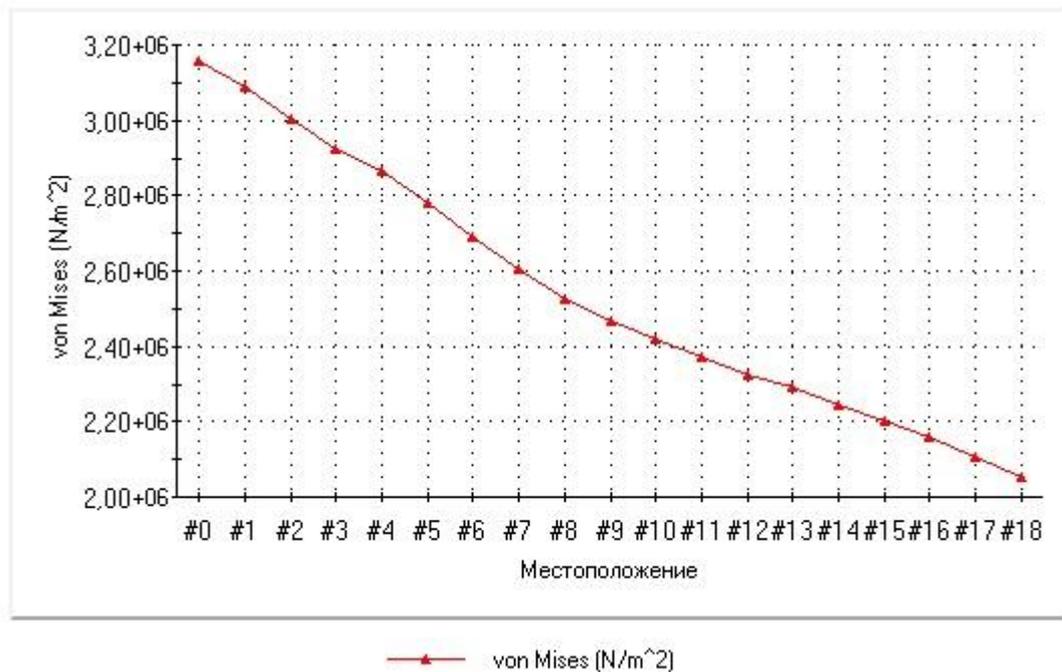


Рис. 2.9. График распределения кольцевых напряжений по радиусу однослойной ПВХ-изоляции при увеличении гидростатической нагрузки в 1,5 раза

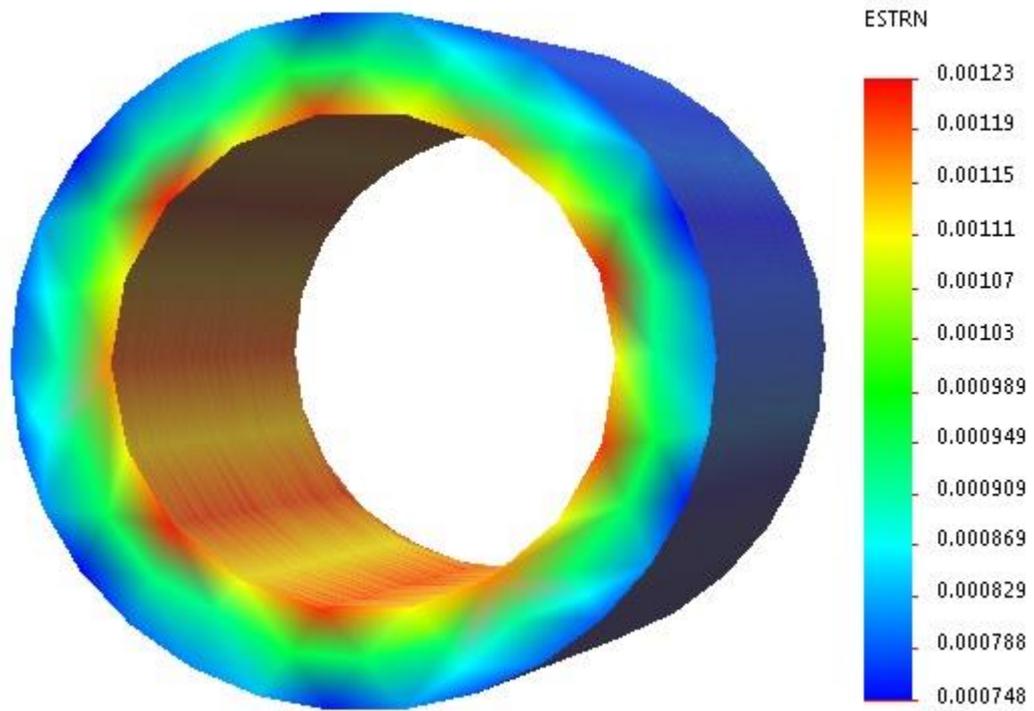


Рис. 2.10. Распределение кольцевых деформаций в однослойной ПВХ-изоляции при увеличении гидростатической нагрузки в 1,5 раза

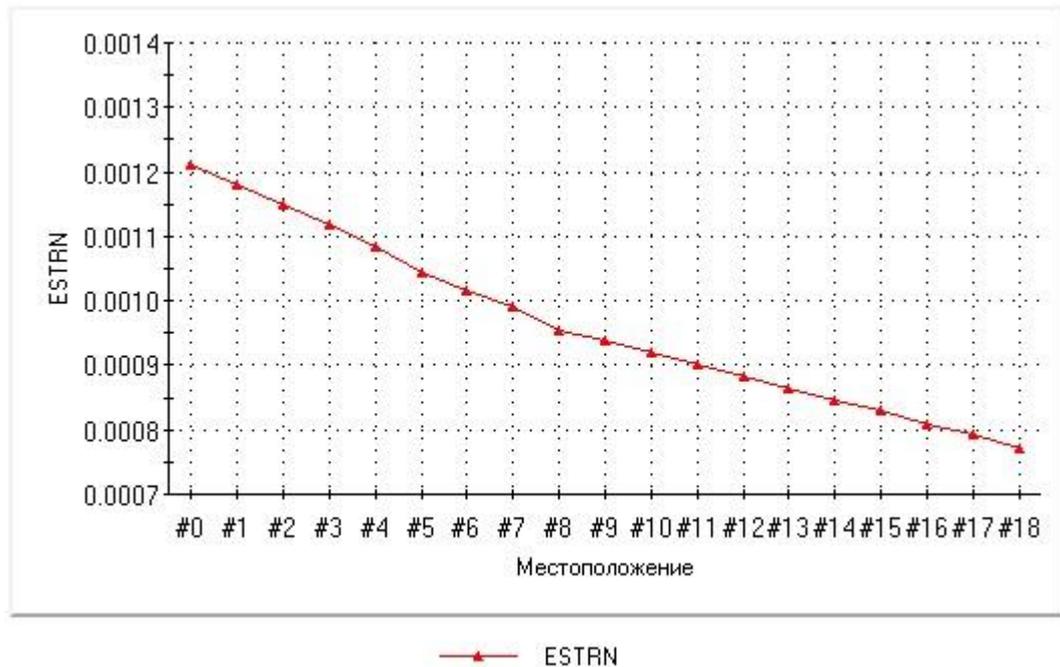


Рис. 2.11. График распределения кольцевых деформаций по радиусу однослойной ПВХ-изоляции при увеличении гидростатической нагрузки в 1,5 раза

Из полученных результатов можно сделать вывод о неравномерном распределении напряжений и деформаций при действии на кабель наружного давления. Наибольшие значения напряжения и деформации возникают у внутреннего радиуса изоляции.

Таким образом, с увеличением нагрузок повышается риск нарушения целостности кабельной изоляции, что в свою очередь может привести к повреждениям токопроводящей жилы. Кроме того, проведенные расчеты НДС кабельной системы, свойства которой подчиняются линейному закону Гука, при возрастающих внешних нагрузках показали правильность работы сложного комплекса программ, основанного на методе конечных элементов.

2.4.2. Анализ НДС трехслойного покрытия электрического кабеля при действии всестороннего давления

Как известно, коэффициент Пуассона и модуль Юнга полностью характеризуют свойства любого изотропного упругого изделия. Первый показатель равен нулю для абсолютно хрупких материалов и 0,5 – для абсолютно несжимаемых, а второй, также называемый модулем упругости, характеризует сопротивление материала растяжению (сжатию) при упругой деформации; чем он больше, тем меньше уровень деформаций, и, следовательно, материал более жесткий [188]. По этой причине при моделировании трехслойных кабельных ПВХ-изоляций будем подбирать оптимальные значения именно этих двух характеристик при постоянстве остальных теплофизических свойств (таблица 2.4); при этом предполагаем, что модуль упругости и коэффициент Пуассона увеличиваются по направлению от внутреннего слоя к внешнему.

Численное исследование проведем на конечно-элементных моделях трехслойных ПВХ-изоляций электрического кабеля с соотношениями толщин слоев 1:1:1, 1:2:1, 3:2:1, 1:2:3.

Таблица 2.4. Физико-механические свойства 3d-модели
трехслойной ПВХ-изоляции

Свойство	Единицы измерения	Значения		
		Внутренний слой	Средний слой	Внешний слой
Модуль упругости	10^6 Н/м ²	6	1350	2700
Коэффициент Пуассона	-	0,3825	0,394	0,471
Коэффициент теплового расширения	10^{-6} (1/К)	54		
Модуль сдвига	10^6 Н/м ²	866,7		
Массовая плотность	кг/м ³	1300		
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,147		
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	1355		

Первый этап математического моделирования состоял в создании компьютерных геометрических моделей трехслойных изоляций – они показаны с учетом геометрических моделей пропорций на рис. 2.12.

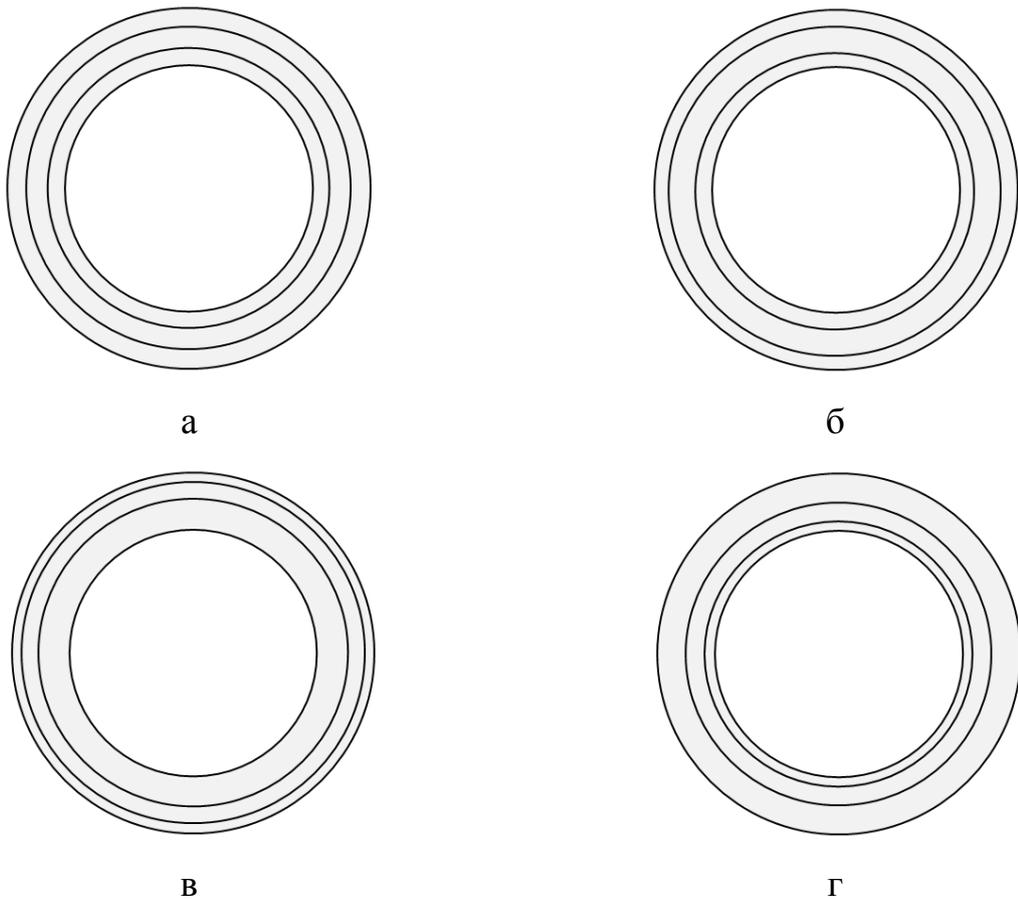


Рис. 2.12. Сечения виртуальных моделей трехслойных ПВХ-изоляций кабеля с соотношениями слоев изоляции: а) 1:1:1; б) 1:2:1; в) 3:2:1; г) 1:2:3

На втором этапе была создана конечно-элементная модель для всех четырех вариантов, которая являлась основой для расчета напряженно-деформированного состояния. На рис. 2.13 показана сетка конечных элементов для геометрического соотношения толщин слоев изоляции 1:2:3. Для этого был использован, как и ранее, пространственный тетраэдральный элемент с аппроксимацией линейными функциями вида (2.7).

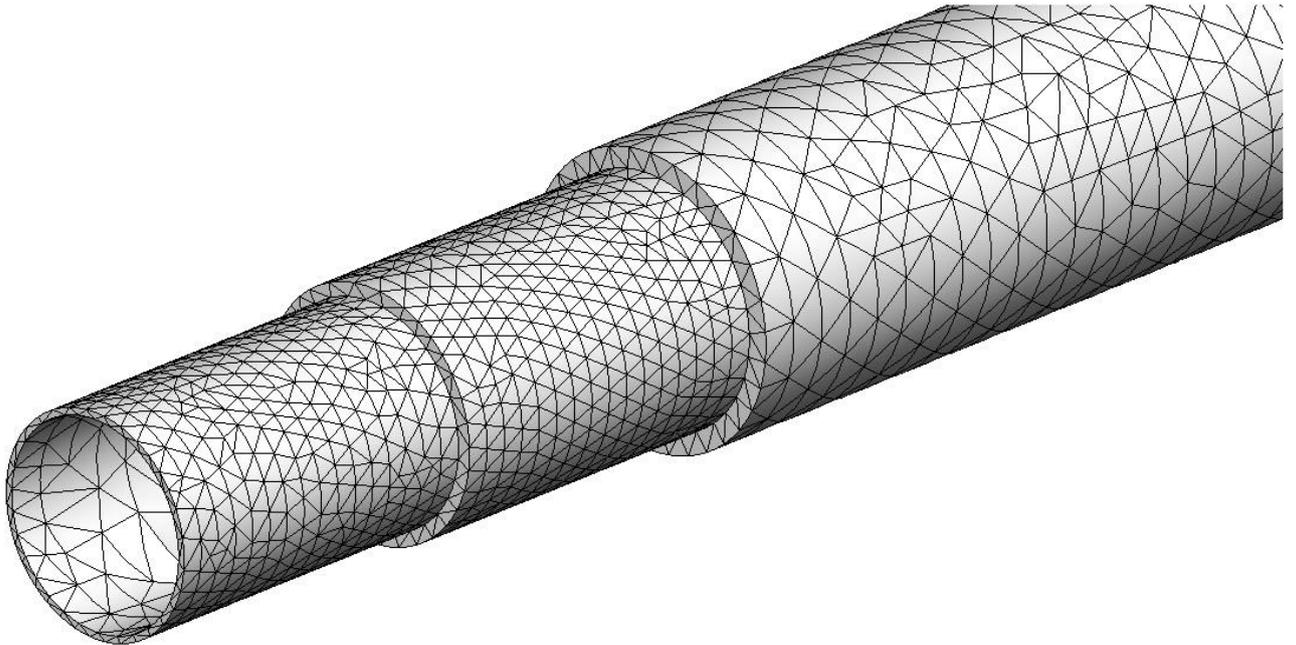


Рис. 2.13. Трехмерная модель трехслойной ПВХ-изоляции кабеля с нанесенной сеткой конечных элементов

Подробная информация о построенной сетке конечных элементов приводится в таблице 2.5.

Как и в случае с однослойным покрытием была смоделирована внешняя нагрузка в виде давления, равного 500 КПа, и при этом были получены следующие результаты.

Для трехслойного кабеля наибольшие напряжения, в отличие от однородного покрытия, наблюдаются во внешнем слое (рис. 2.14), при этом линейность их распределения нарушается для всех четырех моделей.

На рисунке 2.15 показано изменение кольцевых деформаций в трехслойной оболочке. Из анализа графиков видно, что распределение

деформаций, как и в случае однослойного покрытия, происходит приблизительно по линейному закону, причем наибольшие деформации также наблюдаются во внутреннем слое изоляции.

Перемещения слоев пространственных моделей трехслойных кабельных ПВХ-изоляций различной конфигурации, а также максимальные и минимальные значения напряжений и деформаций представлены в таблице 2.6.

Таким образом, в результате численных исследований установлено, что при одинаковых нагрузках наиболее устойчивой к внешнему давлению будет изоляция из ПВХ-пластиката с геометрическим соотношением толщин слоев 1:2:3.

Таблица 2.5. Параметры сетки конечных элементов для трехслойных
ПВХ-изоляций

Показатель	Значения			
	1:1:1	1:2:1	3:2:1	1:2:3
Тип сетки	Сетка на твердом теле			
Используемое разбиение	Стандартная сетка			
Точки Якобиана	4 Точки			
Размер элемента, мм	1,01167 ± 0,0505837	1,34047 ± 0,0670234	1,33918 ± 0,066959	0,992868 ± 0,0496434
Качество сетки	Высокое			
Всего узлов	47920	47863	48770	48946
Всего элементов	30436	30387	31497	31100
Максимальное соотношение сторон	14,69	32,933	26,236	28,236
% элементов с соотношением сторон < 3	19,2	31,1	30,5	48
% элементов с соотношением сторон > 10	0,174	0,434	0,219	0,511
% искаженных элементов (Якобиан)	0	0	0	0

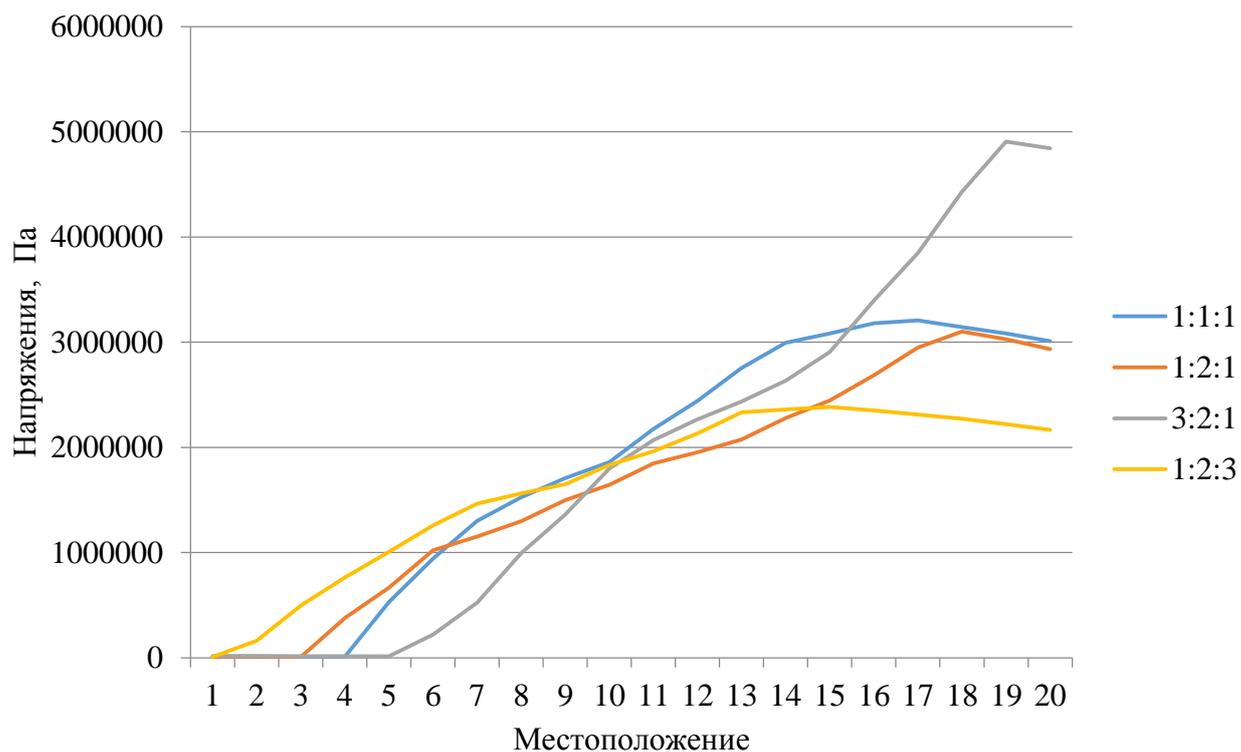


Рис. 2.14. График распределения кольцевых напряжений по радиусу трехслойной изоляции при действии гидростатического сжатия для различных вариантов соотношения толщин слоев

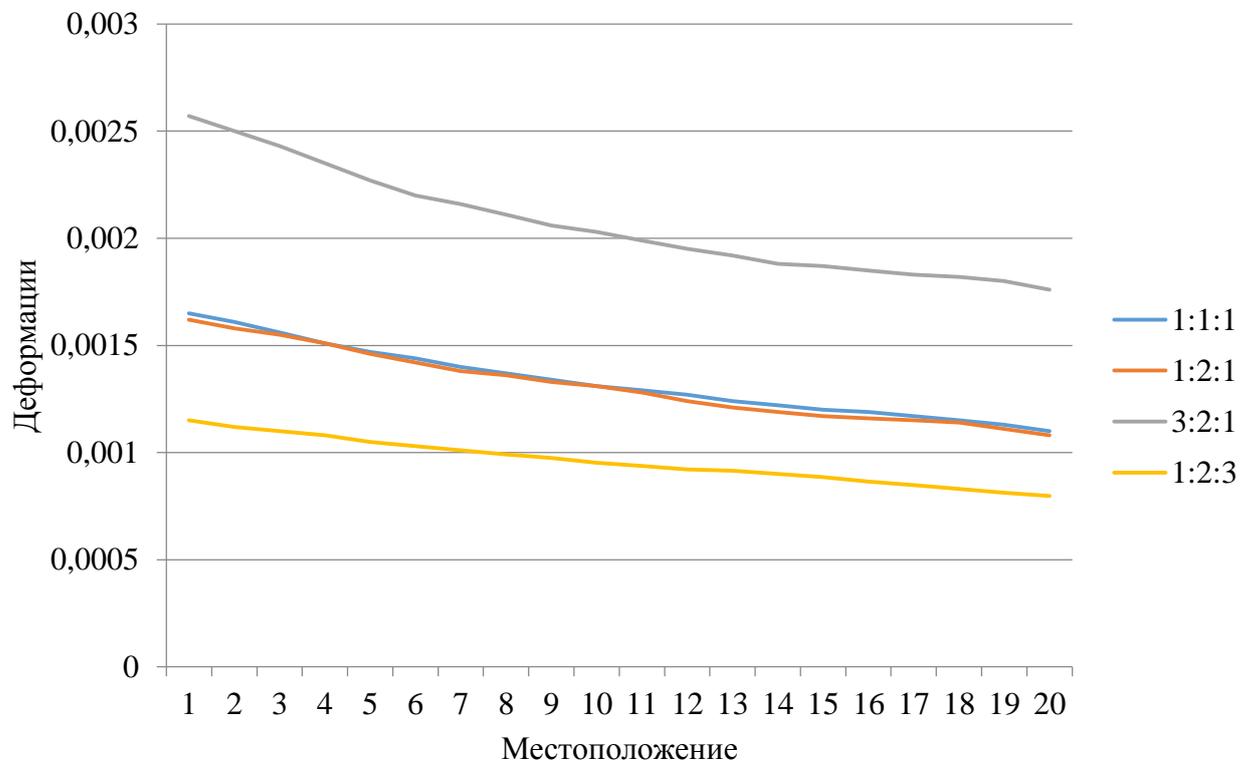


Рис. 2.15. График распределения кольцевых деформаций по радиусу трехслойной изоляции при действии гидростатического сжатия для различных вариантов соотношения толщин слоев

Таблица 2.6. Максимальные и минимальные значения напряжений, деформаций и перемещений в трехслойных ПВХ-изоляциях

Показатель	Единицы измерения	Соотношение слоев ПВХ изоляции			
		1:1:1	1:2:1	3:2:1	1:2:3
Максимальное значение напряжения	Н/м ²	3344,4·10 ³	3281,8·10 ³	5070,7·10 ³	2470,6·10 ³
Минимальное значение напряжения		9,659·10 ³	9,541·10 ³	14,373·10 ³	7,199·10 ³
Максимальное значение деформации	-	1,701·10 ⁻³	1,665·10 ⁻³	2,639·10 ⁻³	1,246·10 ⁻³
Минимальное значение деформации		1,095·10 ⁻³	1,065·10 ⁻³	1,701·10 ⁻³	0,788·10 ⁻³
Максимальное значение перемещения	мм	0,0102	0,034117	0,060723	0,0068
Минимальное значение перемещения		0,00255	0,00337	0,0269	0,00183

Таким образом, численные исследования и сравнительный анализ расчетов НДС одно- и трехслойных ПВХ-изоляций кабельной продукции при действии всестороннего наружного давления показал, что:

1. более долговечной и работоспособной будет кабельная изоляция из ПВХ-пластиката с геометрическим соотношением толщин слоев 1:2:3 и физико-механическими параметрами, приведенными в таблице 2.3;
2. оптимальный выбор характеристик слоев ПВХ-покрытия на этапе виртуального проектирования с учетом сравнительного анализа полученных числовых результатов позволит увеличить срок эксплуатации электрического кабеля;
3. наиболее неудачной конструкцией трехслойной кабельной ПВХ-изоляции является вариант подбора слоев вида 3:2:1, т.к. в этом

случае, как следует из таблицы 2.6, максимальные значения напряжений в два раза выше по сравнению с конструктивным решением вида 1:2:3.

2.4.3. Оптимальный выбор параметров многослойной изоляции электрических кабелей, обеспечивающих наибольшую устойчивость по прочности к действиям внешних механических нагрузок

Как было отмечено выше, из четырех вариантов кабельной изоляции на основе ПВХ-пластиката с различными геометрическими соотношениями толщин слоев более оптимальной является конфигурация 1:2:3. Однако прочностные характеристики однослойной изоляции, как показали расчеты, не сильно отличаются от свойств указанного варианта. В связи с этим проведем еще серию численных экспериментов с целью подбора оптимальных физико-механических параметров неоднородной оболочки из ПВХ-пластиката.

Рассмотрим несколько вариантов подбора значений коэффициента Пуассона и модуля упругости в слоях (таблица 2.7). Полученные результаты приведем в виде графиков зависимости кольцевых напряжений и деформаций от радиуса (рис. 2.16 и 2.17).

Таблица 2.7. Варианты подбора значений коэффициента Пуассона и модуля упругости

Вариант №	Коэффициент Пуассона			Модуль упругости, 10^6 Н/м ²		
	Внутренний слой	Средний слой	Внешний слой	Внутренний слой	Средний слой	Внешний слой
1	0,3825	0,394	0,471	6	1350	2700
2	0,471	0,394	0,471	2700	1350	2700
3	0,471	0,394	0,471	2700	1850	2700
4	0,471	0,427	0,385	2700	1850	2700
5	0,427	0,394	0,3825	2700	2050	2700

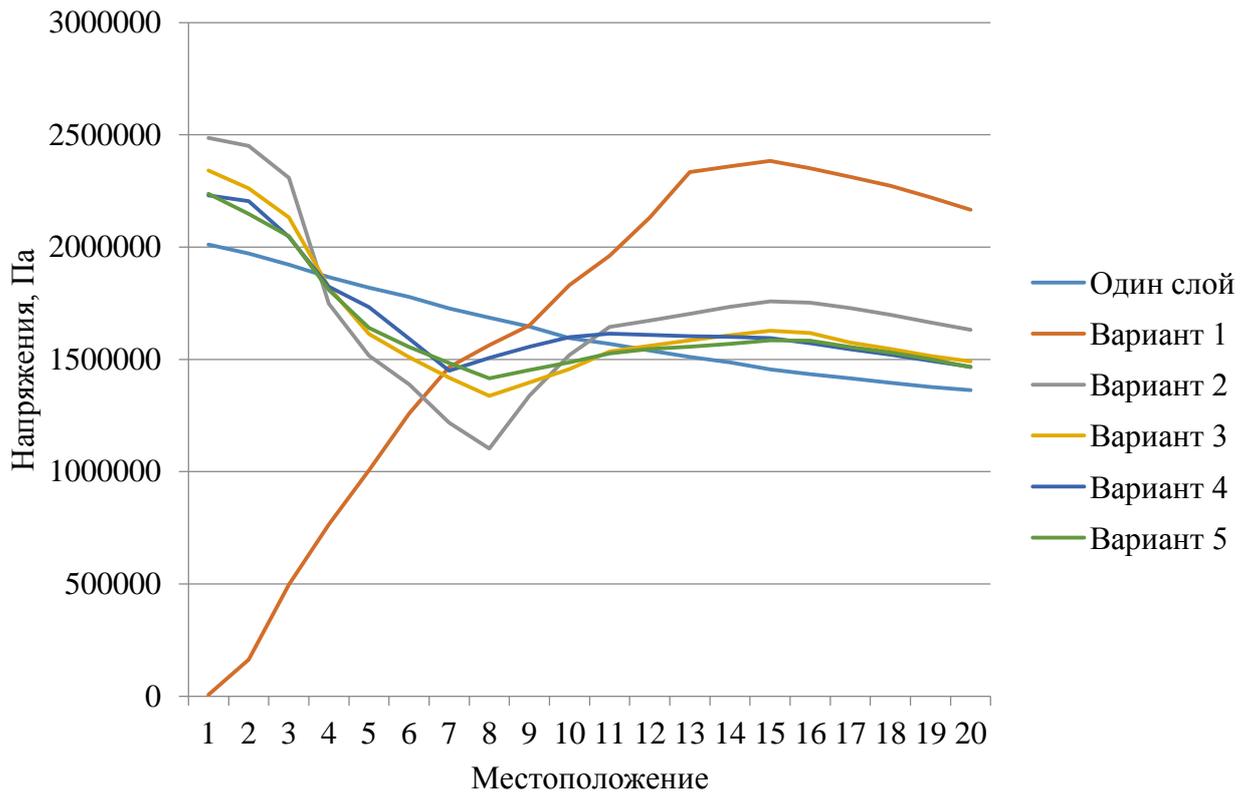


Рис. 2.16. Графики распределения кольцевых напряжений по направлению от внутреннего радиуса к внешнему

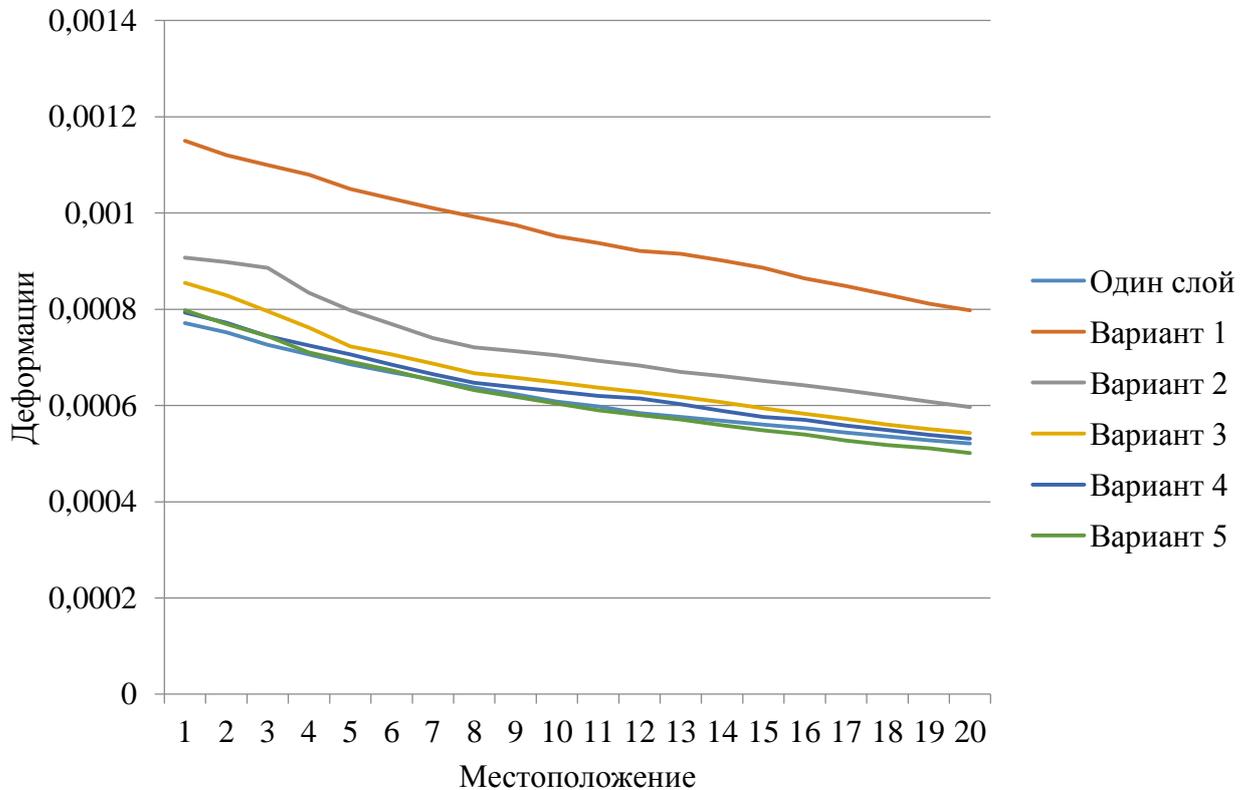


Рис. 2.17. Графики распределения кольцевых деформаций по направлению от внутреннего радиуса к внешнему

Соответствующие условиям задачи значения перемещений приведены в следующей таблице 2.8.

Таблица 2.8. Максимальные и минимальные значения перемещений в различных типах ПВХ-изоляций

Тип изоляции	Перемещение	
	Максимальное значение, мм	Минимальное значение, мм
Рассматриваемая однослойная изоляция	0,0422	0,00447
Вариант трехслойной изоляции № 1	0,0068	0,00183
Вариант трехслойной изоляции № 2	0,00649	0,00122
Вариант трехслойной изоляции № 3	0,00637	0,00101
Вариант трехслойной изоляции № 4	0,00645	0,00124
Вариант трехслойной изоляции № 5	0,00622	0,000984

Сравнительный анализ результатов из рисунков 2.16-2.17 и таблицы 2.8 показал, что наиболее оптимальной конфигурацией изоляции является вариант № 5, параметры которого приведены в таблице 2.9. При этом варианте уровень НДС кабельного покрытия наиболее низок.

Таблица 2.9. Физико-механические свойства трехслойной ПВХ-изоляции

Свойство	Единицы измерения	Значения		
		Внутренний слой	Средний слой	Внешний слой
Модуль упругости	10^6 Н/м ²	2700	2050	2700
Коэффициент Пуассона	-	0,427	0,394	0,3825
Коэффициент теплового расширения	10^{-6} (1/К)	54		
Модуль сдвига	10^6 Н/м ²	866,7		
Массовая плотность	кг/м ³	1300		
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,147		
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	1355		

Таким образом, в результате численного анализа подобраны геометрические и физико-механические параметры трехслойного полимерного покрытия электрических кабелей, которые будут обладать наибольшей по прочности устойчивостью к внешним нагрузкам по сравнению с однослойной ПВХ-изоляцией. Следует отметить, что этот вывод имеет силу при оценке прочности ПВХ-покрытий от действия внешнего давления.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

На основании математического и компьютерного моделирования НДС в многослойных ПВХ-изоляциях электрических кабелей показано, что при разумном выборе закона изменения коэффициента теплового расширения в трехслойных изоляциях электрических кабелей колебания кольцевых напряжений по своду будут небольшими и такие оболочки из ПВХ-пластиката будут более работоспособными и долговечными, чем аналогичные с однородными свойствами.

Компьютерное моделирование НДС ПВХ-изоляций с различными геометрическими соотношениями толщин слоев, а именно 1:1:1, 1:2:1, 3:2:1, 1:2:3, и вычислительный эксперимент показали, что более долговечной и работоспособной будет кабельная изоляция из ПВХ с соотношением толщин слоев 1:2:3.

Кроме того, численными экспериментами показано, что можно подобрать физико-механические параметры слоев, способные продлить срок эксплуатации кабельного покрытия за счет минимизации колебания кольцевых напряжений в слоях.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ОДНО- И ТРЕХСЛОЙНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ПВХ-ИЗОЛЯЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК

3.1. Оптимальный выбор закона изменения коэффициента линейного расширения в кабельных ПВХ-изоляциях

При внутреннем нагреве кабеля от электрического тока возникают напряжения, связанные с бóльшим расширением слоев, близких к радиусу $r = a$ (рис. 3.1) по сравнению с внешними областями, т.к. внутренние слои давят на соседние, которые имеют меньшую температуру и, естественно, меньшее расширение. Сказанное относится к материалам с постоянным коэффициентом теплового расширения. Если попытаться подобрать во внутренней части изоляции из ПВХ-пластиката среду с меньшим коэффициентом теплового расширения, чем в наружной области $r = b$, то указанное выше давление «внутренних слоев» ослабнет, и слой оболочки от тепловой нагрузки будет напряжен по всему своду почти равномерно. Это, естественно, продлит работоспособность кабельной изоляции, подверженной тепловому воздействию от металлического сердечника, по которому идет электрический ток.

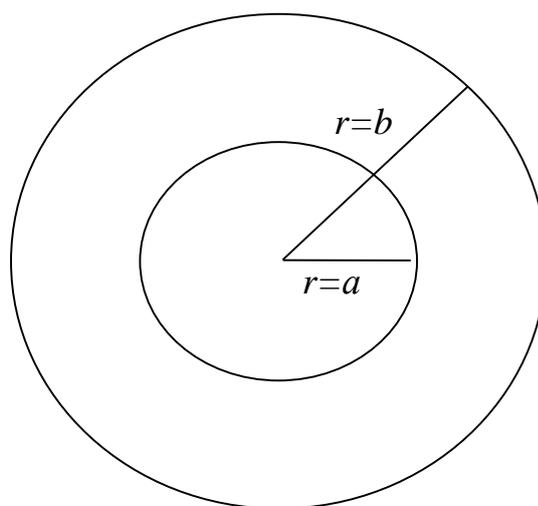


Рис. 3.1. Сечение кабеля

Заметим, что наиболее значительными, а, следовательно, более опасными (как и в случае действия внутреннего давления) являются кольцевые напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ [93, 174, 189-190], которые могут вызвать разрушение изоляции. С другой стороны, радиальные напряжения могут вызвать отслоения элементов изоляции, что также весьма нежелательно. Рассмотрим в связи с этим задачу определения кольцевых напряжений в цилиндрических кабельных конструкциях, возникающих под действием радиально распределенных температурных полей.

Известно, что кольцевое напряжение $\sigma_{\theta\theta}$, возникающее под действием заданного температурного поля $T = T(r)$, $a \leq r \leq b$, имеет вид [93, 191]

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{r^2} \left(\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \alpha T dr + \int_a^r \alpha T dr - \alpha T r^2 \right). \quad (3.1)$$

Здесь E – модуль Юнга, α – коэффициент теплового расширения.

Как отмечалось выше, вопрос состоит в том, чтобы выбрать такой закон изменения $\alpha(r)$ при заданной функции $T(r)$, чтобы $\frac{d\sigma_{\theta\theta}}{dr} = 0$. Это означает, что в этом случае кольцевые напряжения по своду кабеля будут постоянными и такой слой будет более долговечным в процессе эксплуатации.

Если провести операцию дифференцирования по формуле (3.1), то задача, очевидно, сведется к решению интегро-дифференциального уравнения относительно функции $\alpha = \alpha(r)$. Такой путь является достаточно сложным и в связи с этим в работе предлагается простой способ выбора зависимости $\alpha = \alpha(r)$ при известном законе $T = T(r)$, который обеспечивает более равномерное распределение кольцевых напряжений $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}(r)$, чем в случае постоянного значения коэффициента теплового расширения.

Потребуем, чтобы изменения функций $\sigma_{\theta\theta}(r)$ в области $a \leq r \leq b$ подчинялись условию

$$|\sigma_{\theta\theta}(b) - \sigma_{\theta\theta}(a)| \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

т.е. будем минимизировать колебания кольцевых напряжений в точках $r = a$, $r = b$.

Если удастся подобрать соответствующий закон изменения $\alpha = \alpha(r)$ по условию (3.2), то колебания кольцевых напряжений по своду будут небольшими и такая оболочка из ПВХ-пластиката будет более работоспособной и долговечной, чем аналогичная с однородными по коэффициенту теплового расширения свойствами.

Подставляя в формулу (3.1) значения $r = a$, $r = b$ по критерию (3.2), получим:

$$\begin{aligned}
 & |\sigma_{\theta\theta}(b) - \sigma_{\theta\theta}(a)| = \\
 & = \left| \left(\frac{E(a^2 + b^2)}{b^2(b^2 - a^2)} - \frac{E(a^2 + b^2)}{a^2(b^2 - a^2)} \right) \int_a^b \alpha T r dr + \frac{E}{b^2} \int_a^b \alpha T r dr + \right. \\
 & \left. + \alpha(a)T(a)a^2 - \alpha(b)T(b)b^2 \right| \rightarrow \min.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Проведя вычисления, можно показать, что

$$|\sigma_{\theta\theta}(b) - \sigma_{\theta\theta}(a)| = |\alpha(a)T(a)a^2 - \alpha(b)T(b)b^2|. \tag{3.4}$$

Потребуем, чтобы

$$\frac{\alpha(a)}{\alpha(b)} = \frac{b^2 T(b)}{a^2 T(a)}. \tag{3.5}$$

Тогда $|\sigma_{\theta\theta}(b) - \sigma_{\theta\theta}(a)| = 0$, т.е. кольцевые напряжения в точках $r = a$, $r = b$ становятся одинаковыми и их изменения возможно только по толщине свода кабельной ПВХ-изоляции.

Из формулы (3.5) следует, что в случае внутреннего нагревания ($T(a) = T_0$, $T(b) \approx 0$) коэффициент линейного расширения в окрестности $r = a$ должен быть небольшим, возрастая при $r \rightarrow b$. В случае внешнего нагрева ($T(a) \approx 0$, $T(b) = T_0$), наоборот, коэффициент теплового расширения должен быть почти нулевым при $r = b$ и расти при $r \rightarrow a$. Наконец, в случае тонких покрытий ($b \approx a$) законы изменения $\alpha(r)$ и $T(r)$ в точках $r = a$, $r = b$ связаны обратным соотношением

$$\frac{\alpha(a)}{\alpha(b)} = \frac{T(b)}{T(a)}. \quad (3.6)$$

Предложенная методика подбора значений коэффициента теплового расширения по заданному температурному полю $T(r)$, обеспечивающая равенство кольцевых напряжений в точках $r = a, r = b$ может быть обобщена на три точки, т.е. можно потребовать, чтобы эти напряжения были одинаковыми, например, в точках $r = a, r = \frac{a+b}{2}, r = b$. Очевидно, предлагаемый алгоритм при этом остается в силе. Ясно, что при таком выборе коэффициента теплового расширения распределение кольцевых напряжений будет практически более равномерным, чем в случае постоянства указанного параметра. Очевидно также, что указанные рекомендации будут полезны при конструировании многослойных изоляций как на стадии виртуального проектирования, так и в процессе их практической эксплуатации.

3.2. Моделирование температурных нагрузок в однослойных кабельных изоляциях

Для обоснования достоверности предложенной выше методики дадим расчет кольцевых напряжений кабельных изоляций на основе ПВХ-пластикатов при действиях температурного поля по своду покрытия, имитирующего в какой-то степени короткое замыкание в кабельном изделии.

Как отмечалось в первой главе, одной из причин повреждения кабеля может стать перегрузка в электрической сети, приводящая к короткому замыканию. Этот процесс сопровождается значительным возрастанием температуры токопроводящей жилы. Из-за резкого увеличения силы тока и малой длительности самого замыкания выделяющаяся в проводнике тепловая энергия не успевает передаться в окружающую среду и практически полностью идет на нагрев жилы и окружающего покрытия. Естественно, такой кратковременный нагрев проводника может привести к различным аварийным ситуациям [192-194].

Компьютерное моделирование поставленной задачи проведем по следующему алгоритму (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Схема моделирования температурных нагрузок на изоляцию кабеля

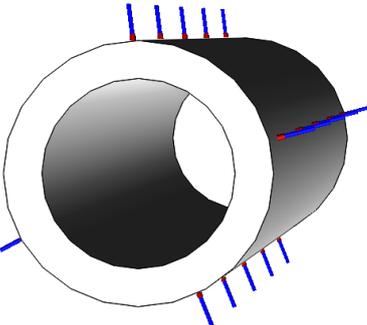
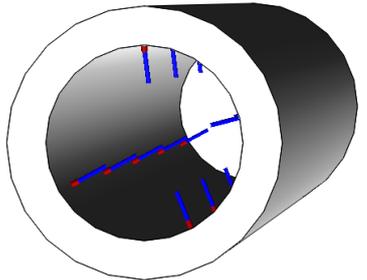
Для проведения численных экспериментов, максимально приближенных к реальным условиям, зададим теплофизические свойства 3d-модели, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Теплофизические свойства однослойной ПВХ-изоляции

Свойство	Единицы измерения	Значение
Модуль упругости	10^6 Н/м ²	2410
Коэффициент Пуассона	-	0,3825
Модуль сдвига	10^6 Н/м ²	866,7
Массовая плотность	кг/м ³	1300
Коэффициент теплового расширения	10^{-6} (1/К)	70
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,147
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·К)	1355

Согласно [195] для проводов и кабелей с пластмассовой изоляцией температура жил, как правило, не должна превышать 65°C , поэтому смоделируем процесс короткого замыкания, сопровождаемый резким нагревом кабельной изоляции при постоянной внешней температуре (нагрузки представлены в таблице 3.2).

Таблица 3.2. Тепловые нагрузки на ПВХ-изоляцию

	Изображение	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Внешняя грань		20
Внутренняя грань		70

Произведем разбиение трехмерной модели на конечные элементы различного качества (таблица 3.3).

В процессе решения поставленной задачи методом конечных элементов были получены следующие результаты.

При внутреннем нагреве цилиндра, имитирующего температурные нагрузки на кабельную изоляцию во время короткого замыкания, возникают напряжения (в таблице 3.4 приведены промежутки их распределения для различных разбиений), которые вызывают расширение изоляции. Заметим, что при этом их распределение крайне неравномерно (на рис. 3.3 приведены результаты для достаточно густой сетки конечных элементов).

Таблица 3.3. Параметры сетки конечных элементов

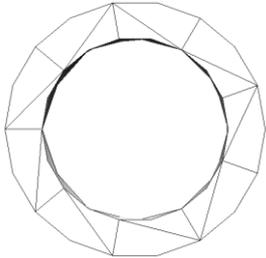
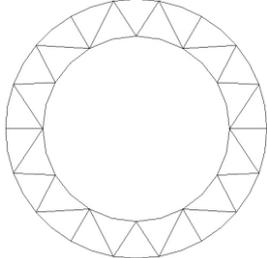
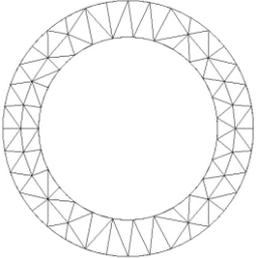
Показатель	Значение		
	Сетка черного качества	Стандартная сетка	Густая сетка высокой точности
Сечение модели			
Тип сетки	Сетка на твердом теле		
Используемое разбиение	Стандартное		
Точки Якобиана	4 точки		
Размер элемента, мм	2,34334	1,17167	0,585835
Качество сетки	Черновое	Высокое	Высокое
Всего узлов	657	16033	95676
Всего элементов	1917	8085	57044
Максимальное соотношение сторон	4,7996	4,8569	3,9039
% элементов с соотношением сторон < 3	82,1	98,7	100
% элементов с соотношением сторон > 10	0	0	0
% искаженных элементов (Якобиан)	0	0	0

Таблица 3.4. Значения напряжений

Показатель	Значение		
	Сетка черного качества	Стандартная сетка	Густая сетка высокой точности
Минимальное значение напряжения, кН/м ²	658,343	274,04	120,444
Максимальное значение напряжения, кН/м ²	4 785,126	11 722,593	10 757,048

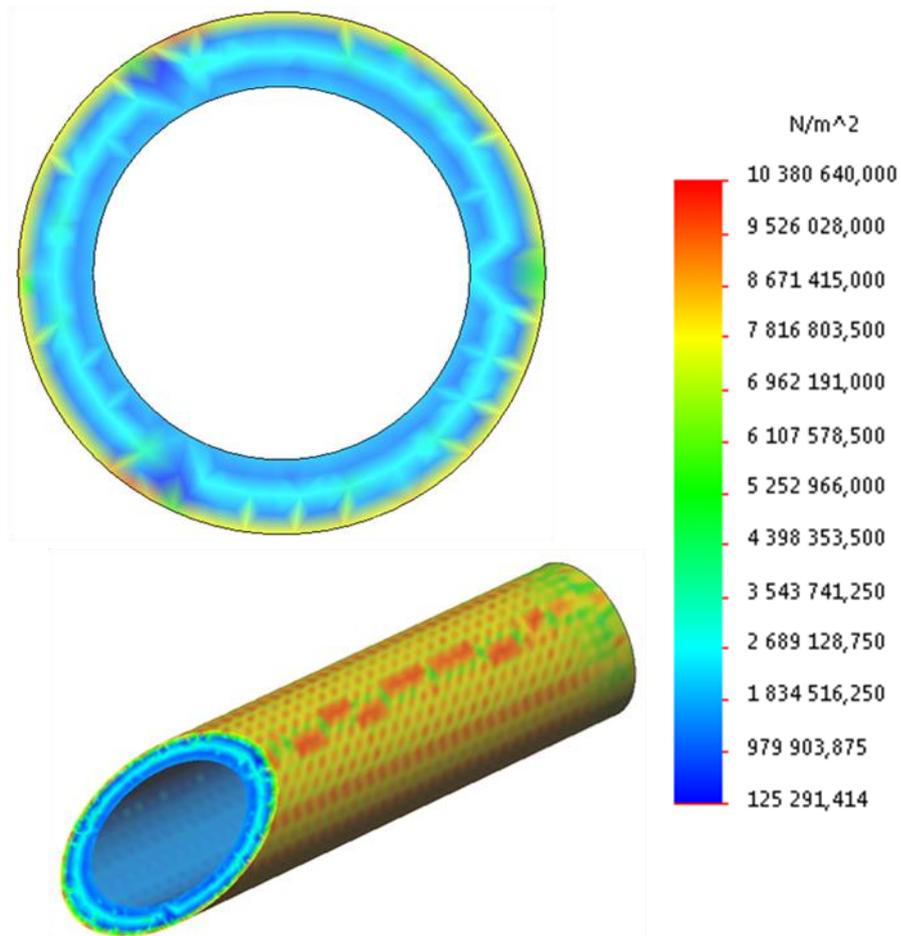


Рис. 3.3. Распределение кольцевых напряжений в сечении кабельной изоляции, вызванные внутренним температурным нагревом в результате моделирования короткого замыкания

Возникающие в кабеле напряжения вызывают деформацию изоляции (рис. 3.4), а именно ее расширение. В результате может появиться отслоение ПВХ-покрытия от токопроводящей жилы, что недопустимо с точки зрения эксплуатационных требований.

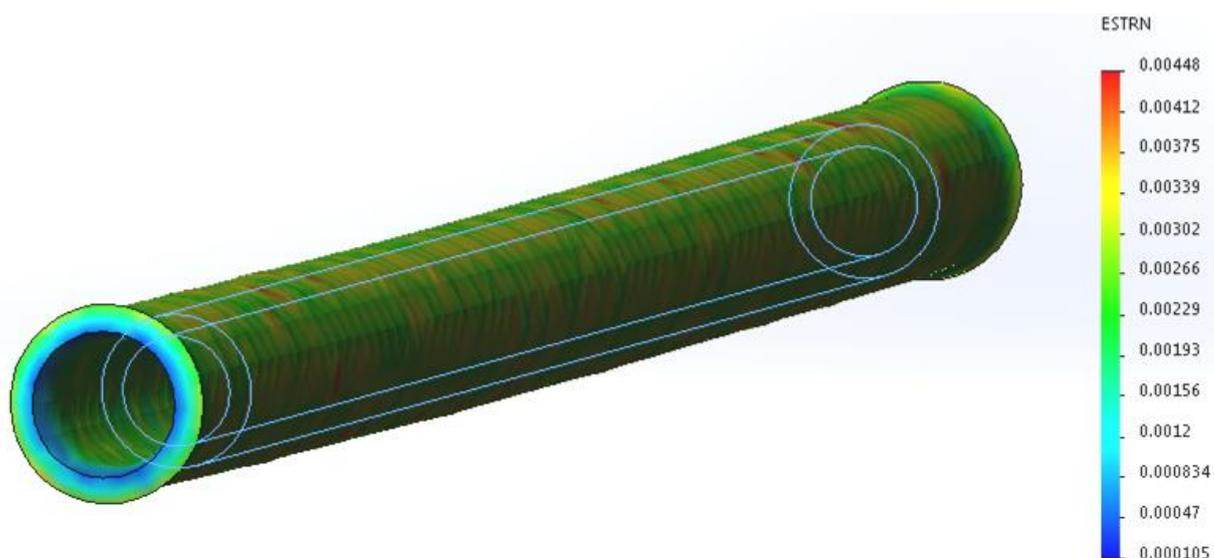


Рис. 3.4. Виртуальное изображение деформации кабельной изоляции, вызванные внутренним нагревом (первоначальные размеры образца представлены сплошной линией)

Определим перемещения, вызванные указанными выше деформациями. Для этого рассмотрим их значения в 11 точках (узлах) модели в порядке, указанном стрелкой на рис. 3.5, т.е. в направлении от внутреннего радиуса к внешнему.

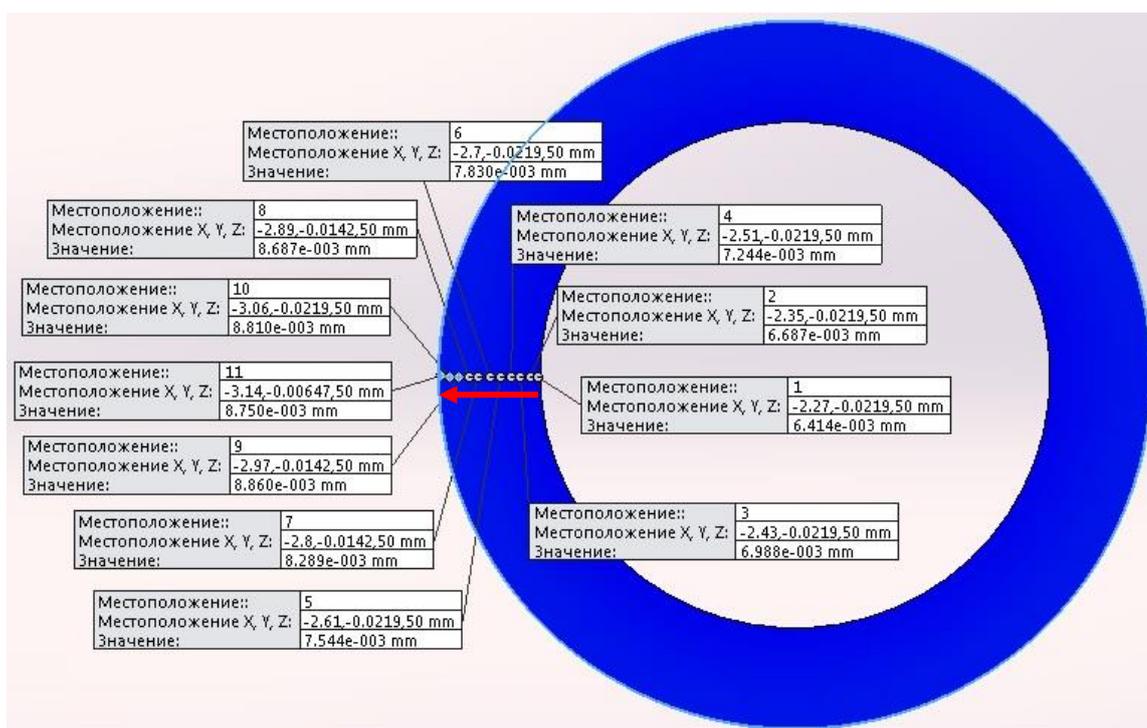


Рис. 3.5. Направление перемещений и их значения

Значения перемещений в узлах и их расположение относительно осей Ox , Oy и Oz представлены в следующей таблице 3.5.

Таблица 3.5. Значения перемещений

Узел	Значение, мм	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	$6,414 \cdot 10^{-3}$	-2,272	-0,022	50
2	$6,687 \cdot 10^{-3}$	-2,349	-0,022	50
3	$6,988 \cdot 10^{-3}$	-2,434	-0,022	50
4	$7,244 \cdot 10^{-3}$	-2,511	-0,022	50
5	$7,544 \cdot 10^{-3}$	-2,612	-0,022	50
6	$7,830 \cdot 10^{-3}$	-2,704	-0,022	50
7	$8,289 \cdot 10^{-3}$	-2,805	-0,014	50
8	$8,687 \cdot 10^{-3}$	-2,890	-0,014	50
9	$8,860 \cdot 10^{-3}$	-2,975	-0,014	50
10	$8,810 \cdot 10^{-3}$	-3,060	-0,022	50
11	$8,750 \cdot 10^{-3}$	-3,137	-0,006	50

Для наглядного представления промежутка изменения перемещений построен график (рис. 3.6), из которого видно, что наибольшие перемещения наблюдаются на внешнем радиусе ПВХ-изоляции.

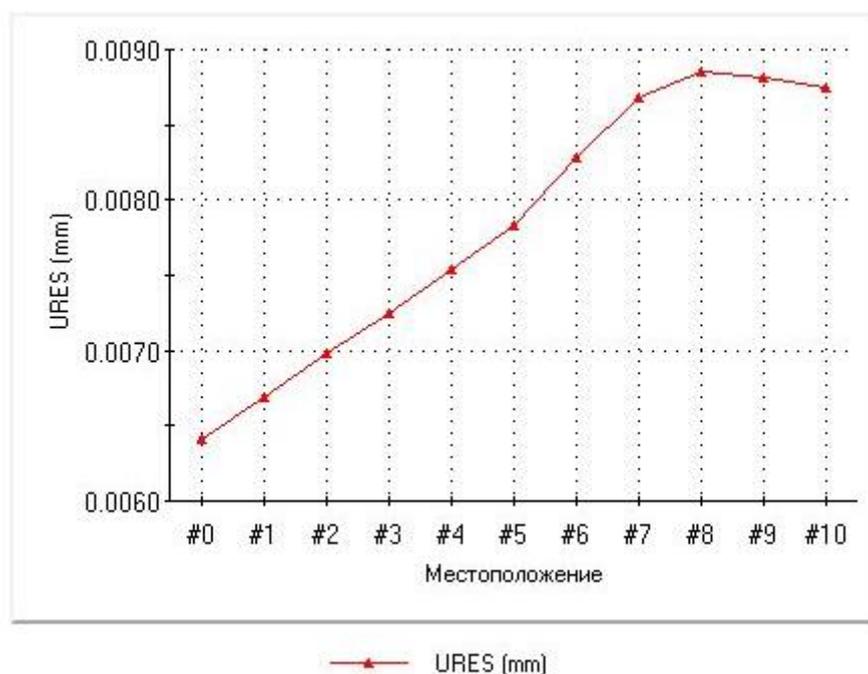


Рис. 3.6. График распределения перемещений по своду в случае внезапного нагрева внутренней части ПВХ-изоляции

Таким образом, совокупность возникающих в кабельной ПВХ-изоляции напряжений, деформаций и перемещений в результате воздействия сравнительно высоких температур с большой долей вероятности могут привести к расслоению и разрушению кабельной оболочки.

3.3. Вычисление оптимального закона изменения коэффициента линейного расширения в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластиката

Выше отмечалось, что, если должным образом подобрать закон изменения коэффициента теплового расширения по радиусу с соблюдением условия (3.2), то можно добиться почти равномерного напряжения кабельной изоляции, вызванного тепловым воздействием.

Проведем расчеты для тонкостенной цилиндрической изоляции. Пусть

$$\frac{b}{a} \approx 1, \quad \frac{T(a)}{T(b)} = 2.$$

Тогда, согласно формуле (3.5),

$$\frac{\alpha(a)}{\alpha(b)} = \frac{1}{2} = 0,5.$$

Таким образом, для кабельной изоляции с параметром $\frac{b}{a} \approx 1$ при $r \rightarrow b$ коэффициент $\alpha(r)$ должен увеличиться примерно в 2 раза. При таком выборе закона изменения коэффициента линейного расширения кольцевые напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ по своду изоляции будут иметь незначительный перепад и, следовательно, долговечность такого кабельного покрытия будет большей по сравнению с материалом, имеющим однородные свойства. В случае нестационарных тепловых полей упомянутые выводы, очевидно, в основном, сохранятся, но, естественно, потребуются некоторые корректировки.

Если температурное поле по своду цилиндра меняется по линейному закону

$$T(r) = \frac{T(b) - T(a)}{b - a} r + \frac{bT(a) - aT(b)}{b - a}, \quad (3.7)$$

а зависимость коэффициента линейного расширения от радиуса имеет также линейный вид

$$\alpha(r) = \frac{\alpha(b) - \alpha(a)}{b - a}r + \frac{b\alpha(a) - a\alpha(b)}{b - a}, \quad (3.8)$$

то для тонкого покрытия кабеля, согласно (3.6), можно найти значения $\alpha(a)$ или $\alpha(b)$, если заданы значения $T(a)$, $T(b)$. Эти значения $\alpha(a)$, $\alpha(b)$ определяют окончательный вид линейной функции (3.8).

Приведем пример расчета. Пусть перепад температуры

$$\frac{T(a)}{T(b)} = 3.$$

Тогда для постоянства кольцевых напряжений по своду значение коэффициента линейного расширения для изоляции кабеля должно возрасти от точки $r = a$ до $r = b$ также в 3 раза.

3.4. Моделирование температурных нагрузок в трехслойных кабельных изоляциях

Для анализа и подтверждения правильности приведенных выше выводов проведем вычислительный эксперимент. Виртуальную модель из предыдущего вычислительного эксперимента разделим на три слоя. Основные теплофизические свойства зададим, как и у однослойной ПВХ-изоляции, а коэффициент теплового расширения подберем по указанной выше рекомендации (таблица 3.6).

Разбиение спроектированной конструкции на тетраэдры производится автоматически самим программным комплексом, однако при необходимости можно вмешаться в этот процесс. Таким образом, по этому алгоритму была создана неравномерная конечно-элементная сетка с уменьшением размера элементов на границах раздела слоев для достижения большей точности расчетов (рис. 3.7).

Таблица 3.6. Теплофизические свойства трехслойной ПВХ-изоляции

Свойство	Единицы измерения	Значение		
		Внутренний слой	Средний слой	Внешний слой
Коэффициент теплового расширения	$10^{-6}(1/K)$	54	62	70
Модуль упругости	10^6 Н/м^2	2410		
Коэффициент Пуассона	-	0,3825		
Модуль сдвига	10^6 Н/м^2	866,7		
Массовая плотность	кг/м^3	1300		
Теплопроводность	$\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	0,147		
Удельная теплоемкость	$\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	1355		

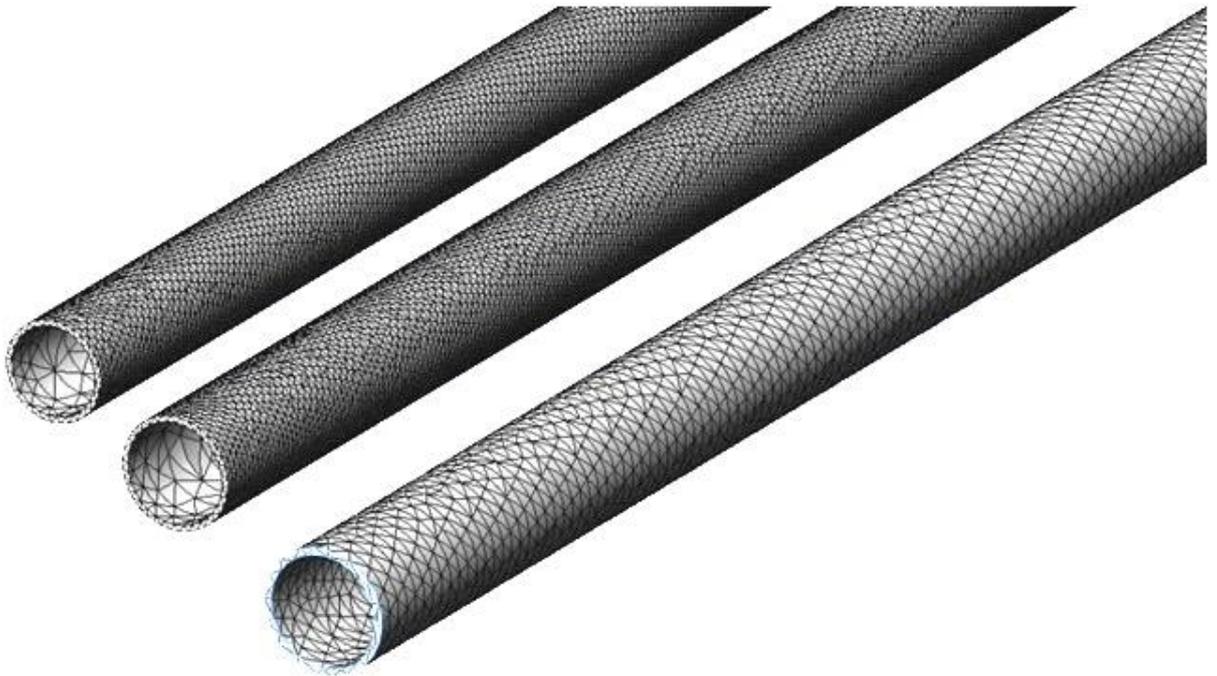


Рис. 3.7. Неравномерная сетка конечных элементов в трехслойной ПВХ-изоляции: сетка элементов более густая для внутренних слоев кабельной изоляции

Зададим для данной модели те же нагрузки, что и для однослойной (таблица 3.3), и проведем численный анализ полученных результатов.

Значения напряжений по своду трехслойной кабельной изоляции, как показывают расчеты, имеют незначительный перепад (рис. 3.8) и в среднем в 3 раза меньше, чем в однослойной оболочке при аналогичных нагрузках.

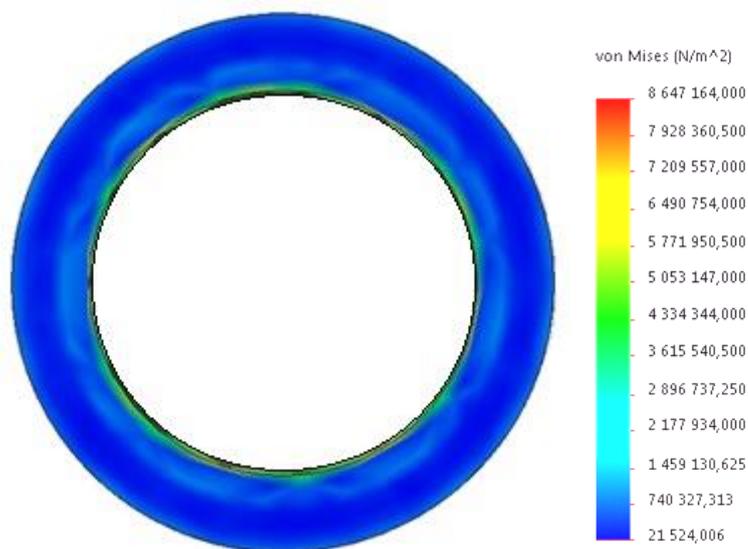


Рис. 3.8. Распределение напряжений в трехслойной кабельной изоляции, вызванные температурным нагревом в результате моделирования короткого замыкания

Следовательно, и деформации, вызванные таким напряжением, приведут к значительно меньшим значениям перемещений слоев изоляции (рис. 3.9). Заметим, что в однослойной изоляции наблюдается увеличение перемещений в направлении от внутреннего слоя к внешнему, в то время как в трехслойной оболочке происходит их уменьшение в этом же направлении.

Таким образом, из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что трехслойная ПВХ-изоляция конструктивно более предпочтительная, чем однослойная.

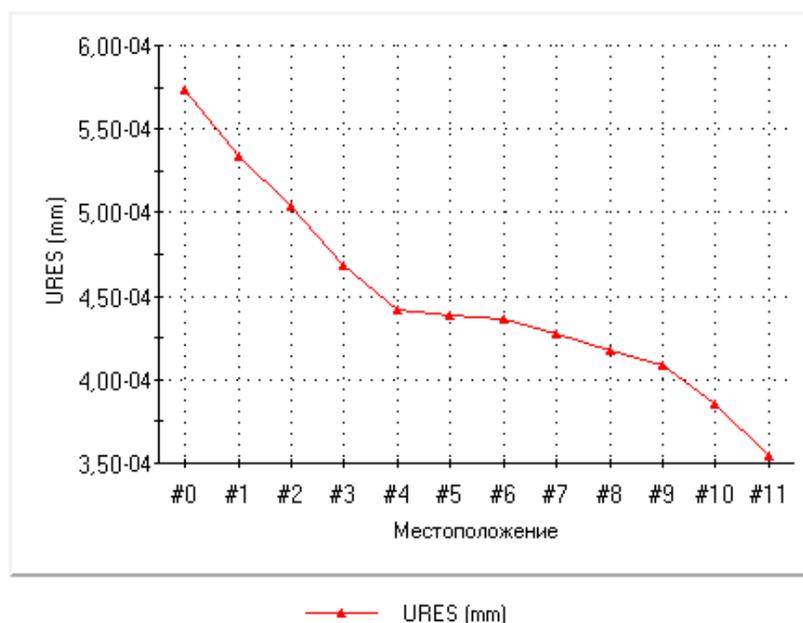


Рис. 3.9. График распределения перемещений по своду трехслойной кабельной изоляции в случае внезапного нагрева внутренней части ПВХ-изоляции

Следовательно, оптимальный подбор закона изменения коэффициента теплового расширения в ПВХ-изоляциях электрических кабелей позволит избежать возникновения радиальных растягивающих напряжений, которые могут привести к расслоению кабельной изоляции.

Приведенные результаты получены при соотношении 1:1:1 толщин слоев ПВХ-изоляции для кабеля номинальным сечением 16 мм^2 . Рассмотрим еще две геометрические конфигурации толщин – 1:2:1 и 3:2:1. Аналогичным образом построим 3d-модели и проведем разбиение на конечные элементы со сгущением сетки на границах соприкосновения слоев (таблица 3.7). При тех же нагрузках, что указаны в таблице 3.3, был проведен вычислительный эксперимент, результаты которого сравнивались с указанными выше решениями (таблица 3.8, рисунки 3.10-3.12).

Таблица 3.7. Параметры сетки конечных элементов для трехслойных
ПВХ-изоляций

Показатель	Соотношение слоев ПВХ изоляции		
	1:1:1	1:2:1	3:2:1
Тип сетки	Сетка на твердом теле		
Используемое разбиение	Сетка на основе кривизны		
Точки Якобиана	4 Точки		
Максимальный размер элемента, мм	2,02335	2,02335	2,06028
Минимальный размер элемента, мм	0,674443	0,674443	0,686752
Качество сетки	Высокое		
Всего узлов	153371	196844	161573
Всего элементов	108562	140985	114529
Максимальное соотношение сторон	21,269	33,104	24,404
% элементов с соотношением сторон < 3	72,4	59	60,6
% элементов с соотношением сторон > 10	0,00921	1,21	1,35
% искаженных элементов (Якобиан)	0	0	0,00437

Таблица 3.8. Максимальные и минимальные значения напряжений, деформаций и перемещений в трехслойных ПВХ-изоляциях

Показатель	Единицы измерения	Геометрическое соотношение слоев ПВХ изоляции		
		1:1:1	1:2:1	3:2:1
Максимальное значение напряжения	Н/м ²	$4,598 \cdot 10^6$	$2,739 \cdot 10^6$	$3,476 \cdot 10^6$
Минимальное значение напряжения		$0,197 \cdot 10^6$	$0,117 \cdot 10^6$	$0,385 \cdot 10^6$
Максимальное значение деформации	-	$2,034 \cdot 10^{-3}$	$0,955 \cdot 10^{-3}$	$2,014 \cdot 10^{-3}$
Минимальное значение деформации		$0,108 \cdot 10^{-3}$	$0,029 \cdot 10^{-3}$	$0,097 \cdot 10^{-3}$
Максимальное значение перемещение	мм	$5,618 \cdot 10^{-4}$	$2,003 \cdot 10^{-4}$	$5,541 \cdot 10^{-4}$
Минимальное значение перемещения		$3,491 \cdot 10^{-4}$	$1,620 \cdot 10^{-4}$	$3,435 \cdot 10^{-4}$

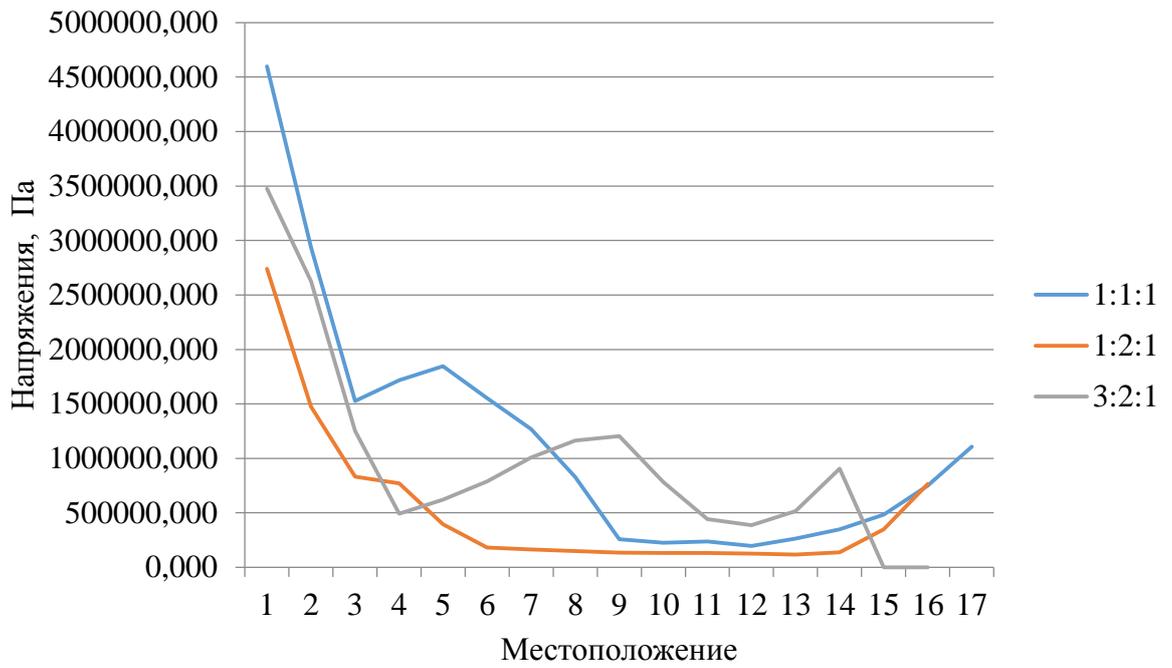


Рис. 3.10. Значения напряжений для кабельных ПВХ-изоляции с различными геометрическими соотношениями толщин слоев

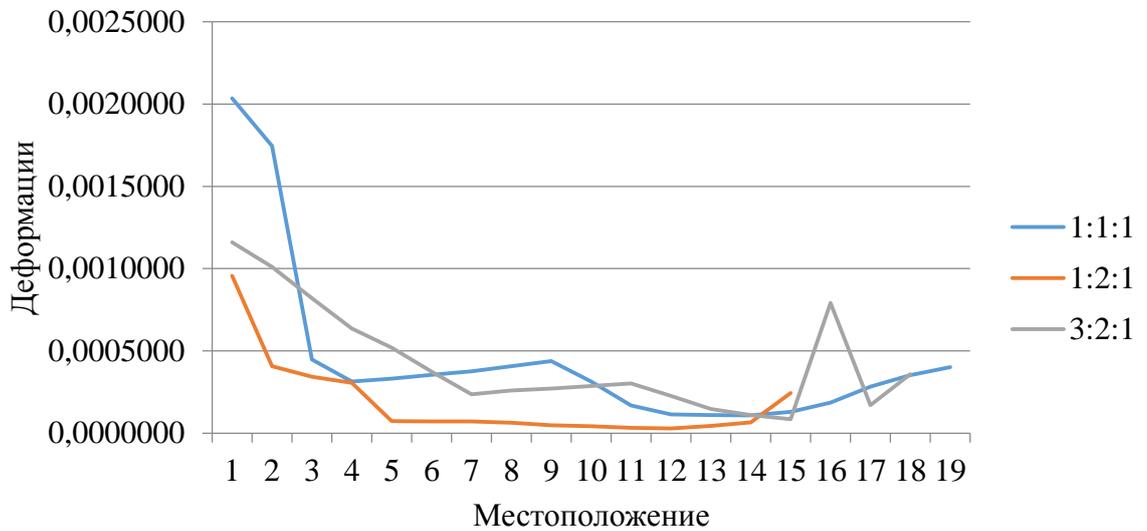


Рис. 3.11. Значения деформаций для кабельных ПВХ-изоляции с различными геометрическими соотношениями толщин слоев

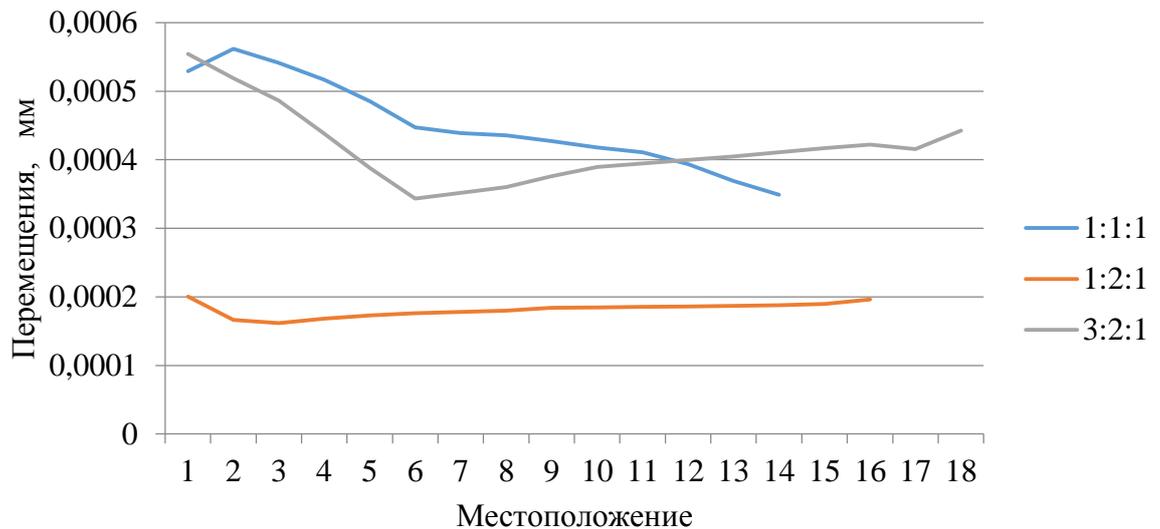


Рис. 3.12. Значения перемещений для кабельных ПВХ-изоляций с различными геометрическими соотношениями толщин слоев

Из анализа графиков и таблиц следует, что более долговечной и работоспособной будет кабельная изоляция из ПВХ-пластиката с теплофизическими свойствами, представленными в таблице 3.6, и геометрическим соотношением толщин слоев 1:2:1. Распределение температур в трехслойной ПВХ-изоляции имеет вид, показанный на рисунках 3.12 и 3.13.

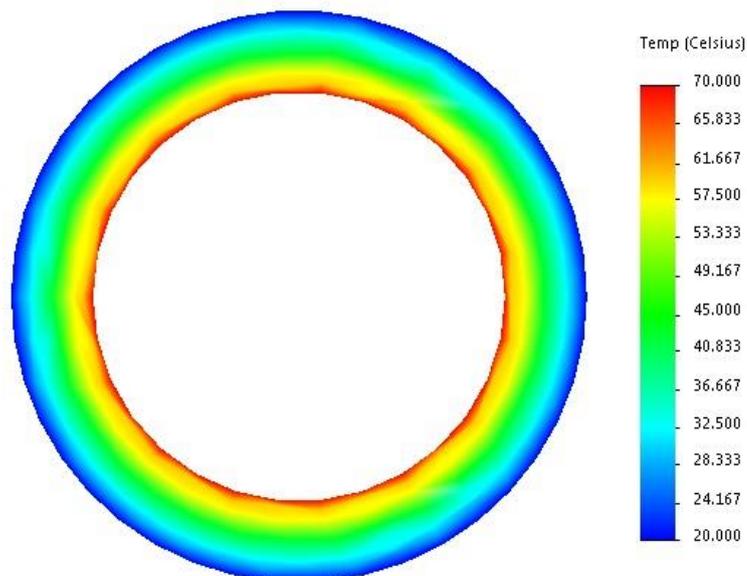


Рис. 3.13. Распределение значений температуры при моделировании короткого замыкания (случай 1:2:1)

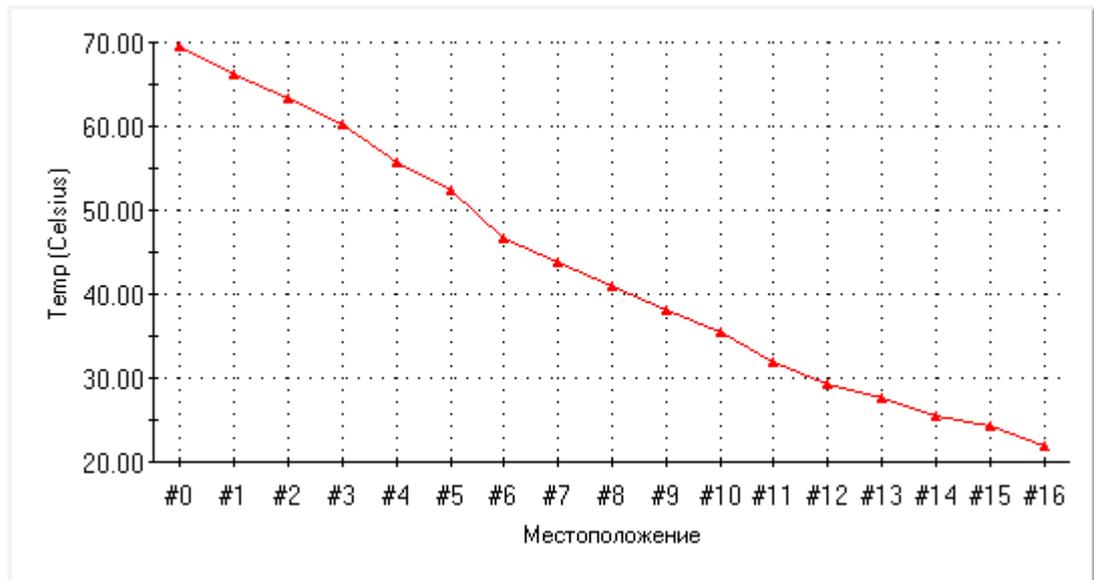


Рис. 3.14. График распределения значений температуры при моделировании короткого замыкания (случай 1:2:1)

Из рисунка 3.13 и графика 3.14 следует, что уменьшение температуры в трехслойной цилиндрической ПВХ-изоляции от 70 °C на внутреннем радиусе до 20 °C на внешнем происходит примерно по линейному закону.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

Численными экспериментами показано, что при оптимальном выборе закона изменения коэффициента теплового расширения в трехслойных ПВХ-изоляциях электрических кабелей можно добиться равномерного распределения кольцевых напряжений по своду изоляции, что, естественно, продлит работоспособность кабельной системы.

Разработаны компьютерные имитационные модели ПВХ-изоляций с различными геометрическими соотношениями толщин слоев, 1:1:1, 1:2:1, 3:2:1, проведены вычислительные эксперименты и дан сравнительный анализ полученных результатов. На основании анализа расчетов НДС изоляций с различными геометрическими характеристиками показано, что более

долговечной и работоспособной будет кабельная изоляция из ПВХ-пластиката с геометрическим соотношением толщин слоев 1:2:1.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА НДС ПО СВОДУ КАБЕЛЬНОЙ ПВХ-ИЗОЛЯЦИИ

4.1. Статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов

Как отмечалось выше, важной характеристикой механических свойств ПВХ-изоляций является зависимость между напряжениями и деформациями. Графическое представление такой зависимости, кривая напряжение-деформация, является основной характеристикой деформационных свойств ПВХ-пластиков.

На рисунках 4.1 и 4.2 показаны диаграммы зависимостей $\sigma \sim \epsilon$ в случаях гидростатического давления и теплового воздействия на кабель, вызванного коротким замыканием.

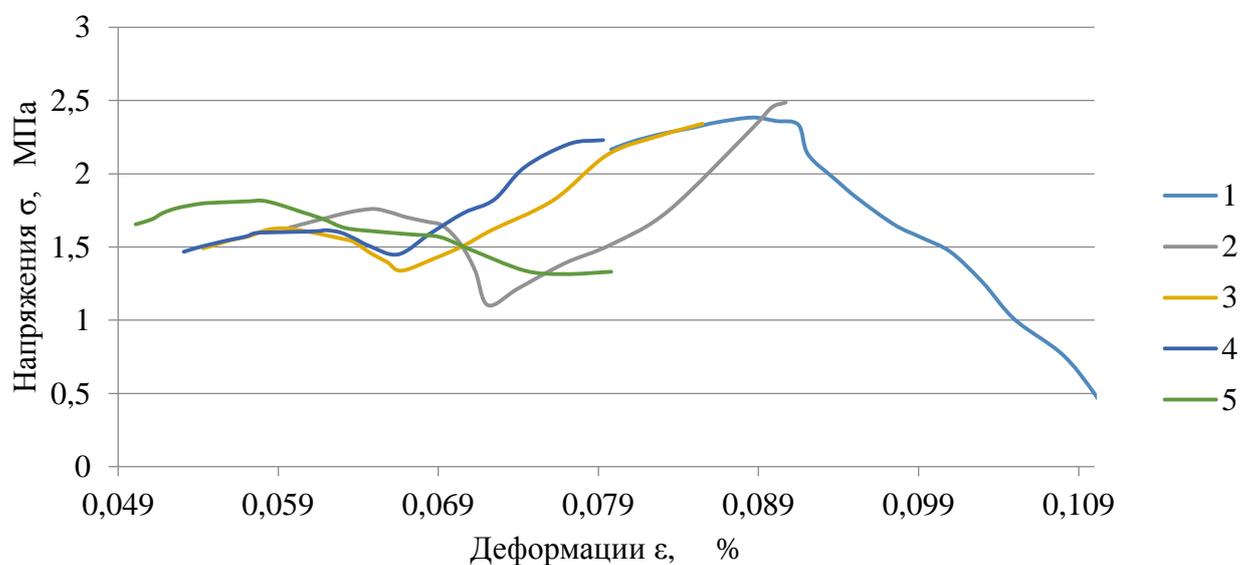


Рис. 4.1. Зависимость $\sigma \sim \epsilon$ для пяти вариантов физико-механических свойств кабельных ПВХ-изоляций при действии гидростатического давления

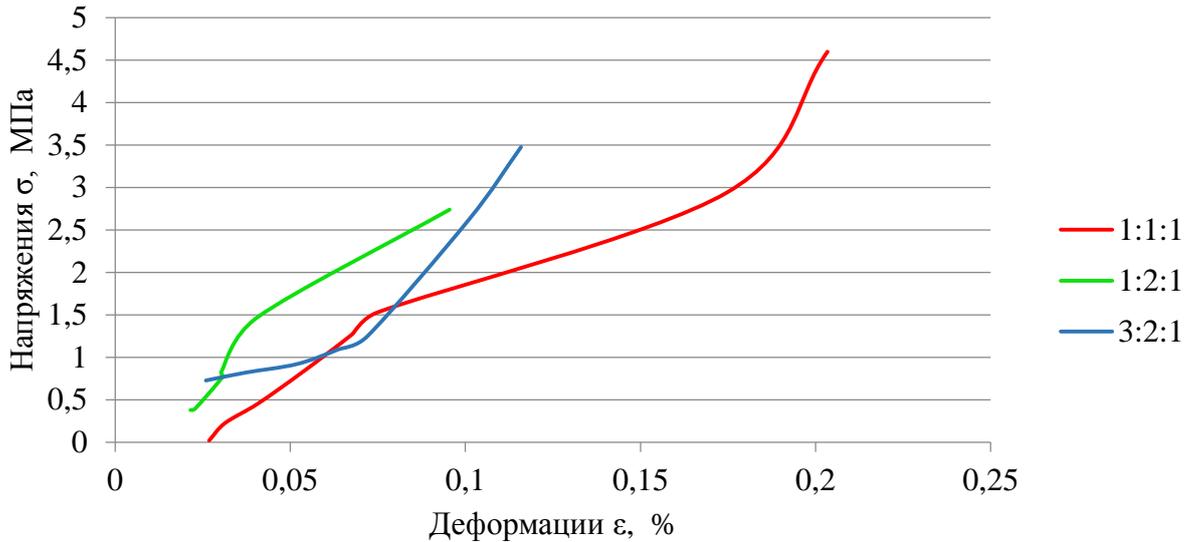


Рис. 4.2. Зависимость $\sigma \sim \epsilon$ для трех различных вариантов толщин слоев кабельных ПВХ-изоляций при действии температурного поля

Для более полного и точного анализа зависимостей $\sigma \sim \epsilon$ аппроксимируем экспериментальные данные линейной функцией вида

$$y = kx + b \quad (4.1)$$

методом наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации суммы квадратов отклонений [196-198]

$$S(k, b) = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

где n – количество экспериментальных точек, (x_i, y_i) – их координаты. Коэффициенты k и b находятся по формулам [196]

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2}, \quad (4.3)$$

$$b = \bar{y} - k \cdot \bar{x} \quad (4.4)$$

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}, \quad \tilde{y}_i = y_i - \bar{y}, \quad (4.5)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (4.6)$$

По описанному алгоритму была написана программа с использованием средств MATLAB [199-201] и получены зависимости вида

- для гидростатического давления

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \sigma = -68,7976 \varepsilon + 8,2305, \\
 & s = 1,3665, \\
 2) \quad & \sigma = 19,6321 \varepsilon + 0,2874, \\
 & s = 1,7596, \\
 3) \quad & \sigma = 22,9230 \varepsilon + 0,1319, \\
 & s = 0,6238, \\
 4) \quad & \sigma = 24,5485 \varepsilon + 0,1028, \\
 & s = 0,3032, \\
 5) \quad & \sigma = -16,3283 \varepsilon + 2,6548, \\
 & s = 0,1213;
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

- для тепловых нагрузок

$$\begin{aligned}
 1) \quad & \sigma = 18,9478 \varepsilon + 0,2927, \\
 & s = 4,3292, \\
 2) \quad & \sigma = 27,7429 \varepsilon - 0,0086, \\
 & s = 0,5849, \\
 3) \quad & \sigma = 18,3394 \varepsilon + 0,2262, \\
 & s = 4,9364.
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Здесь s – дисперсии, т.е. отклонения экспериментальных статистических точек от найденных прямых, т.е. по существу, количественная характеристика точности аппроксимации.

Для повышения точности расчетов, т.е. уменьшении дисперсии s , увеличим степень полинома до второго, т.е. будем искать функциональную зависимость вида

$$y = ax^2 + bx + c. \tag{4.9}$$

Для нахождения коэффициентов a , b , c необходимо решить следующую систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n y_i = a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + nc, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i = a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 = a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2, \end{array} \right. \quad (4.10)$$

Минимизируемая сумма квадратов отклонений в этом случае имеет вид

$$S(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i + c - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (4.11)$$

С использованием средств MATLAB получены следующие полиномы второй степени, аппроксимирующие зависимости $\sigma \sim \varepsilon$ в различных ситуациях:

- для гидростатического давления

$$1) \sigma = -2,3443 \cdot 10^3 \varepsilon^2 + 0,3859 \cdot 10^3 \varepsilon - 13,5705,$$

$$s = 0,2370,$$

$$2) \sigma = 3,0628 \cdot 10^3 \varepsilon^2 - 0,4424 \cdot 10^3 \varepsilon + 17,4046,$$

$$s = 0,5045,$$

$$3) \sigma = 1,8617 \cdot 10^3 \varepsilon^2 - 0,2348 \cdot 10^3 \varepsilon + 8,8799,$$

$$s = 0,1714,$$

$$4) \sigma = 1,7083 \cdot 10^3 \varepsilon^2 - 0,1997 \cdot 10^3 \varepsilon + 7,3574,$$

$$s = 0,1161,$$

$$5) \sigma = -0,7801 \cdot 10^3 \varepsilon^2 + 0,0837 \cdot 10^3 \varepsilon - 0,4888,$$

$$s = 0,0592;$$

- для тепловых нагрузок

$$1) \sigma = -9,6464 \varepsilon^2 + 20,9782 \varepsilon + 0,2474,$$

$$s = 4,3230,$$

$$2) \sigma = 69,2706 \varepsilon^2 + 21,7012 \varepsilon + 0,0452,$$

$$s = 0,5433,$$

$$3) \sigma = 432,7746 \varepsilon^2 - 32,4629 \varepsilon + 1,1839,$$

$$s = 2,4446.$$

(4.13)

Как видно из сравнения линейной и параболической аппроксимаций, второй вариант (квадратичный) существенно уменьшает значение параметра дисперсии s и при обработке данных рекомендуется использовать именно представление вида (4.9).

Анализ кривых деформаций 4.1-4.2 и полученных зависимостей (4.7)-(4.8) и (4.12)-(4.13) показал, что в случае гидростатического давления наибольшей эффективностью обладают изоляции с конфигурацией №5; в случае моделирования короткого замыкания наиболее работоспособной оказалась ПВХ-изоляция с геометрическим соотношением 1:2:1. Таким образом, полученные методом наименьших квадратов результаты совпадали с выводами, установленными методом конечных элементов во второй и третьей главах.

4.2. Метод обработки экспериментальных данных кусочно-линейными функциями

При исследовании свойств ПВХ-пластиков возникает необходимость научно обоснованной обработки экспериментальных данных для того, чтобы описать статистическую закономерность как можно точнее. Другими словами, следует аппроксимировать весь набор экспериментальных данных кусочно-линейными функциями так, чтобы дисперсия (или отклонение) разыскиваемой функции от данных опыта была минимальной. Для решения этой задачи обычно используется описанный выше метод наименьших квадратов, в котором минимизируется сумма квадратов отклонений по оси Oy на плоскости. Рассмотрим другой метод, отличный от классического, который заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от данных точек до линейной функции, что уменьшает значение среднеквадратического отклонения, и, кроме того, приводит к неединственности выбора прямой.

Для пояснения вышеизложенных идей рассмотрим задачу. Требуется найти кусочно-линейную функцию, которая является оптимальной по группам экспериментальных точек (рис. 4.3).

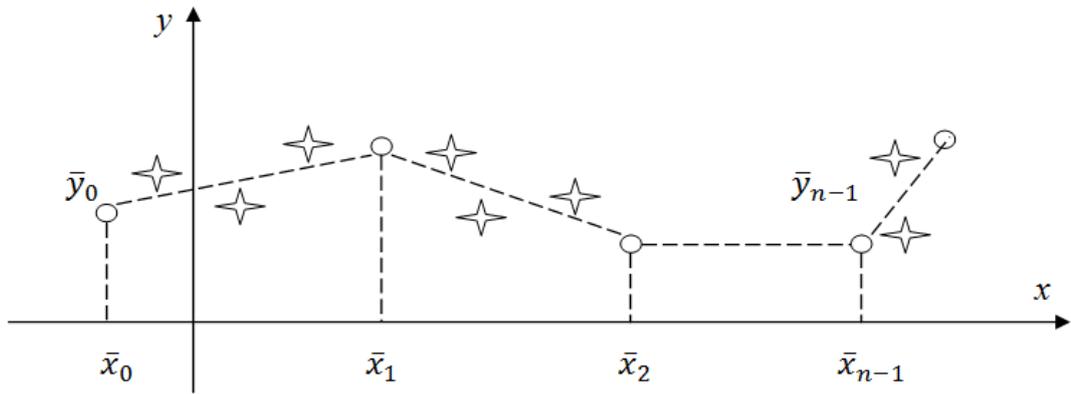


Рис.4.3. Схема построения участков графика

Здесь через (\bar{x}_i, \bar{y}_i) обозначены координаты границ участков, а сами результаты эксперимента представлены звездочками с координатами (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$.

Предположим, что начальным результатом эксперимента является точка (\bar{x}_0, \bar{y}_0) . Тогда выбор направления прямой или углового коэффициента определяется из решения уравнения (в случае, когда $\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \neq 0$) [197]

$$k^2 - \alpha k - 1 = 0, \quad (4.14)$$

где

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\tilde{x}_i^2 - \tilde{y}_i^2)}{\sum_{i=1}^{n_1} \tilde{x}_i \tilde{y}_i}, \quad (4.15)$$

$$\tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_0, \quad \tilde{y}_i = y_i - \bar{y}_0,$$

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_i}{n_1}, \quad \bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} y_i}{n_1}.$$

Здесь n_1 – количество точек (звездочек на рис. 4.3) до точки с абсциссой \bar{x}_1 , т.е. $x_i \leq \bar{x}_1$.

Уравнение (4.14) выводится из условия минимума суммы квадратов расстояний от точек с координатами (x_i, y_i) , $i = 1 \div n_1$ до прямой (4.1), т.е. из минимума выражения

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (kx_i + b - y_i)^2}{k^2 + 1}. \quad (4.16)$$

Соответствующие решениям уравнения (4.14) линейные участки графика функции имеют вид

$$\begin{aligned} y &= k_1x + b_1, y = k_2x + b_2, \\ b_1 &= \bar{y}_0 - k_1\bar{x}_0, b_2 = \bar{y}_0 - k_2\bar{x}_0, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где

$$k_{1,2} = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 4}}{2}. \quad (4.18)$$

Из вида уравнения (4.14) следует, что прямые (4.17) взаимно перпендикулярны и проходят через точку с координатами (\bar{x}_0, \bar{y}_0) .

Вопрос выбора одной из двух оптимальных прямых может быть решен по минимуму суммы квадратов расстояний (4.16). Если

$$S(k_1, b_1) < S(k_2, b_2), \quad (4.19)$$

то следует выбрать линейный участок вида $y = k_1x + b_1$ и, наоборот, в случае противоположного неравенства выбирается прямая вида $y = k_2x + b_2$.

Нетрудно доказать, что среднеквадратическое отклонение при выборе кусочно-линейной функции по минимуму выражения (4.16) будет меньше, чем по классическому варианту в $\sqrt{k^2 + 1}$ раз. Это значит, что применение нового алгоритма (а не классического) более обосновано в случае больших значений параметра k . В случае, когда статистическая корреляция между двумя величинами слабая, т.е. $|k| \approx 0$, оба подхода приводят к почти одинаковым результатам.

4.3. Общие принципы построения программного комплекса для обработки экспериментальных данных

Рассмотренные в двух предыдущих параграфах классический и неклассический методы обработки экспериментальных данных реализованы в виде программ на языке MATLAB. Разработанная система автоматизации обработки результатов исследований представляет собой комплекс программных средств, обеспечивающий:

- связь программ с внешними файлами данных, которые содержат исходную информацию;
- автоматизацию расчетов по методу наименьших квадратов и неклассическому алгоритму обработки данных как для случая гидростатического давления, так и для температурных нагрузок в отдельности;
- сравнительный анализ обоих алгоритмов и выбор наиболее оптимальной линейной зависимости $\sigma \sim \varepsilon$ для каждого из рассмотренных случаев;
- визуализацию полученных линейных зависимостей;
- получение информации об исходных и рассчитанных данных.

Схема программного комплекса представлена на рисунке 4.4.

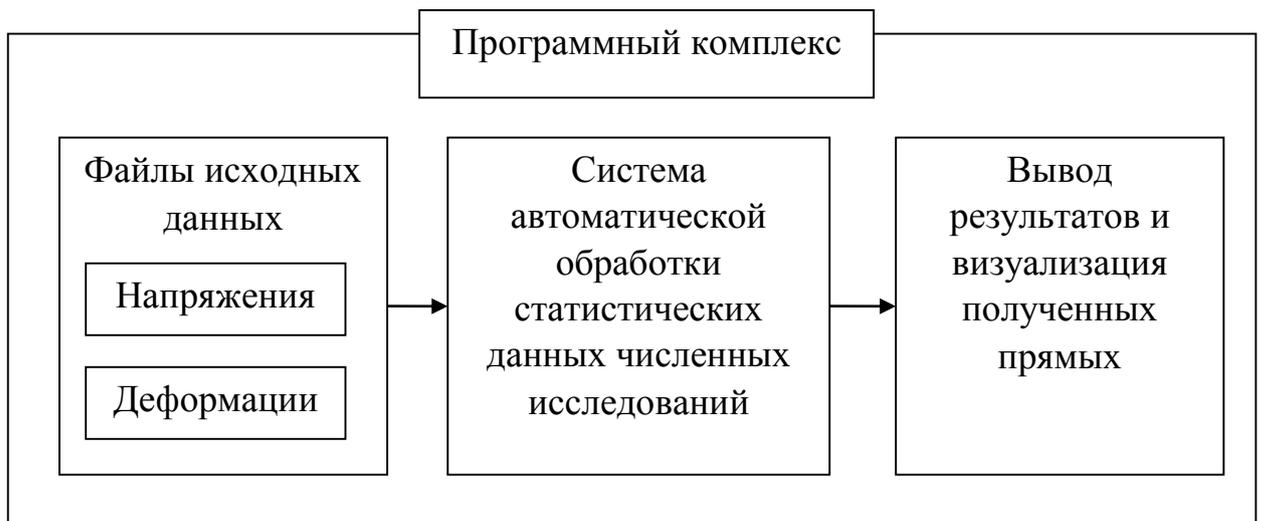


Рис. 4.4. Схема работы программного комплекса

Для обработки результатов исследований с помощью данного программного комплекса необходимо создать несколько наборов данных, в которых будут храниться результаты численных экспериментов. Т.к. в работе рассматриваются пять различных конфигураций изоляций на основе ПВХ-пластиката для исследования гидростатического давления и три – для моделирования короткого замыкания, то исходная информация подключается к

программе из десяти внешних файлов для анализа первого случая (пять файлов для значений напряжений и столько же для деформаций) и шести – для второго.

Система осуществляет преобразование исходных данных из внешних файлов во внутреннее представление, с которым непосредственно и работает программный комплекс.

Система автоматической обработки статистических данных численных исследований в свою очередь содержит три блока:

- блок обработки данных по классическому методу наименьших квадратов,
- блок обработки данных по неклассическому алгоритму,
- блок сравнения эффективностей двух рассмотренных методов и выбора оптимального результата.

Заключительным этапом работы программного комплекса является вывод полученных результатов и их визуальное представление в виде прямых в системе координат напряжение-деформация.

4.4. Построение функциональных зависимостей $\sigma \sim \varepsilon$ и $\alpha \sim r$

При обработке экспериментальных данных исследования на координатной плоскости отмечаются статистические точки и по указанной выше методике строятся графики зависимостей для рассмотренных случаев гидростатического давления и моделирования короткого замыкания. Обработку данных осуществляет описанный выше программный комплекс.

Таким образом, графики зависимости $\sigma \sim \varepsilon$ для наиболее эффективных кабельных изоляций на основе ПВХ-пластиката представлены на рисунке 4.5.

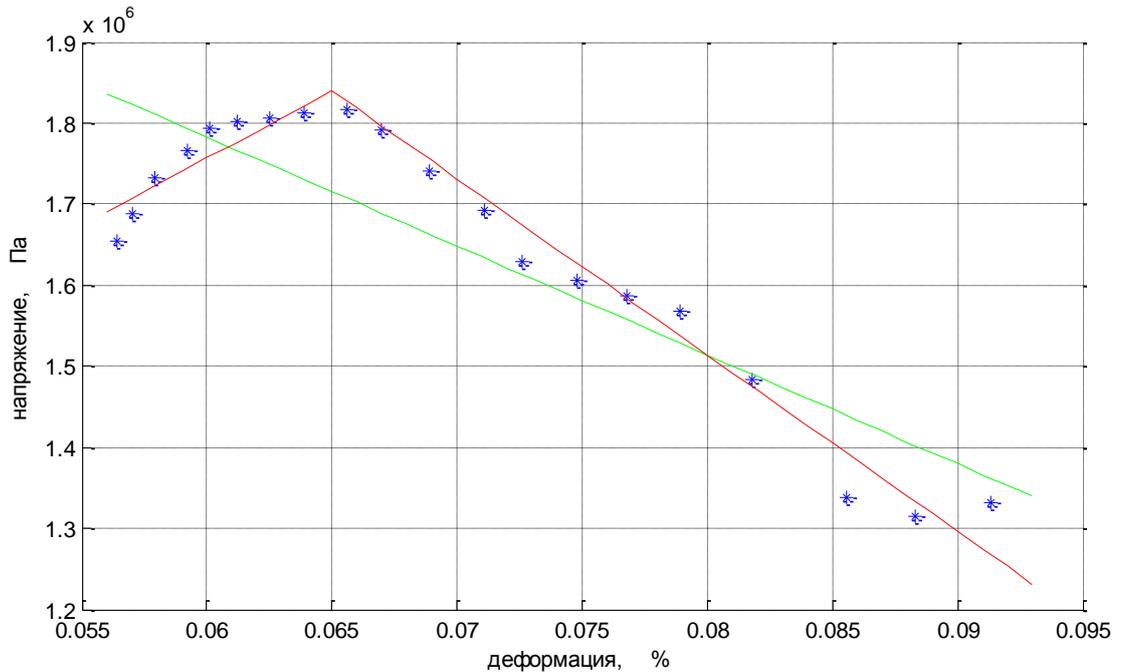


Рис. 4.5. Зависимость напряжения от деформации в кабельной ПВХ-изоляции с оптимальными геометрическими и физико-механическими параметрами при гидростатическом давлении: синие звездочки – статистические точки исследования; зеленая прямая – прямая зависимости $\sigma \sim \varepsilon$, построенная по классическому методу наименьших квадратов; красная ломаная – график зависимости $\sigma \sim \varepsilon$, построенный по неклассическому алгоритму

Проведенный анализ численных результатов подтверждает гипотезу об уменьшении ошибок аппроксимации при нахождении линейной функции по минимуму квадратов расстояний по сравнению с классическим алгоритмом.

Для случая математического моделирования короткого замыкания построим функциональную зависимость коэффициента теплового расширения от радиуса кабельной ПВХ-изоляции $\alpha \sim r$ методом наименьших квадратов в виде

$$\alpha(r) = 1,8939 \cdot 10^{-5}r + 1,0635 \cdot 10^{-5}. \quad (4.20)$$

Если в полученное в третьей главе соотношение (3.8) подставить значения a , b , $\alpha(a)$ и $\alpha(b)$, то с погрешностью примерно равной $2,9 \cdot 10^{-6}$ оно совпадет с (4.20).

Таким образом, закон изменения коэффициента теплового расширения в зависимости от радиуса для трехслойной кабельной изоляции с геометрическим соотношением толщин слоев 1:2:1, при котором колебания кольцевых

напряжений при тепловом воздействии будут небольшими, имеет вид (4.20).

График этой зависимости представлен на рисунке 4.6.

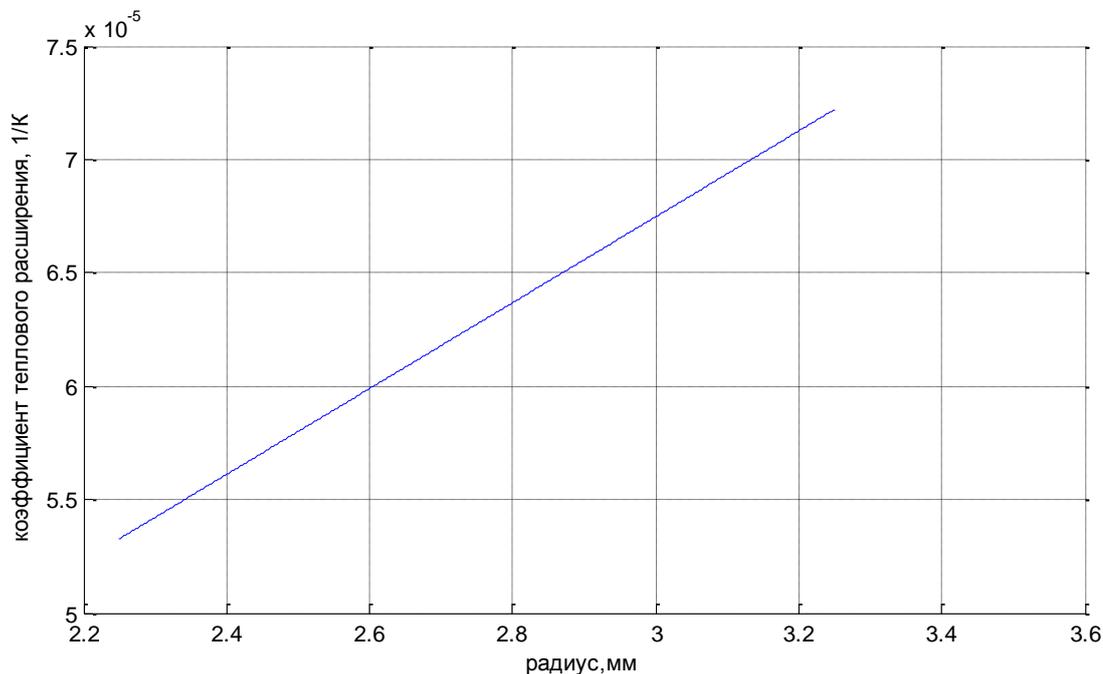


Рис. 4.6. График зависимости $\alpha \sim r$

Из вида графика 4.6 следует, что небольшое увеличение коэффициента линейного расширения от $5,3 \cdot 10^{-5}$ до $7,2 \cdot 10^{-5}$ приводит к уменьшению колебания кольцевых напряжений по своду кабельной изоляции.

4.5. Оценка степени влияния модуля упругости и коэффициента Пуассона на значения напряжений и деформаций в кабельных изоляциях на основе ПВХ-пластиката

В случае гидростатического давления результат численных экспериментов зависел от двух факторов, т.е. мы подбирали значения двух показателей – модуля упругости и коэффициента Пуассона. Для оценки величины влияния каждого параметра на результирующий признак (на значения напряжений и деформаций) построим уравнения множественной регрессии вида

$$y = f(x_1, x_2), \quad (4.21)$$

где x_1 и x_2 – факторные признаки (модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ соответственно; y – результирующий показатель (напряжение или деформация)).

Рассмотрим частный случай (4.20) в виде линейной зависимости

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2, \quad (4.22)$$

где a_1, a_2 – параметры уравнения, демонстрирующие уровень влияния соответствующего факторного признака на результирующий показатель при фиксированном состоянии других признаков; a_0 – свободный член (не имеет физического смысла).

Параметры a_0, a_1, a_2 находят методом наименьших квадратов, решая уравнения вида [202]

$$\begin{cases} a_0n + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} = \sum_{i=1}^n y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} = \sum_{i=1}^n y_i x_{1i}, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_{2i}. \end{cases} \quad (4.23)$$

Подставляя в систему уравнений (4.23) данные, установленные в результате проведенных численных экспериментов, получим

$$\begin{aligned} \sigma &= 1,6408 + 3,1149 \cdot 10^{-6}E - 0,0022\mu, \\ \varepsilon &= 0,0618 - 1,6312 \cdot 10^{-7}E + 6,5787 \cdot 10^{-4}\mu, \end{aligned} \quad (4.24)$$

Функциональные зависимости (4.24) показывают, как изменятся значения напряжений или деформаций при изменении отдельного факторного показателя на единицу, но по ним нельзя судить, какой из двух факторов оказывает большее влияние на результирующий признак. Для этих целей рассчитаем частные коэффициенты вида

$$\varepsilon_i = a_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}, \quad (4.25)$$

где ε_i – частный коэффициент эластичности для i -того фактора; a_i – коэффициент регрессии для i -того фактора; \bar{x}_i – среднее значение i -того фактора; \bar{y} – среднее значение результирующего фактора.

По формуле (4.25) находим

- для модуля упругости $\Delta_n = 0,047$ (влияние на напряжения) и $\Delta_d = -0,0066$ (влияние на деформации);
- для коэффициента Пуассона $\Delta_n = -5,3599 \cdot 10^{-4}$ (влияние на напряжения) и $\Delta_d = 0,0042$ (влияние на деформации).

Другими словами, если изменить модуль упругости на 1%, то это приведет к изменению напряжений и деформаций, вызванных гидростатическим давлением, на 0,0477% и 0,0066% соответственно; в случае же изменения коэффициента Пуассона эти величины равны 0,0005% и 0,0042% соответственно. Это означает, что модуль упругости оказывает больше влияния на распределение напряжений, в то время как коэффициент Пуассона – на значения деформаций.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

На основании численных исследований и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы и заключения.

Разработан алгоритм и на его основе реализован программный комплекс для анализа статистических данных, который позволяет уменьшить погрешности, связанные с заданием определяющих законов, описывающих физико-механические свойства ПВХ-пластиков.

На основании результатов проведенного математического моделирования гидростатического давления и короткого замыкания получены зависимости $\sigma \sim \varepsilon$, функциональные зависимости напряжений и деформаций от модуля упругости и коэффициента Пуассона, а также коэффициента теплового расширения от радиуса кабельной ПВХ-изоляции. Методами многофакторного корреляционного анализа показано, что модуль упругости оказывает большее влияние на распределение напряжений, в то время как коэффициент Пуассона – на значения деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочность кабельных изоляций зависит от предельных значений напряжений, при которых происходит их разрушение. По этой причине необходимо разработать модели, позволяющие определять НДС кабельных конструкций с учетом их реальных физико-механических свойств и условий эксплуатации. По этой причине в работе предлагаются алгоритмы и на их основе программные комплексы для оценки указанных параметров.

Использованные в диссертационной работе методы являются универсальными и могут быть применены для решения различных по сложности задач, связанных с конструированием и эксплуатацией кабельных систем.

Основные результаты диссертационной работы приведены в нижеуказанных выводах.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические и компьютерные модели расчета температурного поля и НДС одно- и многослойных изоляций на основе ПВХ-пластиков, позволяющие выбрать конструктору кабельных сетей на стадии проектирования оптимальную геометрическую структуру толщин слоев, механические и теплофизические свойства кабельных изоляций.
2. На основании сравнительного анализа полученных результатов проведенных численных экспериментов по расчету напряженно-деформированного состояния ПВХ-изоляций с различными геометрическими соотношениями толщин слоев показано, что при гидростатическом давлении более долговечной и работоспособной будет конструкция кабельной изоляции из ПВХ-пластика с соотношением толщин слоев 1:2:3.
3. Для указанного геометрического соотношения слоев ПВХ-изоляции при внешнем давлении подобраны физико-механические параметры, уменьшающие уровень НДС в слоях и способствующие продлению срока эксплуатации кабельной системы.
4. Проведенные математические расчеты температурных напряжений в однослойных ПВХ-изоляциях электрических кабелей на основании созданных виртуальных прототипов, имитирующих короткое замыкание в кабельной системе, показали, что наиболее опасные напряжения возникают при больших значениях градиента температурного поля по своду кабельного покрытия.
5. Численный анализ температурных напряжений в многослойных ПВХ-изоляциях электрических кабелей показал, что при разумном выборе закона изменения коэффициента теплового расширения колебания кольцевых напряжений по своду будут незначительными.

6. На основании расчетов НДС ПВХ-изоляций с различными геометрическими соотношениями толщин слоев показано, что более долговечной по прочности в случае внезапного внутреннего нагрева будет кабельная изоляция с соотношением толщин слоев 1:2:1.
7. Разработан алгоритм и на его основе программа по анализу статистических данных, которая уменьшает погрешность при аппроксимации определяющих законов.

Список литературы

1. ГОСТ 15845-80 Изделия кабельные термины и определения. Взамен ГОСТ 15845-70; введен 01.07.1981. – М., Издательство стандартов, 1981.
2. [Электронный ресурс] – Становой С. Изоляция электрических проводов и кабелей // Популярная электроника. Режим доступа: <http://scsiexplorer.com.ua>.
3. [Электронный ресурс] – ЭлектроТехИнфо. Режим доступа: www.eti.su.
4. Бородулин В.Н., Воробьев А.С., Попов С.Я. и др. Конструкционные и электротехнические материалы. Под ред. Филикова В.А. – М.: Высш. школа, 1990. – 296 с., ил.
5. Кузнев В.Ю., Крехова О.В. М. Кабели, провода и материалы для кабельной индустрии: технический справочник. – М.: Нефть и газ, 2006. – 360 с.
6. Кабели, провода и шнуры: справочник. В семи томах, Издательство ВНИИКП, 2002.
7. Ларин Ю.Т., Ильин А.А., Нестерко В.А. Кабели оптические. Заводы изготовители. Общие сведения. Конструкции, оборудование, техническая документация, сертификаты. – М: Престиж, 2007. – 320 с., ил.
8. Ильин А.А., Ларин Ю.Т., Фомичев В.Ю. Одномодовые оптические волокна и их основные характеристики. Приложение к журналу «Кабели и провода», № 2, 2008, с. 3-15.
9. Алиев И.И. Кабельные изделия: справочник. – М.: РадиоСофт, 2009. – 224 с.
- 10.[Электронный ресурс] – Электротехническая компания «Атлас». Режим доступа: atlastpk.ru.
11. Григорьев Г. П., Ляндзберг Г.Я., Сирота А. Г. Полимерные материалы. – М.: Высш. школа, 1966. – 260 с.
12. Ульянов В.М., Рыбкин Э.П., Гуткович А.Д., Пишин Г.А. Поливинилхлорид. М.: Химия, 1992. – 288 с., ил.

13. Хрулев М.В. Поливинилхлорид. – М.: Химия, 1964. – 263 с.
14. Уилки Ч., Саммерс Дж., Даниэлс Ч. Поливинилхлорид. Пер. с англ.; под ред. Г.Е. Заикова. – СПб.: Профессия, 2007. – 728 с., ил.
15. Пахомов С.И., Трифонова И.П., Бурбистров В.А. Поливинилхлоридные композиции: учеб. пособие. Иван. гос. хим.-технолог. ун-т. – Иваново, 2010. – 104 с.
16. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: уч.-справ. пос. Под общ. ред. Крыжановского В.К. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с., ил.
17. [Электронный ресурс] – Аналитический портал химической промышленности «Новые химические технологии». Режим доступа: <http://www.newchemistry.ru>.
18. [Электронный ресурс] – Полимерсервис. Режим доступа: <http://polymerservis.ru>.
19. ГОСТ 5960-72 Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия. Взамен ГОСТ 5960-51; введен 01.01.74. – М.: Издательство стандартов, 1974.
20. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. Производство изделий из полимерных материалов. Под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб.: Профессия, 2008. – 460 с.
21. ГОСТ 14193-78 Монохлорамин ХБ технический. Технические условия. Взамен ГОСТ 14193-69; введен 01.01.80. – М.: Издательство стандартов, 1980.
22. Обзор рынка ПВХ-композиций в СНГ. – М: 2005. – 108 с. [Электронный ресурс] – Исследовательская группа «Инфолайн». Режим доступа: <http://www.infomine.ru>.
23. Бакланов А.В. Способ получения инициатора полимеризации винилхлорида // Химический журнал. – 2006. – № 12. – С. 22.

24. Попова З.В., Тихова Н.В. Получение и свойства поливинилхлорида. Под ред. Зильбермана Б.Н. – М.: Химия, 1968. – 288с.
25. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойство, технология: учеб. пособие. Под ред. Берлина А.А. – СПб.: Профессия, 2008. – 560с.
26. Киреев В. А. «Краткий курс физической химии». Изд. 5-е, стереотипное. – М.: Химия, 1978. – 624 с., ил.
27. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения: 3 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 656 с., ил.
28. Киреев В.В. Высокомолекулярные соединения. – М.: Высш. школа, 1992. – 512 с.
29. Семчиков Ю.Д. Высокомолекулярные соединения. – М.: Академия, 2005. – 367 с.
30. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / под ред. Гроссмана Ф. 2-е изд.: пер. с англ. / под ред. В.В. Гузеева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 608 с.
31. [Электронный ресурс] – RFA-Engineering ПВХ компоненты и оборудование. Режим доступа: <http://www.rfa-engineering.ru>.
32. Штаркман Б.П. Пластификация поливинилхлорида. – М.: Химия, 1975. – 248 с.
33. Штаркман Б.П. Основы разработки термопластических полимерных материалов. – Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2004. – 328 с.
34. Козлов В.П., Папков С.П. Физико-химические основы пластификации полимеров. – М.: Химия, 1982. – 224 с., ил.
35. Воробьев В.А. Технология строительных материалов и изделий на основе пластмасс. Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 472 с., ил.
36. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Технология полимеров. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. – М.: Высш. школа, 1980. – 303 с., ил.

37. Darby J.R., Sears J.K. // *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. V. 10.: – New York, 1969. – P. 228.
38. Тиниус К. Пластификаторы. Пер. с нем. Ткаченко Г.В. и Левиной З.М. под ред. Тростянской Е.Б. – М.-Л.: Химия, 1964. – 916 с.
39. [Электронный ресурс] – Новые технологии переработки пластмасс. Режим доступа: <http://www.polymer.ru>.
40. ГОСТ 8728-88 Пластификаторы. Технические условия. Взамен ГОСТ 8728-77; введен 01.01.90. – М.: Издательство стандартов, 1990.
41. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник. Изд. 5-е, перераб. и доп. Под ред. Белоруссова Н.И. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
42. Белоруссов Н.И., Федосеева Е.Г. Кабели, провода и шнуры с пластмассовой изоляцией. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 320 с.
43. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: справочник / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наукова думка, 1977. – 244с.
44. Zanella A., Omacini A. Influenza delle condizioni di lavorazione e di estrusione sulle caratteristiche tecnologiche di mescole di PVC per isolamento di cavi di energia. // *Materie Plastiche ed Elastomeri*. – 1968. – Vol. 2. – Pp. 188-202.
45. Pezzin G., A. Omacini and F. Zilio-Grandi. La transizione vetrosa dei sistemi cloruro di polivinile-diluyente. // *Chim. Ind. Milan*. – 1968. – Vol. 50. – Pp. 309-313.
46. Гузеев В.В. Рациональный выбор добавок для композиций ПВХ// *Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии*. – М.: Отраслевые ведомости, 2010. – № 7–8. – С. 38-48.
47. Armstrong R.W., Strauss U.P. Polyelectrolytes. // *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Vol. 10. – New York, 1969. – 861 p.
48. Барштейн Р.С., Ермолаев Г.С. Совместимость полиэфирных пластификаторов с поливинилхлоридом // *Пластические массы*. – 1970. – № 10. – С. 47–51.

49. Smith P.V., Newberg R.G., Young G.D. Properties of Polyvinyl Chloride Compounds // *Industr. Eng. Chem. Vol. 42.* – 1950. – P. 2576–2583.
50. Барштейн Р.С., Кирилович В.И., Носовский Ю.Е. Пластификаторы для полимеров. – М.: Химия, 1982. – 200 с., ил.
51. Zhou Q., Tang C., Wang Y.Z., Zheng L. Catalytic degradation and dechlorination of PVC-containing mixed plastics via Al-Mg composite oxide catalysts // *Fuel.* – V. 83, 2004. – P. 1727–1732.
52. Минскер К.С., Федосеева Г.Т. Деструкция и стабилизация поливинилхлорида. – М.: Химия, 1972. – 427 с.
53. Минскер К.С., Берлин А.А., Лисицкий В.В., Колесов С.В., Корнева Р.С. О связи термической стабильности окисленного поливинилхлорида с химическим строением его макромолекул // *Доклады АН СССР.* – 1977. – Т.232, № 1. С. 93–96.
54. Минскер К.С., Берлин А.А., Лисицкий В.В., Колесов С.В. Причина низкой стабильности поливинилхлорида. // *Пластические массы,* 1976. – № 10. – С. 67-70.
55. Минскер К.С., Колесов С.В., Янборисов В.М., Берлин А.А., Заиков Г.Е. Еще раз о причинах низкой стабильности поливинилхлорида // *Высокомолекулярные соединения. Серия А.* – 1984. – Т.26, № 5. С. 883–899.
56. ГОСТ 9.710-84 Единая система защиты от коррозии и старения. Старение полимерных материалов. Термины и определения. Взамен ГОСТ 17050-71; введен 01.01.86. – М.: Издательство стандартов, 1988.
57. Плотникова Г.В., Халиуллин А.К., Гусарова Н.К., Сухов Б.Г., Куимов В.А., Тимохин Б.В. Влияние доступных фосфорсодержащих соединений на снижение горючести поливинилхлоридных пластизолов // *Материалы III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий».* Томск, 2004. С. 83-84.

58. Owen E.D. Chemical Aspects of PVC Stabilisation // Degradation and Stabilisation of PVC. Ed. Owen E.D. Elsevier Applied Science. – New York, 1984. – P. 197–252.
59. Ivan, B., Thermal stability, degradation, and stabilization mechanisms of poly (vinyl chloride). Adv // Chem. Ser. – 1996. – V. 249. – P. 19-32.
60. Минскер К.С., Редосеева Г.Т., Заварова Т.Б. О стабилизации поливинилхлорида производными ди- и моноалкилолова // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1969. – Т.11, № 8. – С. 603–605.
61. Седельникова В.Н., Терман Л.М., Разуваев Г.А. Стабилизирующее действие изоцианата трифенилолова в процессе термодеструкции поливинилхлорида // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1975. – Т.17, № 3. – С. 237–238.
62. Седельникова В.Н. Терман Л.М., Колесов С.В., Минскер К.С., Разуваев Г.А. К механизму стабилизирующего действия оловоорганических изоцианатов при термораспаде поливинилхлорида // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1976. – Т.18, № 11. – С. 849–851.
63. Кондратьев В.В., Кириллов Н.С. Новые термостабилизаторы ПВХ-композиций // Пластические массы. – 2007. – № 7. – С. 9.
64. Miller V. Encyclopedia of polymer science and engineering // Plast. World. – 1975. – V. 33, N 6. – P. 42–43.
65. Обрядчикова К.Н., Гузеев В.В., Коврига В.В., Рафиков М.Н. Влияние наполнителей на некоторые свойства пластифицированного ПВХ // Пластические, массы. – 1975. – № 7. – С. 61–63.
66. Рафиков М.Н., Гузеев В.В., Малышева Г.П. и др. Исследование взаимодействия наполнителей с поливинилхлоридом // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1975. – Т.17, вып. 7. – С. 557–559.
67. Гузеев В.В., Булучевский А.Г., Рафиков М.Н. и др. Изменение объема наполненного пластифицированного поливинилхлорида при деформации//

- Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1975. – Т.17, вып. 12. – С. 408–410.
68. Варламова Л.П., Извозчикова В.А., Аверенко А.С., Семчиков Ю.Д., Рябов С.А. Огнезащитные полимерные композиции на основе поливинилхлорида и перхлорвинилового смолы // Журнал прикладной химии. – 2008. Т.81., вып. 4. – С. 675-678
69. Шеков А.А., Егоров А.Н, Анненков В.В. Роль модифицированного наполнителя в повышении огнестойкости поливинилхлоридных материалов // Материалы III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий». Томск, 2004. С. 112-113.
70. Шеков А.А., Егоров А.Н, Анненков В.В. Влияние наноразмерных добавок на горючесть поливинилхлоридных материалов // Материалы III Всероссийской научной конференции «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий». Томск, 2004. С. 113-114.
71. Шеков А.А., Егоров А.Н, Анненков В.В. Влияние кремний содержащих наполнителей на свойства горючесть поливинилхлоридных материалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 57-62.
72. Шеков А.А., Егоров А.Н., Анненков В.В. Влияние органо-неорганических наполнителей на пожарную опасность полимерных материалов // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2004. – Т.28. – № 6. – С. 89-92.
73. Наумов Ю.В. Применение наполнителей на основе железооксисодержащих руд как способ снижения горючести эпоксидных наливных композиций // Пожарная безопасность. – 2004. – С. 58-62.
74. Naitove M.I., Evans L. PVC Plastics: Properties, Processing and Applications// Plast. Technol. – 1976. – V. 22, № 8. – P. 49, 51–74.
75. Wyruch G. Handbook of Fillers. – Toronto: ChemTec Publ., 2000. – P. 48–58, P. 800.

76. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. М. Ксантоса: пер. с англ., под ред. В.Н. Кулезнева. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 311 с.
77. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справочное пособие. Пер. с англ. / Под ред. Бабаевского П.Г. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
78. Пенева А., Никова А. Върху някои свойства на смеси от поливинилхлорид и високомолекулни съединения. – Год. на Висшия химико-технол. инст. – Бургас, т. VI, кн. 2, 1969. – С. 59-66.
79. Шапиро Т.М., Горшков В.С. Взаимодействие поливинилхлорида с наполнителем // Пластические массы. – 1968. – № 11. С. 10–12.
80. Гузеев В.В., Рафиков М.Н., Малинский Ю.М. О влиянии дисперсности наполнителей на вязкость расплавов ПВХ // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1975. – Т.17, № 4. – С. 804–806.
81. [Электронный ресурс] – Химическая энциклопедия. Режим доступа: <http://www.ximuk.ru>.
82. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров. – М.: Химия, 1989. – 432 с., ил.
83. [Электронный ресурс] – Энциклопедия физики и техники. Режим доступа: <http://femto.com.ua>.
84. [Электронный ресурс] – Инженерный справочник. Режим доступа: <http://www.dpva.info>.
85. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1970. Т.1. – 492 с.
86. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. – М., Научный мир, 2009. – 384 с., ил.
87. Хохлов А.Р., Кучанов С.И. Лекции по физико-химии полимеров. – М.: Мир, 2000. – 192 с.
88. Аскадский А.А. Лекции по физико-химии полимеров. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001. – 222 с.

89. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
90. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. школа, 1990. – 368 с., ил.
91. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высш. школа, 1990. – 400 с., ил.
92. Рындин Н. И. Краткий курс теории упругости и пластичности. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1974. – 136 с.
93. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Пер. с англ. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
94. Амензаде Ю.А. Теория упругости. Изд. 3-е, доп. – М.: Высш. школа, 1976. – 272 с., ил.
95. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. – М.: Наука, 1981. – 688 с.
96. Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высш. школа, 1979. – 432 с., ил.
97. [Электронный ресурс] – Учебно-методический сайт для поддержки курса дисциплины "Высокомолекулярные соединения" (ВМС). Режим доступа: <http://dmitry-muryshkin.narod.ru>.
98. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1978. – 328 с., ил.
99. Кулезнев В.Н., Шершенев В.А. Химия и физика полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2007, 367 с., ил.
100. [Электронный ресурс] – Большая Энциклопедия Нефти и Газа. Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>.
101. ГОСТ 11262-80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Взамен ГОСТ 11262-76; введен 01.12.1980. – М., Издательство стандартов, 1986.
102. ГОСТ 4651-82 Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Взамен ГОСТ 4651-78; введен 01.07.1983. – М., Издательство стандартов, 1998.

103. Эрдоган Ф., Кобаяси А., Атлури С. и др. Вычислительные методы в механике разрушения. Пер. с англ. Под ред. Атлури С. – М.: Мир, 1990. – 392 с., ил.
104. Хеллан К. Введение в механику разрушения. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 364 с., ил.
105. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
106. Керштейн И.М., Ключников В.Д., Ломакин Е.В. и др. Основы экспериментальной механики разрушения. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 140 с., ил.
107. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. Под ред. Ельяшевича А.М. – Л.: «Химия», 1990. – 432 с.
108. Валишин А.А., Степанова Т.С. Применение многомерного статистического анализа в исследованиях долговременной прочности полимеров. 1. Теория // Вестник МИТХТ. – 2007, Т.2, № 1. – С. 40-48.
109. Регель В.Р., Слункер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 450 с.
110. Сивухин Д.В. Общий курс физики: термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2006. – 562 с.
111. Таблицы физических величин: Справочник. Под ред. Кикоина И.К. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
112. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
113. Физический энциклопедический словарь. Под ред. Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с., ил.
114. Большой энциклопедический словарь. Под ред. Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1993. – 1632 с.
115. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М., Энергия, 1975. – 488 с.

116. Минскер К.С., Колесов С.В., Заиков Г.Е. Старение и стабилизация полимеров на основе винилхлорида. М.: Наука, 1982. – 272 с.
117. Bulsari A., Konkarikoski A., Lahtinen J. Nonlinear modelling of optical fibre drawing with OFC 20 // Proceeding of the International Wire and Cable Symposium. – USA, 2001. – P. 13-18.
118. Bulsari A., Lahti M. Nonlinear modelling of secondary coating from expensive experimental data // Proceeding of the International Wire and Cable Symposium. – USA, 2001. – P. 302-305.
119. Bulsari A., Lahti M. Nonlinear models guide secondary coating of OFCs // Wire and Cable Technology International. – 2001. – V. 29. – № 5. – P. 40-43.
120. Bulsari A., Lahti M., Sneck S. Optimizing OFC secondary coating – Use of nonlinear model simplifield // Wire and Cable Technology International. – 2002. – V. 30. – № 3. – P. 44-46.
121. Bulsari A., Lahti M., Sneck S. Control of loose butter tube properties with advanced techniques of nonlinear modeling // Proceeding of the International Wire and Cable Symposium. – USA, 2002. – P. 267-274.
122. Bulsari A., Lahti M., Sneck S. A new technology for process guidance of secondary coating // Proceeding of Wire Asia 2002. – Shanghai, China, 2002. – P. 113-117.
123. Булсари А., Лахти М., Снек С. Применение нелинейного моделирования для волоконно-оптических кабелей // Кабели и провода. – 2004. – № 2. – С. 21-25.
124. Neher J.H., McGrath M.H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems // AIEE Trans. – 1957. – Vol. 76, Part 3 – P. 755-772.
125. George J. Anders Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications. – McGraw Hill Professional, 1997. – 428 p.

126. De Leon F., Anders G.J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite elements method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – V. 23. – № 2. – P. 537-543.
127. Flatabo N. Transient Heat Conduction Problems in Power Cables Solved by the Finite Element Method. – IEEE Trans. on PAS. – 1973. – P. 56-63.
128. Electric cables – Calculations for current ratings – Finite element method. – IEC Technical Report TR 62095. – First Edition 2003.
129. Грешняков Г.В., Ковалев Г.Г., Дубицкий С.Д. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12-16.
130. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалев Г.Г., Коровкин Н.В. Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов // Кабели и провода. – 2013. – № 4. – С. 15-21.
131. Ковригин Л.А. и др. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS // Кабель-News. – 2009. – № 4. – С. 91-95.
132. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ кабеля // Кабель-News. – 2009. – № 10. – С. 47-51.
133. Баннов В.В. Математическая модель электромагнитных влияний на ближнем конце между цепями симметричного кабеля для широкополосного абонентского доступа с пленко-пористо-пленочной полиэтиленовой изоляцией // Кабели и провода. – 2009. – № 5. – С. 20-23.
134. Xiao-Bang Xu, Guanghao Liu. Investigation of the magnetic field produced by unbalanced phase current in an underground three phase pipe-type cable // Electric Power Systems Research. – 2002. – V. 62. – P. 153-160.
135. Xiao-Bang Xu, G. Liu. A two step numerical solution of magnetic field produced by elf sources within a steel pipe // Progress in Electromagnetics Research, PIER. – 2000. – V. 28. – P. 17-28.

136. Kuang J., Boggs S. Pipe-type cable losses for balanced and unbalanced currents // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – V. 17. – № 2. – P. 313-317.
137. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалев Г.Г., Коровкин Н.В. Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты // Кабели и провода. – 2013. – № 4. – С. 9-14.
138. Антонец Ю.А., Золотарев В.М., Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Математическая модель электрических процессов в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабели и провода. 2014. № 5 (348). С. 17-21.
139. Веселовский В.Б., Берлов А.В., Белый Н.И., Ляшенко В.И. Температурные поля электрических кабелей при воздействии полей различной физической природы // Вісник Дніпропетр. ун-ту.Механіка. – 2001. – Т.1. – вип. 5. – С. 73-83.
140. Веселовский В.Б., Берлов А.В., Белый Н.И., Ляшенко В.И. Расчет температурных полей электрических кабелей // Минский международный форум по теплообмену (MIF V). – 2004.
141. Marshall J.S., Hines P.D., Zhang J.D., Minervini F., Rinjitham S. Modeling the impact of electric vehicle charging on heat transfer around underground cables // Electric Power Systems Research. – 2013. – V. 97. – P. 76-83.
142. Yang Liu, Nhan PhannThien, Kemp R. Coupled conduction-convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. – 2000. – V. 1. – № 2. – P. 187-206.
143. R. de Lieto Vollaro, Fontana L., Vallati A. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. – 2011. – V. 31. – P. 772-778.

144. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.12. – № 4 (5) – С. 1318-1321.
145. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов при определении допустимых токовых нагрузок кабельных линий // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т.325. – № 4. – С. 82-90.
146. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Математическое моделирование и управление пропускной способностью кабельных линий в подземном канале // Электротехника. – 2012. – № 11. С. 11-14.
147. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. С. 38-41.
148. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Численное исследование температурного поля в кабельных линиях для анализа возможности уплотнения кабельного канала // Электротехника. – 2014. – № 11. – С.11-14.
149. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование сложного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле // Тезисы докладов XVIII Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2013. – С. 253.
150. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процессов сложного теплообмена в кабельном канале и управление токовой нагрузкой силовых кабелей с учетом тепловых потерь в металлических экранах // Материалы конференции «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск, 2013. – С.272-276.

151. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М., Марковский М.В. Математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С.55-66.
152. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса в кабельном канале с учетом потерь в экранах кабелей // Тезисы докладов XIX Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2015. – С. 218.
153. Навалихина Е.Ю. Математическое моделирование процессов сложного тепломассопереноса в кабельном канале: канд. тех. наук. Перм. нац. исслед. политех. университет, Пермь, 2015.
154. Мещанов Г.И., Холодный С.Д. Физико-математическая модель процесса горения электрических кабелей при групповой прокладке // Кабели и провода. – 2007. – № 4 (351). – С. 10-14.
155. Каменский М.К., Крючков А.А., Савин Д.В., Степанова Т.А., Троицкая Г.А., Фрик А.А., Шувалов М.Ю. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процессов, развивающихся при горении безгалогенных полимерных композиций, применяемых в конструкциях пожаробезопасных кабельных изделий // Кабели и провода. – 2012. – № 6. – С. 3-9.
156. Булычев Д.А., Каменский М.К., Крючков А.А., Савин Д.В., Степанова Т.А., Фрик А.А., Шувалов М.Ю. Применение математического моделирования для сравнительного анализа горения (пиролиза) безгалогенных полимерных композиций в условиях конкалориметрического эксперимента // Кабели и провода. – 2015 – № 2. – С. 7-15.

157. Ларин Ю.Т. Теоретические посылки для создания математической модели оптических кабелей – шаг к компьютерным методам описания, расчета и диагностики кабельного изделия // Кабели и провода. – 2004 – № 1. – С. 12-14.
158. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Компьютерная модель процессов тепломассопереноса в кабельном канале при различных режимах работы кабельных линий // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9. – Ч.5. – С. 988-992.
159. Ошхунов М.М., Тхакахов Р.Б. Математические модели и методы расчета на прочность поливинилхлоридных композиций // Пластические массы. – 2007. – № 11. – С. 43-47.
160. Труфанов Н.А., Труфанова Н.М., Широких Д.И. Математическая модель образования технологических напряжений в пластмассовой изоляции провода // Пластические массы. – 1997. – № 8. – С. 33-36.
161. Зиннатуллин Р.Р., Труфанова Н.М. Численное моделирование технологических напряжений при изготовлении пластмассовой изоляции провода // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2009. – Т.2. – № 1. – С. 38-53.
162. Зиннатуллин Р.Р. Определение критерия качества, предсказывающего образование дефектов при охлаждении пластмассовой изоляции провода, наложенной методом экструзии // Кабель-News. – 2009. – № 9. – С. 48-52.
163. Ошхунов М.М. О сходимости итерационных процессов в нелинейной упругости // Прикладная механика. – Киев, 1995. – Т.31. – № 1. – С. 84-100.
164. Ошхунов М.М. О скорости сходимости итерационных процессов нелинейной упругости // Прикладная механика. – Киев, 1995. – Т.31. – № 1. – С. 117.
165. Комаров Г.Н., Ошхунов М.М. О разрешимости физически нелинейных задач теории упругости // Украинский математический журнал. – 1996. – № 6. – С. 132.

166. Ошхунов М.М, Комаров Г. И. О существовании решений физически нелинейных задач термоупругости // Украинский математический журнал. – 1996. – Т.48 (7). – С. 59–64.
167. Oshkhunov M.M. Introduction to Solid Mechanics – Nalchik: KBSU, 2000. – 40 p.
168. 16. Oshkhunov M.M., Ozden S. The general stress and strain relation ship in non-linear materials // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2000. – Т. 35. – С. 763-767.
169. Ошхунов М.М. Математические модели физически нелинейных деформируемых твердых тел и методы последовательных приближений // Актуальные вопросы современного естествознания. Сб. научных трудов. Альманах, посвященный 100-летию со дня рождения А.И. Колмогорова. – 2003. – № 1. – С. 95-101.
170. Ошхунов М.М., Нагоев З.В. Дискретно-динамическое моделирование задач теории упругости // Материалы второй всероссийской конференции «Проблемы информатизации регионального управления». – Нальчик, 2006. – С. 50-55.
171. Ошхунов М.М., Елеева Р.Д. Молекулярно-динамическое моделирование и тестирование некоторых задач теории упругости // Известия КБНЦ РАН. – 2006. – С. 139.
172. Ошхунов М.М. Механика деформируемого твердого тела: альтернативный подход // Известия КБНЦ РАН. – 2006. – № 1. – С. 72-75.
173. Ошхунов М.М. Об одном общем методе решения задач механики деформируемых твердых тел и его использование в виртуальных средах // Материалы первой международной конференции «Автоматизация управления и интеллектуальные системы и среды». – Издательство КБНЦ РАН, 2010. – Т.1. – С. 76-85.
174. Nagoev Z.V., Oshkhunov M.M. Discrete-dynamic particle method in problems of mechanics of deformable solids // Mechanics of Solids. – 2011. – V.46. – № 4. – С. 622-634.

175. Ошхунов М.М., Нагоев З.В., Макоева Р.Д. Метод частиц в задачах механики сплошных сред и теплопередачи. // Известия КБНЦ РАН. – 2012. – № 3. – С.32-36.
176. Ошхунов М.М., Нагоев З.В. Моделирование свойств деформируемых сред взаимодействующими частицами // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. – 2014. – Т.36. – № 19 (190). – С. 155-163.
177. [Электронный ресурс] – Энциклопедии и словари. Режим доступа: <http://enc-dic.com>.
178. Ошхунов М.М., Нагоев З.В. Математические модели деформируемых сред для интеллектуальных систем виртуального прототипирования. – Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013 – 201 с.
179. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. – 543 с.
180. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986 – 318 с.
181. Деклу Ж. Метод конечных элементов: Пер. с франц. – М.: Мир, 1976. – 96 с.
182. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
183. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М.: Мир, 1979. – 392 с.
184. ГОСТ 31996-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. Введен впервые; введен 01.01.2014. – М., Стандартинформ, 2013.
185. Каргин В.А. Энциклопедия полимеров. Т.2 Л-Полинозные волокна. – М.: Сов. Энци., 1974. – 1032 с., ил.
186. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. Изд. 2-е. – М.-Л.: Химия, 1966. – 768 с.

187. [Электронный ресурс] – Интерактивный учебник по физике. Режим доступа: <http://www.physel.ru>.
188. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. I. Механика. – М.: Физматлит, 2005. – 560 с.
189. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
190. Нагоев З.В., Ошхуннов М.М. Метод дискретно-динамических частиц в задачах механики деформируемого твердого тела // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 4. – С. 155-169.
191. Боли Б. Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений – М.: Мир, 1964. – 517 с.
192. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Бортник И.М. и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с.
193. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
194. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0, 4-35 кВ. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 88 с.
195. Правила устройства электроустановок. – М.: Кнорус, 2015. – 488 с.
196. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 512 с., ил.
197. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. – М.: Физматлит, 1958. – 338 с.
198. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения. Пер. с англ. – М.: Наука, 1968. – 548 с.
199. Иглин С.П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MatLab. Учебное пособие – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.
200. Иглин С.П. Математические расчеты на базе Matlab. – СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 2007. – 640 с.

201. Поршнеv С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования. – М.: Бином-Пресс, 2010. – 320 с.
202. Шмойлова Р.А. Теория статистики. Под ред. Р.А. Шмойловой. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 656с.