На правах рукописи

БОЧКАРЁВА СВЕТЛАНА АЛЕКСЕЕВНА

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ РАЗБРОСА УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

Специальность
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск 2006

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Люкшин Борис Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, ст.н.с. Герасимов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент Смолин Игорь Юрьевич

Ведущая организация: **Томский государственный архитектурно-строительный университет**

Защита диссертации состоится "____" _____2006 г. в "____" часов на заседании диссертационного совета Д212.267.13 при Томском государственном университете по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан "____"_____2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.267.13,
доктор технических наук Христенко Ю.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Деформационно-прочностные свойства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяются различными факторами: механическими свойствами фаз, характером их взаимодействия, видом включений (их геометрии), степенью наполнения, технологией изготовления и т.д. Нестабильность параметров технологических процессов изготовления изделий из ПКМ приводит к тому, что их деформационно-прочностные свойства являются не строго детерминированными, а в значительной мере случайными величинами.

Таким образом, на уровне матрицы-включения (мезоуровне) физико-механические и прочностные свойства материала меняются в некотором малом масштабе от точки к точке, и параметры напряженно-деформированного состояния могут достигать в отдельных областях значений, близких к критическим, что может привести к разрушению конструкции. В связи с этим требуется оценка влияния рассеяния свойств фаз ПКМ на их эффективные свойства и на надежность изготовленных из них конструкций.

Первые исследования по определению эффективных модулей упругости композитов связаны с работами Фойгта и Рейса, предложившими аналитические формулы вычисления эффективных модулей по правилу механического смешивания. Многообразие структур реальных композиционных материалов приводит к многообразию подходов и методов определения их эффективных свойств, основанных на различных физико-математических моделях.

Наиболее известными в этой области являются работы Z. Hashina, S. Shtrikmana, E. Kronera, Р. Кристенсена, Р. Хилла, Г.А. Ванина и т.д.

В настоящее время в работах В.Е. Панина, С.Г. Псахье, П.В. Макарова, В.Н. Лейцина, Ю.Н. Сидоренко и других авторов развиваются модели, основанные на многоуровневом подходе. Материал в целом рассматривается как многоуровневая, иерархически организованная система, но возникает сложность перехода от описания свойств и поведения единичного объекта к описанию систем таких объектов с учетом их взаимодействия.

Основной недостаток существующих методов и теорий заключается в том, что они либо в недостаточной мере учитывают влияние структуры композита на его эффективные свойства, либо вводимые предположения и упрощения направлены на то, чтобы исключить из рассмотрения реальную структуру материала или существенно ее упростить. Точные решения получены для определенных моделей композиционных материалов при очень жестких предположениях относительно свойств материала и геометрии конструкции. Большинство результатов получено для двухфазных материалов. Возможное рассеяние свойств фаз ПКМ не учитывается при построении моделей структурно-неоднородных сред и при вычислении из эффективных характеристик.

Поэтому необходима оценка влияния рассеяния свойств фаз на эффективные характеристики материала, а также на надежность конструкции в целом.

Кроме того, в большинстве случаев уровень механических нагрузок и геометрия изделий носят статистический характер, что также оказывает влияние на надежность конструкции.

Таким образом, точное теоретическое предсказание того, насколько прочной будет та или иная конструкция из ПКМ, практически невозможно, даже если известны прочностные характеристики материала, полученные на стандартных образцах при стандартных испытаниях. В таких случаях прочность и разрушающие напряжения являются вероятностными величинами.

Несмотря на то, что существует достаточное большое количество работ по исследуемой проблеме (Н.С. Стрелецкого, А.Р. Ржаницына, В.В. Болотина, Н.Ф. Хоциалова, К. Капура, Л. Ламберсона, С.В. Серенсена, В.С. Стреляева, Ю.И. Реутова, А.И. Реутова, К.Н. Кана, А.Я. Гольдмана), тем не менее при вычислении эффективных характеристик не учитывается возможное рассеяние свойств фаз ПКМ при построении моделей структурно-неоднородных сред и при оценке надежности конструкций.

Целью диссертационной работы является определение влияния разброса свойств фаз ПКМ на их эффективные деформационно-прочностные характеристики, разработка методов прогноза надежности конструкций из ПКМ и построение полей вероятностей безотказной работы для конкретных конструкций с учетом полученного разброса эффективных характеристик материала, случайного изменения геометрических размеров конструкции и параметров эксплуатационных нагрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) исследовать влияние рассеяния свойств фаз дисперсно наполненных ПКМ на эффективные и деформационно-прочностные свойства материала на основе физико-математической модели структурно-неоднородной среды;
2) получить массив параметров напряженно-деформированного состояния конструкций на основе численных экспериментов, с учетом экспериментально обнаруженной неоднородности свойств полимерных материалов и их колебаний от образца к образцу;
3) обработать полученные данные с помощью методов теории вероятности и математической статистики для определения надежности конструкций, построить поля вероятности безотказной работы в упругом и нелинейно-упругом случаях, в том числе применительно к конкретным элементам конструкций: 1) к трубопроводу под действием внутреннего давления и осевого сжатия; 2) к элементу аварийного клапана.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан метод определения вероятности безотказной работы конструкций из полимерных композиционных материалов с учетом нестабильности свойств полимерных материалов, отклонения геометрии изделий и параметров нагрузки от их номинальных значений;

- реализован алгоритм определения вероятностей безотказной работы конструкций, изготовленных из структурно-неоднородных материалов с применением численного моделирования;
- разработан метод получения эффективных свойств материала с учетом рассеяния свойств фаз дисперсно-наполненных полимерных композиций на основе физико-математической модели структурно-неоднородной среды;
- разработан вычислительный алгоритм, реализующий методику получения эффективных свойств, основанный на методе конечных элементов и процедуре последовательных нагружений, позволяющий в линейной и нелинейной постановке получать эффективные характеристики композиции на основе информации о структуре материала (о фазовом составе) с учетом случайного отклонения свойств фаз от их номинальных значений;
- получены количественные оценки влияния неоднородности свойств фаз ПКМ на его эффективные деформационно-прочностные свойства, что позволило учесть технологические особенности их изготовления.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- численно реализован и применен метод определения эффективных свойств к анализу полимерных композитных материалов, содержащих одну и две фракции дисперсного наполнителя, что иллюстрирует его универсальность и применимость для анализа свойств широкого спектра полимерных дисперсно наполненных композиций;
- получены распределения вероятности безотказной работы по конструкции применительно к конкретным классам изделий: трубы под действием внутреннего давления и осевого сжатия и элемента аварийного клапана высокого давления, позволяющие оценить зоны наиболее вероятного разрушения и определить управляющие параметры, для которых требуется особенно тщательный контроль при изготовлении и эксплуатации изделий. Разработанный подход применим к анализу достаточно произвольного вида и назначения конструкций.

На защиту выносятся положения и результаты:

- метод получения эффективных свойств материала с учетом рассеяния свойств фаз на основе физико-математической модели структурно-неоднородной модели с применением численного моделирования;
- метод численного определения вероятности безотказной работы конструкций из полимерных композиционных материалов с учетом нестабильности свойств полимерных материалов, отклонения геометрии изделий и параметров нагрузки от их номинальных значений;
- оценка надежности конкретных конструкций с целью выбора наиболее подходящего материала: 1) трубопровода под действием внутреннего давления и осевого сжатия и 2) элемента аварийного клапана высокого

давления в случаях упругого и нелинейно-упругого поведения материала конструкции.

Обоснованность и достоверность представленных результатов обеспечивается строгостью математических формулировок задач, тестированием вычислительных алгоритмов путем сравнения результатов расчета с имеющимися аналитическими решениями и экспериментальными данными. Внутренняя сходимость численных алгоритмов проверена сопоставлением результатов, полученных при различном разбиении конечно-элементной сетки. Выбор размеров рассматриваемого в диссертации представительного объема обоснован сходимостью свойств композиции при его увеличении.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись на 10 отраслевых, Всероссийских и Международных конференциях:

1) VIII отраслевое совещание «Проблемы и перспективы развития ТНХК», Томск, 1994; 2) IX отраслевое совещание «Проблемы и перспективы развития ТНХК», Томск, 1995; 3) The scientific conference on the Use of Research Conversion Results in the Siberian Institutes of higher education for international cooperation (SIBCONVERS 95), Tomsk, 1995; 4) 4-я Международная конференция «CADAMT`95. Компьютерное конструирование перспективных материалов и технологий», Томск, 1995; 5) VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Механика летательных аппаратов и современные материалы», Томск, 2002; 6) Abstracts of the Int. workshop "Mesomechanics: Fundamentals and Application" (MESO' 2003) and the VII Int. conf. "Computer aided desing of advanced materials and techndlogies" (CADAMT' 2003). Томск, 2003; (2 сообщения); 7) Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых специалистов «Научная сессия ТУСУР - 2004», Томск, 2004; 8) IV Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», Томск, 5-7 октября 2004г.; 9) VIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Наука и образование», Томск, 2004 (2 сообщения); 10) Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск, 2004. Кроме того, основные результаты представлены на IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006 г.).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 1 приложения, списка используемой литературы. Работа содержит 144 страницы, 36 рисунков, 3 таблицы. Список используемой литературы включает в себя 122 наименования.

Основное содержание работы

Во введении диссертации проведен обзор и анализ основных методов определения эффективных свойств композитных полимерных материалов и оценки работоспособности полимерных изделий. Обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цель и задачи. Формулируются результаты, составляющие научную и практическую значимость работы, положения, выносимые на защиту и новизна исследования. Приводится также обоснование достоверности результатов.

В первой главе на основе физико-математической модели полимерного дисперсно-наполненного композитного материала разработан и численно реализован метод, позволяющий получать макрохарактеристики материала с учетом информации о его структуре, свойствах фаз, рассеяния свойств фаз, а также о характере межфазного взаимодействия. Численное моделирование неоднородности структуры материала и рассеяние эффективных свойств от опыта к опыту проводилось с помощью программ, генерирующих последовательности псевдослучайных чисел с заданным (нормальным) законом распределения, и методов математической статистики.

Вычислительный алгоритм, реализующий определение параметров НДС основан на методе конечных элементов и процедуре последовательных нагружений, что позволяет получать эффективные характеристики композиции в случаях упругого и неупругого деформирования и рассматривать большие деформации дисперсно-наполненных композиций**.** В основе метода конечных элементов лежит вариационная постановка задачи теории упругости. Решение задачи теории упругости в этом случае предполагает минимизацию функционала потенциальной энергии системы. В результате задача сводится к решению системы алгебраических уравнений относительно узловых перемещений, и затем вычисляются компоненты тензоров деформаций и напряжений.

Проведено тестирование полученных вычислительных алгоритмов для плоской и осесимметричной задач сравнением результатов расчета с имеющимися для частных случаев соответствующими аналитическими решениями. Результаты тестирования показали, что численное и аналитическое решения отличаются в пределах, не превышающих погрешности определения свойств фаз, заложенных в расчет.

Во второй главе метод определения эффективных деформационно-прочностных свойств ПКМ с учетом рассеяния свойств фаз (разработанный в первой главе) применен к дисперсно наполненному полимерному композиционному материалу с целью оценки влияния неоднородности свойств фаз на эффективные деформационно-прочностные характеристики дисперсно наполненной полимерной композиции с учетом информации о структуре и свойствах фаз.

При необходимости значительно повысить степень наполнения использование включений одного размера нерационально. Для решения этой задачи обычно используется наполнение матрицы включениями, отличающимися друг от друга по размерам на порядок и более. В этом случае

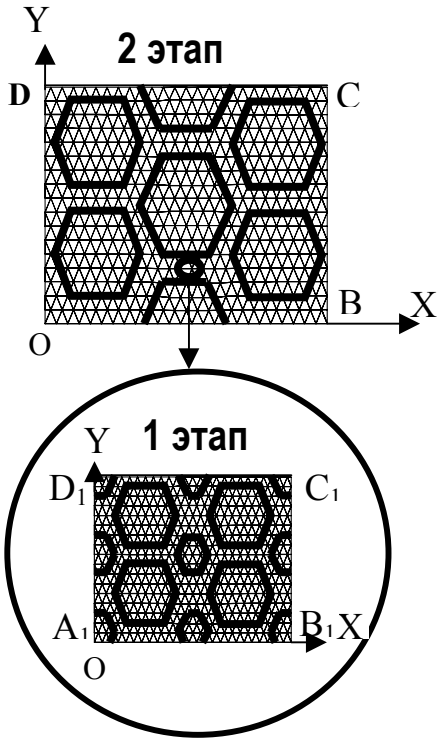
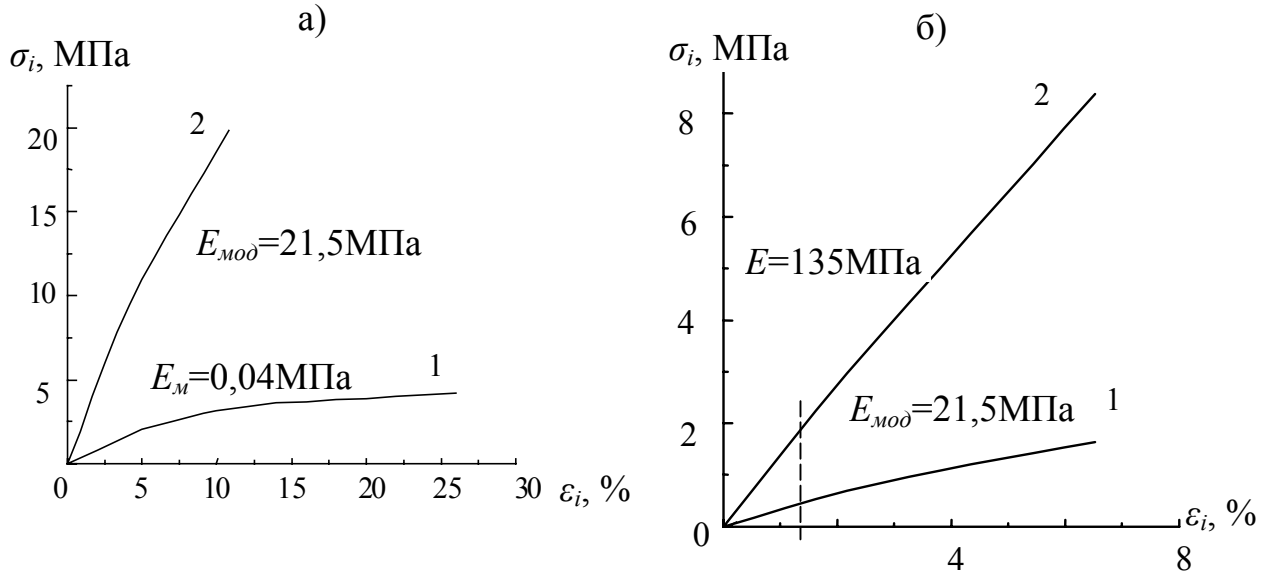


Рис.1. Этапы анализа НДС полимерной композиции

пустоты, возникающие между включениями большего размера, заполняются более мелкой фракцией наполнителя, что в целом, значительно увеличивает степень наполнения. Проблемы такого рода актуальны, например, при создании твердотопливных зарядов. В этих случаях повышение степени наполнения композиции становится одной из главных целей. Происходящее изменение механических свойств композиции требует проведения соответствующих оценок.

Стандартные процедуры численного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) в этом случае становятся неприменимыми в силу большого отличия размеров включений. На любой регулярной сетке становится невозможно учесть либо крупные, либо мелкие включения. По этой причине анализ проводится в два этапа, при этом на первом этапе анализа получаются свойства матрицы, модифицированной мелкими включениями, на втором – эффективные характеристики материала в целом (рис. 1), т.е. на первом этапе рассматривается материал между крупными включениями как матрица (каучук), наполненная мелкой фракцией. Матрица характеризуется следующими свойствами: модуль упругости матрицы $E_м$ = 0,04 МПа, коэффициент Пуассона $\nu_м$ = 0,49. Свойства дисперсных частиц (пыли)



1 – исходный материал (каучук);
2 – каучук, наполненный мелкой фракцией.

1 – каучук, наполненный мелкой фракцией;
2 – каучук, наполненный двумя фракциями.

Рис.2. $\sigma_i \sim \varepsilon_i$ диаграмма полимерной композиции в случае одноосного растяжения

следующие: модуль упругости включения $E_в$ = 400 МПа, коэффициент Пуассона $\nu_в$ = 0,4.

Моделирование одноосного растяжения представительного объема материала позволило определить на первом этапе в упругом случае свойства модифицированной матрицы: коэффициент Пуассона $\nu_{мод}$ = 0,37 и модуль Юнга при растяжении $E_{мод}$ = 21,5 МПа и построить диаграмму $\sigma \sim \varepsilon$ в случае неупругого деформирования материала. На втором этапе рассматривается материал с полученными на первом этапе свойствами матрицы, а включения учитываются явно в виде дисперсных частиц. С помощью моделирования одноосного растяжения представительного объема материала на этом этапе определены в упругом случае коэффициент Пуассона ν = 0,27 и модуль Юнга при растяжении E = 135 МПа. Моделирование сдвига позволило определить модуль сдвига для материала в целом G = 62 МПа. Таким образом, были получены эффективные упругие характеристики материала в целом и построена $\sigma \sim \varepsilon$ диаграмма поведения материала (рис. 2).

Анализ композиции, наполненной большими (характерный размер компактных включений 200 мкм) и мелкими (4-6 мкм) включениями показывает, что полученный материал становится менее эластичным, но его модуль упругости увеличивается. Это необходимо учитывать при эксплуатации подобных материалов и при изготовлении конструкций из них.

Во второй задаче определялось влияние неоднородности свойств матрицы по рассматриваемому представительному объему на эффективные характеристики материала. Рассчитывалось НДС композиции на основе политетрафторэтилена. Разброс модуля упругости матрицы задавался случайным образом по всему представительному объему – с помощью датчика псевдослучайных чисел – в пределах 20% от номинального значения. Расчеты показали, что разброс модуля упругости, в частности для политетрафторэтилена, оказывает на макрохарактеристики композита незначительное влияние - изменение модуля упругости материала в целом не превышает 6%, а кривые σ ~ ε для случая одноосного растяжения практически совпадают. Для рассматриваемого представительного объема материала

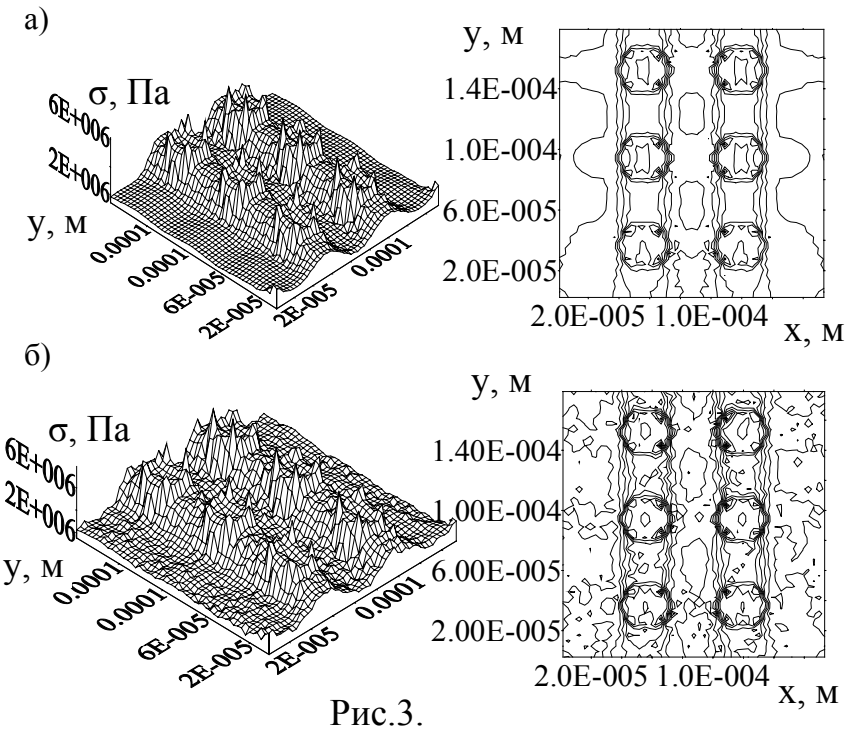


Рис.3.

получены поверхности и изолинии напряжений (рис.3). В случае неоднородного распределения модуля упругости наблюдаются осцилляции напряжений, вызванные разбросом свойств фаз (рис.3, б).

Таким образом, упругие характеристики материала являются практически структурно независимыми, в то время как прочностные характеристики, в том числе предельная деформация разрушения, связана с разбросом характеристик фаз.

На мезоуровне параметры напряженно-деформированного состояния материала матрицы могут достигать в отдельных элементах значений, близких к критическим, что может привести к разрушению конструкции. Поэтому необходима обработка полученных результатов статистическими методами для получения зависимостей прочностных параметров материала от случайного разброса свойств матрицы в представительном объеме. Чтобы удовлетворить прочностным требованиям, предъявляемым к материалу, в данном случае нужно знать диапазон изменения модулей упругости матрицы и включений.

В третьей главе рассмотрены методы вероятности безотказной работы конструкции от разброса одного и нескольких управляющих параметров. Разработан метод численного определения вероятности безотказной работы конструкций из полимерных композиционных материалов с учетом нестабильности свойств полимерных материалов, отклонения геометрии изделий и параметров нагрузки от их номинальных значений, на основе экспериментально полученных данных. В работе использованы экспериментальные данные, полученные сотрудниками кафедры механики и графики ТУСУРа.

Для расчета надежности конструкций, в том числе с разбросом свойств материала, используются в основном два подхода: вероятностный и детерминистский. В некоторых инженерных задачах совмещают оба подхода. Использование вероятностных расчетов при проектировании означает, что величины, используемые для оценки несущей способности конструкции, принимаются случайными. Детерминированное проектирование основывается на том, что величины, определяющие несущую способность конструкции, определены точно, что по отношению к полимерным композиционным материалам неприемлемо. В основном их свойства колеблются в определенном диапазоне, а не являются точной величиной. Расчет ведется по средним значениям параметров, а наличие отклонений для реальных материалов от этих значений учитывается введением коэффициента запаса прочности.

Таким образом, точное теоретическое предсказание того, насколько прочной будет та или иная конструкция из ПКМ, практически невозможно, даже если известны прочностные характеристики материала, полученные на стандартных образцах при стандартных испытаниях. В таких случаях прочность и разрушающие напряжения являются вероятностными величинами. Одним из основных показателей надежности или безотказности является вероятность безотказной работы (ВБР) конструкции. Работоспособность конструкции означает, что за время ее эксплуатации не наступит ни одно из недопустимых предельных состояний, т.е. такое состояние, при котором дальнейшая

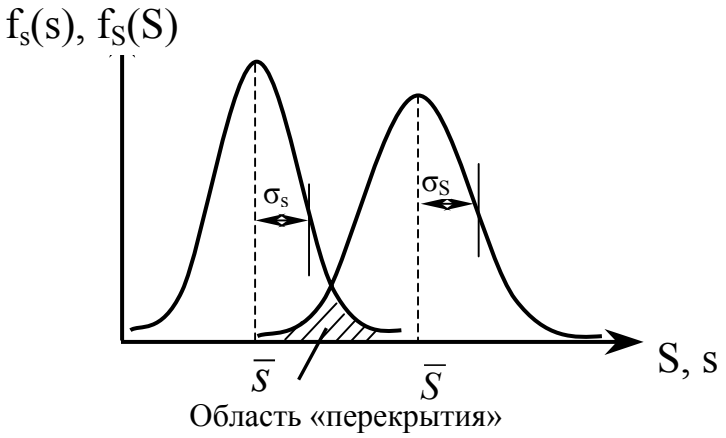


Рис. 4. Плотности распределения эквивалентных и критериальных напряжений

эксплуатация конструкции невозможна. Предельное состояние может определяться развитием чрезмерных деформаций, потерей несущей способности (усталостью, прочностью), образованием и раскрытием трещин и т.д. Для определения ВБР конструкций из ПКМ с учетом нестабильности их свойств определяются параметры НДС конструкции, которые носят вероятностный характер, строятся кривые распределения значений эквивалентных напряжений и/или деформаций в каждой точке конструкции и сравниваются с экспериментально полученными предельными напряжениями, имеющими также вероятностный характер.

Если обозначить через $f_s(s)$ – плотность распределения напряжения s, а $f_S(S)$ – плотность распределения прочности S (рис. 4), тогда вероятность безотказной работы имеет вид

$$R = P(S > s) = P(S - s > 0).$$

Область «перекрытия», полученная в результате сопоставления кривых распределения эквивалентных напряжений и их предельных значений (прочности) характеризуется определенной вероятностью отказа. В случае если плотность распределения эквивалентных напряжений s подчиняется нормальному закону распределения:

$$f_s(s) = \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right], -\infty < s < \infty.$$

и аналогичному закону подчиняется плотность распределения предельных напряжений S (прочности)

$$f_s(S) = \frac{1}{\sigma_S\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S-\mu_S}{\sigma_S}\right)^2\right], -\infty < S < \infty.$$

где μ_s – математическое ожидание эквивалентных напряжений, σ_s – среднее квадратичное отклонение эквивалентных напряжений, μ_S – математическое ожидание предельных напряжений, σ_S – среднее квадратичное отклонение предельных напряжений. Поскольку вероятность безотказной работы

определяется площадью между *0* и ∞ под кривой распределения, то её можно выразить через y как

$$R = P(y > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] dy$$

Если $z = (y - \mu_y)/\sigma_y$, то $\sigma_y dz = dy$. При $y = 0$ нижний предел случайной величины z имеет вид

$$z = \frac{0 - \mu_y}{\sigma_y} = -\frac{\mu_S - \mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}}$$ – уравнение связи

а при $y \to +\infty$ верхний предел $z \to +\infty$. Следовательно,

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu_S - \mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}}}^{\infty} e^{-z^2/2} dz$$

Ясно, что $z = (y - \mu_y)/\sigma_y$ является нормированной случайной величиной, распределенной по нормальному закону.

Формулу (1) можно представить в виде:

$$R = 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_S - \mu_s}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}}\right),$$

где *Ф* – интеграл Лапласа.

Уравнение связи устанавливает вероятностное соотношение между приложенными и допустимыми напряжениями, а величину z называют также показателем надежности. Если z определено, то вероятность безотказной работы R может быть найдена по таблицам функции нормального распределения.

Процесс анализа надежности можно разделить на следующие этапы:

1. Выявление внешних факторов, определение конструктивных и технологических параметров, влияющих на параметры напряженно-деформированного состояния конструкции: X_1, X_2,…, X_n (E, μ, d_1, d_2, σ_T, P_1,P_2,…)
2. Количественная оценка эффективных свойств материала, конструктивных параметров, действующих нагрузок, параметров напряженно-деформированного состояния. Определение их функций распределения.
3. Количественная оценка прочности элементов и разрушающих нагрузок, включая их функции распределения, установленные в результате экспериментальных данных.
4. Расчет вероятности безотказной работы, на основе полученных данных.

Таким образом, если определены возможные случайные факторы и их количественные значения, производится расчет их статистических характеристик – математического ожидания и среднеквадратичного отклонения. Затем проводится многократное определение параметров НДС, которые являются функциями случайных величин $Y = f(X_1, X_2,\ldots, X_n) = f(E, \mu, d_1, d_2, \sigma_T, P_1, P_2,\ldots)$, характеризующих параметры материала, геометрию конструкции, разброс нагрузки. В результате полученные параметры НДС, следуя теоремам теории вероятности, тоже можно трактовать как случайные величины, распределенные по нормальному закону. Их математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение оцениваются для значений интенсивности напряжений (деформаций) в каждой конечно-элементной ячейке расчетной сетки по соответствующим формулам теории вероятностей, что позволяет построить функции плотности распределения для каждой ячейки.

Необходимо отметить, что способы аналитического определения математического ожидания и дисперсии случайных функций по формулам теории вероятности возможно, если существует детерминированная зависимость - $\mathbf{Y = f(X_1, X_2,\ldots, X_n) = f(E, \mu, d_1, d_2, \sigma_T, P_1, P_2,\ldots)}$ между случайными параметрами. В случае же решения конкретных задач, в силу их нелинейности либо сложности, не всегда можно получить такого рода зависимость или определить необходимые для расчета среднеквадратического отклонения частные производные случайной функции по каждому из параметров. Эту задачу можно решить, используя численное моделирование НДС конструкции, имеющей случайные характеристики. Определение надежности в этом случае будет проводиться по следующей схеме:

1) С помощью программы, генерирующей последовательность случайных чисел с определенным (нормальным) законом распределения, моделируется отклонение каждого из параметров конструкции от его номинального значения, в частности: модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела текучести, геометрических размеров, нагрузки.
2) Из полученных рядов с помощью датчика случайных чисел формируются массивы случайных отклонений расчетных параметров.
3) Для N случаев решается задача определения параметров напряженно-деформированного состояния с учетом полученного рассеяния расчетных параметров.
4) Для полученных в каждой отдельной задаче (опыте) значений эквивалентных напряжений или деформаций определяются математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение по формулам теории вероятностей.
5) Полученные распределения эквивалентных напряжений (деформаций) сравниваются с экспериментально полученными распределениями для предельных напряжений или деформаций соответственно, с целью получения вероятностей безотказной работы.

Существуют различные предельные состояния, соответствующие использованию определенных критериев прочности. Предельные состояния могут определяться уровнем напряжений, развитием чрезмерных деформаций, образованием и раскрытием трещин. В зависимости от специфики полимерного материала и назначения конструкции проводят расчет по одному из критериев или по нескольким предельным состояниям одновременно.

В частности, для труб характерна проверка 2-х предельных состояний. В случае проверки по первому предельному состоянию эквивалентное напряжение рассчитывается в зависимости от того, какое ожидается разрушение: хрупкое или вязкое. Для кристаллизующихся полимеров – полиэтилен, полипропилен – характерно хрупкое разрушение, поэтому эквивалентное напряжение рассчитывается по критерию наибольших касательных напряжений или по критерию интенсивности напряжений, выражающему «среднее» касательное напряжение в точке (критерий Губера-Мизеса). В случае проверки по критерию предельных деформаций для труб принималось допускаемое приращение наружного диаметра (обычно для полимерных изделий не более 10%).

Тестирование вычислительного алгоритма для определения вероятности безотказной работы конструкции проведено сравнением результатов с аналитически полученным значением ВБР участка трубопровода под действием внутреннего давления на основе формул Ляме. Исследовалась ВБР в двух случаях: 1) если параметры напряженно-деформированного состояния являются функциями одного случайного параметра $\sigma(P)$, где P – внутреннее давление и 2) если параметры напряженно-деформированного состояния являются функциями нескольких случайных параметров $\sigma(P,D,d)=\sigma(x_i)$ – действующей нагрузки (внутреннего давления P), наружного D и внутреннего диаметра d. В качестве расчетных данных использовались характеристики, соответствующие морозостойкому полипропилену МПП 15-04.

Отличие результатов, полученных численно и аналитически, составило не более 3%.

Таким образом, в третьей главе показано, что при расчете вероятностей безотказной работы конструкций характерное для полимерных композиционных материалов большое рассеяние физико-механических свойств, а также характерное для большинства конструкций отклонение геометрических размеров и действующих нагрузок от их номинальных значений можно учитывать с помощью датчика случайных чисел, а вероятность безотказной работы, при отсутствии аналитических зависимостей, определять с помощью численного моделирования.

В четвертой главе методика расчета вероятности безотказной работы применена к конкретным изделиям из полимерных материалов: 1) трубы под действием внутреннего давления и осевого сжатия; 2) определения надежности элемента уплотнительного узла аварийного клапана полиэтилена высокого давления.

В первом случае определялась ВБР конструкции, выполненной в виде участка трубы из полимерных материалов на основе полипропилена: 1) МПП 15-04 – морозостойкий полипропилен, 2) БСПЭ – блоксополимер полиэтилена с этиленом, в случае, когда возникающие напряжения являются случайными функциями, зависящими от одного или нескольких случайных параметров. Трубопроводы, изготовленные из этих материалов, используются для транспортировки воды, газа и т.д. Определение ВБР трубы проводилось при разных температурах – 20˚С и 60˚С.

В силу осевой симметрии задачи анализировалась расчетная область, представляющая собой половину осевого сечения трубы. Осесимметричная задача решается в физически нелинейной постановке. В качестве эквивалентной деформации (напряжения), по которой можно судить о работоспособности данного материала в конструкции, принимается интенсивность деформаций (напряжений). Для определения параметров НДС использовался метод конечных элементов в сочетании с процедурой последовательных нагружений.

Сопоставляя полученные интенсивности деформаций (напряжений) с предельными экспериментальными значениями, имеющими также случайное распределение, получаем в каждой точке трубы значение функции вероятности безотказной работы конструкции *R*.

Таким образом, ответ на вопрос о надежности или о возможном разрушении конструкции при рассматриваемом подходе получается в виде вероятности неразрушения материала во всех точках изделия, что можно представить в виде поверхностей распределения ВБР по поперечному сечению конструкции. На рис.5 приведен пример распределения ВБР трубы из материала на основе полипропилена – МПП при температуре 60˚С в виде поверхности (справа) и соответствующих ей изолиний (слева). Очевидно, что на

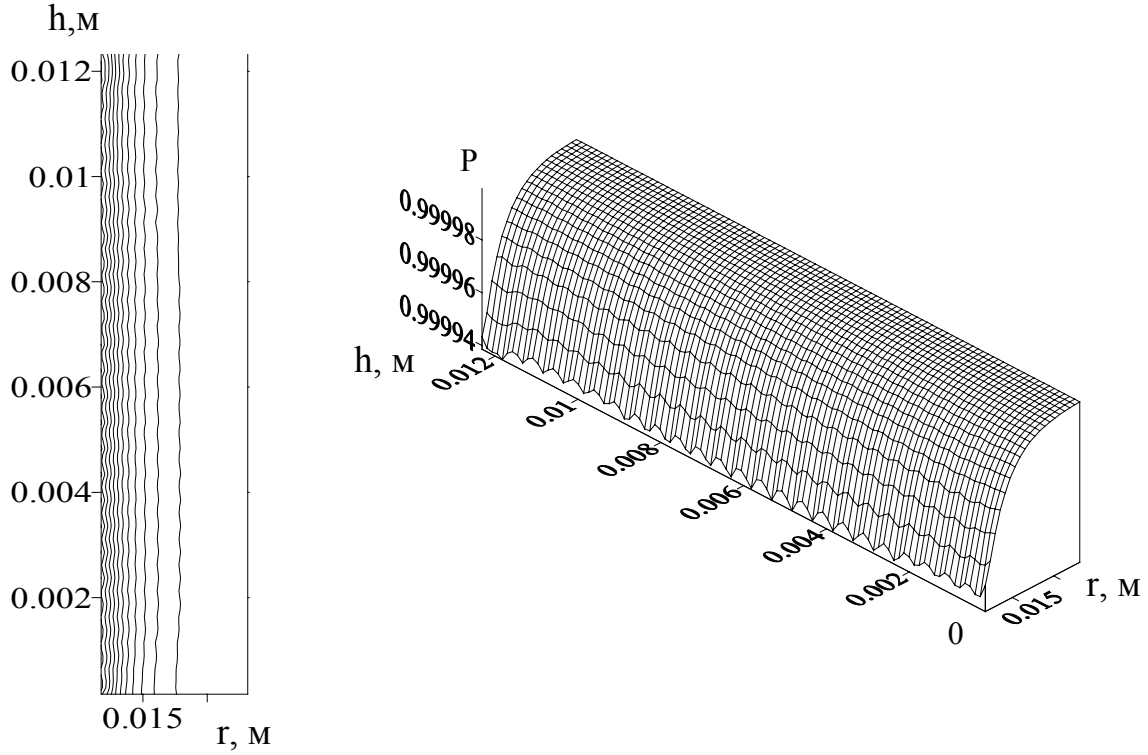


Рис. 5. поверхность и изолинии распределения вероятности безотказной работы по осевому сечению участка трубы.

внутренней поверхности трубы вероятность безотказной работы меньше. Исследовалось изменение ВБР при увеличении нагрузки в случае упругопластического деформирования по двум предельным состояниям. При проверке по первому предельному состоянию за предельное напряжение принималось напряжение текучести, а в качестве эквивалентного напряжения – интенсивность напряжений. При проверке по второму предельному состоянию за предельную деформацию принималось ее значение, отвечающее

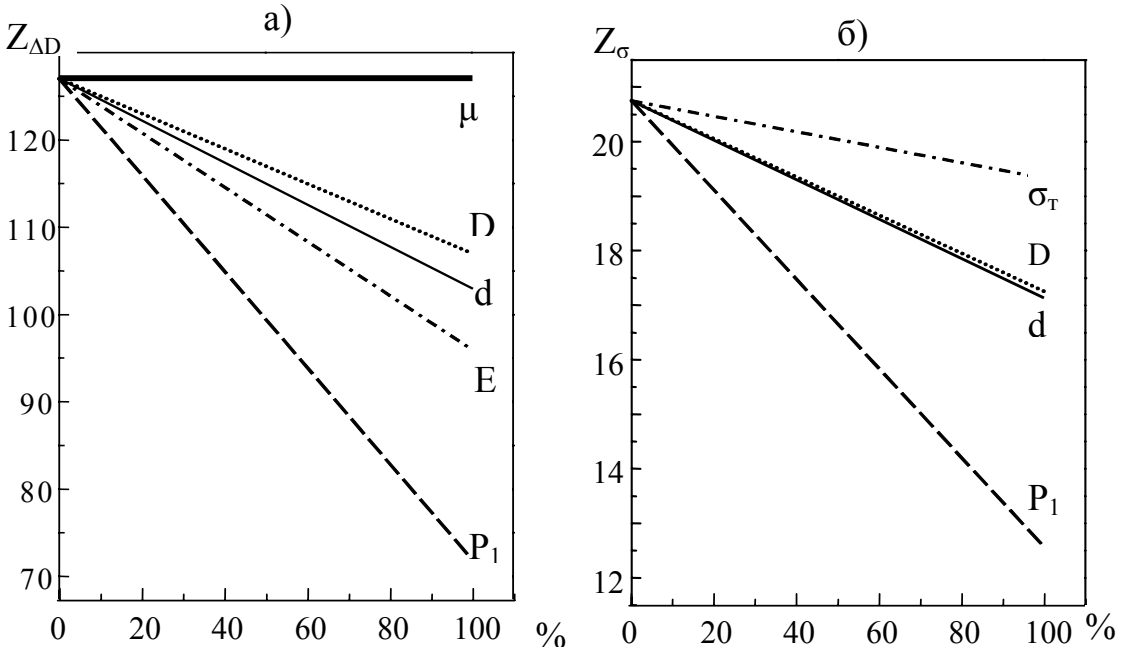


Рис. 6. Зависимость показателя надежности Z от увеличения среднего значения случайных параметров.

максимальному приращению внешнего диаметра 10%. Анализ полученных результатов позволяет выбрать наиболее надежный материал для изготовления трубопроводов. При заданных условиях эксплуатации из рассмотренных выше материалов таким является БСПЭ, так как ВБР изготовленных из него труб равна 1.

Для определения наиболее значимых параметров по отношению к работоспособности конструкций проводилось исследование зависимости показателя надежности *z* от увеличения математического ожидания (рис.6) и среднеквадратичного отклонения возможных случайных параметров (внутреннего *d* и внешнего диаметров трубы *D*, внутреннего давления *P*, модуля упругости *E* и предела текучести $\sigma_т$, коэффициента Пуассона μ). Рис.6, а соответствует проверке по критерию предельных деформаций, рис.6, б - соответствует проверке по критерию максимальных напряжений. Аналогичная картина получилась и при увеличении среднеквадратичного отклонения случайных параметров.

Из приведенных результатов следует, что наиболее значимым параметром является *P*, далее по убывающей *E*, *d, D,* σ_T. Изменение коэффициента Пуассона в данном случае роли не играет. Это означает, что при проектировании

полимерных труб важно учитывать скачки нагрузки и контролировать величину предела текучести и модуля Юнга материала, так как они являются наиболее значимыми параметрами, а в процессе изготовления наиболее строго контролировать геометрические размеры.

Во втором случае рассчитана вероятность безотказной работы для узла сальникового уплотнения аварийного быстродействующего клапана реактора полиэтилена высокого давления.

На рис. 7 представлено поперечное сечение полимерного композитного кольца, которое выполняет функцию уплотнения. Полимерные композитные кольца чередуются в узле с жесткими металлическими кольцами.

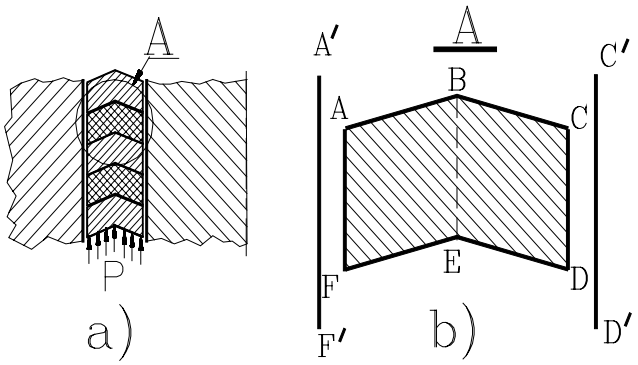


Рис.7. Схема узла уплотнения (а)
и расчетная область ABCDEFA (б) – поперечное сечение
кольца. Линии $A'F'$, $C'D'$ - контур корпуса клапана

Решалась задача выбора наиболее подходящего материала с точки зрения надежности для изготовления уплотнительных колец на основе информации об имеющемся кольце-прототипе, изготовленном австрийскими производителями (фирма Беллер). Были выбраны 3 композиции разного состава для изготовления колец: политетрафторэтилен; политетрафторэтилен, наполненный тремолитом (φ=15%) и никелем (φ=10%) и композиция на основе политетрафторэтилена, наполненного базальтом (φ=15%) и медью (φ=10%). На основе этих композиций изготовлены 4 вида образцов. При наполнении базальтом при разном давлении прессования получены 2 вида образцов. Отработка состава и технологии изготовления образцов проводилась на кольцах с прямоугольным поперечным сечением, по размерам идентичным сечению реального кольца.

С учетом полученных разбросов модуля упругости материала и предела текучести рассчитывалось их влияние на разброс параметров напряженно-деформированного состояния кольца. Учет и моделирование рассеяния параметров, характеризующих деформационно-прочностные свойства материала, в том числе предела прочности, и случайное изменение свойств материала (модуля упругости) проводилось с использованием датчика случайных чисел. В силу осевой симметрии задачи анализировалась расчетная область, представляющая собой половину осевого сечения кольца. Для определения параметров НДС решалась осесимметричная задача теории

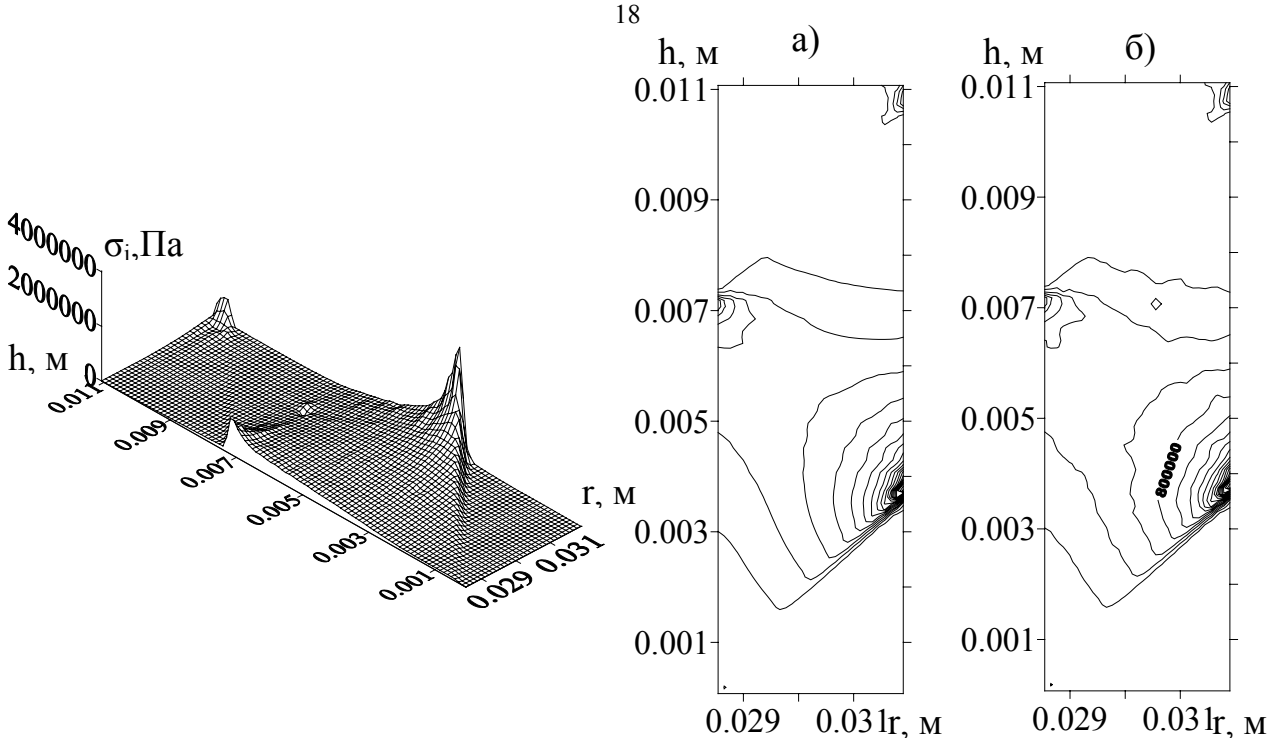


Рис. 8. Распределения интенсивности напряжений и соответствующие изолинии

упругости с помощью метода конечных элементов в сочетании с процедурой пошагового нагружения. На границе кольца с корпусом клапана задавались смешанные граничные условия.

На рис.8 показаны поверхность интенсивности напряжений и изолинии: а) соответствует случаю однородному распределению модуля упругости по объему конструкции; б) случаю, когда учитывается разброс этой характеристики. Наблюдается некоторое изменение изолиний, но в целом уровень интенсивности напряжений заметно не меняется.

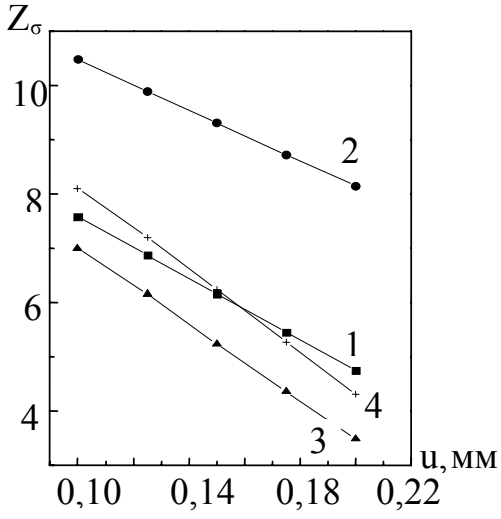


Рис. 9. Изменение показателя надежности с увеличением нагрузки

Для определения наилучшего материала проводилось исследование увеличения нагрузки на показатель надежности z (как наиболее чувствительной величины), и тем самым на величину вероятности безотказной работы. Очевидно, что при одинаковых условиях эксплуатации наилучшим является материал 2 – политетрафторэтилен, наполненный тремолитом, поэтому он был выбран для изготовления колец (рис.9). На рис.10 показаны примеры поверхностей распределения вероятностей безотказной работы и изолинии для 4 и 3 материалов. Показано, что наиболее напряженным участком кольца является вершина нижнего

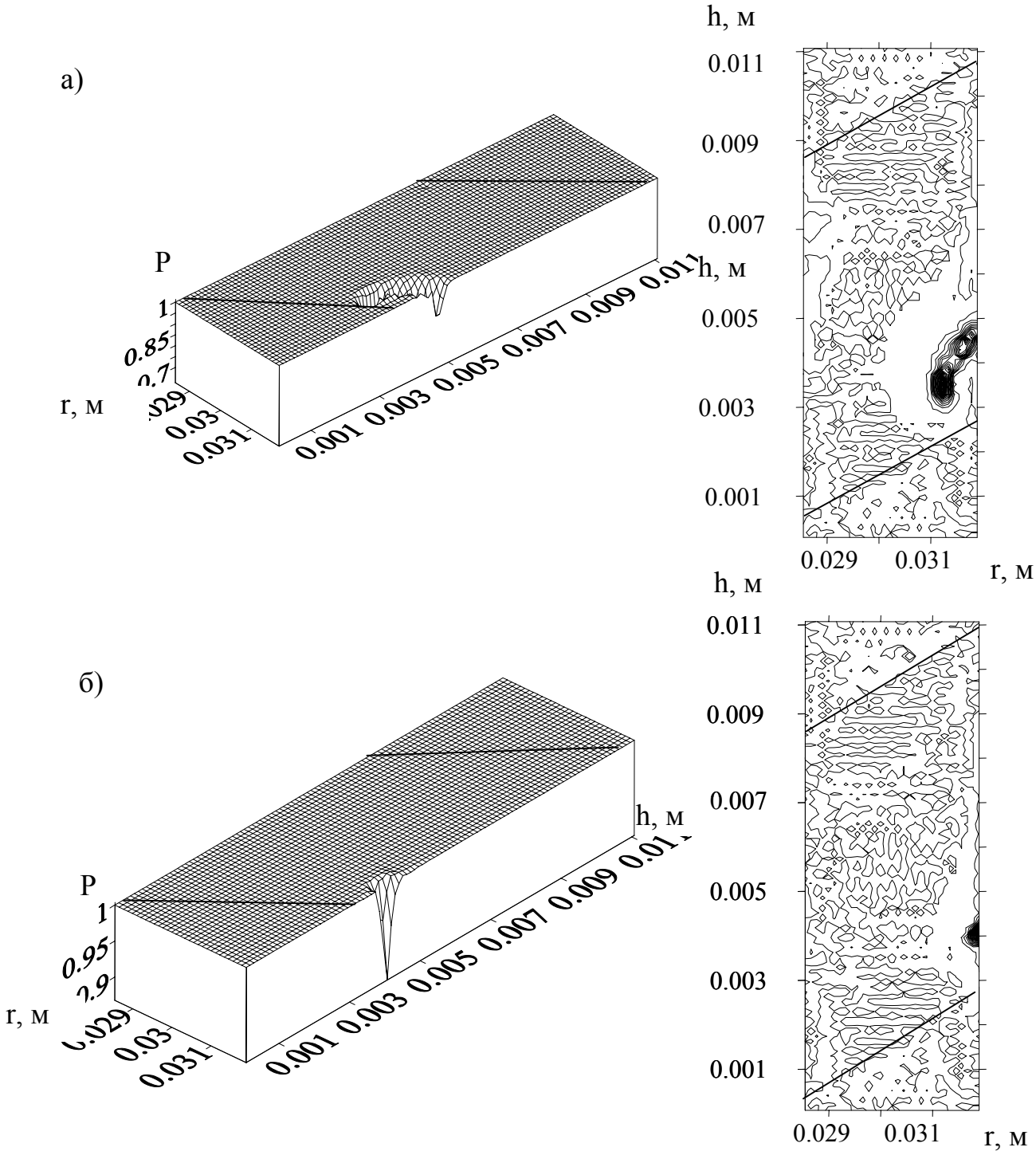


Рис. 10. Поверхности распределения вероятности безотказной работы уплотнительного кольца.

профиля кольца так называемого шевронного вида. В этой зоне соответственно возрастает вероятность разрушения и отказа изделия, получены количественные связи уровня напряжений (деформаций) с вероятностью отказа.

Проведенные в условиях производства испытания в период с марта 2005г. по февраль 2006г. показали, что изготовленные из разработанного материала уплотнительные узлы обеспечивают необходимую герметичность клапана в

эксплуатационном режиме нагружения и уплотнительные кольца рекомендованы к дальнейшему использованию в сальниках арматуры высокого давления вместо импортных аналогов.

Акт «об испытаниях и использовании отечественных материалов в уплотнительных элементах арматуры высокого давления» прилагается к диссертации.

В заключении изложены основные выводы исследования и представлены результаты, полученные в работе.

1. Разработан метод определения вероятности безотказной работы конструкций из полимерных композиционных материалов на основе численного эксперимента с учетом нестабильности свойств полимерных материалов, отклонения геометрии изделий и параметров нагрузки от их номинальных значений.

2. Приведенные в работе примеры иллюстрируют последовательность построения полей вероятности безотказной работы конструкции – от получения свойств материала на основе анализа его структурного и фазового состава, оценки разброса этих свойств по объему изделия до учета внешних факторов – геометрии изделия и параметров нагрузки, в том числе учета их случайного характера. На основе разработанной методики исследована надежность конкретных конструкций: трубопровода под действием внутреннего давления и осевого сжатия и элемента аварийного клапана высокого давления в случаях упругого и нелинейно-упругого поведения материала конструкции с целью выбора наиболее подходящего, с точки зрения надежности, материала для изготовления рассматриваемых конструкций. Построение полей вероятностей безотказной работы элементов конструкций с учетом физической нелинейности материала выполнено впервые.

3. Разработан метод получения эффективных свойств материала с учетом рассеяния свойств фаз на основе физико-математической модели структурно-неоднородной среды с применением численного моделирования, позволивший исследовать влияние разброса свойств фаз дисперсно наполненных полимерных композиций на их эффективные деформационно-прочностные характеристики. Модель реализована с использованием аппарата механики деформируемого твердого тела и применения метода конечных элементов в случае численной реализации, при этом решение нелинейных задач основано на использовании процедуры последовательных нагружений. Метод позволяет анализировать материалы с дисперсными включениями различного фракционного состава и последовательно, по мере изменения масштаба анализа, уточнять значения эффективных деформационно-прочностных характеристик композиций.

4. Получены оценки значимости (ранжирование) управляющих параметров по отношению к критериям работоспособности элементов конкретных конструкций. В частности, показано, что наиболее значимыми параметрами для трубопровода являются (по мере убывания) величина нагрузки, предел текучести материала, модуль упругости, толщина стенки и т.д. Эти исследования позволили дать практические рекомендации по выбору

наиболее жестко контролируемых параметров на этапе производства и эксплуатации конструкций.

Полученные в работе результаты имеют достаточно общий характер в том отношении, что метод получения вероятностей безотказной работы конструкций и построения соответствующих полей применим к материалам не только на полимерной основе, но и к другим – металлам, сплавам, керамике при наличии достоверной информации о распределении свойств материала по конструкции, а также об изменении этих свойств от опыта к опыту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Филатов И.С. Критерии качества материала для бампера автомобиля // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината. Тезисы докладов VIII отраслевого совещания. Томск, 1994, с. 24.
2. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Филатов И.С. Требования к полимерному композитному материалу для трактов гусениц снегоходов // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината. Тезисы докладов IX отраслевого совещания. Томск, 1995, с.186.
3. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А. Обоснование прочностных испытаний материала // CADAMT`95. Компьютерное конструирование перспективных материалов и технологий. Тезисы докладов 4-й Международной конференции. Томск, 1995. с. 54 - 55.
4. Alexeev L.A., Bochkareva S.A., Ljukshin B.A., Osipov Yu.V. The polymer composite materials tilled with powder – models of medium and analysis of structure // The scientific conference on the Use of Research Conversion Results in the Siberian Institutes of higher cducation for international cooperation (SIBCONVERS 95). Abstracts. – Tomsk: Tomsk State Academy of Control Systems and Radioelectronics, 1995, pp.42 - 43.
5. Алексеев Л.А., Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Осипов Ю.В. Дисперсно наполненные материалы – модели среды и расчет конструкций // Сибконверс-95. Труды международной конференции. Томск, 1996. т.1, с.96 - 98.
6. Бочкарева С.А., Матолыгина Н.Ю. Влияние разброса свойств матрицы на макро характеристики дисперсно наполненных полимерных композитных материалов // Механика летательных аппаратов и современные материалы. Сборник докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 2002.
7. Bothcareva S.A., Ljukshin B.A., Matolygina N.A. Computer aided desing of a particle-reinforced polymer composite with two specified characteristics // Abstracts of the Int. workshop "Mesomechanics: Fundamentals and Application" (MESO' 2003) and the VII Int. conf. "Computer aided desing of advanced materials and technndlogies" (CADAMT' 2003). Томск: 2003, с. 211 - 212.
8. Bothcareva S.A., Ljukshin B.A., Ljukshin P.A., Matolygina N.A., Osipov Yu. B., Reutov A.I. Investigation of the influence of specimen shape and size on measured strain and strength characteristics // Abstracts of the Int. workshop "Mesomechanics: Fundamentals and Application" (MESO' 2003) and the VII Int. conf. "Computer aided

desing of advanced materials and techndlogies" (CADAMT' 2003). Томск: 2003, с. 212 - 213.
9. Бочкарева С.А., Реутов А.И. Определение вероятностей безотказной работы конструкций из полимерных материалов // Научная сессия ТУСУР – 2004. Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых специалистов. Томск, 2004, с. 162.
10. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Реутов А.И. Влияние разброса свойств фаз полимерной композиции конструкционного назначения на ее деформационно-прочностные свойства и вероятность безотказной работы // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады IV Всероссийской научной конференции. Томск, изд-во ТГУ, 2004, с. 178-179.
11. Бочкарева С.А., Реутов А.И. Влияние нестабильности свойств полимерных материалов на вероятность безотказной работы конструкций // Наука и образование. Доклады VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). Томск, 2004, с. 14-18.
12. Бочкарева С.А., Смолянинова Н.В. Исследование зависимости прочностных характеристик полимерной композиции от нестабильности свойств матрицы // Наука и образование. Доклады VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). Томск, 2004, с. 18-23.
13. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Реутов А.И. Определение вероятностей безотказной работы конструкций из полимерных материалов // Физическая мезомеханика. Томск, 2004, Т.7, с. 43-45.
14. Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Реутов А.И. Оценки надежности конструкций из полимерных композитных материалов – Известия ТПУ, 2004, Т. 307, №6, с. 108-112.
15. Анисимов И.И., Бочкарева С.А., Десятых В.И., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Смолянинова Н.В. Эффективные деформационно-прочностные характеристики полимерной композиции с дисперсными включениями разных размеров – Физическая мезомеханика, 2006, Т.9, №2, с. 11-15.