

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	19
--------------------------	----

## **Глава 1**

<b>Применение метода конечных элементов в расчете конструкций</b> .....	26
---	----

1.1. Краткие основы и алгоритмы метода конечных элементов .....	28
1.1.1. Основные соотношения для дискретных систем .....	33
1.1.2. Физические и нормальные координаты .....	34
1.1.3. Метод перемещений .....	35
1.1.4. Метод сил.....	35
1.1.5. Алгоритм решения статической задачи .....	36
1.2. Статический расчет конструкций.....	38

## **Глава 2**

<b>Компоненты программ Femap/NX Nastran и их взаимодействие. Файлы</b> .....	45
--	----

2.1. Конфигурирование.....	48
2.1.1. Конфигурирование Windows .....	48
2.1.2. Конфигурирование Femap/NX Nastran .....	49
2.2. Файлы Femap и Nastran .....	51

## **Глава 3**

<b>Интерфейс пользователя</b> .....	54
-------------------------------------	----

3.1. Окна.....	55
3.2. Доступ к командам .....	56
3.3. Объекты данных .....	57
3.4. Диалоговое окно выбора объектов – Entity Selection ...	58
3.4.1. Методы выбора объектов .....	60
3.4.2. Альтернативные методы быстрого выбора объектов.....	61
3.5. Графический выбор объектов.....	62
3.6. Определение координат точки и вектора .....	62

3.6.1. Диалоговое окно задания точки в пространстве – Locate Coordinate Definition .....	64
3.6.2. Диалоговое окно задания вектора – Vector Definition .....	66
3.7. Операции с файлами – меню File .....	68
3.7.1. Открытие файла модели .....	68
3.7.2. Сохранение файла модели .....	68
3.7.3. Импорт и экспорт файлов .....	68
3.7.4. Выполнение анализа и виды анализа в Femap .....	72
3.7.5. Использование примечаний и ссылок .....	72
3.7.6. Использование печати и копирования .....	75
3.7.7. Команды меню Messages .....	77
3.7.8. Перестройка файла модели .....	77
3.7.9. Предварительные назначения .....	77
3.8. Инструменты – меню Tools .....	79
3.8.1. Отмена и восстановление выполненных операций .....	79
3.8.2. Рабочая Плоскость – Workplane .....	80
3.8.3. Закрепляемые панели инструментов .....	82
3.8.4. Инструменты операций – Operational Tools .....	84
3.8.5. Инструменты объектов – Entity Tools .....	87
3.8.6. Инструменты измерений – Measuring Tools .....	91
3.8.7. Инструменты проверок – Checking Tools .....	93
3.9. Создание геометрических объектов – меню Geometry .....	100
3.10. Создание соединений – меню Connect .....	101
3.11. Создание объектов расчетной модели – меню Model .....	102
3.11.1. Создание систем координат .....	103
3.11.2. Создание функций .....	105
3.12. Модификация объектов модели – меню Modify .....	108
3.12.1. Операции с кривыми .....	109
3.12.2. Операции перемещения объектов .....	111

---

3.12.3. Редактирование параметров модели.....	116
3.12.4. Расширенные средства модификации объектов.....	118
3.13. Вывод информации – меню List .....	126
3.13.1. Вывод информации об объектах подменю Tools .....	126
3.13.2. Вывод информации о геометрических объектах .....	127
3.13.3. Вывод информации об объектах расчетной модели .....	129
3.13.4. Вывод результатов расчета .....	131
3.13.5. Вывод информации о группах и о модели .....	137
3.13.6. Назначение вывода .....	138
3.14. Удаление объектов модели – меню Delete .....	138
3.14.1. Удаление объектов меню Tools .....	139
3.14.2. Удаление геометрических объектов .....	139
3.14.3. Удаление объектов расчетной модели .....	139
3.14.4. Удаление результатов расчета .....	141
3.14.5. Удаление объектов из библиотек.....	142
3.13.6. Удаление групп и видов .....	142
3.15. Операции с группами объектов модели – меню Group .....	142
3.15.1. Создание и установка активной группы .....	142
3.15.2. Команды манипуляций группами .....	143
3.15.3. Команды добавления определенных объектов в группу .....	147
3.16. Управление отображением модели в графических окнах – меню View .....	149
3.16.1. Управление видами .....	150
3.16.2. Модификация видов .....	151
3.17. Управление отображением модели в графических окнах – меню Window .....	153
3.17.1. Команды управления окнами видов .....	153
3.17.2. Команды перерисовки окон видов .....	154
3.18. Доступ к справочной системе – меню Help .....	154

## Глава 4

<b>Средства создания геометрической модели ...</b>	<b>155</b>
4.1. Создание точек .....	156
4.2. Создание кривых.....	156
4.2.1. Построение прямых линий .....	157
4.2.2. Построение дуг .....	159
4.2.3. Построение окружностей .....	160
4.2.4. Сплайны .....	162
4.2.5. Создание кривых из поверхностей .....	166
4.3. Типы поверхностей .....	167
4.4. Создание граничных поверхностей .....	168
4.4.1. Команды подменю Boundary Surface .....	168
4.5. Построение поверхностей .....	169
4.5.1. Диалоговое окно задания плоскости .....	169
4.5.2. Построение поверхностей по углам и кромкам .....	171
4.5.3. Образование поверхностей выталкиванием, вращением и вытягиванием по направляющей .....	172
4.5.4. Создание плоской, цилиндрической и сферической поверхностей.....	172
4.5.5. Смещение и преобразование поверхностей.....	174
4.6. Серединные поверхности .....	174
4.6.1. Создание и редактирование простых поверхностей.....	174
4.6.2. Автоматическое создание серединной поверхности .....	175
4.6.3. Полуавтоматическое создание серединной поверхности .....	176
4.7. Объемы и твердые тела.....	177
4.8. Твердотельное геометрическое моделирование .....	177
4.8.1. Активация твердого тела .....	178
4.8.2. Создание и редактирование твердых тел .....	178
4.8.3. Модификация твердых тел .....	182
4.8.4. Логические операции с твердыми телами ....	182
4.8.5. Операции разрезания и рассечения .....	184

4.8.6. Очистка твердых тел.....	187
4.9. Копирование геометрических объектов .....	188
4.9.1. Копирование смещением .....	188
4.9.2. Радиальное копирование .....	189
4.9.3. Копирование масштабированием .....	190
4.9.4. Копирование вращением .....	190
4.9.5. Копирование отражением .....	191
4.10. Геометрический интерфейс.....	191
4.10.1. Импорт геометрии.....	193
Чтение файлов STL .....	195
4.11. Приемы создания твердотельных геометрических моделей.....	196

## Глава 5

### Моделирование конструкций конечными

<b>элементами.....</b>	<b>203</b>
5.1. Выбор системы единиц измерения .....	205
5.2. Объекты конечного элемента .....	206
5.3. Узлы и степени свободы в узле.....	207
5.4. Библиотека конечных элементов .....	208
5.4.1. Одномерные элементы .....	208
5.4.2. Двумерные элементы .....	219
5.4.3. Объемные элементы .....	228
5.4.4. Другие элементы .....	231
5.5. Создание материалов .....	234
5.5.1. Изотропные материалы.....	236
5.5.2. Ортотропные материалы .....	238
5.5.3. Анизотропные материалы .....	240
5.5.4. Нелинейные материалы .....	240
5.6. Пакет слоев укладки Layer .....	247
5.7. Создание свойств элементов .....	249
5.7.1. Свойства элементов Rod, Tube и Curved Tube .....	251
5.7.2. Свойства элементов Beam, Bar и Curved Beam .....	253
5.7.3. Свойства элемента Spring/Damper .....	258

5.7.4. Свойства элемента DOF Spring .....	259
5.7.5. Свойства элемента GAP .....	260
5.7.6. Свойства элемента Shear Panel .....	260
5.7.7. Свойства элементов Plate, Bending Only, Membrane .....	261
5.7.8. Свойства элемента Laminate .....	262
5.7.9. Свойства элемента Axisymmetric .....	264
5.7.10. Свойства элемента Solid .....	264
5.7.11. Свойства элемента Mass .....	265
5.7.12. Свойства элемента Slide Line .....	266
5.7.13. Свойства элемента Weld/Fastener .....	266
5.8. Создание узлов и элементов по одному .....	266
5.8.1. Создание узлов .....	266
5.8.2. Создание элементов .....	268
5.8.3. Создание элемента GAP .....	273
5.8.4. Создание и применение Rigid-элементов .....	275
5.8.5. Создание элемента Slide Line .....	288
5.8.6. Создание элемента соединения Weld/Fastener .....	291

## Глава 6

### Средства автоматизированного создания

<b>сеток конечных элементов</b> .....	298
6.1. Создание сеток на геометрических объектах .....	299
6.1.1. Команды управления параметрами сетки .....	299
6.1.2. Команды разбиения геометрической модели .....	314
6.2. Создание сеток без использования геометрии .....	322
6.2.1. Построение сетки в области между узлами .....	322
6.2.2. Построение сетки по заданным группам узлов .....	323
6.2.3. Построение связей между узлами модели .....	324
6.2.4. Создание сетки в произвольной области .....	327
6.3. Модификация сеток .....	328

6.3.1. Редактирование сетки .....	328
6.3.2. Переразбиение сетки .....	329
6.3.3. Очистка сетки .....	330
6.3.4. Редактирование параметров сетки на импортированной геометрии .....	330
6.3.5. Создание окантовок и ребер жесткости.....	332
6.3.6. Сглаживание сетки .....	333
6.4. Копирование сеток.....	333
6.5. Создание сеток выдавливанием, вращением и вытягиванием .....	333
6.5.1. Создание сеток выдавливанием .....	334
6.5.2. Создание сеток вращением.....	337
6.5.3. Создание сеток вытягиванием.....	337

## Глава 7

<b>Моделирование соединений</b> .....	338
7.1. Автоматический поиск и создание соединений .....	340
7.2. Создание соединений на основе поверхностей контакта.....	341
7.3. Свойства соединения.....	342
7.4. Задание контактных сегментов .....	342
7.4.1. Выбор объектов, определяющих сегмент .....	344
7.5. Создание соединения или контактной пары .....	344
7.6. Создание объема жидкости .....	345
7.7. Создание сегментов болта .....	347
7.8. Создание сегментов ротора .....	347

## Глава 8

<b>Нагрузки и граничные условия</b> .....	349
8.1. Типы нагрузок .....	350
8.2. Создание и активация варианта нагрузок.....	353
8.3. Объемные нагрузки.....	354
8.4. Узловые нагрузки .....	356
8.5. Элементные нагрузки.....	359
8.5.1. Связь между узловыми и элементными нагрузками .....	360

8.6. Нелинейные силы.....	362
8.7. Геометрические нагрузки .....	363
8.7.1. Нагрузки в точке .....	364
8.7.2. Нагрузки на кривой.....	364
8.7.3. Нагрузки на поверхности.....	366
8.7.4. Приведение геометрических нагрузок к узловым и элементным нагрузкам .....	367
8.8. Задание параметров нелинейного и динамического нагружения .....	367
8.8.1. Параметры нелинейного нагружения.....	368
8.8.2. Параметры динамического нагружения.....	372
8.9. Манипулирование нагрузками .....	381
8.9.1. Создание нового варианта копированием.....	381
8.9.2. Создание комбинаций нагрузок.....	381
8.9.3. Создание нагрузок из выходных данных .....	382
8.9.4. Преобразование нагрузок со свободного тела в нагрузки варианта нагружения .....	384
8.10. Граничные условия.....	385
8.10.1. Создание и активация варианта граничных условий.....	385
8.10.2. Узловые закрепления .....	385
8.10.3. Использование симметрии модели .....	387
8.10.4. Закрепления на геометрии .....	389
8.10.5. Приведение закреплений на геометрии к узловым закреплениям.....	391
8.10.6. Манипулирование закреплениями.....	391
8.10.7. Уравнения связи.....	391
8.10.8. Жесткие элементы на основе уравнений связи .....	392
8.10.9. Алгоритм наложения связей на перемещения узлов.....	393
8.10.10. Постоянные закрепления.....	395
8.11. Редактор данных на поверхностях – Data Surface Editor .....	395



## Глава 9

### Управление отображением модели

<b>и результатов</b> .....	403
9.1. Команда выбора вида .....	404
9.1.1. Отображение модели и выбор данных для отображения модели .....	405
9.1.2. Отображение результатов на модели .....	406
9.1.3. Отображение нагрузок на свободное тело....	411
9.1.4. Вывод графиков результатов расчета и функциональных зависимостей модели .....	412
9.2. Команда задания опций изображения .....	415
9.3. Команда назначения видимости объектов.....	421
9.4. Структура выходных наборов данных .....	422
9.5. Манипулирование результатами .....	428
9.5.1. Создание и активация наборов и векторов результатов .....	428
9.5.2. Создание выходных данных и заполнение векторов результатов.....	430
8.5.3. Манипулирование данными векторов результатов .....	432
9.5.4. Обработка комплексных векторов .....	440

## Глава 10

### Структура входного файла программы

<b>Nastran и параметры анализа</b> .....	444
10.1. Структура входного файла программы Nastran.....	445
10.1.1. Секция управления выполнением задания .....	445
10.1.2. Секция управления расчетными случаями.....	446
10.1.3. Секция основных исходных данных.....	446
10.1.4. Параметры управления последовательностью решения .....	448
10.1.5. Запись символов, целых и вещественных чисел .....	449

10.1.6. Узлы .....	450
10.1.7. Системы координат .....	450
10.1.8. Элементы в NX Nastran .....	451
10.1.9. Задание свойств материалов .....	455
10.1.10. Статические нагрузки .....	456
10.1.11. Закрепления перемещений в отдельных узлах .....	457
10.1.12. Связь перемещений нескольких узлов .....	457
10.1.13. Параметры нелинейного расчета – карта NLPARM .....	457
10.2. Группы степеней свободы .....	459
10.2.1. Описание групп степеней свободы .....	459
10.2.2. Группы степеней свободы при динамической редукации .....	462
10.3. Подготовка параметров анализа – создание варианта анализа .....	463
10.3.1. Структура варианта анализа .....	465
10.3.2. Опции разделов варианта анализа .....	468
10.3.3. Параметры нелинейного анализа – подраздел Nonlinear Options .....	470
10.3.4. Параметры модального анализа – подраздел Modal/Buckling .....	472
10.3.5. Параметры динамического анализа – подраздел Dynamics .....	474

## Глава 11

### Задачи статики в линейной

<b>постановке .....</b>	<b>477</b>
11.1. Расчет пластины с отверстием .....	478
11.2. Анализ прямоугольного кессона .....	485
11.2.1. Создание расчетной модели кессона и решение статической задачи .....	486
11.2.2. Анализ результатов расчета прямоугольного кессона .....	492

11.3. Проблемы сочетания элементов Beam и Membrane .....	495
11.4. Моделирование конструкций из композиционных материалов .....	498
11.4.1. Двухосное растяжение пластины .....	498
11.4.2. Моделирование трехслойных оболочек – конструкций с заполнителем .....	503
11.4.3. Анализ цилиндрической оболочки из композита .....	506
11.5. Анализ распределения усилий в заклепочном шве .....	516
11.6. Расчет незакрепленных конструкций.....	518
11.6.1. Рекомендации по выбору кинематических степеней свободы.....	522
11.6.2. Корректность решения .....	522

## **Глава 12**

### **Нелинейный статический анализ**

<b>конструкций</b> .....	524
12.1. Решение задачи запрессовки цилиндра .....	525
12.1.1. Особенности моделирования .....	527
12.1.2. Анализ результатов .....	533
12.1.3. Моделирование контакта с помощью аппарата Connect.....	535
12.2. Анализ остаточных деформаций рессоры .....	536

## **Глава 13**

### **Решение контактных задач**.....

13.1. Решение задачи контакта трубы и втулки .....	548
13.1.1. Моделирование контакта элементами Slide Line.....	549
13.1.2. Анализ результатов по элементу Slide Line..	556
13.1.3. Моделирование контакта средствами Connect.....	557
13.2. Анализ контакта в отверстии элементами GAP .....	561

## Глава 14

<b>Анализ устойчивости и несущей способности ...</b>	564
14.1. Линейный анализ устойчивости.....	565
14.2. Расчет потери устойчивости цилиндрической оболочки .....	572
14.2.1. Создание расчетной модели и анализ устойчивости по Эйлеру .....	573
14.2.2. Анализ результатов расчета потери устойчивости .....	575
14.3. Потеря устойчивости конструкций, работающих на растяжение .....	578
14.4. Деформационный анализ устойчивости .....	581
14.5. Устойчивость цилиндрической оболочки .....	582
14.6. Анализ несущей способности стрингерной панели .....	585
14.7. Анализ систем с прощелкиванием .....	590
14.7.1. Анализ закритического поведения пологой оболочки .....	592
14.8. Выполнение рестартов.....	596
14.8.1. Использование рестартов в нелинейных расчетах .....	598
14.8.2. Анализ закритического поведения конструкций с использованием рестарта.....	601

## Глава 15

<b>Фрагментация модели.....</b>	604
15.1. Получение граничных условий для фрагмента из анализа полной модели.....	608
15.2. Решение статических задач с использованием подконструкций .....	614

## Глава 16

<b>Динамический анализ конструкций.....</b>	618
16.1. Уравнения движения .....	619
16.1.1. Система с одной степенью свободы .....	620
16.1.2. Система со многими степенями свободы и проблема собственных значений .....	626

---

16.2. Анализ собственных форм и частот .....	632
16.2.1. Вычисление собственных форм и частот квадратной пластины .....	633
16.2.2. Собственные формы и частоты преднапряженных конструкций.....	635
16.3. Анализ переходных процессов .....	637
16.3.1. Метод разложения по собственным формам .....	640
16.3.2. Метод прямого интегрирования .....	642
16.4. Частотный анализ отклика .....	645
16.4.1. Колебания консольной балки.....	645
16.4.2. Колебания идеализированного прямого крыла .....	650
16.5. Спектральный анализ.....	655
16.5.1. Генерация спектра отклика .....	659
16.5.2. Приложение спектра отклика.....	665
16.5.3. Анализ сейсмических воздействий.....	669
16.6. Применение подконструкций в задачах динамики. Прямой матричный ввод .....	674
16.6.1. Метод Релея–Ритца.....	675
16.6.2. Редукция по Гайану – метод статической конденсации .....	675
16.6.3. Покомпонентный синтез форм .....	677
16.6.4. Применение прямого матричного ввода .....	678

## **Глава 17**

<b>Нелинейный динамический анализ .....</b>	<b>683</b>
17.1. Моделирование копровых испытаний рессорного шасси .....	684

## **Глава 18**

<b>Оптимизация конструкций.....</b>	<b>694</b>
18.1. Общая формулировка проблемы оптимизации .....	696
18.2. Обзор оптимизационной модели.....	703
18.3. Создание оптимизационной модели в программе Femap .....	704
18.4. Оптимизация трехстержневой фермы.....	708

- 18.5. Проектирование оптимальной окантовки  
оконного выреза ..... 711
- 18.6. Оптимизация стыка цилиндрической  
и сферической поверхностей оболочки ..... 723

## **Глава 19**

- Анализ ошибок**..... 732
- 19.1. Плохая обусловленность и вырожденность  
матрицы жесткости ..... 733
- 19.2. Выявление механизмов и вырожденных  
степеней свободы в модели ..... 738
- 19.3. Применение нелинейного вида анализа  
для получения более устойчивого результата ..... 740
- 19.4. Диагностика ошибок в NX Nastran..... 742

## **Глава 20**

- Основы выполнения тепловых расчетов**..... 749
- 20.1. Анализ прочности учетом температур ..... 750
- 20.2. Модель для теплового расчета ..... 751
- 20.2.1. Конечные элементы ..... 752
- 20.2.2. Материалы ..... 753
- 20.2.3. Нагрузки и граничные условия ..... 753
- 20.2.4. Начальные условия ..... 754
- 20.3. Пример выполнения теплового расчета ..... 755
- 20.3.1. Стационарный тепловой расчет ..... 755
- 20.3.2. Нестационарный тепловой расчет ..... 757
- 20.4. Анализ прочности при действии тепловых  
нагрузок ..... 760
- 20.4.1. Тепловой расчет оболочки ..... 761
- 20.4.2. Статический расчет оболочки  
при температурном нагружении ..... 764

- Список литературы**..... 766

- Предметный указатель**..... 768

# Предисловие

В настоящее время метод конечных элементов служит универсальным средством анализа конструкций, и среди многообразия CAD/CAM/CAE-программ пакеты конечно-элементного анализа играют наиболее ответственную роль. Для их эффективного применения, в отличие от CAD/CAM-систем, требуется более профессиональная подготовка, чем для изучения интерфейса и стандартных приемов работы. Дело в том, что гибкость метода конечных элементов обеспечивается многовариантностью способов моделирования конструкции. Это влечет за собой большую вероятность появления скрытых ошибок, то есть ситуаций, когда результат анализа либо недостижим, либо абсурден, либо необъясним, либо, что самое опасное и распространенное, правдоподобен, но неверен. Чтобы с большой вероятностью получить достоверный и объяснимый результат, от пользователя пакета конечно-элементного анализа требуются знание принципов и методов реализации этого метода, глубокое понимание механики поведения конструкций в используемой области анализа, владение методами построения модели для необходимого анализа и, наконец, владение методами выявления формальных и фактических ошибок.

В сущности, не имеет значения, какой пакет использовать, чтобы освоить расчет конструкций методом конечных элементов. Это могут быть известные коммерческие пакеты, например ANSYS, NASTRAN, MARC, ScadSoft, или программы, разработанные в нашей стране: ДИАНА, MAPC, РИПАК. Неплохим способом может служить написание собственного пакета, реализующего метод конечных элементов. Все дело в соотношении «качество/цена», где «цена» – это время освоения, а «качество» – количество знаний, приобретаемых вами в процессе изучения.

Одним из лучших соотношений «качество/цена» обладает программа Femap со встроенным решателем NX Nastran (Femap with NX Nastran). Предшественником этого пакета являлся пакет MSC. visualNASTRAN for Windows, который рассматривался в первой книге автора. Femap with NX Nastran имеет достаточно широкие возможности для создания геометрической и конечно-элементной модели самых разнообразных конструкций, позволяет выполнять практически любые виды анализа и, что имеет особую ценность, оптимизировать параметры конструкции при заданных ограничениях. Конечно-элементная модель с краевыми условиями и условиями анализа

подготавливается в среде Femap. Затем требуемый анализ выполняется в NX Nastran, а результаты визуализируются и документируются в среде Femap. Решатель NX Nastran имеет практически одинаковый интерфейс с версиями программ MSC Nastran и MD Nastran. Поэтому эти программы также могут быть подключены в качестве решателей. Программа анализа Nastran начала разрабатываться в середине 60-х годов, когда интерфейс пользователя сводился к выводу либо на печатающее устройство, либо на плоттер, либо на перфоратор, а ввод осуществлялся с перфокарт. С тех пор интерфейс программы не меняется, а для подготовки модели и обработки результатов расчета используются графические оболочки. Как правило, эти программы являются независимыми программными продуктами и ориентируются на несколько решателей с различной степенью совместимости. Для программ MSC Nastran и MD Nastran одной из таких оболочек служит программа MSC.Patran, обеспечивающая полностью интегрированную среду для моделирования и анализа результатов. Эта программа в 90-е годы была ориентирована на рабочие станции, имеющие тогда более высокую производительность, чем персональные компьютеры, и работала в среде UNIX-подобных операционных систем. Разумной альтернативой MSC.Patran в качестве графической оболочки для Nastran может служить программа Femap, ориентированная на персональные компьютеры и операционные системы Windows. Выбор той или иной оболочки зависит от предпочтений пользователя. Поскольку интерфейс программы Femap по-прежнему не позволяет получить доступ ко всем возможностям Nastran, особенно в области оптимизации конструкций, предполагается, что MSC.Patran более подходит для профессионального использования, но Femap удобен для самостоятельного изучения, так как имеет простой и дружелюбный интерфейс. В этих сравнениях не учитывается, что основная сущность при использовании пакета конечно-элементного моделирования содержится все-таки в программе анализа, которая в данном случае имеет одни и те же корни. С появлением многопроцессорных компьютеров и повышением эффективности численных методов преимущества той или иной конфигурации пакета конечно-элементного анализа, и раньше достаточно условные, стали носить символический характер. Поскольку задача любой разумной степени подробности теперь может быть решена за конечное и небольшое время, значительно больше усилий требуется на постановку задачи и понимание полученного результата. В этом смысле материал книги также будет полезен пользователям, работающим в среде MSC.Patran/MSC.Nastran.



Вопросы, с которыми сталкивается начинающий пользователь, в зависимости от его искушенности можно разделить на несколько групп:

- что такое метод конечных элементов?
- каким образом построить расчетную (конечно-элементную) модель?
- какие конечные элементы применить и какую выбрать степень подробности?
- какой вид анализа применить для решения задачи?
- как исправить формальные ошибки в модели и получить какое-нибудь решение?
- как оценить степень достоверности решения?
- как получить решение, вызывающее доверие?
- как интерпретировать полученное решение?

Многие пользователи, в конце концов, довольствуются ответами на второй и пятый вопросы. Действительно, глубокое знание метода конечных элементов, хотя его название вынесено на титул программ, не является необходимым. Овладение средствами моделирования геометрии и построения расчетных моделей само по себе требует значительных и исчерпывающих усилий. Мощность программы анализа гарантирует правильность результата, и цветное и анимированное изображение напряженно-деформированного состояния конструкции вызывает доверие. К сожалению, эти очевидные выводы являются заблуждением, а поиск и знание ответов на последние три вопроса являются ключевыми при использовании пакета конечно-элементного анализа. Освоение программы Nastran может служить хорошим стимулом для изучения различных областей теории упругости и пластичности, строительной механики, механики композиционных материалов, линейной алгебры и проблемы собственных значений, динамики и устойчивости конструкций, численных методов решения нелинейных систем, оптимизации конструкций. При этом Nastran имеет сравнительно небольшой набор базовых понятий, которые необходимо усвоить, чтобы начать использовать его в практической работе.

Предлагаемая книга является существенной переработкой первой книги автора «Моделирование конструкций в среде MSC.visual NASTRAN для Windows» [15]. В данной книге рассматривается среда моделирования Femap v10.2. В последней версии программы – Femap 10.3 – появились новые функции автоматической обработки геометрии, которые позволяют работать с твердотельной геометрией высокой степени сложности. При этом существенно возросла ско-

рость построения сеток большой размерности. Версия 10.3 также расширяет возможности моделирования введением пользовательского интерфейса для решения в NX Nastran задач аэроупругости, таких как дивергенция несущих поверхностей и анализ флаттера. Поскольку рассмотрение этих задач в любом случае выходит за рамки данной книги, а появление новых функций обработки геометрии не меняет принципов построения расчетных моделей, материал книги соответствует также и версии Femap 10.3.

Графический интерфейс программы Femap, значительно расширенный, по сравнению с версиями до 2009 года, изложен компактно, и высвободившийся объем книги использован для освещения множества проблем, не рассмотренных в первом издании. В частности, описываются расширенные средства анализа в терминах программы Nastran, приводятся нестандартные приемы моделирования конструкций, освещаются основы тепловых расчетов.

В первой главе книги изложены основы метода конечных элементов, различных видов анализа конструкций и их взаимосвязи. Способ изложения выбран таким, чтобы, не впадая в профанацию, с одной стороны, и в формальное изложение – с другой, дать заинтересованному читателю достаточно строгое представление о предмете. Приводятся ссылки на классическую литературу по данному вопросу.

Во второй главе обсуждаются структура пакета программ Femap with NX Nastran, конфигурирование и взаимосвязь его составляющих.

В третьей главе изложен пользовательский интерфейс Femap. При его описании рассмотрены большинство компонентов интерфейса и команды, за исключением команд построения геометрической и конечно-элементной модели. Этим вопросам посвящены отдельные главы. Изложение интерфейса может служить кратким справочником программы Femap.

В четвертой главе рассмотрены обширные функции создания и модификации объектов геометрических моделей.

Пятая глава посвящена классификации и описанию объектов конечно-элементной модели – узлов, материалов, элементов и их свойств. Эта глава является ключевой при изучении пакета Femap with NX Nastran и при выборе стратегии построения расчетной модели. Компактный и исчерпывающий набор (библиотека) конечных элементов высокой точности – одно из основных достоинств программы Nastran. В главе подробно описаны большинство элементов этой библиотеки и их использование при построении расчетной модели. При описании материалов даны основные определения терминов из области теории упругости и пластичности на русском и английском языках.

В шестой главе рассматриваются средства автоматизированного создания конечно-элементных сеток.

Седьмая глава посвящена работе со специфическим аппаратом Femap и NX Nastran – *Connect* (Соединять).

В восьмой главе описаны способы задания внешних воздействий (нагрузок) и граничных условий. При описании параметров задания нелинейных и динамических видов анализа приводятся некоторые алгоритмы и параллельное определение сопутствующих терминов и понятий на русском и английском языках.

В девятой главе рассматриваются средства отображения модели объекта в графических окнах и средства обработки, документирования и визуализации результатов.

В десятой главе кратко изложены структура и элементы входного файла, на основании этого материала подробно рассматриваются параметры вариантов анализа (*Analysis Set*) и некоторые расширенные методы расчета.

Принципиальный материал книги изложен на характерных примерах, в которых рассматриваются проблемы, присущие каждому виду анализа. Часть этих примеров демонстрирует решение классических задач, а часть – решение задач, в разное время считавшихся уникальными. Примеры строятся по следующей схеме: постановка задачи – построение модели в программе Femap – решение с помощью программы Nastran – возможные ошибки – анализ результатов – сопоставление с результатами, полученными другими способами.

В одиннадцатой главе рассматривается самый простой вид анализа – линейный статический расчет конструкций. Описывается применение элементов, моделирующих композиты и крепеж. Рассматривается анализ незакрепленных конструкций. Приводятся подробные и компактные алгоритмы (последовательности выполнения команд Femap) построения расчетных моделей, выполнения анализа и визуализации результатов.

В двенадцатой и тринадцатой главах рассматриваются задачи, которые приводят к нелинейной формулировке – нелинейному статическому анализу. Это физическая нелинейность, вызванная пластическим поведением материала, геометрическая нелинейность, вызванная большими перемещениями, и задачи контакта, в которых освещается применение специфических контактных элементов. Приводятся алгоритмы построения твердотельных геометрических моделей, методы моделирования натяга и задания сложных граничных условий.

Четырнадцатая глава посвящена задачам устойчивости и несущей способности конструкций. Рассматриваются классическая задача

потери устойчивости цилиндрической оболочки в различных постановках, практическая задача анализа несущей способности стрингерной панели, применение рестартов. Излагается метод решения задач с прощелкиванием.

В пятнадцатой главе обсуждаются проблемы фрагментации моделей и возможные варианты их решения.

В шестнадцатой и семнадцатой главах приводится классификация способов динамического анализа конструкций, рассматриваются разнообразные динамические задачи, иллюстрирующие возможности пакета Femap with NX Nastran в области анализа переходных процессов, гармонического анализа и анализа спектрального отклика и нелинейных динамических расчетов.

В восемнадцатой главе, насколько возможно, подробно рассматривается оптимизация, начиная с формулировки задачи. Собственно, оптимизация и является основой процесса проектирования конструкции. А мощные средства анализа конструкций программы Nastran являются лишь ядром средств оптимизации. Интерфейс Femap открывает доступ далеко не ко всем возможностям аппарата оптимизации Nastran, однако приведенные примеры построения оптимизационных моделей тонкостенных конструкций позволяют читателю изучить эту важную область.

В девятнадцатой главе рассматриваются наиболее типичные случаи аварийного завершения работы программы Nastran – так называемые «фатальные» ошибки, которые обычно вызывают у начинающего пользователя панику. Описываются методы диагностики и преодоления этих ошибок. Хотя процесс обучения состоит в преодолении сделанных ошибок, в большинстве книг и руководств к подобным программам приводятся лишь способы «правильного» решения задач, но почти ничего не говорится о том, что нужно делать, если программа сообщает о непреодолимых ошибках в модели.

В двадцатой главе излагаются краткие сведения по тепловому анализу и рассматриваются несколько примеров.

При описании последовательности действий пользователя используются следующие условные обозначения и соглашения:

- название команд и элементы интерфейса выделяются **полужирным шрифтом**;
- строки выпадающих списков и переменные обозначаются моноширинным шрифтом;
- для обозначения последовательности действий при выполнении команды используется стрелка  $\Rightarrow$ , например **Geometry  $\Rightarrow$  Surface  $\Rightarrow$  Cylinder**;

- нажатие кнопки в диалоговом окне команды обозначается названием кнопки, заключенным в угловые скобки < >, например **<Select All>**;
- нажатие клавиш на клавиатуре отмечается их названием, заключенным в круглые скобки (), например **(F5)**;
- занесение данных в текстовое поле диалогового окна обозначается знаком =, например **Area, A=100**;
- выбор строки выпадающего списка диалогового окна обозначается знаком = и строкой списка, заключенной в фигурные скобки, например **Analysis Type={10..Nonlinear Static}**;
- выбор одной из альтернативных опций диалогового окна обозначается словом **Yes** или **true**, например **Membrane=Yes**;
- включение или выключение опций диалогового окна обозначается словами **On** или **Off**, например **Surface Mesh Only=On**; **Midside Nodes=Off**;
- объекты, которые должны быть выбраны в графическом окне по какому-либо признаку, заключаются в фигурные скобки, например {выбрать поверхность основания цилиндра}.

Английские названия команд и элементов интерфейса сопровождаются русским переводом. Перевод команды приводится либо в скобках (буквальный), либо в тексте описания команды. Курсивом выделяются английские названия терминов или команд, если последние даются вне контекста описания интерфейса. Для элементов сообщений и программ, представленных в виде листингов, используется моноширинный шрифт.

Книга может служить как учебником по работе в интегрированной среде Femap with Nastran, так и методическим пособием по моделированию конструкций для выполнения различных видов анализа. Большая часть материалов книги использовалась автором при чтении курсов и проведении тренингов в Самарском государственном аэрокосмическом университете, в космическом центре ЦСКБ-Прогресс, в инженерном центре ECAR-Airbus.

При работе над книгой автора мотивировали восхищением достижениями сыновей Славы и Валентина и их лучших половинок Луизы и Ирины, а также внучки Лизы, приложившей свои руки к тексту книги. По-прежнему была неоценима помощь жены Татьяны при поиске парадоксальных решений в трудных ситуациях.