

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пре/пост процессор FEMAP и анализатор NX Nastran адаптировано к ЭВМ с разными типами процессоров и с разными операционными системами, с одним или большим количеством процессоров (параллельные расчеты). Рассматриваемый комплекс FEMAP 10.2 & NX Nastran 7.1 (сокращенное название: SPLMS.Fv10.2.0), является неполной версией из этих и некоторых других программ обслуживания для ПЭВМ с операционной системой Windows NT. Основное назначение SPLMS.Fv10.2.0 для Windows – начальное обучение и расчеты относительно небольших задач нескольких основных типов. Кроме того, комплектация комплекса SPLMS.Fv10.2.0 и возможность решения им не основных типов задач зависит от условий контракта, по которому поставляется программа.

В этой книге описаны только основы работы в FEMAP для NX Nastran. Но если овладеть этим объемом информации, можно решать значительное число типов краевых задач, представленных в NX Nastran. Кроме того, FEMAP имеет интерфейс со многими другими программами, в которых реализован метод конечных элементов. Каждая из этих программ имеет свою специфику, описание которой (для FEMAP) требует много места. Но практика показывает, что почти всегда данные для них формируются и передаются неточно, с проблемами. Поэтому рекомендуют пользоваться „родными” пре- и постпроцессорами. Кроме того, все эти программы очень дорогие, поэтому редко одна фирма имеет несколько программ, которые может „обслуживать” FEMAP. Именно по этим причинам в книге не описано создание моделей и интерфейс с другими программами (не NX Nastran).

Кроме описанных в книге, FEMAP имеет и другие инструменты, команды и диалоги, очень простые для понимания, которые по этой причине не описаны в книге. В частности, некоторые команды меню „File” (общие для проекта действия), меню „List” (вывод данных в виде текста в окно „Messages” или файл).

В FEMAP и NX Nastran есть еще ресурсы, для использования которых нужно иметь специальную подготовку. Такая информация помещена в „Help”. Причем, кроме основных сведений в файлах формата HTML, есть еще значительное количество файлов в формате PDF (раздел „More Resources”). В частности, специалист может иметь прямой доступ в базу данных FEMAP. В FEMAP можно создавать новые макросы, для чего применяется язык программирования FEMAP. Подробные сведения о внутренних функциях, типах данных, описание разнообразных объектов и их свойств и т.п. помещены в файле ...\\FEMAPv102\\PDF\\api.pdf. А в файле ...\\FEMAPv102\\PDF\\neutral.pdf подробно описаны форматы двух типов файлов, которые применяются в FEMAP: **FEMAP Neutral File Format**, **FEMAP Material Definition File**.

Для FEMAP создана программа управления очередью задач с названием **Vis**, которая имеет две части: **Vis Server** и **Vis Client**. **Vis Client** используется на ЭВМ пользователя, посылает через сеть задания для расчетов, получает результаты расчетов. **Vis Server** руководит программным обеспечением ЭВМ, которая решает задачу (обычно это отдельная очень мощная многопроцессорная машина), очередью задач, файлами и каталогами на сервере. Наличие этой программы позволяет автоматизировать указанные процессы.

Расчеты краевых задач с помощью МКЭ становятся все более популярными. Но надо помнить, что эти расчеты – приближенные. Теоретически для получения более точного результата необходимо уменьшать расстояния между узлами конечно-элементной сетки и применять КЭ второго порядка аппроксимации (параболические), что приводит к резкому увеличению количества узлов и КЭ, а это, в свою очередь, нуждается в очень большой памяти (оперативной и дисковой) и требует огромного времени для решения системы алгебраических уравнений, порождаемой МКЭ. Кроме того, процесс создания расчетной модели (см. Раздел 1.6) часто не является простым. Это действительно творческий процесс, от качества которого зависит, в частности, не только точность и время проведения расчетов, а и правильность (сходимость) полученных результатов.

Многое зависит от наличия у пользователя профессиональных знаний из таких дисциплин, как сопротивление материалов, теория упругости, теория пластичности и ползучести, строительная механика, теория колебаний, численные методы и т.п. В Приложениях 4 ... 8 приведены лишь основные сведения по этим вопросам для общего (трехмерного) случая. Одномерные, двумерные и оболочечные КЭ имеют специфику, часто очень значительную. Эти сведения можно получить из литературных источников и „**Help**” программы.

## ЛИТЕРАТУРА

**Примечание.** Наряду с форматом **HTML**, практически весь „**Help**” сохранен в файлах формата **PDF**. Ниже в списке литературы все эти документы названы. Для сокращения записей символом \* помечена папка ...\**FEMAPv102**\pdf. Документы из этой папки доступны с помощью команды **Help**→**Help Topics**→**More Resources**→**More Resources**→... (только поз. 1 ... 9). Символами \*\* помечена папка ...\**FEMAPv102**\nastranhel\NXNastran\nast\mics\doc\docs\pdf. Документы из этой папки доступны с помощью команды **Help**→**NX Nastran**→**Help Library—PDF Collection** ... (только поз. 10 ... 19, 22, 23, 25, 29 ... 31). Символами \*\*\* помечена папка ...\**FEMAPv102**\nastranhel\NXNastran\nast\mics\doc\docs. Документы из этой папки доступны с помощью команды **Help**→**NX Nastran**→**Help Library—PDF Collection**... (только поз. 20, 21, 24, 26 ... 28). Поз. 32 ... 40 из „**Help**” почему-то недоступны. Литературой поз. 41 ... 76 автор пользовался в той или иной мере при подготовке этой книги.

1. What's New in FEMAP. (\*\newfeat.pdf)
2. FEMAP. Examples. Version 10.2. (\*\examples.pdf)
3. FEMAP. User Guide. Version 10.2. (\*\user.pdf)
4. FEMAP. Commands. Version 10.2. (\*\commands.pdf)
5. Installation Guide. (\*\network.pdf)
6. FEMAP. Topology Optimization. Version 10.2. (\*\topology.pdf)
7. FEMAP. API Reference. Version 10.2. (\*\api.pdf)
8. FEMAP Neutral File Format. FEMAP Material Definition File. (\*\neutral.pdf).
9. VisQ. Queue Manager System Guide. Version 10.2. (\*\visqman.pdf)
10. NX Nastran 7. Release Guide. (\*\*\release\_guide\_7.pdf)
11. NX Nastran 7. Installation and Operations Guide. (\*\*\cog.pdf)
12. NX Nastran 7. Quick Reference Guide. (\*\*\QRG.pdf)
13. NX Nastran. Getting Started Tutorials. (\*\*\get\_start.pdf)
14. NX Nastran 7. User's Guide. (\*\*\User.pdf)
15. NX Nastran 7. Basic Dynamic Analysis User's Guide. (\*\*\basic\_dynamics.pdf)
16. NX Nastran 7. Advanced Dynamic. Analysis User's Guide. (\*\*\adv\_dyn.pdf)
17. NX Nastran 7. Superelement User's Guide. (\*\*\super.pdf)
18. NX Nastran 7. Design Sensitivity and Optimization User's Guide. (\*\*\optimization.pdf)
19. NX Nastran 7. Basic Nonlinear Analysis User's Guide. (\*\*\bas\_nonlinear.pdf)
20. NX Nastran 7. Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. (\*\*\*\advanced\_nonlinear\advanced\_nonlinear\_tmng.pdf)
21. NX Nastran. Handbook of Nonlinear Analysis (SOL 106). (\*\*\*\nonlinear\_106\nonlinear\_106\_NXN.pdf)
22. NX Nastran 7. Thermal Analysis User's Guide. (\*\*\thermal.pdf)
23. NX Nastran 7. Aeroelastic Analysis User's Guide. (\*\*\aero.pdf)
24. NX Nastran 7. Rotor Dynamics User's Guide. (\*\*\*\rotordynamics\rotordyn.pdf)
25. NX Nastran 7. DMAP Programmer's Guide. (\*\*\dmap.pdf)
26. NX Nastran 7. Parallel Processing Guide. (\*\*\*\parallel\_processing\parallel\_processing\_users\_guide.pdf)
27. NX Nastran 7. Numerical Methods User's Guide. (\*\*\*\numerical\numerical.pdf)
28. NX Nastran. Nastran Theoretical Manual. (\*\*\*\theoretical\theoretical\_NXN.pdf)
29. NX Nastran 7. Element Library Reference. (\*\*\element.pdf)
30. NX Nastran. Verification Manual. Version 7.0. (\*\*\Verification.pdf)
31. NX Nastran. Glossary. (\*\*\glossary.pdf)
32. FEMAP. Getting Started. (\*\Getting Started.pdf)
33. Other Analysis Program Interfaces. (\*\othertrans.pdf)

34. FEMAP v10.2. New Features and Corrections. Updates and Enhancements. (\*\readme.pdf)
35. Welcome to FEMAP README for Previous Versions. (\*\readprev.pdf)
36. NX Nastran 7. Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. (\*\*\*\collection\Final\_NXN71-TMG-100519.pdf)
37. NX Nastran 7.1. DMAP Programmer's Guide. (\*\*\*\nxn71\_docs\dmap.pdf)
38. NX Nastran 7.1. Quick Reference Guide. (\*\*\*\nxn71\_docs\qrg.pdf)
39. NX Nastran 7.1. Release Guide. (\*\*\*\nxn71\_docs\release\_guide\_71.pdf)
40. NX Nastran 7.1. Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. (\*\*\*\nxn71\_docs\tnmg.pdf)
41. Бате Н., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
42. Валях Е. Последовательно-параллельные вычисления. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 456 с., ил.
43. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
44. Василенко М.В., Алексейчук О.М. Теорія коливань і стійкості руху: Підручник. – К.: Вища шк., 2004. – 525 с., іл.
45. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
46. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984 – 333 с.
47. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.
48. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
49. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. – М.: Высш. школа, 1983 – 349 с.
50. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1989. – 608 с.
51. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под ред. А.С. Сахарова, И. Альтенбаха. – К.: Вища школа, Лейпциг: ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.
52. Нестационарные тепловые процессы в энергетических установках летательных аппаратов / Коваленко Н.Д., Шмукин А.А., Гужва М.И., Махин В.В. – К.: Наук. думка, 1988. – 224 с.
53. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
54. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища шк., 1993. – 655 с.
55. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 384 с.
56. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 366 с.
57. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
58. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
59. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій для розрахунків у MSC.Nastran: Посібник. К.: НТУУ „КПІ”, 2005. – 210 с., іл.
60. Рудаков К.М. FEMAP. Геометричне та скінченно-елементне моделювання конструкцій у MSC.visualNastran for Windows: Посібник. К.: НТУУ „КПІ”, 2005. – 218 с., іл.
61. Рудаков К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К., 2009. – 296 с., ил.

62. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ „КПІ”, 2007. – 379 с.
63. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.: ил. (Проектирование и моделирование).
64. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учебн. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
65. Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
66. Хейгеман Л., Янг Д. Прикладные итерационные методы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 448 с.
67. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с., ил. (Серия „Проектирование”).
68. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 704 с., ил. (Серия „Проектирование”).
69. K.J. Bathe. Finite Element Procedures. – Prentice Hall, 1996.
70. D. Chapelle, K.J. Bathe. The Finite Element Analysis of Shells. Fundamentals. – Springer, 2003.
71. Crisfield M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume 1: Essentials. – John Wiley & Sons, 2000.
72. Crisfield M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume 2: Advanced Topics. – John Wiley & Sons, 2000.
73. Doltsinis I. Large Deformation Processes of Solids. From Fundamentals to Numerical Simulation and Engineering Applications. – WIT Press, 2004.
74. Ogden R.W. Non-linear Elastic Deformations. – Dover, 1997.
75. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 1: The Basis. – Butterworth-Heinemann, 2000.
76. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Volume 2: Solid Mechanics. – Butterworth-Heinemann, 2000.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> . . . . .	3
<b>Раздел 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ</b> . . . . .	6
1.1 Меню FEMAP . . . . .	7
1.2 „Горячие” клавиши FEMAP . . . . .	7
1.3 Переключатели, мнемонические меню, панели и кнопки FEMAP . . . . .	8
1.4 Файлы FEMAP и NX Nastran . . . . .	13
1.5 Настройка FEMAP . . . . .	14
1.6 О создании расчетной модели . . . . .	23
1.7 Уровни и группы . . . . .	24
1.7.1 Уровни . . . . .	24
1.7.2 Группы . . . . .	25
1.8 Функции и макросы . . . . .	30
1.8.1 Создание функций . . . . .	30
1.8.2 Просмотр графиков функций . . . . .	32
1.8.3 Создание макросов . . . . .	32
<b>Раздел 2 СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕЛА</b> . . . . .	33
2.1 Импорт и экспорт геометрической модели тела . . . . .	34
2.1.1 Импорт геометрической модели тела . . . . .	34
2.1.2 Экспорт геометрической модели тела . . . . .	38
2.2 Создание геометрической модели тела . . . . .	39
2.2.1 Системы координат, ориентация и размеры изображения, рабочая плоскость . . . . .	39
2.2.2 Введение точек . . . . .	41
2.2.3 Построение линий . . . . .	42
2.2.3.1 Построение прямых линий . . . . .	43
2.2.3.2 Построение окружностей и их частей (дуг) . . . . .	44
2.2.3.3 Построение линий сплайнами . . . . .	45
2.2.3.4 Построение линий на поверхности . . . . .	46
2.2.4 Построение поверхностей . . . . .	48
2.2.5 Построение объемов и „твердых” тел . . . . .	50
2.2.5.1 Построение объемов . . . . .	50
2.2.5.2 Построение „твердых” тел . . . . .	50
2.2.5.3 Очищение „твердых” тел . . . . .	54
2.2.6. Общие операции с элементами геометрической модели . . . . .	55
2.2.6.1 Операции копирования . . . . .	55
2.2.6.2 Операции модификации . . . . .	56
2.2.6.3 Операции контроля качества геометрии . . . . .	57
2.2.6.4 Операции измерения . . . . .	58
<b>Раздел 3 СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ТЕЛА</b> . . . . .	60
3.1 Задание свойств материалов . . . . .	60
3.2 Задание атрибутов „Properties” конечных элементов . . . . .	63
3.3 Создание конечно-элементной модели тела на основе геометрической модели . . . . .	68
3.3.1 Подготовка к автоматическому созданию конечно-элементной сетки . . . . .	68
3.3.1.1 Задание параметров автоматического создания конечно-элементной сетки . . . . .	68

3.3.1.2 Назначение атрибутов конечно-элементной сетки геометрическим объектам . . . . .	70
3.3.1.3 Упорядочивание будущей конечно-элементной сетки на поверхности	71
3.3.1.4 Исключение несущественных особенностей в „твердых” телах . . .	72
3.3.2 Создание конечно-элементной сетки тела или конструкции на основе геометрической модели . . . . .	72
3.3.2.1 Задание параметров узлов и конечных элементов . . . . .	72
3.3.2.2 Создание конечных элементов в точках . . . . .	73
3.3.2.3 Создание конечно-элементной сетки на линиях . . . . .	73
3.3.2.4 Создание двумерной и осесимметричной конечно-элементной сетки	73
3.3.2.5 Создание двумерной конечно-элементной сетки на основе срединных поверхностей . . . . .	75
3.3.2.6 Создание трехмерной конечно-элементной сетки для „твердого” тела	76
3.3.2.7 Создание трехмерной конечно-элементной сетки на основе объема . .	79
3.3.2.8 Создание конечно-элементной конструкции из разных материалов . .	79
3.4 Создание конечно-элементной модели тела без геометрической модели . . . .	80
3.4.1 Создание конечно-элементной сетки на основе полного набора узлов . . . .	80
3.4.2 Создание конечно-элементной сетки на основе опорных узлов . . . . .	82
3.4.3 Создание конечно-элементной сетки на основе операций выдавливания, вращения и вытягивания . . . . .	83
3.4.4 Создание трехмерной конечно-элементной сетки на основе двумерных конечных элементов . . . . .	85
3.5 Модификация конечно-элементной модели тела . . . . .	86
3.5.1 Создание связей между узлами . . . . .	86
3.5.2 Редактирование конечно-элементной сетки . . . . .	86
3.5.3 Регенерация и очистка конечно-элементной сетки . . . . .	87
3.5.4 Преобразования конечно-элементной сетки в STL-моделях . . . . .	88
3.5.5 Создание ребер жесткости . . . . .	88
3.5.6 Сглаживание конечно-элементной сетки . . . . .	89
3.5.7 Операции манипулирования узлами и конечными элементами . . . . .	89
3.5.8 Изменение нумерации объектов конечно-элементной сетки тела . . . . .	89
3.5.9 Команды изменения параметров конечно-элементной сетки тела . . . .	90
3.6 Контроль параметров конечно-элементной модели тела . . . . .	92
3.6.1 Контроль функций, характеристик материалов и свойств конечных элементов . . . . .	92
3.6.2 Контроль совпадающих узлов и конечных элементов . . . . .	92
3.6.3 Контроль расположения узлов на заданной плоскости . . . . .	93
3.6.4 Контроль геометрических параметров конечных элементов . . . . .	93
<b>Раздел 4 ОБЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ</b>	<b>95</b>
4.1 Общие инструменты для задания граничных условий . . . . .	95
4.1.1 Объекты приложения граничных условий . . . . .	95
4.1.2 Ассоциации между объектами КЭС и геометрической модели . . . . .	96
4.1.3 Введение значений граничных условий . . . . .	97
4.1.4 Манипулирование наборами граничных условий . . . . .	101
4.1.4.1 Копирование наборов граничных условий . . . . .	102
4.1.4.2 Удаление и редактирование наборов граничных условий . . . . .	102
4.1.4.3 Линейное комбинирование наборов граничных условий . . . . .	102
4.1.4.4 Масштабирование наборов граничных условий . . . . .	103
4.1.4.5 Использование результатов расчетов для задания граничных условий	103

4.1.4.6 Преобразования граничных условий	104
4.2 Создание задания и запуск процесса расчета краевой задачи	105
4.2.1 О запуске процесса расчета краевой задачи	105
4.2.2 Идентификаторы и коды основных типов краевых задач в NX Nastran 5.0	106
4.2.3 Диалоговая панель „Analysis Set Manager”: создание задания на проведение анализа со стандартным набором параметров	107
4.2.4 Настройка рестарта процесса расчета краевой задачи в Nastran	108
4.2.5 Опции панели „NASTRAN Executive and Solution Options”	109
4.2.6 Опции панели „NASTRAN Bulk Data Options”	110
4.2.7 Опции панели „GEOMCHECK”	113
4.2.8 Опции панели „MODELCHECK”	114
4.2.9 Другие панели раздела „Options” для Nastran	115
4.2.10 Панели раздела „Master Requests and Conditions”	116
4.2.11 Создание задания для многовариантного анализа	118
4.3 Процесс расчета краевой задачи	118
4.4 Мастер создания модели	119
<b>Раздел 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ</b>	<b>122</b>
5.1 Моделирование краевой задачи стационарной теплопроводности	122
5.1.1 Задание начальных условий краевой задачи теплопроводности	122
5.1.2 Задание граничных условий краевой задачи стационарной теплопроводности	122
5.1.2.1 Величины для граничных условий краевой задачи теплопроводности	122
5.1.2.2 Задание граничных условий первого рода	122
5.1.2.3 Задание граничных условий в виде теплового источника или стока тепла	124
5.1.2.4 Задание граничных условий по тепловому потоку	124
5.1.2.5 Задание граничных условий конвекционного нагрева	125
5.1.2.5.1 Задание граничных условий „свободного” конвекционного нагрева	125
5.1.2.5.2 Задание граничных условий „принудительного” конвекционного нагрева	125
5.1.2.6 Задание граничных условий радиационного нагрева	128
5.1.3 Запуск процесса расчета краевой задачи стационарной теплопроводности	129
5.2 Моделирование краевой задачи нестационарной теплопроводности	130
<b>Раздел 6 МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. СТАТИКА</b>	<b>132</b>
6.1 Задание начальных и граничных условий в FEMAP	132
6.1.1 Задание начальных условий	132
6.1.2 Задание граничных условий 1-го рода (закреплений, перемещений, связей)	132
6.1.2.1 Создание собственной системы координат.	133
6.1.2.2 Задание граничных условий 1-го рода в виде закреплений	133
6.1.2.3 Задание граничных условий 1-го рода в виде перемещений или углов вращения	135
6.1.2.4 Задание граничных условий 1-го рода в виде связей	135
6.1.2.5 Редактирование или удаление граничных условий 1-го рода	136
6.1.2.6 Контроль закрепления тела	136
6.1.3 Задание силовых граничных условий	137
6.1.3.1 Задание объемных силовых граничных условий	137
6.1.3.2 Задание статических линейных силовых граничных условий	137
6.1.3.3 Задание силовых граничных условий „болтового соединения”	138



6.1.3.4 Задание силовых граничных условий типа „несжимаемая жидкость”	138
6.1.3.5 Задание нелинейных силовых граничных условий	140
6.2 Задание опций и параметров нелинейного анализа	140
6.3 Моделирование статических краевых задач о НДС тел	142
6.3.1 Краевые задачи линейной упругости и термоупругости	142
6.3.2 Краевые задачи нелинейной упругости для изотропного материала	143
6.3.3 Краевые задачи нелинейной упругости для материала типа „резина”	143
6.3.4 Краевые задачи упруго-пластичности	144
6.3.5 Краевые задачи ползучести	145
6.3.6 Краевые задачи об упругой устойчивости тел	146
6.3.7 Краевые задачи об оптимизации конструкции	148
6.4 Применение модифицированного подхода Лагранжа для решения краевых задач со всеми видами нелинейности	149
6.4.1 Опции диалоговой панели „NXSTRAT Solver Parameters”	149
6.4.2 Опции диалоговой панели „NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters”	152

<b>Раздел 7 МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. ДИНАМИКА</b>	155
7.1 Общие сведения относительно моделирования динамических краевых задач	155
7.2 Задание общих параметров динамических расчетов	155
7.2.1 Диалоговая панель „Load Set Options for Dynamic Analysis”	155
7.2.2 О применении граничных условий типа „несжимаемая жидкость”	157
7.2.3 Роторный регион	158
7.3 Моделирование динамических краевых задач	158
7.3.1 Краевая задача о собственных частотах и формах колебаний	158
7.3.2 Краевая задача о переходном (эволюционном) процессе при динамическом негармоническом нагружении тела	160
7.3.2.1 Метод прямого интегрирования, линейная задача	160
7.3.2.2 Метод разложения по собственным частотам	161
7.3.2.3 Нелинейный переходной процесс	162
7.3.2.3.1 Нелинейный переходной процесс, малые деформации	162
7.3.2.3.2 Нелинейный переходной процесс, большие деформации	162
7.3.2.4 Спектральный отклик тела при ударной нагрузке	163
7.3.2.5 Динамические задачи при наличии гироскопических сил	164
7.3.2.6 Расчет полной реакции спектрального отклика тела	166
7.3.3 Краевая задача о вынужденных гармонических колебаниях тела	166
7.3.4 Краевая задача о стохастическом возбуждении тела	168
7.3.5 Модальный анализ методом DDAM	170

<b>Раздел 8 МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ</b>	172
8.1 Формирование зон контакта методом „узел-узел”	172
8.2 Формирование зон контакта с применением регионов	173
8.2.1 Общие сведения	173
8.2.2 Автоматический и „ручной” варианты формирования зон контакта с применением регионов	173
8.2.3 Диалоговая панель „Define Connection Property”	174
8.2.3.1 Вкладка „NX Linear” диалоговой панели „Define Connection Property”	174
8.2.3.2 Вкладка „NX Adv Nonlin” диалоговой панели „Define Connection Property”	176
8.2.3.3 Вкладка „NX Implicit” диалоговой панели „Define Connection Property”	179
8.2.4 Команды создания/редактирования объектов контактного региона	180
8.3 Дополнительные пояснения к контактными алгоритмам	182

8.4 Создание задания для проведения расчета краевой контактной задачи . . . .	183
<b>Раздел 9 ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ И ДРУГИХ ВВЕДЕННЫХ ДАННЫХ . . . .</b>	<b>184</b>
9.1 Загрузка результатов расчетов краевой задачи . . . . .	184
9.1.1 Импорт результатов расчетов краевой задачи другими программами . . . .	184
9.1.2 Загрузка результатов расчетов NX Nastran . . . . .	185
9.2 Комбинирование и редактирование результатов расчетов краевой задачи . . . .	185
9.3 Управление изображениями на рабочем поле FEMAP . . . . .	191
9.3.1 Команды меню „Window” и „View” . . . . .	191
9.3.2 Диалоговая панель „View Options” . . . . .	193
9.4 Просмотр функций и результатов расчетов краевой задачи . . . . .	196
<b>Приложение 1 ОБЪЕКТЫ СПИСКА „Option” ДИАЛОГОВОЙ ПАНЕЛИ „View Options” . . . . .</b>	<b>207</b>
<b>Приложение 2 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ФУНКЦИИ FEMAP (Function reference) . . . .</b>	<b>217</b>
<b>Приложение 3 БИБЛИОТЕКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ . . . . .</b>	<b>220</b>
П3.1 Одномерные конечные элементы . . . . .	220
П3.1.1 Стержневой элемент типа ROD . . . . .	220
П3.1.2 Элемент трубы типа TUBE . . . . .	220
П3.1.3 Криволинейный элемент трубы типа CURVED TUBE . . . . .	220
П3.1.4 Балочные элементы типа BAR, BEAM . . . . .	221
П3.1.5 Элемент криволинейной балки типа CURVED BEAM . . . . .	222
П3.1.6 Элемент типа LINK . . . . .	222
П3.1.7 Упругий элемент типа SPRING/DAMPER . . . . .	222
П3.1.8 Упругий элемент типа DOF SPRING . . . . .	222
П3.1.9 Контактный элемент типа GAP (зазор) . . . . .	222
П3.1.10 Графический элемент типа PLOT ONLY . . . . .	223
П3.2 Двумерные (плоские) конечные элементы . . . . .	223
П3.2.1 Элемент типа SHEAR PANEL (сдвиговая панель) . . . . .	224
П3.2.2 Элемент типа MEMBRANE (мембранный) . . . . .	224
П3.2.3 Элемент типа BENDING ONLY (изгибный) . . . . .	224
П3.2.4 Универсальный оболочечный элемент типа PLATE . . . . .	224
П3.2.5 Элемент типа LAMINATE (слоистый) . . . . .	225
П3.2.6 Элемент типа PLANE STRAIN (плоская деформация) . . . . .	225
П3.2.7 Осесимметричный оболочечный элемент типа AXISYMMETRIC SHELL . . . . .	225
П3.2.8 Графический элемент типа PLOT ONLY . . . . .	226
П3.3 Пространственные (объемные, трехмерные) конечные элементы . . . . .	226
П3.3.1 Осесимметричный элемент типа AXISYMMETRIC . . . . .	226
П3.3.2 Объемный элемент типа SOLID . . . . .	227
П3.4 Другие конечные элементы . . . . .	227
П3.4.1 Элемент типа MASS . . . . .	227
П3.4.2 Элемент типа MASS MATRIX . . . . .	227
П3.4.3 Элемент типа RIGID . . . . .	228
П3.4.4 Элемент типа STIFFNESS MATRIX . . . . .	228
П3.4.5 Контактный элемент типа SLIDE LINE . . . . .	228
П3.4.6 Элемент типа WELD . . . . .	228
П3.5 Примечания . . . . .	229
<b>Приложение 4 КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ (теория) . . . . .</b>	<b>230</b>
П4.1 Постановка краевой задачи несвязанной теплопроводности . . . . .	230

П4.2	Учет температурной зависимости характеристик материала	231
П4.3	Ослабление постановки краевой задачи теплопроводности	231
П4.4	Конечно-элементное представление краевой задачи теплопроводности	233
П4.5	Алгоритм Ньютона-Рафсона решения нелинейной САУ краевой задачи стационарной теплопроводности	235
П4.6	Алгоритм Ньюмарка решения краевой задачи нестационарной теплопроводности	235

## **Приложение 5 КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. СТАТИКА. МАЛЫЕ ДЕФОРМАЦИИ (теория)**

П5.1	Основные уравнения механики деформируемого тела в элементарном объеме тела	237
П5.1.1	Системы координат	237
П5.1.2	Уравнение статического равновесия в элементарном объеме тела	237
П5.1.3	Геометрические соотношения в элементарном объеме тела	237
П5.1.4	Уравнения физических моделей материала в элементарном объеме тела	238
П5.1.4.1	Уравнения для определения температурных деформаций	238
П5.1.4.2	Уравнения для определения линейно-упругих деформаций	239
П5.1.4.3	Уравнения для определения нелинейно-упругих деформаций	240
П5.1.4.4	Уравнения для определения упруго-пластических деформаций	242
П5.1.4.5	Уравнения для определения деформаций ползучести	243
П5.1.5	Граничные условия	244
П5.1.6	Вариационная постановка статической краевой задачи	244
П5.2	Конечно-элементное представление краевых задач о НДС твердого деформируемого тела. Малые деформации	244
П5.2.1	Векторы перемещений, деформаций, напряжений	244
П5.2.2	Малые деформации	245
П5.2.3	САУ при малых деформациях	246
П5.3	Краевая задача о потере устойчивости твердого деформируемого тела	247
П5.3.1	Геометрические уравнения, учитывающие нелинейные члены	247
П5.3.2	САУ при учете нелинейных членов и методы ее решения в NX Nastran	249
П5.3.3	Краевая задача о потере устойчивости твердого деформируемого тела	250
П5.4	Алгоритм „двух шагов” получения решения в NX Nastran задачи для тел с малой жесткостью	251

## **Приложение 6 КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. СТАТИКА. БОЛЬШИЕ ДЕФОРМАЦИИ (теория)**

П6.1	О классических типах формулирования алгоритмов решения геометрически нелинейных краевых задач	253
П6.2	Основные определения и соотношения, необходимые для формулирования алгоритмов решения геометрически нелинейных краевых задач	254
П6.2.1	Системы координат. Метрический тензор	254
П6.2.2	Тензор деформаций Грина-Лагранжа	256
П6.2.3	О мерах тензоров напряжений	258
П6.2.4	Соотношение между компонентами первого и второго тензоров напряжений Пиола-Кирхгофа в начальной конфигурации	259
П6.2.5	Символы Леви-Чивита	260
П6.2.6	Изменение элементарного объема при деформировании	260
П6.2.7	Следствие из закона сохранения массы тела	261
П6.2.8	Формула Нансона	261

П6.2.9 Соотношение между компонентами первого и второго тензоров напряжений Пиола-Кирхгофа с компонентами тензора Эйлера-Коши . . .	263
П6.3 Принцип возможных перемещений в текущей конфигурации . . . . .	264
П6.3.1 Законы движения и равновесия элементарного объема тела . . . . .	264
П6.3.2 Принцип (начало) возможных перемещений (в текущей конфигурации)	265
П6.4 Принцип возможных перемещений при TL-формулировке . . . . .	266
П6.4.1 Выражение для работы напряжений на вариациях перемещений в TL-формулировке принципа возможных перемещений . . . . .	266
П6.4.2 Выражение для объемного интеграла в TL-формулировке принципа возможных перемещений . . . . .	267
П6.4.3 Выражение для поверхностного интеграла в TL-формулировке принципа возможных перемещений . . . . .	268
П6.4.4 Выражение принципа возможных перемещений при TL-формулировке	269
П6.5 Конечно-элементная аппроксимация краевых задач при TL-формулировке и метод решения системы алгебраических уравнений . . . . .	269
П6.5.1 Конечно-элементная аппроксимация принципа возможных перемещений	269
П6.5.2 Алгоритм решения краевой задачи с учетом геометрической нелинейности на основе метода Ньютона-Рафсона . . . . .	270
П6.5.3 Алгоритм метода BFGS решения САУ для краевой задачи с учетом геометрической нелинейности . . . . .	273
П6.6 Основные положения UL-формулировки алгоритмов решения геометрически нелинейных краевых задач . . . . .	274
П6.6.1 Разложение матрицы градиента деформации Грина на матрицы растяжения и вращения (теорема про полярную декомпозицию) . . . . .	274
П6.6.2 Логарифмические деформации Генки (Hencky) . . . . .	275
П6.6.3 Сходства и особенности UL- и TL-формулировок алгоритмов решения геометрически нелинейных краевых задач . . . . .	276
П6.6.4 Алгоритмы методов ограничения нагрузок/перемещений при решении краевой задачи с учетом геометрической нелинейности. Сферический критерий длины дуги (M.A. Crisfield) . . . . .	277
П6.7 Заключительные замечания . . . . .	280

<b>Приложение 7 КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ДИНАМИКА (теория) . . . . .</b>	<b>281</b>
П7.1 Постановка краевой динамической задачи термоупругости . . . . .	281
П7.2 Конечно-элементная аппроксимация краевой динамической задачи . . . . .	281
П7.3 Конечно-элементное решение краевых динамических задач . . . . .	282
П7.3.1 Непосредственное решение динамического уравнения . . . . .	282
П7.3.1.1 Метод Ньюмарка . . . . .	282
П7.3.1.2 Явный центрально-разностный алгоритм . . . . .	283
П7.3.1.3 Решение на первом временном шаге . . . . .	283
П7.3.2 Задача о собственных частотах и формах колебаний . . . . .	283
П7.3.2.1 Решение при отсутствии демпфирования . . . . .	284
П7.3.2.2 Решение при наличии демпфирования . . . . .	284
П7.3.3 Решение динамического уравнения с применением метода разложения решения по собственным формам колебаний (модальное решение) . . . . .	285
П7.3.4 Задача о стохастическом возбуждении тела . . . . .	286
П7.4 Динамическая задача при наличии гироскопических сил . . . . .	288

<b>Приложение 8 КРАЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (теория)</b>	290
П8.1 Особенности постановки краевых контактных задач о напряженно-деформированном состоянии тел	290
П8.2 Модели коэффициента трения Кулона	291
П8.3 Модели контакта	292
<b>Приложение 9 СТРУКТУРИРОВАННЫЕ И НЕСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ТИПЫ ЗАДАЧ В NX Nastran 7.1</b>	295
<b>Приложение 10 ЗНАЧЕНИЯ ОПЦИИ „Diagnostics” ДИАЛОГОВОЙ ПАНЕЛИ „NASTRAN Executive and Solution Options”</b>	296
<b>Приложение 11 ХАРАКТЕРНЫЕ СООБЩЕНИЯ NX Nastran 7.1</b>	299
<b>Приложение 12 ОСНОВНЫЕ ВЕКТОРЫ – РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ</b>	302
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	305
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	307