



Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. МАКАРОВА**

Институт ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
Кафедра теории и конструкции судовых ДВС

А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников

РАСЧЕТ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СРЕДЕ AUTODESK NASTRAN IN-CAD

Учебное пособие

*Рекомендовано федеральным Учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 26.00.00 «Техника и технологии кораблестроения
и водного транспорта» в качестве учебного пособия для реализации основной
профессиональной образовательной программы высшего образования
по направлениям подготовки: 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника
и системотехника объектов морской инфраструктуры»,
26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника
объектов морской инфраструктуры»*

Санкт-Петербург
Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
2017

Яманин, А. И. Расчет машиностроительных конструкций в среде Autodesk Я54 Nastran In-CAD: учеб. пособие / А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 160 с.

ISBN 978-5-9509-0288-8

Рассмотрено применение приложения Autodesk Nastran In-CAD при выполнении расчетов методом конечных элементов машиностроительных конструкций, в том числе поршневых двигателей. Приведенные расчеты используются при решении разнообразных по физическому содержанию и формулировкам задач, в том числе прикладных задач двигателестроения. В настоящем пособии описаны, главным образом, практические действия пользователей, а их теоретические обоснования приводятся в минимальном объеме, позволяющем рассматривать алгоритм действия систем среднего уровня, обладающих весьма широкими возможностями для решения задач с различным физическим содержанием при одновременной легкости их освоения.

Предназначено в качестве основной литературы для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», 13.03.03 «Энергомашиностроение», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», магистрантов, обучающихся по направлению 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», аспирантов, обучающихся по направлению 26.06.01 «Техника и технология кораблестроения и водного транспорта». Пособие может быть полезно также для специалистов конструкторских бюро, судостроительных и машиностроительных предприятий.

Рекомендовано федеральным Учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 26.00.00 «Техника и технологии кораблестроения и водного транспорта» в качестве учебного пособия для реализации основной профессиональной образовательной программы высшего образования по направлениям подготовки: 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры».

Рецензенты:

Гальшев Юрий Витальевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;

Вихров Николай Михайлович, д-р техн. наук, ген. директор ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»;

Чистов Валентин Борисович, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

ISBN 978-5-9509-0288-8

© ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017

© Яманин А. И., Жуков В. А., Барышников С. О., 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Интерфейс приложения Autodesk Nastran In-CAD	7
2. Задача статике	17
2.1. Решение задачи в объемной постановке	17
2.2. Управление плотностью сетки конечных элементов	36
2.3. Решение задачи с использованием одномерных конечных элементов	39
2.4. Решение задачи с использованием двумерных конечных элементов	44
3. Модальная задача	46
3.1. Содержание задачи и алгоритм решения	46
3.2. Порядок выполнения действий	46
4. Устойчивость (линейная задача)	52
4.1. Содержание задачи и алгоритм решения	52
4.2. Порядок выполнения действий	53
5. Контактная задача в Autodesk Nastran In-CAD	58
5.1. Содержание задачи и алгоритм решения	58
5.2. Порядок выполнения действий	58
6. Модальный анализ деталей при наличии предварительного напряженного состояния	69
6.1. Содержание задачи и алгоритм решения	69
6.2. Порядок выполнения действий	70
7. Стационарная задача теплопроводности	74
7.1. Прямая задача теплопроводности	74
7.2. Обратная задача теплопроводности	81
8. Нелинейная задача статике	84
8.1. Геометрически нелинейная задача	84
8.2. Физически нелинейная задача (гиперупругие материалы)	92
8.3. Физически нелинейная задача (пластичность)	96
9. Нелинейная устойчивость	99
9.1. Актуальность задач и алгоритм решения	99
9.2. Порядок решения задачи	100
10. Нелинейная задача теплопроводности	103
10.1. Итерационный способ решения задачи	103
10.2. Пример решения нелинейной задачи	104
11. Расчет выносливости	110
11.1. Многоосная усталость	110
11.2. Вибрационная выносливость (виброустойчивость)	118

12. Расчет переходных процессов	132
12.1. Метод прямого интегрирования	132
12.2. Метод суперпозиции собственных форм колебаний	140
13. Нелинейная задача о переходном процессе.....	147
Заключение	157
Библиографический список	158

Введение

В настоящее время в современную инженерную практику широко внедряются расчетные методы исследования конструкций, основанные на применении численных методов и прежде всего метода конечных элементов (МКЭ).

Достаточно разнообразными являются программные средства, реализующие МКЭ, — от легких программных продуктов, позволяющих решать одну-две задачи (по физическому содержанию) при описании конструкции простейшими субпараметрическими конечными элементами (КЭ) с линейными функциями формы, до тяжелых систем, обладающих широкими возможностями решения задач с различным физическим содержанием в линейной и нелинейной, статической и динамической постановках, использующих различные типы КЭ. К легким программным средствам относятся: пакеты прикладных программ Cosmos Xpress, среда прочностного анализа Autodesk Inventor Professional, модуль «Анализ напряжений» для системы КОМПАС и др. Такие системы, как правило, не являются автономными (т. е. работают только в совокупности с соответствующими САД-системами), однако они достаточно просты в освоении и не требуют глубокой теоретической подготовки пользователя в области теории МКЭ.

Наиболее известные тяжелые КЭ-системы: ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и др., наоборот эффективны при наличии у пользователя необходимой теоретической подготовки (некоторые из них обладают сложным для понимания интерфейсом и т. д.). В качестве компромисса между этими двумя крайними случаями можно рассматривать системы среднего уровня, обладающие весьма широкими возможностями для решения задач с различным физическим содержанием при одновременной легкости освоения и наличии дружественного интерфейса. При этом результаты, получаемые с помощью программных средств среднего уровня, по точности и информативности практически не уступают результатам расчета в среде тяжелых программных продуктов.

К числу наиболее известных программных продуктов среднего уровня, реализующих МКЭ, относятся: Cosmos Simulation for Solid Works, Simulation Multiphysics for Autodesk Inventor Professional, Simulation Mechanical for Autodesk Inventor Professional, MSC visual Nastran Desktop 4D (в настоящее время его развитие и поддержка прекращены). Здесь же следует назвать многие расчетные модули, входящие в состав тяжелых САД-систем: Creo Parametrics, NX, CATIA и др.

В последние два-три десятилетия наметилась тенденция создания программных продуктов среднего уровня разработчиками тяжелых систем. При этом такие программные средства адаптируются для наиболее распространенных САД-систем. К числу подобных средств относится и рассматриваемый в настоящем пособии программный продукт NASTRAN for Autodesk Inventor Professional, известный также, как Autodesk Nastran In-CAD (ряд авторов интернет-публикаций относят этот продукт к тяжелым). Головной тяжелой программный продукт NASTRAN уже давно разрабатывается специалистами фирмы MSC, изданы книги, посвященные работе с ним [8] – [10].

Пакет Autodesk Nastran In-CAD появился относительно недавно и бесплатно предоставляется фирмой Autodesk для учебных и научных целей¹. В связи с тем, что литература по этому продукту отсутствует (в сети Интернет может быть найден лишь ряд разрозненных примеров), в настоящем издании авторы попытались исправить создавшуюся ситуацию.

Предлагаемое издание предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», 13.03.03 «Энергомашиностроение», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», магистрантов, обучающихся по направлению 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», аспирантов, обучающихся по направлению 26.06.01 «Техника и технология кораблестроения и водного транспорта». Пособие может быть полезно для специалистов конструкторских бюро, судостроительных и машиностроительных предприятий.

В предлагаемом издании предпринята попытка проиллюстрировать применение продукта Autodesk Nastran In-CAD при решении разнообразных по физическому содержанию и формулировкам задач, в том числе прикладных задач двигателестроения. Предполагается, что читатель знаком с основами теории МКЭ, поэтому в настоящем пособии описываются, главным образом, практические действия пользователей, а их теоретические обоснования приводятся в минимальном объеме.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: Ю. В. Галышеву, Н. М. Вихрову и В. Б. Чистову за ценные замечания, сделанные в процессе рецензирования настоящего издания.

¹ См. сайт students.autodesk.com.

1. ИНТЕРФЕЙС ПРИЛОЖЕНИЯ

Autodesk Nastran In-CAD

Пакет Autodesk Nastran In-CAD при инсталляции встраивается в структуру Autodesk Inventor Professional и активизируется при запуске последнего. При этом на инструментальной ленте Inventor появляется соответствующая вкладка (рис. 1.1).

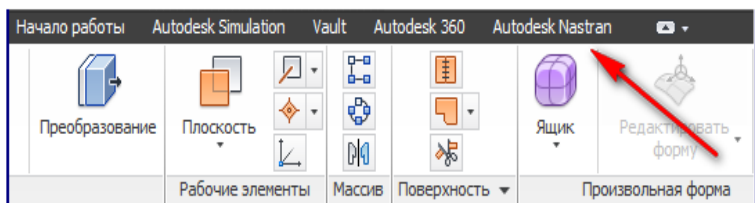
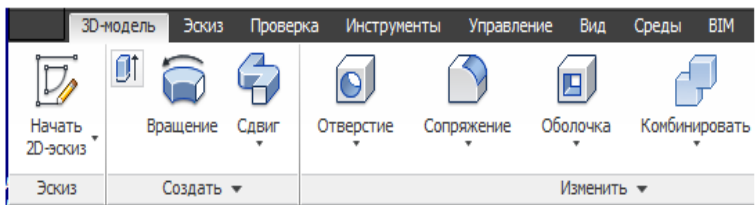


Рис. 1.1. Вкладка Autodesk Nastran-in CAD на ленте Autodesk Inventor Professional

Обращение к Autodesk Nastran In-CAD производится при необходимости выполнения расчета во время сеанса работы с приложением Autodesk Inventor. Перед этим спроектированная деталь (сборка) должна быть сохранена. Вид ленты Autodesk Nastran In-CAD показан на рис. 1.2.

Разделы ленты содержат команды настройки (*System*), организации нового сеанса работы или редактирования существующего (*Analysis*), описания свойств рассчитываемой модели (*Properties*), наложения граничных условий (*Setup*), построения сетки КЭ (*Mesh*), запуска задачи на выполнение (*Solve*), отображения результатов расчета (*Results, Display*), получения контекстной помощи (*Nastran Support*).

Команда *Default Settings* из раздела *System* позволяет установить (отредактировать) многочисленные настройки интерфейса по умолчанию. При обращении к этой команде выводится одноименная диалоговая панель (рис. 1.3). Устанавливая в полях этой панели отметки или , пользователь может выбрать / отменить режимы расширенного формата отображе-

ния сетки узлов (*Nastran Wide Field Format*), автоматического обновления файлов (*Auto Update Nastran File*), вывода оперативных предупреждений при решении (*Prompt for Solution with Warnings*), сохранения данных о ко-

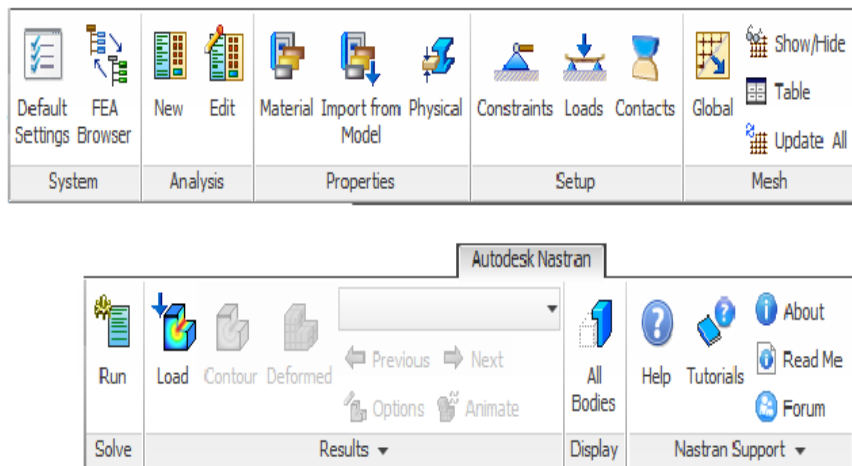


Рис. 1.2. Лента Autodesk Nastran In-CAD

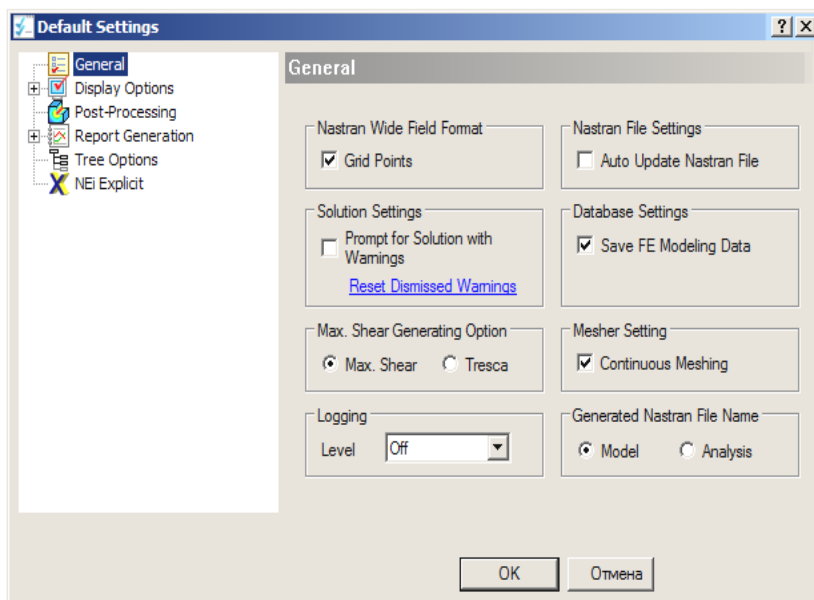


Рис. 1.3. Установка основных параметров Autodesk Nastran In-CAD

нечно-элементной модели (*Save FE Model Data*), оценки прочности по максимальным растягивающим напряжениям (*Max Shear Generating Option*), построения сплошной сетки КЭ (*Continuous Meshing*), записи текстового файла-протокола выполненных действий (*Logging*), назначения имени генерируемому файлам (*Generated Nastran File Name*).

Переход в левом окне панели *Default Settings* (см. рис. 1.3) на строку *Display Options* позволяет установить требуемые опции отображения информации. Из рис. 1.4 следует, что на экран монитора будут выводиться кинематические и силовые граничные условия (*Constraints, Loads*), указываться максимальные и минимальные значения выводимых результатов расчетов (*Max / Min on Contour*), отрисовываться конечно-элементная модель – КЭМ (*Mesh Model*), обозначаться символ системы координат (*Coordinate Systems*), будет соблюдена ориентация осей неизотропного материала (*Material Orientations*), будут отрисовываться сосредоточенные массы (*Concentrated Masses*), связи (*Connections*), свободные границы (*Free Edges*), инструменты управления сеткой КЭ (*Mesh Control*); контур недеформированной модели (*Unreformed Edges*) обозначен в нижней части рис. 1.4 в виде серого прямоугольника.

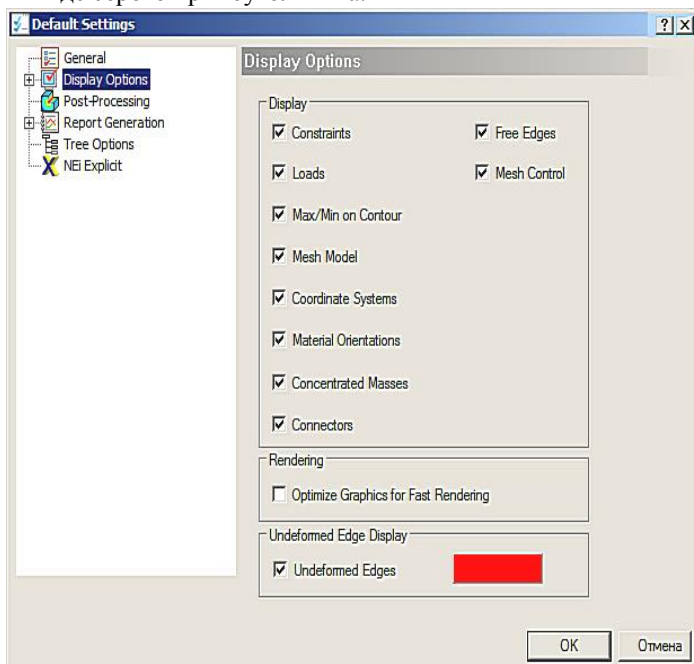


Рис. 1.4. Настройка опций отображения информации

Раскрыв список в строке *Display Options*, можно установить требуемые параметры отображения узлов (*Nodes*) и элементов (*Elements*) модели: номера, цвет и размер, порядковые номера материалов и др. (рис. 1.5).

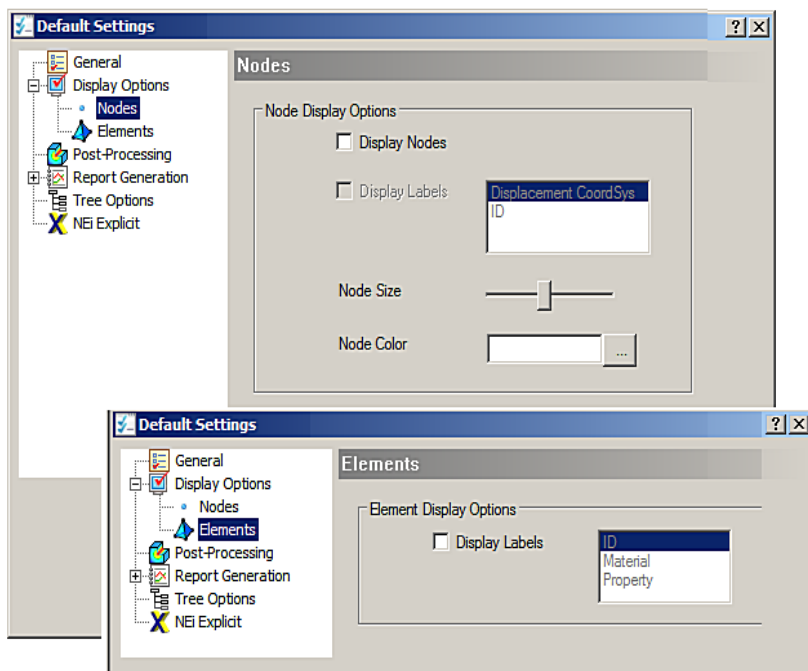


Рис. 1.5. Установка опций отображения узлов и элементов КЭМ

Выбор строки *Post-Processing* на панели *Default Settings* позволяет установить некоторые опции отображения результатов расчета, в том числе, режим автоматического обновления отображаемых результатов (для этого отметка ставится в поле *Automatic Plot Updating*), количество кадров при отображении анимированных форм колебаний (*Number of Frames*) и задержки между последовательными кадрами (*Delay*), а также режим отображения форм колебаний. В последнем случае выбран режим *Full* (рис. 1.6), т. е. будет отображаться один полный цикл колебаний (другие возможные варианты этого режима — *Half* и *Oscillate* — соответствуют отображению половины цикла колебаний и многократного повторения полного цикла).

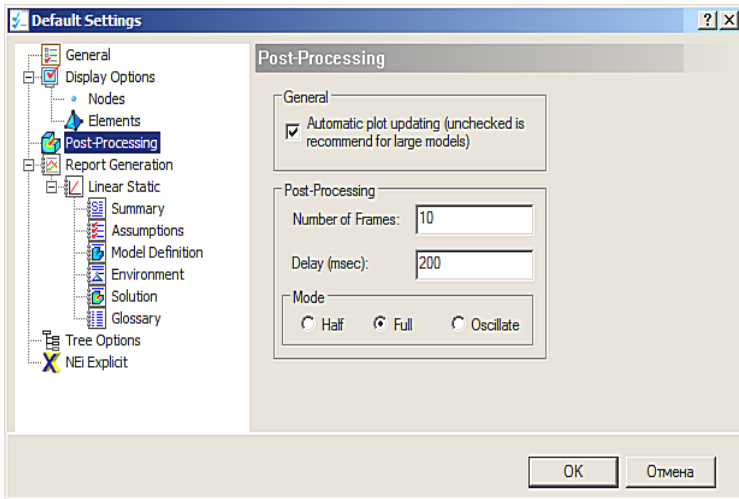
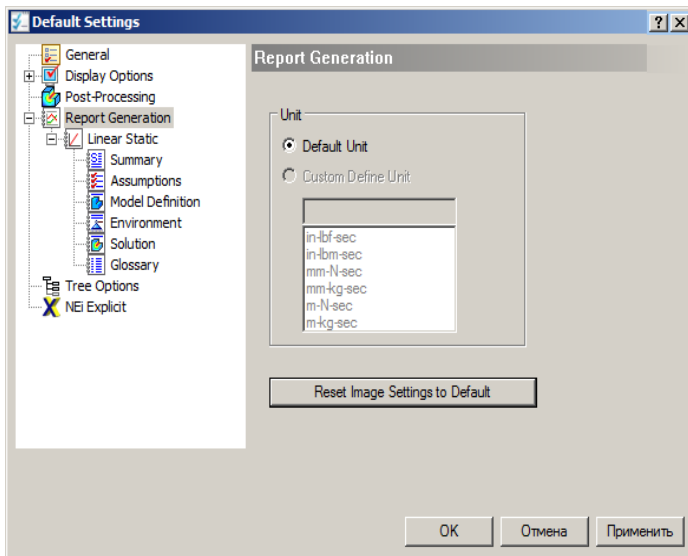


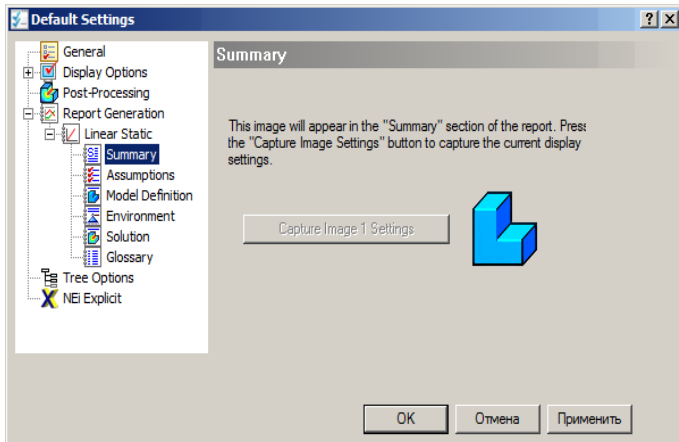
Рис. 1.6. Установка опций отображения результатов расчета

Выполняя команду *Report Generation* на панели *Default Settings*, получим возможность установить опции автоматической генерации отчета. Одной из таких опций является выбор системы единиц физических величин, используемых при отображении результатов (рис. 1.7, а).

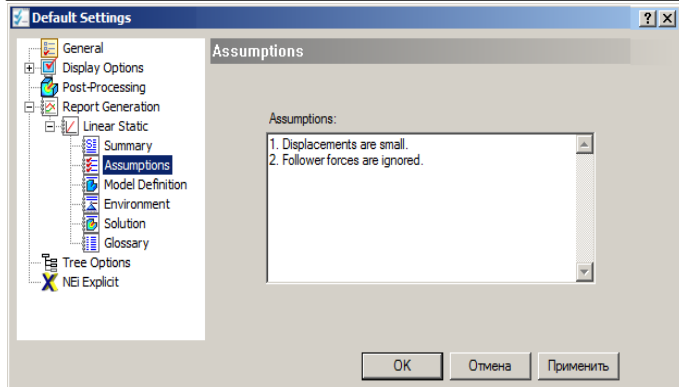
а)



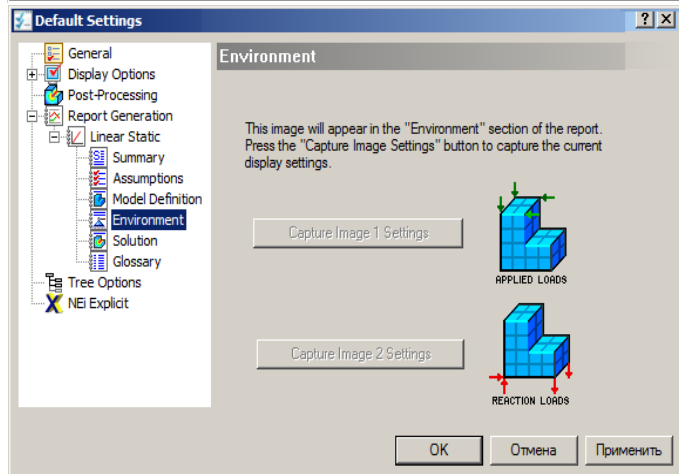
б)



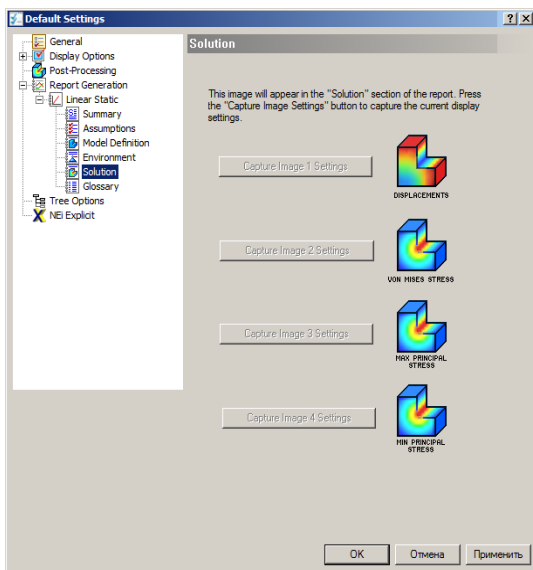
в)



г)



д)



е)

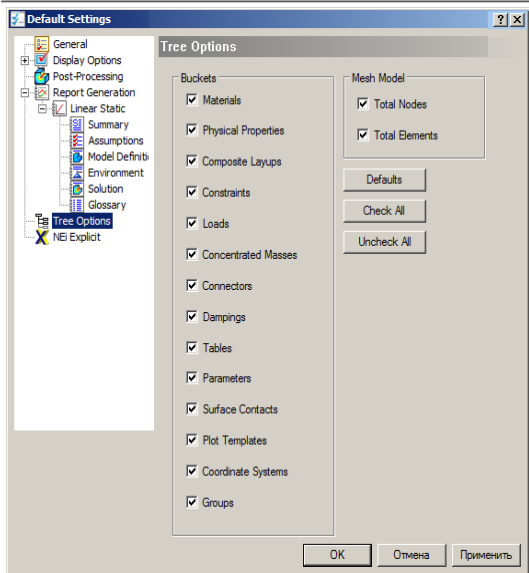


Рис. 1.7. Установка опций автоматической генерации отчета: *a* — выбор системы единиц физических величин, используемых при отображении результатов; *b* — общие сведения о разработке; *в* — общие сведения о сделанных допущениях; *г* — опции захвата изображений; *д* — опции способа отрисовки приложенных нагрузок; *е* — опции наименования выводимых результатов

Для выбранного типа задачи (в данном случае это задача статики в линейной постановке) при последовательном выборе строк *Summary*, *Assumptions*, *Model Definition*, *Environment*, *Solution* могут быть указаны (для последующего использования при составлении отчета) общие сведения о разработке (рис. 1.7, б), сделанных допущениях (1.7, в), об опции захвата изображений (рис. 1.7, з), о способе отрисовки приложенных нагрузок (рис. 1.7, д) и наименования выводимых результатов (рис. 1.7, е).

Строка *Glossary* позволяет формировать / редактировать своеобразный указатель терминов, строка *Tree Options* устанавливает вид «дерева» проекта, который отображается в боковом окне экрана (см. рис. 1.7, е), откуда следует, что в такое «дерево» включаются сведения о материалах модели (*Materials*), ее физических свойствах (*Physical Properties*), компонентах многослойных конструкций из композиционных материалов (*Composite Layers*), кинематических и силовых граничных условиях (*Constrains*, *Loads*), сосредоточенных массах (*Concentrated Masses*), связях (*Connections*), наличии демпфирования (*Damping's*), таблиц, (*Tables*), параметров (*Parameters*), поверхностей контакта (*Surface Contact*), системах координат (*Coordinate Systems*), группах и др. (*Groups*). «Дерево» проекта, соответствующее выбору всех этих опций, показано на рис. 1.8.

Выбор строки *Nei Explicit* (рис. 1.9) позволяет установить опции расчета по МКЭ быстропеременного переходного процесса при помощи так называемого «явного решателя», когда параметры исследуемого процесса на текущем шаге нагружения определяются по рекуррентным соотношениям с учетом результатов решения задачи на предыдущем шаге [11]. Данный вопрос более подробно рассматривается

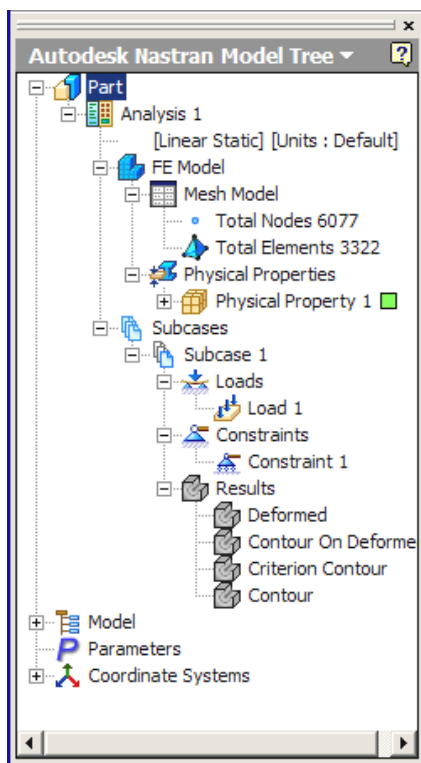


Рис. 1.8. «Дерево» проекта

в гл. 12. Как правило, установка опций решения выполняется относительно редко.

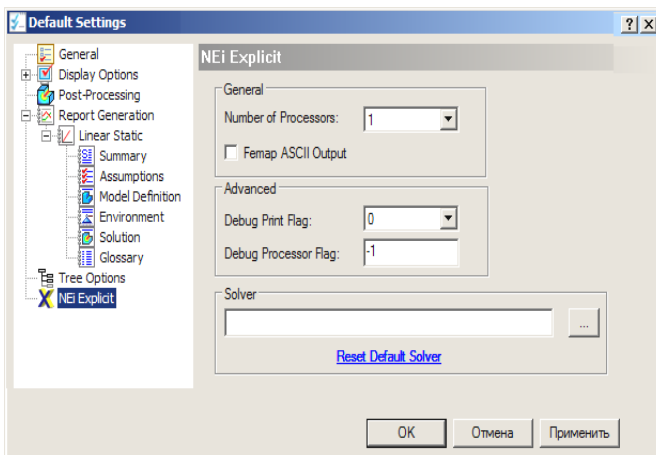


Рис. 1.9. Установка опций расчета по МКЭ быстропеременного переходного процесса при помощи «явного решателя»

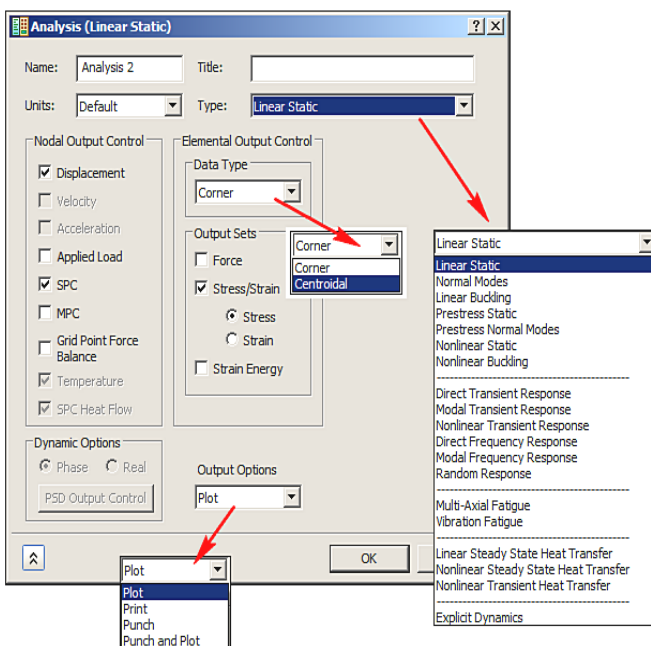


Рис. 1.10. Панель выбора типа решаемой задачи

При нажатии пиктограммных кнопок *New* или *Edit* в разделе *Analysis* инструментальной ленты (см. рис. 1.2) пользователь получает возможность выбрать тип (физическое содержание) решаемой задачи. При этом на экран выводится диалоговая панель (рис. 1.10).

В поле *Name* этой панели вписывается имя решаемой задачи (оно впоследствии будет присвоено всем файлам, образующим базу данных задачи; расширения имен файлов при этом становятся разными). В поле *Title* может быть записан комментарий (это действие не является обязательным). Раскрывающийся список в поле *Units* позволяет выбрать систему единиц физических величин.

Наиболее важным является выбор типа решаемой задачи из списка *Type*. Из рис. 1.10 следует, что могут решаться задачи линейной статики (*Linear Static*), модального анализа (*Normal Modes*), устойчивости в линейной постановке (*Linear Buckling*), статики с предварительным напряженным состоянием (*Prestress Static*), модального анализа статики с предварительным напряженным состоянием (*Prestress Normal Modes*), статики в нелинейной постановке (*Nonlinear Static*), нелинейной устойчивости (*Nonlinear Buckling*). Эти задачи образуют первую группу (необходимо отметить, что такое деление задач на группы является условным). Формулировки каждой задачи даны в приведенных далее примерах решения.

Во вторую группу включены задачи о переходных процессах. Они решаются методами прямого интегрирования уравнений движения и равновесия (*Direct Transient Response*), суперпозиции форм колебаний в линейной и нелинейной постановках (*Modal Transient Response, Nonlinear Transient Response*); гармонического анализа, т. е. расчета отклика системы на гармоническое возмущение, методами прямого интегрирования и суперпозиции форм колебаний (*Direct Frequency Response, Modal Frequency Response*); отклика на случайное воздействие (*Random Response*).

Третью группу образуют задачи о выносливости конструкций в условиях многоосного напряженного состояния (*Multi-Axial Fatigue*) и вибропрочности (*Vibration Fatigue*).

Четвертую группу составляют задачи о стационарной теплопроводности в линейной и нелинейной постановках (*Linear Steady State Heat Transfer, Nonlinear Steady State Heat Transfer*) и нестационарной теплопроводности (*Nonlinear Transient Heat Transfer*).

Содержание задач пятой группы о расчете быстропеременного переходного процесса при помощи явного метода МКЭ (*Explicit Dynamics*) сформулировано при рассмотрении рис. 1.9.

В разделе *Nodal Output Control* при помощи отметки в нужном поле указывается тип основных выводимых узловых результатов, которыми являются перемещения (*Displacement*). Результаты расчета для КЭ (*Elemental Output Control*) выводятся для узлов, находящихся в вершинах элементов (строка *Corner* в списке *Data Type*). Эти результаты могут относиться также к центрам тяжести элементов при выборе в указанном списке строки *Centroidal*. Основными результатами для КЭ на рис. 1.10 выбраны напряжения (*Stress*), также могут выбираться деформации (*Strain*).

В разворачивающемся списке *Output Options* выбирается направление вывода результатов на экран (*Plot*), на печать (*Print*), на 3D-принтер (*Punch*), на 3D-принтер и экран монитора (*Punch and Plot*).

После выбора нужного типа решаемой задачи переходят к вводу необходимых данных при помощи кнопок следующих разделов ленты.

2. ЗАДАЧА СТАТИКИ

2.1. Решение задачи в объемной постановке

Задача статики в линейной постановке формулируется следующим образом: дана геометрия конструкции, известны физико-механические характеристики конструкционных материалов (причем они являются линейными); заданы кинематические граничные условия (закрепления) и силовые граничные условия (нагружение).

Необходимо определить параметры напряженно-деформированного состояния конструкции, представляемые в виде различных полей напряжений (нормальных вдоль координатных осей, тангенциальных, главных, эквивалентных и др.), перемещений, деформаций, энергии деформирования и др.

Рассмотрим решение данной задачи, в которой необходимо определить параметры напряженно-деформированного состояния консольно закрепленной стальной пластины с отверстием, нагруженной давлением, величина которого равна 1 МПа (рис. 2.1).

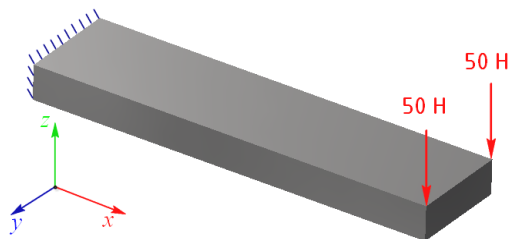


Рис. 2.1. Расчетная схема к решению задачи

В среде большинства приложений, реализующих МКЭ, решение задачи линейной статки осуществляется в приведенной последовательности:

- построение (импорт) геометрии модели;
- описание конструкционных материалов;
- определение параметров сетки конечных элементов;
- наложение кинематических граничных условий;
- наложение силовых граничных условий;
- установка опций решения;
- запуск задачи на выполнение;
- постпроцессорная обработка.

В среде Autodesk Nastran In-CAD предусмотрен только импорт моделей, созданных средствами программных продуктов AutoCAD. Конструкционные материалы для модели могут быть как описаны в среде Autodesk Nastran In-CAD, так и передаваться из среды того приложения, в котором геометрия модели создавалась.

Для описания конструкционных материалов следует обратиться к разделу *Properties* инструментальной ленты (см. рис. 1.2) и нажать пиктограммную кнопку *Material*. При этом на экран выводится одноименная диалоговая панель (рис. 2.2).

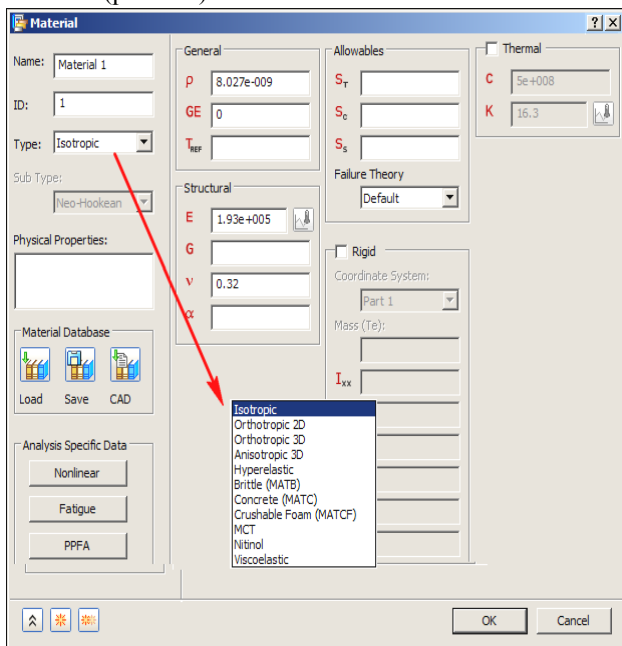


Рис. 2.2. Панель установки свойств конструкционного материала

Материалы, назначаемые для модели, получают порядковые номера и имена, отображаемые в полях *ID* и *Name*. В разворачиваемом списке поля *Type* выбирается тип материала (изотропный, ортотропный, гиперупругий и др.). В поля разделов *General*, *Structural*, *Allowables*, *Thermal* вводятся значения плотности материала ρ , модулей упругости E и G , коэффициента Пуассона ν , коэффициента линейного расширения α , теплоемкости c , коэффициента теплопроводности K , пределов текучести S_T и др.



Около полей значений E и K имеется пиктограммная кнопка, нажатие на которую позволяет задать эти характеристики материала в функции температуры. В списке *Failure Theory* выбирается модель теории прочности, постановка отметки в поле *Rigid* позволяет считать описываемый материал твердым (недеформируемым). Материал может быть назначен при обращении к пользовательской базе данных. Для загрузки последней следует нажать пиктограммную кнопку *Load* в разделе *Material Database*. Кнопка *Save* позволяет записать данные о новом материале в имеющуюся пользовательскую базу данных.

При необходимости использования базы данных материалов, входящих в состав CAD-системы, следует нажать пиктограммную кнопку *CAD*, выбрать одну из доступных баз (*AutoCAD* или *Autodesk Inventor*) и далее требуемый в ней материал (рис. 2.3).

В случае, когда конструкционный материал для исследуемой модели был назначен при ее проектировании в среде CAD-системы, должна быть нажата пиктограммная кнопка *Import from Model* раздела *Properties* инструментальной ленты Autodesk Nastran In-CAD. Далее там же должна быть нажата кнопка *Physical* для выбора параметров КЭ. На диалоговой панели (рис. 2.4, *a*) должны быть выбраны тип элемента (список *Type*), идентификатор системы координат КЭ (список *Coordinate System*) и материал (список *Material*). Из этого рисунка следует, что для формирования сетки КЭ выбран трехмерный элемент (*Solid Element*)¹, система координат которого ориентирована так же, как система координат всей модели (*Part I*), а в качестве материала — высокопрочная низколегированная сталь. Это означает, что сетка КЭ будет строиться с такими настройками, вплоть до изменения хотя бы одной из них.

¹ Из рис. 2.4 следует, что кроме трехмерного КЭ могут быть выбраны двумерный элемент типа «оболочка» (*Shell*) и одномерный элемент типа «стержень» или «балка» (*Line*).

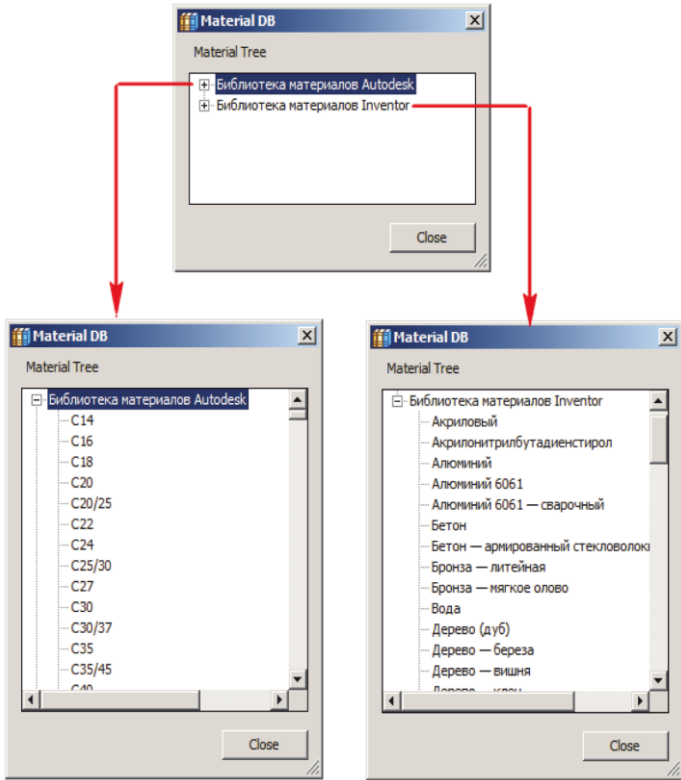


Рис. 2.3. Обращение к базам данных материалов CAD-систем

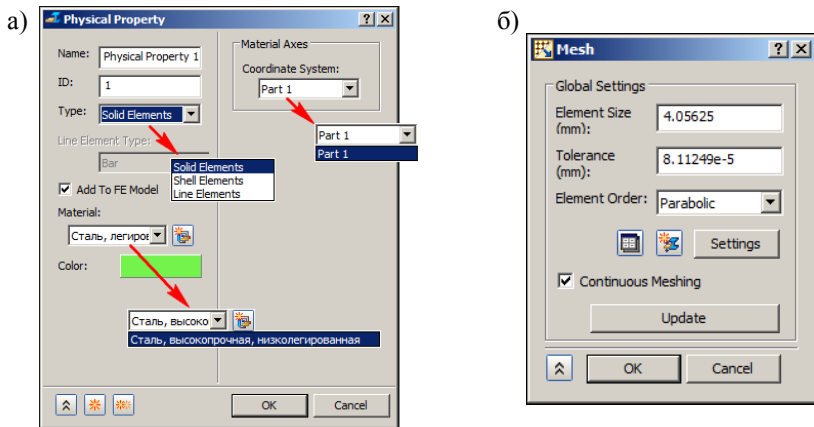


Рис. 2.4. Выбор типа (а) и установка параметров сетки (б) КЭ

Далее при помощи команд раздела *Mesh* должна быть построена сетка КЭ. Команда *Global* предназначена для определения размеров КЭ и собственно для построения сетки. При нажатии одноименной пиктограммной кнопки на экран выводится диалоговая панель (рис. 2.4, б). В полях *Element Size* и *Tolerance* выводятся ориентировочные значения размера ребра КЭ и допуска на этот размер, устанавливаемые автоматически. Пользователь при необходимости может переопределить эти значения вручную.

Следует обратить внимание на значение *Parabolic* параметра, выведенное в поле *Element Order*. Из данного рисунка следует, что при построении сетки КЭ будут использованы так называемые *изопараметрические элементы*¹ с квадратичной функцией формы. В таких КЭ узлы располагаются в вершинах шестигранника (пирамиды, пластины, стержня) и в серединах ребер. Использование изопараметрических КЭ считается предпочтительным [12]. Сетка КЭ строится после нажатия кнопки ОК.

При нажатии на пиктограммную кнопку *Settings* на экран выводится диалоговая панель, позволяющая установить некоторые дополнительные параметры сетки КЭ (рис. 2.5). К этим параметрам относятся: минимальное значение соотношения сторон элемента и внутреннего угла между любыми двумя смежными сторонами, а также допуск на увеличение соотношения сторон и др. Практика показывает, что значения этих параметров, установленные по умолчанию, являются вполне разумными.

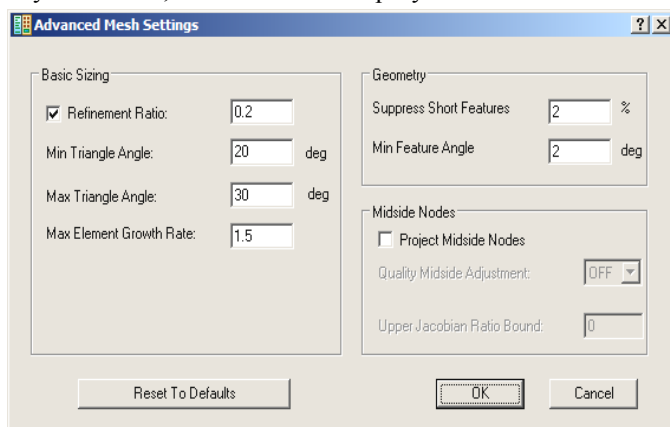


Рис. 2.5. Установка дополнительных параметров сетки КЭ

¹ При выборе в этом списке значения *Linear* сетка КЭ будет формироваться из субпараметрических элементов с линейной функцией формы.

Кнопки *Show/Hide* и *Update* раздела *Mesh* позволяют, соответственно, отобразить / скрыть или перестроить сформированную сетку элементов, кнопка *Table* выводит на экран таблицу КЭ. При показанных на рис. 2.4, б параметрах сетка КЭ содержит 6023 узла и 3357 элементов, размер ребер которых не превышает 4 мм. Впоследствии сетка КЭ будет отображаться цветом, указанным в ячейке *Color* экрана таблицы (рис. 2.6).

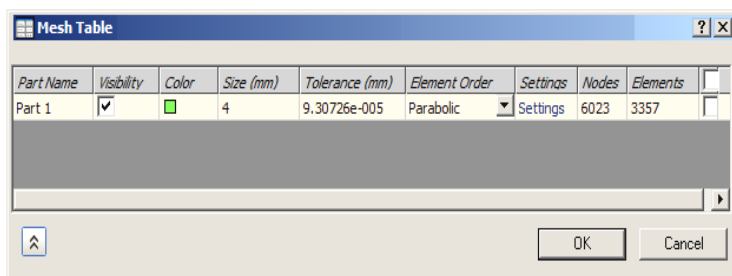


Рис. 2.6. Экран таблицы свойств сетки КЭ

Команды раздела *Setup* позволяют наложить необходимые для расчета граничные условия. В рассматриваемой задаче необходимо описать закрепление по всем степеням свободы

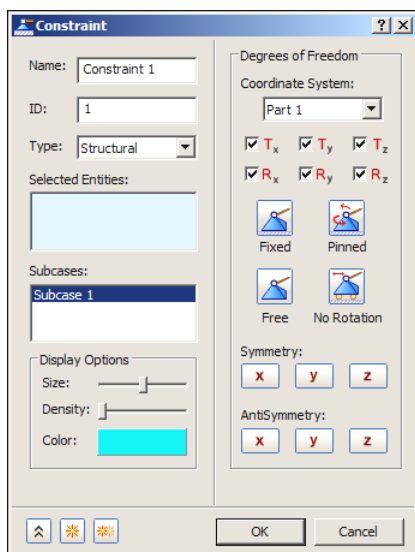


Рис. 2.7. Наложение кинематических граничных условий

на одной из торцевых сторон, и приложение к двум узлам сосредоточенных сил. При нажатии пиктограммной кнопки *Constraints* на экран выводится показанная на рис. 2.7 диалоговая панель. Каждое из предписанных граничных условий получает имя (отображается в поле *Name*).

Тип граничных условий выбирается при помощи пиктограммных кнопок *Fixed*, *Pinned*, *Free* или *No Rotation* (соответствуют жесткому закреплению, вращательному движению, свободному опиранию или поступательному движению). Подавляемые степени свободы указываются при постановке отметок ✓

в полях, соответствующих поступательным (T_x , T_y , T_z) и вращательным (R_x , R_y , R_z) перемещениям. Кнопки *Symmetry* или *AntiSymmetry* позволяют описать симметрию (антисимметрию) кинематических граничных условий. При перемещении вручную движков шкал *Size* и *Density* могут быть установлены размер и частота отображения символов, соответствующих кинематическим граничным условиям.

Закрепляемые поверхности, линии или вершины модели указываются курсором и отображаются в поле *Selected Entities*. Для описания прикладываемых нагрузок следует нажать пиктограммную кнопку *Loads* в разделе *Setup* инструментальной ленты Autodesk Nastran In-CAD (см. рис. 1.2).

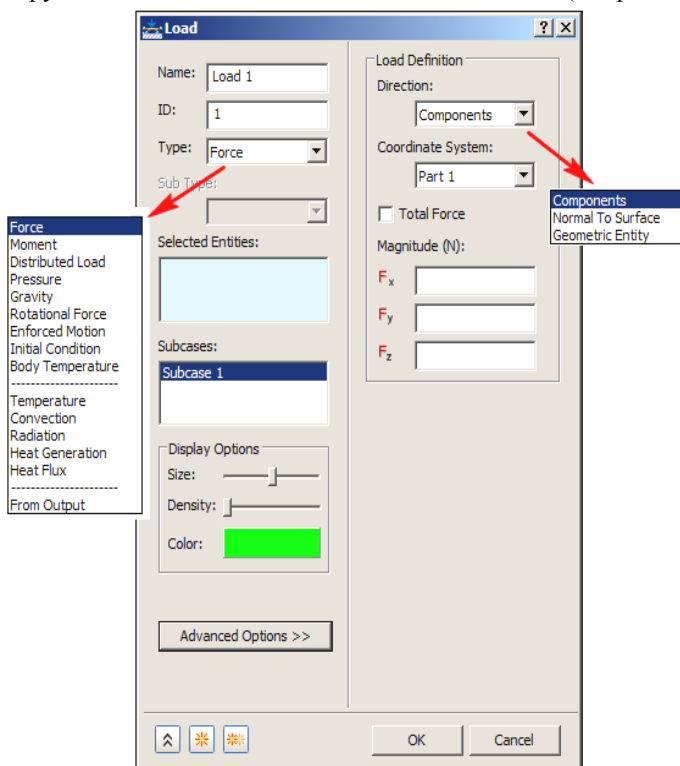


Рис. 2.8. Ввод силовых граничных условий

При помощи диалоговой панели *Load* (рис. 2.8) следует выбрать вид нагрузки (в раскрывающемся списке *Type*) и способ ее приложения (в списках *Direction* и *Coordinate* раздела *Load Definition*). Каждая вводимая нагрузка автоматически получает имя и порядковый номер, которые

отображаются в полях *Name* и *ID* (эти параметры могут редактироваться пользователем).

Из рис. 2.8 следует, что в качестве первой нагрузки ($ID = 1$), которой присваивается имя *Load_1*, задается сосредоточенная сила (*Force*). Ее направление задается составляющими (*Components*) вдоль осей системы координат, связанной с деталью *Part_1*. Составляющие прикладываемой силы вводятся в поля F_x , F_y и F_z панели *Load*. После этого необходимо указать на модели курсором точку приложения силы, номер (имя) которой выводится в поле *Selected Entities*. Назначение раздела *Display Options* совпадает с описанным ранее (см. рис. 2.7).

Из рис. 2.8 также следует, что кроме сосредоточенных сил в качестве силовых граничных условий могут использоваться сосредоточенные моменты (*Moment*), распределенная нагрузка (*Distributed Load*), давление (*Pressure*), сила тяжести (*Gravity*), центробежная сила (*Rotational Force*), вынужденное движение (*Enforced Motion*), начальные условия (*Initial Condition*), температура детали (*Body Temperature*). В качестве тепловых граничных условий могут задаваться предписанные температуры (*Temperature*), параметры конвективного и радиационного теплообмена (*Convection, Radiation*), собственный внутренний источник теплоты (*Heat Generation*), тепловой поток (*Heat Flux*). Направление нагрузки может задаваться также по нормали к воспринимающей поверхности (*Normal to Surface*) или при помощи специально предусмотренных в модели геометрических объектов (*Geometric Entity*), например, векторов.

Кнопка *Advanced Options* (рис. 2.9) расширяет панель *Load*, что позволяет описать более сложные нагрузки, в частности переменные (*Variable Load Definition*). То же относится и к одноименной кнопке панели *Constraint* при наложении кинематических граничных условий.

Сформированная и подготовленная к расчету КЭМ пластина показана на рис. 2.10. Запуск задачи на выполнение производится при нажатии пиктограммной кнопки *Run* в разделе *Solve* инструментальной ленты *Autodesk Nastran-In CAD* (см. рис. 1.2). При выполнении расчета в боковом окне экрана выводятся информационные и диагностические сообщения. При нормальном завершении вычислений выводится информационное окно с соответствующим сообщением (рис. 2.11). Результаты записываются в каталог, ранее предназначенный для размещения базы данных задачи (бинарный файл **.fno* содержит результаты, текстовый файл **.nas* — информацию о координатах узлов, топологии сетки КЭ, граничных условиях и др.). Далее можно приступить к постпроцессорной обработке результатов.

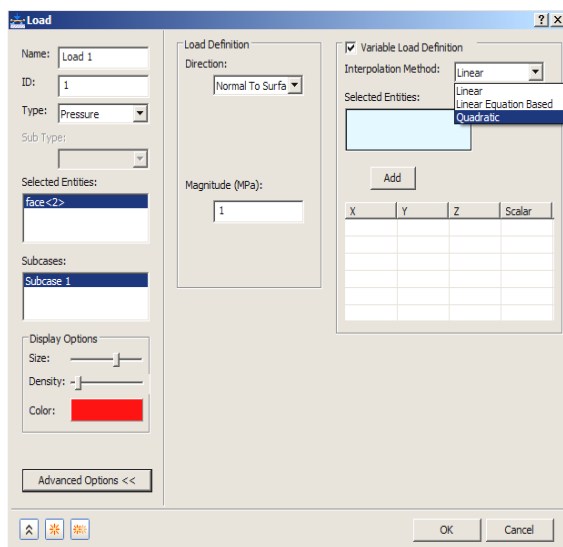


Рис. 2.9. Расширенная панель ввода силовых граничных условий

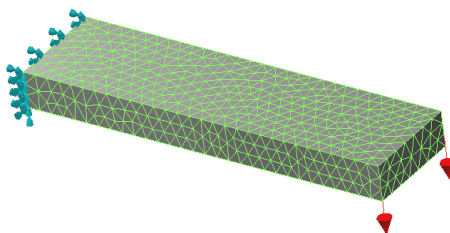


Рис. 2.10. Вид КЭМ пластины перед началом вычислений

Для отрисовки результатов расчета необходимо обратиться к командам раздела *Results* инструментальной ленты или «дерева» проекта (см. рис. 1.2 и 1.18). При нажатии на кнопку *Deformed* выводится изображение деформированной модели с указанием только экстремальных значений перемещений узлов (рис. 2.12). Наглядность такого изображения невысока, поэтому целесообразнее выводить поля найденных результатов расчета. С этой целью следует использовать кнопки *Contour* (при этом выводится поле перемещений на недеформированной модели — рис. 2.13, а) или *Contour on deformed* (поле перемещений накладывается на изображение деформированной модели — рис. 2.13, б). В последнем случае отображается также цветовая легенда.

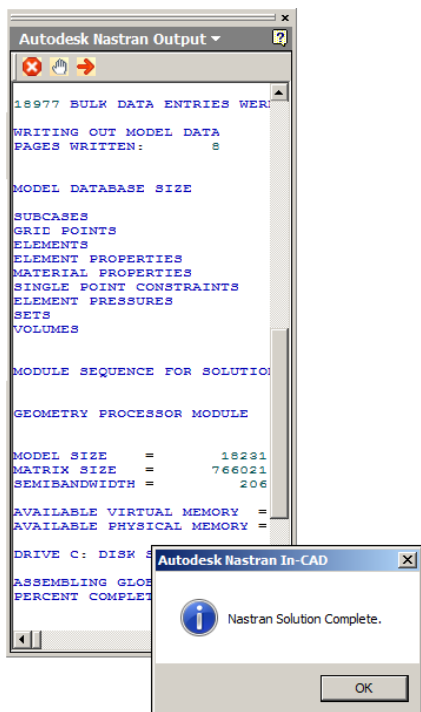


Рис. 2.11. Информационные сообщения, выводимые в процессе и по окончании выполнения задачи

Для управления содержанием и отчасти видом отображаемых результатов

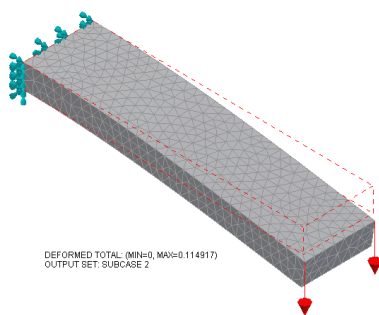


Рис. 2.12. Отображение деформированной модели по окончании расчета

расчета следует использовать пиктограммную кнопку *Contour* на инструментальной ленте. При этом на экран выводится диалоговая панель *Plot* (рис. 2.14). В ее разворачивающемся списке *Rendering* раздела *Display Options* выбирается способ отображения выводимого результата. Здесь выбор строки *Continuous* (установлено по умолчанию) приводит к показанным на рис. 2.12 и 2.13 изображениям, возможно также отображение поля результатов в виде линий (при выборе в списке строки *Line*), *Fringe*, *Gouraud*.

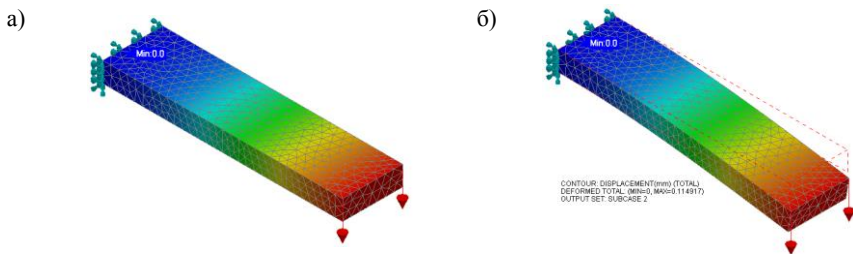


Рис. 2.13. Отображение поля перемещений, наложенного на недеформированную модель (а), на деформированную модель (б)

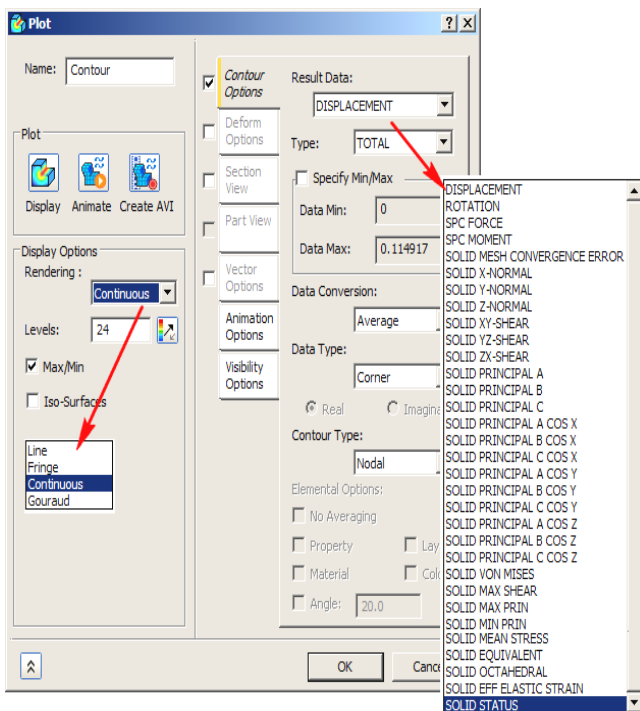


Рис. 2.14. Диалоговая панель выбора результатов расчета, выводимых на экран

Список поля *Result Data* предназначен для выбора отображаемого результата (при этом отметка должна быть установлена в поле напротив закладки *Contour Options*). Постановка отметки в поле напротив закладки *Deform Options* позволяет выбрать составляющую отображаемого результата в разворачивающемся списке *Type* (на рис. 2.15 установлено значение

TOTAL, т. е. будет отображена векторная сумма компонентов перемещения вдоль координатных осей). Здесь же в поле *Value* раздела *Deformation Scale* устанавливается масштаб изображения деформированного состояния (на рис. 2.15 этот масштаб установлен равным 10 % от характерного размера модели).

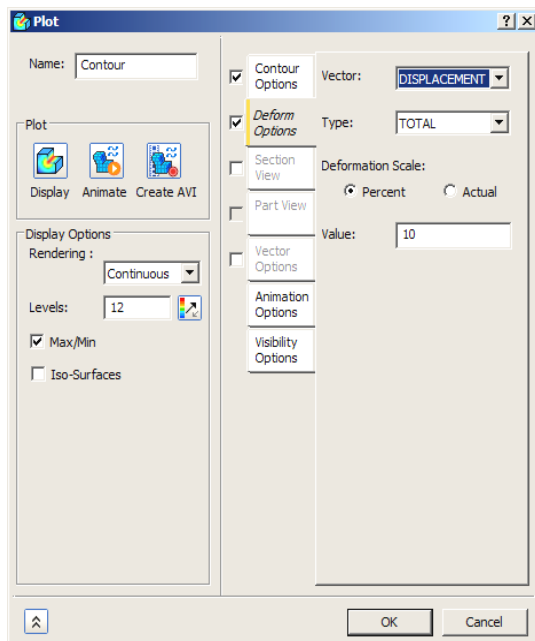


Рис. 2.15. Панель установки опций способа отображения результатов расчета

При помощи закладки *Section View* может быть сформирована плоскость сечения, на которой отрисовывается установленное ранее изображение (рис. 2.16, а). При помощи пиктограммных кнопок и / или текстовых полей, показанных на этом рисунке стрелкой 1, плоскость сечения можно переместить и повернуть вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Постановка отметки \odot в одном из полей, указанных стрелкой 2, позволяет вывести на экран только сечение, наложенное на контур детали, или фрагмент модели, располагающийся за плоскостью сечения. При помощи кнопки, показанной стрелкой 3, может быть отображена часть модели, располагающаяся перед плоскостью сечения. Сформированная плоскость сечения показана на рис. 2.16, б, а варианты отображения сечения модели приведены на рис. 2.17.

Закладка *Part View* на панели *Plot* активизируется только при отображении результатов расчета сборок (в рассматриваемой задаче модель состоит из одной детали).

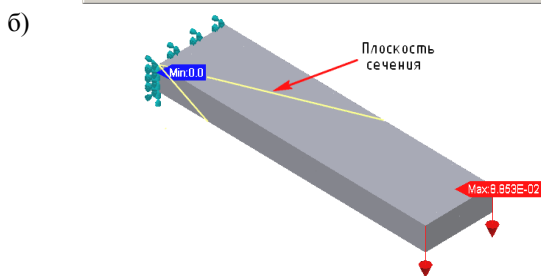
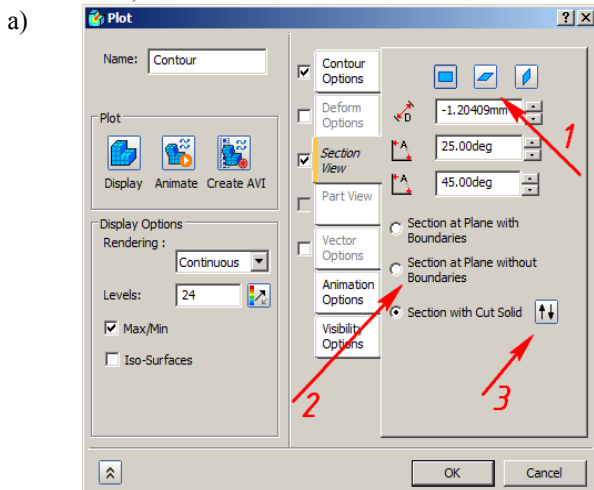


Рис. 2.16. Панель для формирования плоскости сечения (а) и сформированная плоскость сечения (б)

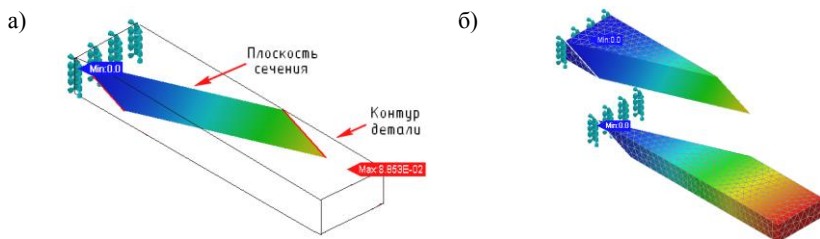
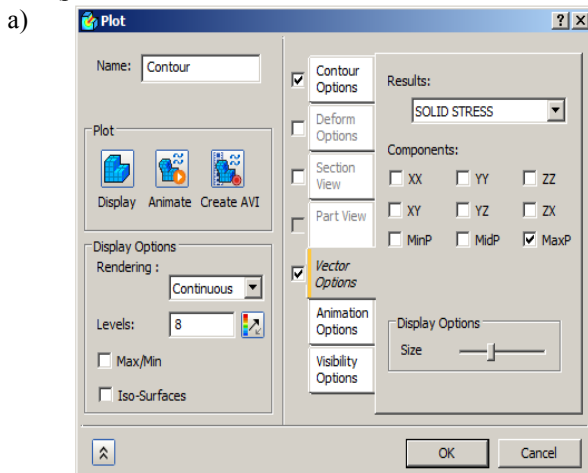


Рис. 2.17. Поле вертикальных перемещений в сечении модели (а) и фрагменты модели перед и после плоскости сечения (б)

В ряде случаев более наглядным является изображение результатов расчета в векторном виде. Для этого следует активизировать закладку *Vector Options* (рис. 2.18, *a*).



б)

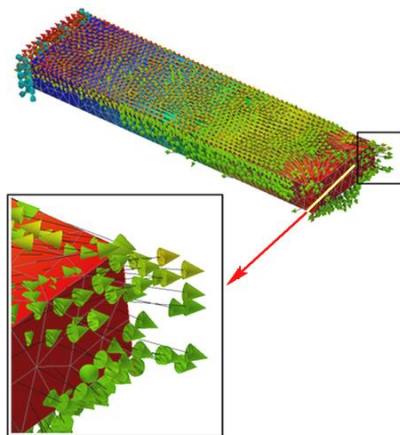


Рис. 2.18. Панель настройки вывода результатов в векторной форме (*a*) и поле максимальных главных напряжений (*б*)

При решении практических задач помимо отображения параметров напряженно-деформированного состояния в виде полей перемещений и других условий возникает необходимость вывода числовых значений этих параметров для отдельных / всех узлов. Это действие может быть выполнено при помощи пиктограммной кнопки *XY Plot*, расположенной

в боковом окне дерева проекта. Такая кнопка появляется там только по окончании решения в разделе *Results*. При ее нажатии (см. стрелку 1 на рис. 2.19) на экран выводится диалоговая панель, на которой должны быть выполнены следующие настройки.

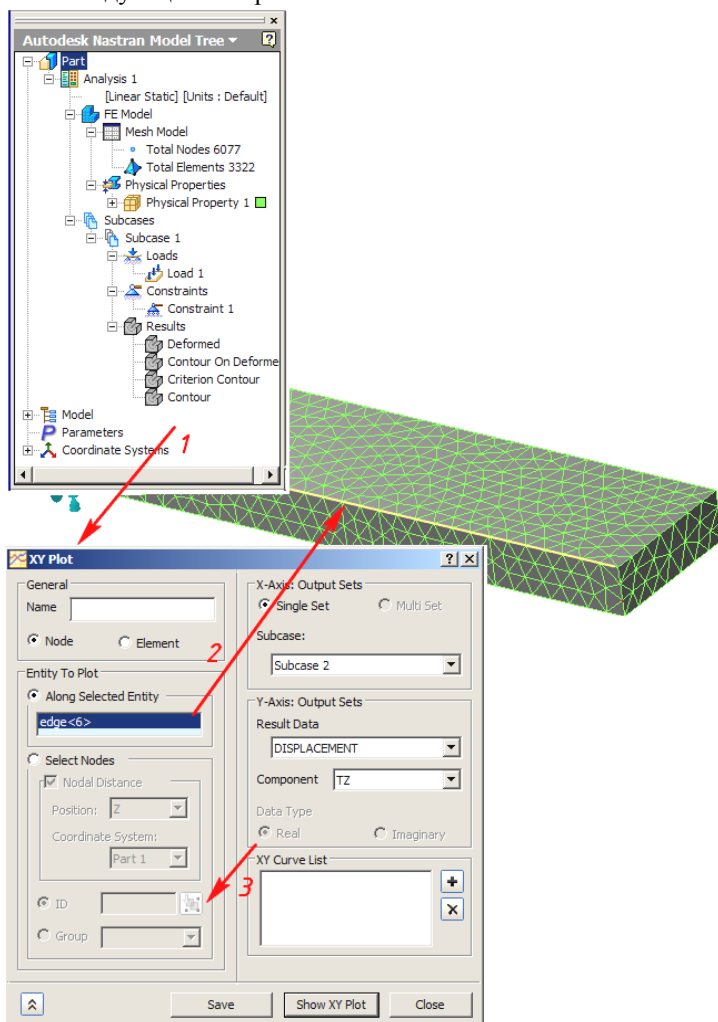


Рис. 2.19. Настройка параметров вывода результатов в числовом виде

В разделе *General* отметкой обозначаются элементы модели, для которых будет выводиться информация о результатах решения (при постановке указанной отметки в поле *Node* — для узлов, в поле *Elements* — для

КЭ). Здесь же в поле *Name* может быть введено пользовательское имя этого выводимого параметра (ввод имени не является обязательным, по умолчанию выводимым результатам могут быть присвоены имена вида *XY Plot#*, где # — порядковый номер).

В разделе *Entity To Plot* указываются объекты, для которых будут выводиться результаты. В примере, которому соответствует рис. 2.19, здесь в поле *Along Selected Entity* первоначально поставлена отметка \odot , после чего на модели курсором выбрано одно из ребер (стрелка 2 на рис. 2.19), порядковый номер которого (здесь $edge<6>$) выводится. Это значит, что результаты расчета будут выводиться для узлов модели, расположенных вдоль указанного ребра.

Результаты также могут выводиться и для отдельных узлов модели. Для этого отметка \odot из поля *Along Selected Entity* должна быть удалена и поставлена в поле *Select Node*, после чего курсором следует выбрать на модели нужные узлы (их номера при этом отображаются в списке *ID*). Если для одних и тех же узлов предполагается вывести несколько различных результатов расчета, то эти узлы могут быть объединены в группу, для чего используется показанная на рис. 2.19 стрелкой 3 пиктограммная кнопка.

На формируемом графике будет выведено значение компонента *Z* перемещения выбранных узлов в зависимости от их положения вдоль выбранного ребра. Для этого в разделе *Y Axis: Output Set* в разворачивающихся списках *Result Data* и *Component* выбраны строки *DISPLACEMENT* и *TZ*. Имя сформированного графика может быть записано в поле *XY Curve List*, сам график отрисован и сохранен при нажатии на пиктограммные кнопки, соответственно, *Show XY Plot* и *Save*. Такой график с настройками, соответствующими рис. 2.19, показан на рис. 2.20.

При выполнении расчетов по МКЭ всегда возникает вопрос о точности получаемого результата. С этой целью та же задача была решена с помощью следующих программных продуктов: ANSYS, ANSYS WBU, Autodesk Simulation Mechanical и Cosmos Simulation for SW, Autodesk Nastran In-CAD. При этом в ряде случаев использовались настройки по умолчанию.

Результаты расчетов максимального прогиба свободного конца балки, представленные в таблице (с. 34), там же приведено точное значение прогиба, полученное по формуле [6], показывают, что приложение Autodesk Nastran In-CAD не уступает указанным программным средствам.

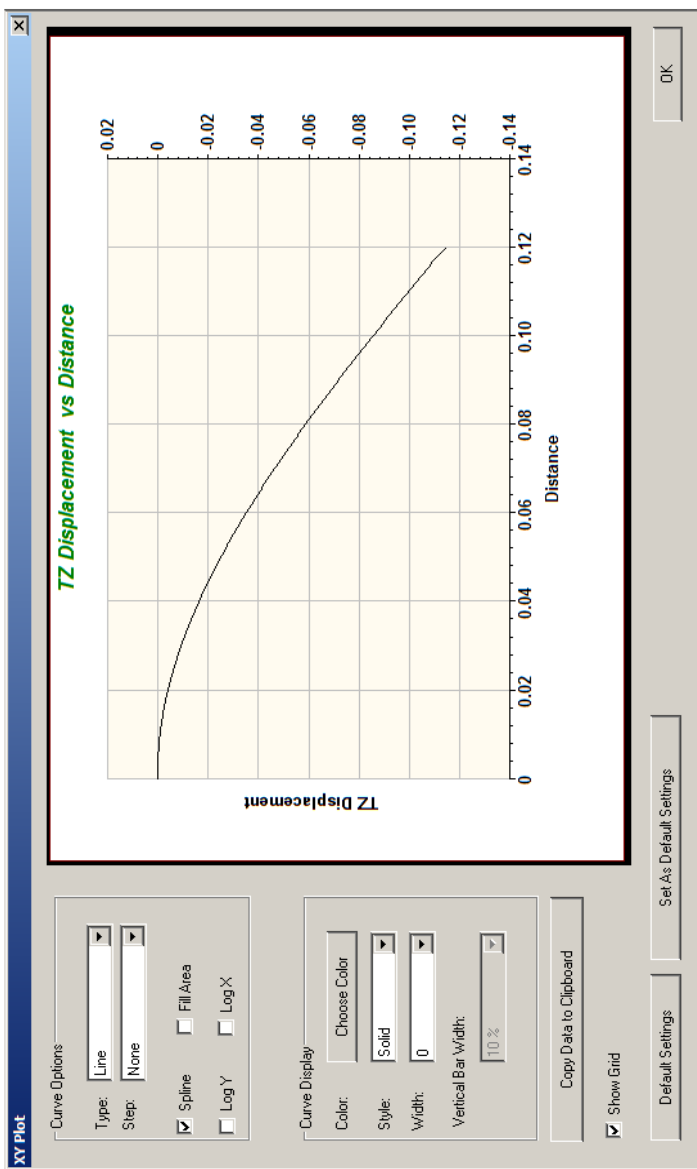


Рис. 2.20. Графический вывод результатов расчетов

Результаты расчета деформированного состояния консольной балки

Результат	Точно	Программный продукт				
		ANSYS	ANSYS WBU	Autodesk Simulation Mechanical	Cosmos Simulation for SW	Autodesk Nastran In- CAD
Прогиб, мм	0,1212	0,1185	0,1180	0,1191	0,1243	0,1182
Погрешность, %	–	2,23	2,64	1,73	2,55	2,47

Числовой вывод результатов может быть использован, например, при определении крутильной жесткости кривошипа. Определив горизонтальное перемещение точки A (рис. 2.21) под действием приложенного крутящего момента M , вначале найдем угол поворота, а затем — значение жесткости $c = M/\varphi$. При выводе числового значения перемещения u_A в поле *Select Nodes* панели *XY Plot* (см. рис. 2.19) должна быть поставлена отметка \odot , а в поле *ID* введен номер соответствующего узла. В таком случае график перемещений изображается в виде одной точки.

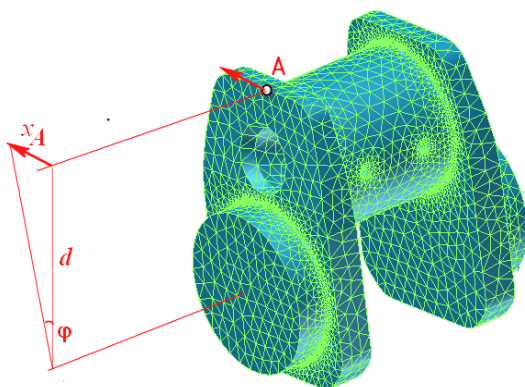


Рис. 2.21. К определению жесткости кривошипа

В связи с тем, что в машиностроении значительное число деталей подвергаются воздействию центробежных сил, возникающих при вращении детали, рассмотрим вопрос об описании такой нагрузки на примере расчета коленчатого вала (рис. 2.22), имеющего частоту вращения $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Допустим, что все предварительные действия по заданию свойств материала, формированию сетки КЭ, наложению кинематических граничных условий выполнены (не отличаются от ранее описанных). В качестве сило-

вых граничных условий зададим только вращение вала (из рис. 2.22 следует, что ось вращения вала параллельна координатной оси x).

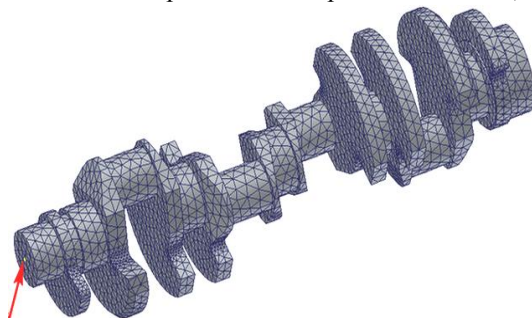


Рис. 2.22. Конечно-элементная модель коленчатого вала

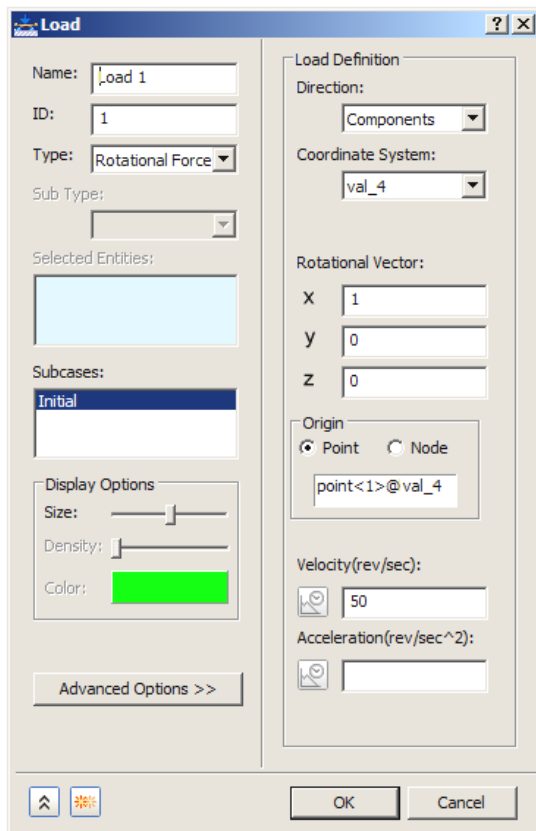


Рис. 2.23. Задание угловой скорости вращения вала

Для задания указанной нагрузки в списке *Type* диалогового окна *Load* (рис. 2.23) следует выбрать строку *Rotational Force*. В окне *Subcases* необходимо выбрать только те случаи нагружения, которым соответствует задаваемая угловая скорость (в рассматриваемой задаче предусмотрен только один случай нагружения с именем *Initial*). Направление вектора угловой скорости может задаваться различными способами.

При выборе в списке *Direction* строки *Components* необходимо в поля *X*, *Y* и *Z* раздела *Rotational Vector* ввести значения косинусов направляющих углов, образуемых вектором угловой скорости с координатными осями системы, выбираемой в списке *Coordinate System* (в данном случае система координат связана с деталью, имеющей имя *val_4*; при анализе сборок система координат может связываться с любой входящей в нее деталью). Значения, введенные в эти поля, свидетельствуют о том, что вектор угловой скорости параллелен оси *x* и направлен в сторону ее положительных значений.

Кроме описанного способа задания угловой скорости, список *Direction* предусматривает возможность ориентации вектора перпендикулярно поверхности (*Normal to Surface*) или вдоль какого-либо существующего в модели геометрического объекта (*Geometry Entity*), например, ребра, оси и др. В этих случаях упомянутые поверхность или геометрический объект должны впоследствии быть указаны курсором мыши.

В разделе *Origin* указывается точка, через которую проходит ось вращения вала (с ней связывается начало вектора угловой скорости). В связи с тем, что при построении сетки КЭ узел не всегда может размещаться в требуемой точке, в среде 3D-модели может быть выполнен специальный эскиз. В рассматриваемой задаче такой эскиз включает лишь одну эту точку, построенную на левой торцевой поверхности вала (эта точка показана стрелкой на рис. 2.22). Значение угловой скорости (в оборотах в секунду) вводится в поле *Velocity* (см. рис. 2.23). Указанному выше значению *n* соответствует частота вращения 50 с^{-1} .

При необходимости так же может быть задано угловое ускорение **Acceleration**. Дальнейшие действия по расчету и постпроцессорной обработке результатов не отличаются от описанных ранее.

2.2. Управление плотностью сетки конечных элементов

В п. 2.1 был рассмотрен пример расчета, когда сетка конечных элементов формировалась автоматически. В этом случае машина будет пытаться по возможности выдерживать постоянную плотность сетки. Однако при разработке конечно-элементной модели может возникнуть необходимость сгуще-

ни сетки, например, в области концентраторов напряжений. В данном случае следует использовать ручное управление плотностью сетки.

Пусть, например, необходимо построить конечно-элементную модель пластины, показанной на рис. 2.24. В связи с наличием полукруглой выточки на одной из сторон, являющейся концентратором напряжений, необходимо увеличить около нее плотность сетки.

Предварительно целесообразно спланировать параметры сетки конечных элементов, т. е. наметить число последних, располагаемых вдоль ребер, между вершинами или на поверхностях твердотельной модели. Пусть в нашем случае вдоль ребер AB , CD , EF , GH , AK , EM , LC и NG (рис. 2.25) будет размещаться по десять конечных элементов, а вдоль дуг KL и MN — по восемь.

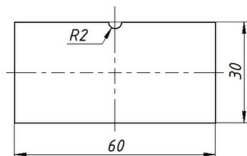


Рис. 2.24. Пластина для построения конечно-элементной модели

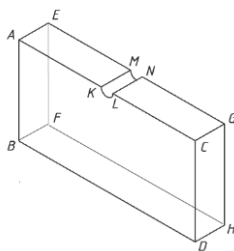


Рис. 2.25. Планирование параметров сетки конечных элементов

Выполним щелчок правой кнопкой «мыши» по строке *Mesh Model* в окне «дерева» проекта (рис. 2.26, а) и выполним далее команду *Add Mesh Control* из появляющегося контекстного меню. На экран будет выведена панель *Mech Control* (рис. 2.26, б).

В связи с выполняемым решением отметим «мышью» поле *Selected Edges* раздела *Edge Data* этой панели и укажем на твердотельной модели все перечисленные ранее прямолинейные ребра пластины (при этом их имена и порядковые номера будут в этом поле выводиться в виде *edge<#>*, где # — порядковый номер).

Завершив выбор ребер, поставим отметку в поле *Number of Elements* и введем принятое ранее значение числа элементов. При использовании для разбиения модели ее ребер помимо числа элементов вдоль них может указываться размер последних (в таком случае отметка ставится в поле *Element Size*).

При использовании для этой цели вершин *Vertex* и / или поверхностей *Face* модели могут быть заданы только размеры элементов, располагаемых между выбранными вершинами и на выбранных поверхностях (списки вы-

бранных вершин и поверхностей при этом отображаются в полях *Selected Points and Vertex* и *Selected Faces*). Конечно-элементная модель пластины, сформированная с описанными настройками, показана на рис. 2.27.

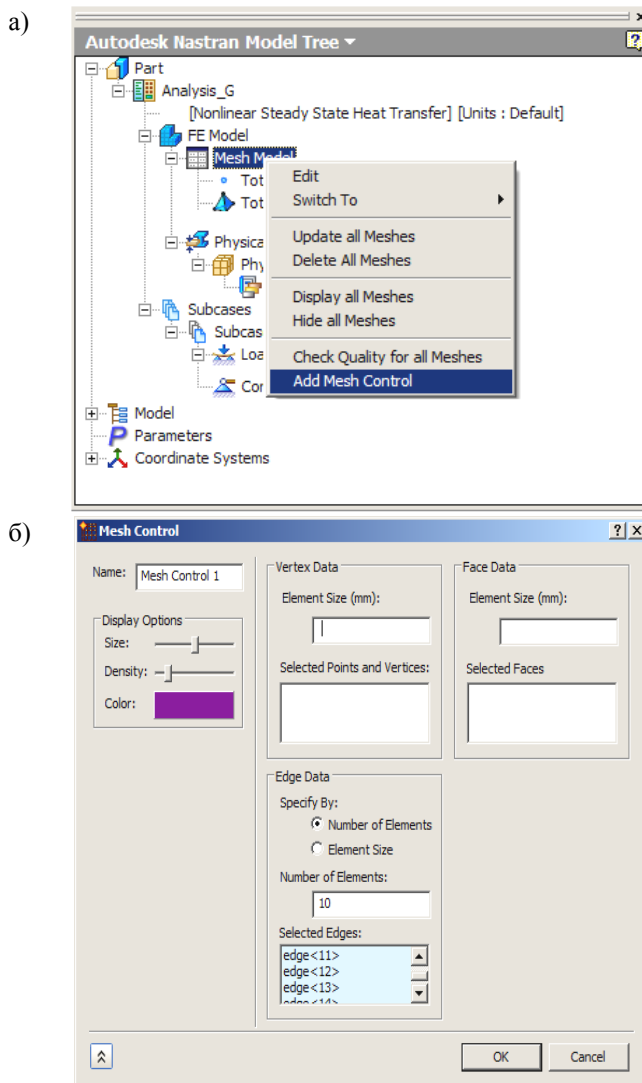


Рис. 2.26. Вызов команды (а) и ввод параметров (б) для управления плотностью сетки конечных элементов

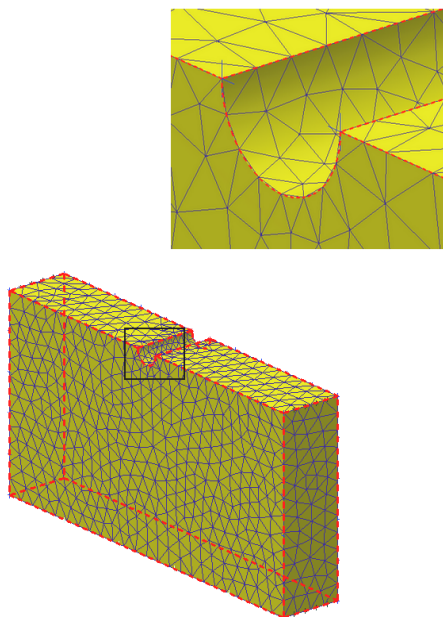


Рис. 2.27. Конечно-элементная модель пластины, сформированная с использованием инструмента управления плотностью сетки

2.3. Решение задачи с использованием одномерных конечных элементов

Приложение Autodesk Nastran In-CAD помимо объемных КЭ позволяет использовать элементы типа «Балка». Рассмотрим решение следующей задачи. Балка прямоугольного сечения закреплена одним из концевых сечений и подвергается чистому изгибу парой сил с моментом M на противоположном конце. Модель такой балки, созданная в среде программного продукта Autodesk Inventor, включает только один эскиз, состоящий из отрезка заданной длины. После импорта модели в среду Autodesk Nastran In-CAD решение задачи выполняется в соответствии с описанным в п. 2.1 алгоритмом.

Некоторые отличия заключаются в выборе типа КЭ: в этом случае используется линейный элемент (*Line Element*) — см. рис. 2.4. Для таких КЭ должна быть выбрана стандартная форма поперечного сечения либо последнее формируется пользователем (при этом отметка ставится, соответственно, в поле *Cross Section* или *Property Input*). При выборе стандартной формы сечения панель *Physical Property* принимает показанный на рис. 2.28, *a* вид.

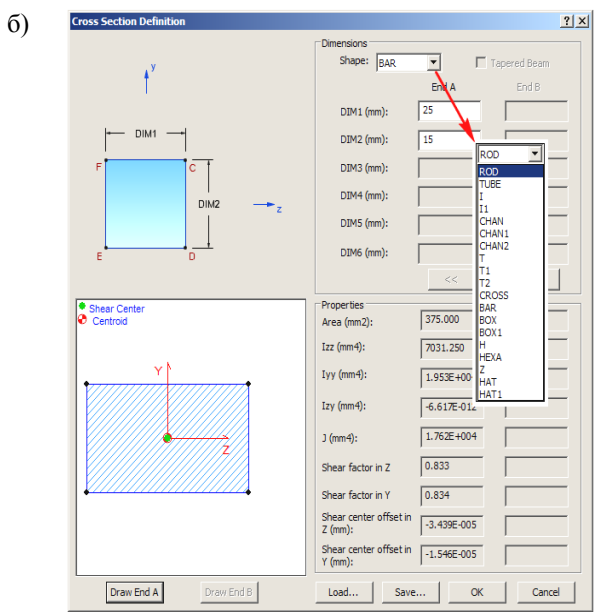
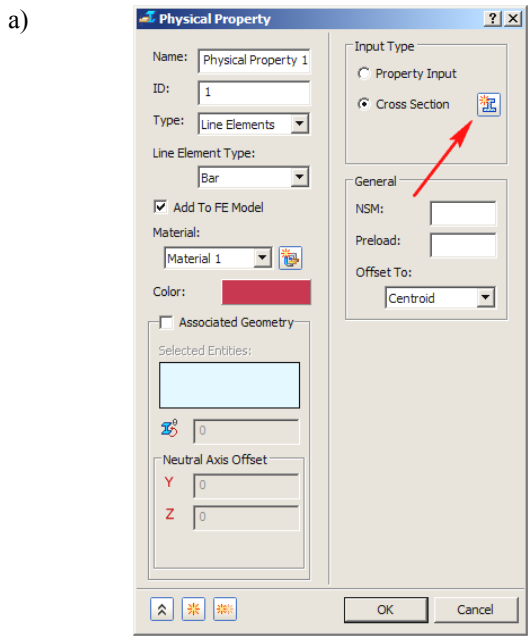


Рис. 2.28. Панель выбора (а) и панель ввода размеров (б) стандартного поперечного сечения линейных конечных элементов

После нажатия на показанную стрелкой пиктограммную кнопку на экран выводится панель *Cross Section Definition* выбора стандартных сечений (рис. 2.28, б). При помощи разворачивающегося списка *Shape* выбирается форма сечения, а в поля *DIM1*, *DIM2* и др. вводятся соответствующие выбранной форме размеры. Характеристики поперечного сечения (площадь, положение центра тяжести, моменты инерции и др.) выводятся в полях раздела *Properties*.

Доступны следующие формы сечения: круг (*ROD*), труба (*TUBE*), двутавр (*I*, *II*), уголок (*CHAN*, *CHAN1*, *CHAN2*), тавр (*T*, *T1*, *T2*), крестообразный (*CROSS*), прямоугольник (*BAR*), труба прямоугольного сечения (*BOX*, *BOX1*), швеллер (*H*), шестигранник (*HEXA*), Z-образный (*Z*), коробчатое (*HAT*, *HAT1*). Некоторые из стандартных сечений показаны на рис. 2.29. Результаты решения задачи впоследствии будут определены для точек *C*, *D*, *E* и *F*. Готовая к расчету КЭМ балки показана на рис. 2.30.

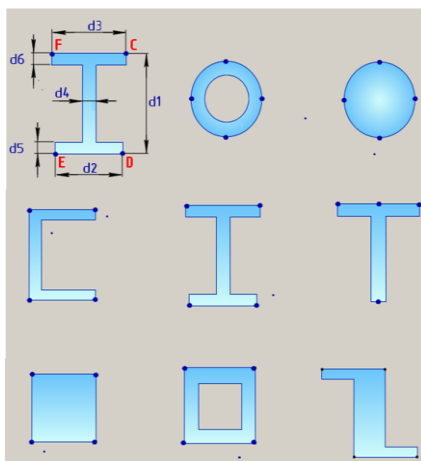


Рис. 2.29. Стандартные формы поперечного сечения линейных КЭ

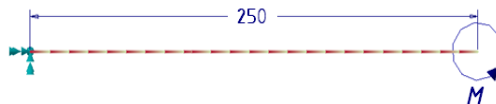


Рис. 2.30. Конечно-элементная модель балки

Результаты расчета балки показаны на рис. 2.31: выведены деформированное состояние балки, цветовая легенда, текстовое сообщение о минимальном и максимальном значениях суммарного перемещения (в мет-

рах), а также график составляющей перемещения узлов вдоль оси Oy (эта ось графика обозначена $TY Displacement$) в зависимости от положения точки вдоль оси балки ($Distance$). Указывая курсором на любую из точек графика (последние соответствуют узлам модели), можно получить на экране значения положения точки (в рассматриваемой задаче оно равно $0,1759$ м) и величину ее перемещения, т. е. $4,105 \cdot 10^{-5}$ м.

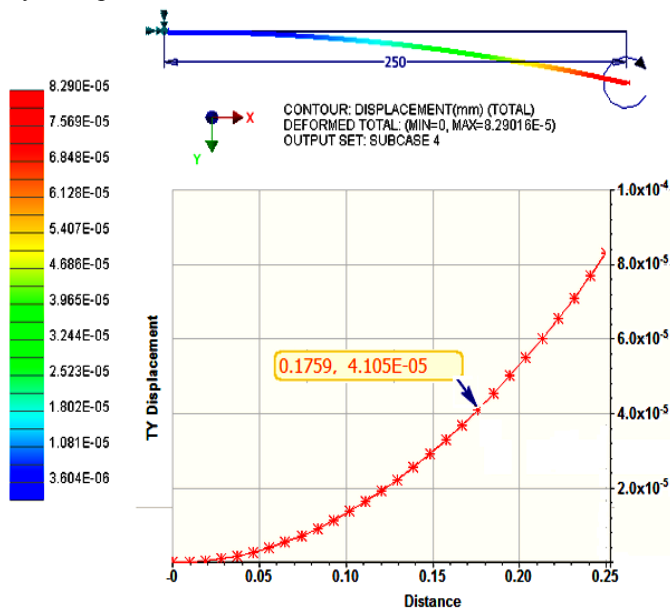


Рис. 2.31. Результаты расчета балки с использованием одномерных КЭ

Одномерные КЭ могут эффективно использоваться при решении задач по сопротивлению материалов при изучении изгиба и сложного напряженного состояния. При этом может возникнуть необходимость задания переменных нагрузок. Пусть требуется описать нагрузку, распределенную по длине участка AB , балки длиной 200 мм (рис. 2.32); пусть максимальное значение нагрузки (в точке A) равно 1000 Н, а минимальное (в точке B) — нулю.

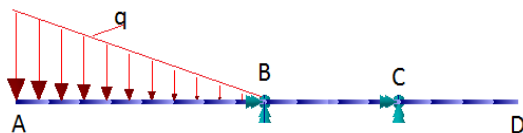


Рис. 2.32. Нагрузка, распределенная по балке

Для описания распределенной нагрузки на панели *Load* (см. рис. 2.9) следует нажать пиктограммную кнопку *Advanced Options* и поставить отметку в поле *Variable Load Definition* диалоговой панели (рис. 2.33). Здесь же в разворачивающемся списке *Interpolation Method* выбирается форма эпюры нагрузки.

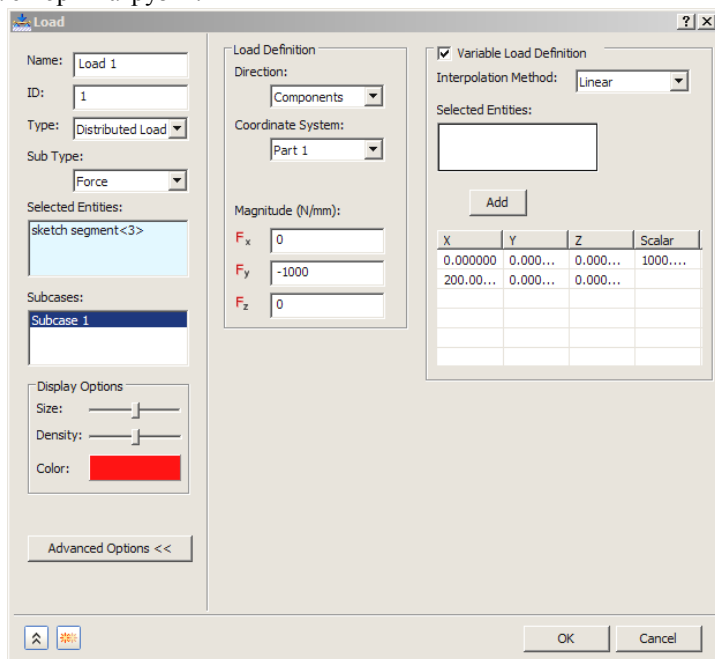


Рис. 2.33. Описание неравномерно распределенной нагрузки на участке балки

Доступны следующие формы эпюры нагрузки: линейная (установлена по умолчанию), описываемая комбинацией линейных функций, и квадратичная. Для задания неравномерно распределенной нагрузки в списке *Type* следует выбрать строку *Distributed Load*, указать курсором участок балки, к которому прикладывается нагрузка (при этом наименование этого участка отображается в левом окне *Selected Entities*), выбрать форму эпюры нагрузки, указать курсором начальную точку эпюры (в данном случае это точка *A*, при этом ее номер отображается в правом окне *Selected Entities*); нажать пиктограммную кнопку *Add*, после чего координаты *x*, *y* и *z* этой точки отобразятся в соответствующих столбцах таблицы), ввести в столбец *Scalar* значение нагрузки. Те же действия следует выполнить для точки *B* участка.

Направление прикладываемой нагрузки определяется знаком числа, введенного в соответствующее поле раздела *Magnitude* и выбором соответствующей строки в разделе *Direction*. В рассматриваемой задаче здесь выбрана строка *Components*, что соответствует заданию направления нагрузки при помощи составляющих вдоль координатных осей системы, связанной с телом (этому соответствует значение *Part 1*, установленное в списке *Coordinate System*).

Прочие действия здесь не отличаются от описанных в п. 2.1.

2.4. Решение задачи с использованием двумерных конечных элементов

Приложение Autodesk Nastran In-CAD позволяет решать задачи линейной статики с использованием двумерных КЭ типа «оболочка», имеющих шесть степеней свободы в каждом узле. Рассмотрим решение примера, в котором участок упругой стальной оболочки толщиной 2 мм, жестко защемленной одним из концевых сечений, на противоположном конце испытывает кручение (рис. 2.34).

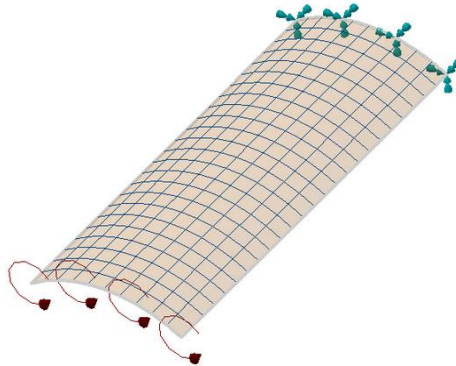


Рис. 2.34. Конечно-элементная модель тонкой оболочки

Отличия при решении этой задачи от предыдущих заключаются в выборе типа КЭ — используются элементы *Shell Elements* (рис. 2.35, а), для которых в поле *t* панели *Physical Property* задается толщина. Нажатие пиктограммной кнопки *Advanced Options* на этой же панели позволит задать параметры слоистой оболочки, переменную толщину (*Variable Thickness*), вывод значений напряжений для верхней или нижней поверхностей оболочки (*Top Fiber*, *Bottom Fiber*), дополнительную изгибную жесткость (*Bending Stiffness*) и др. — рис. 2.35, б.

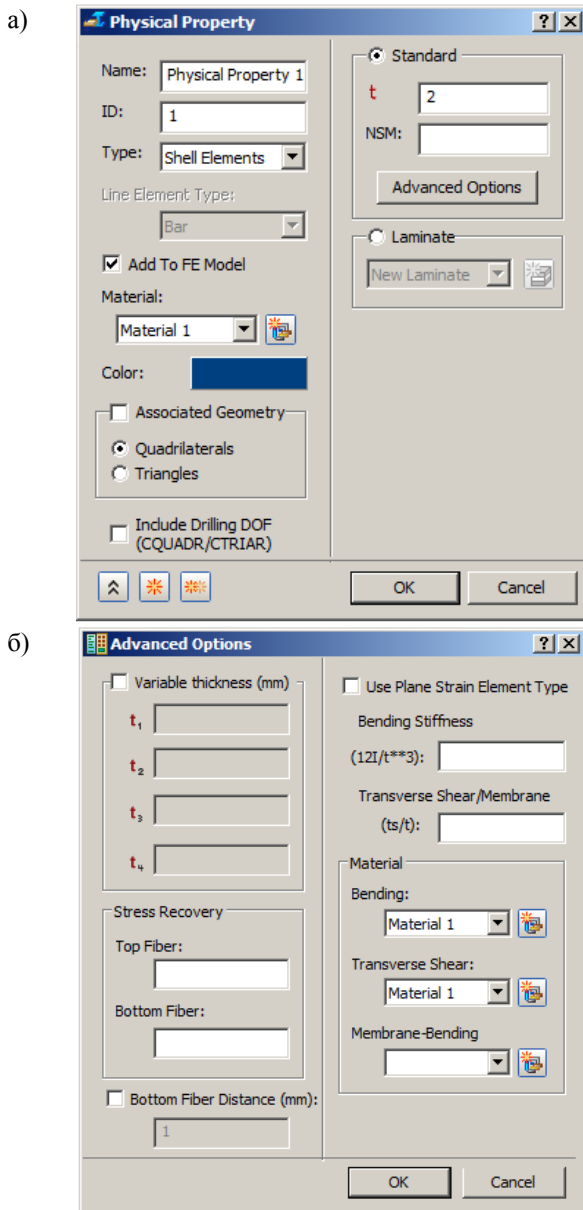


Рис. 2.35. Задание параметров КЭ типа «оболочка» на панели *Physical Property*:
a — поле панели; *b* — пиктограммная кнопка *Advanced Options*

3. МОДАЛЬНАЯ ЗАДАЧА

3.1. Содержание задачи и алгоритм ее решения

При решении модальной задачи определяются частоты и формы, совокупность которых часто называют *модой свободных колебаний конструкции*. При этом частоты колебаний определяются в явном виде, а формы — в относительном (в виде только соотношения амплитуд колеблющихся точек).

Особенностью таких задач является то, что они могут решаться как при наличии, так и при отсутствии кинематических граничных условий. В последнем случае первые шесть мод соответствуют движениям рассматриваемой конструкции как твердого тела и только седьмая, восьмая и последующие моды соответствуют колебаниям этого тела как деформируемого. При наличии кинематических граничных условий первая же найденная мода колебаний соответствует движению деформированного тела.

Модальная задача может решаться при отсутствии / наличии начального (предварительного) напряженного состояния. Рассмотрим первоначально решение простейшей задачи расчета частот и форм колебаний балки без предварительного напряженного состояния. При решении модальной задачи в среде Autodesk Nastran In-CAD следует выполнить указанные далее действия (при условии, что модель в среде CAD-системы построена):

- 1) импорт модели в среду Autodesk Nastran In-CAD;
- 2) установка опций решения (см. рис. 1.10);
- 3) описание свойств конструкционного материала;
- 4) задание физических свойств модели (см. рис. 2.4, а);
- 5) задание параметров сетки КЭ;
- 6) создание сетки КЭ;
- 7) наложение (при необходимости) кинематических граничных условий;
- 8) задание числа определяемых частот и форм колебаний;
- 9) запуск задачи на выполнение;
- 10) постпроцессорная обработка (вывод списка найденных частот, отрисовка и анимация соответствующих форм колебаний, формирование отчета и т. д.);
- 11) сохранение базы данных задачи.

3.2. Порядок выполнения действий

Выполним модальный анализ балки, показанной на рис. 2.11, при этом прежние граничные условия учитываться не будут (напомним, что в этом

случае первые шесть частот и форм колебаний балки будут соответствовать ее движению как твердого тела). В данном случае пп. 1 – 5 алгоритма решения аналогичны действиям, описанным в гл. 2 для задачи статики, и здесь подробно не рассматриваются. Единственным отличием в данном случае является выбор строки *Normal Modes* в поле *Type* панели *Analysis* (см. рис. 1.15).

Для задания числа определяемых частот и форм колебаний следует щелкнуть правой кнопкой мыши по строке *Modal Setup* в окне браузера проекта (рис. 3.1). При этом на экран выводится одноименная диалоговая панель (рис. 3.2). В поле *Number of Modes* этой панели необходимо ввести число определяемых частот и форм колебаний (по умолчанию оно равно десяти). При этом границы частотного диапазона (*Lowest Frequency*, *Highest Frequency*), в котором находятся эти частоты, не задаются. Если эти границы задать, то будут определены лишь те частоты, которые находятся в этом диапазоне.

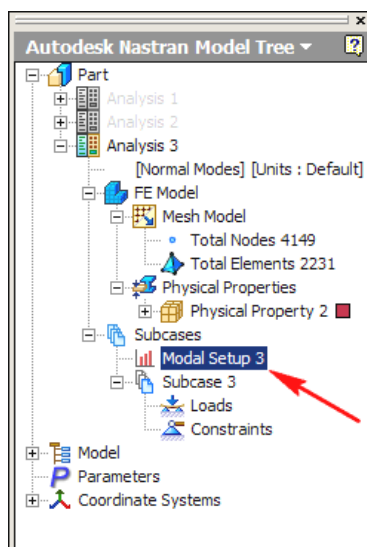


Рис. 3.1. Установка числа определяемых частот и форм свободных колебаний в модальной задаче

В разворачивающихся списках полей *Extraction Method* и *Mass Representation* выбираются, соответственно, методы определения частот и формирования матрицы масс. При помощи списка поля *Modal Database* задается уничтожение / сохранение базы данных задачи. После выполнения всех настроек задача запускается на расчет.

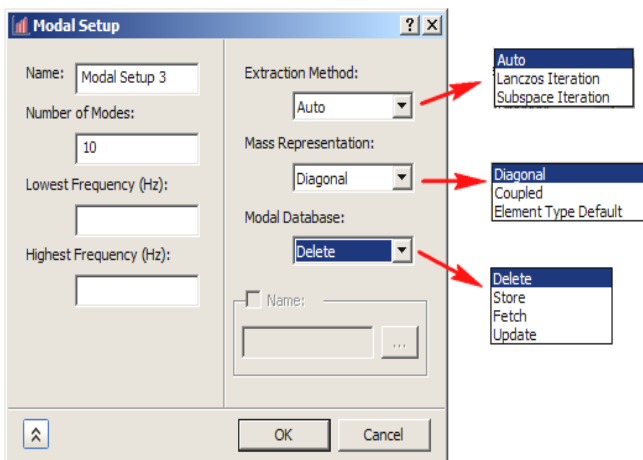


Рис. 3.2. Задание опций решения в модальной задаче

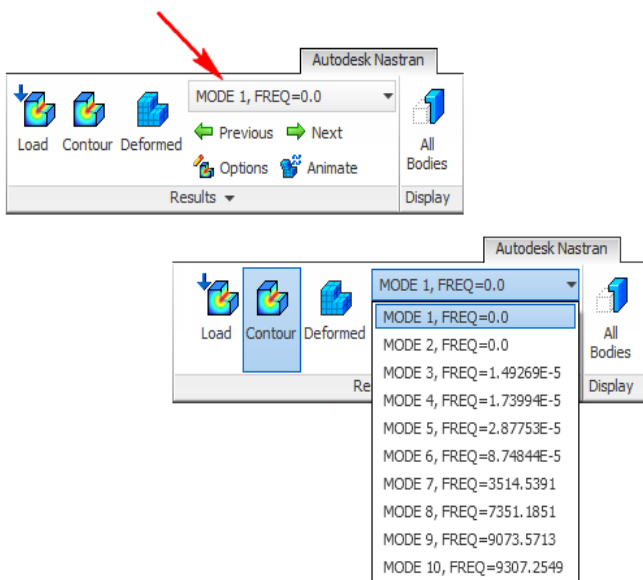


Рис. 3.3. Вывод списка найденных частот колебаний балки

Постпроцессорная обработка результатов включает вывод списка найденных частот собственных колебаний в табличной и/или графической форме, отображение и / или анимацию форм колебаний. Для выполнения этих действий следует использовать команды раздела Results инструмен-

тальной ленты приложения (рис. 3.3). Значения найденных частот свободных колебаний балки выводятся в списке MODE 1 (на рис. 3.3 указан стрелкой). Поскольку в рассматриваемой задаче кинематические граничные условия не были наложены, первые шесть частот оказались равными (близкими) нулю, поскольку они соответствуют движениям балки как твердого тела. Выбрав в этом списке нужную форму, т. е. перейдя на строку MODE #, и нажав далее пиктограммные кнопки Contour и Deformed, на экране отображается деформированное состояние балки, соответствующее выбранной форме колебаний с номером #.

На рис. 3.4 показана крутильная форма колебаний, соответствующая частоте 7351,1851 Гц (следует заметить, что несмотря на вывод цветовой шкалы перемещений и текст MIN = 0,509016 и MAX = 147,737, перемещения узлов модели выведены в относительной форме). Нажимая далее пиктограммные кнопки *Previous* или *Next*, можно вывести на экран изображение предыдущей (следующей) формы колебаний. Кнопка *Animate* в каждом случае позволяет анимировать изображение формы колебаний.

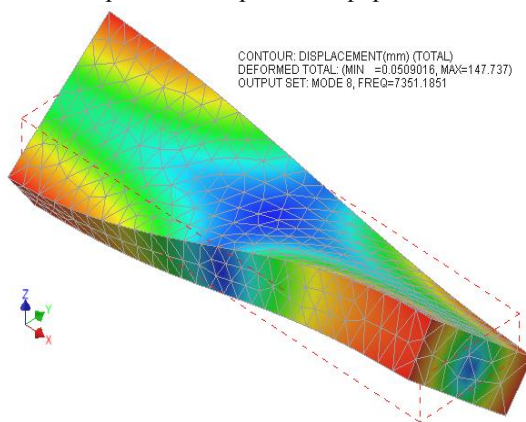


Рис. 3.4. Крутильная форма колебаний балки

График найденных частот выводится при нажатии на строку XY Plot в окне «дерева» проекта, которая появляется по окончании расчета (рис. 3.5).

Модальная задача может решаться также при использовании одномерных и двумерных КЭ. В качестве иллюстрации приведем результат решения модальной задачи для масляного картера поршневого двигателя в двумерной постановке (рис. 3.6). В качестве кинематических граничных условий здесь предусмотрено закрепление верхней границы картера в направлении всех степеней свободы. Подробное решение этой задачи в среде программного продукта ANSYS приведено в [12].

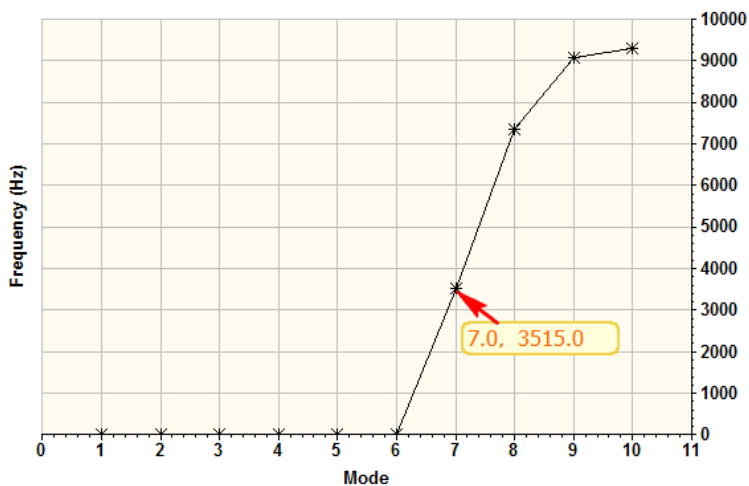


Рис. 3.5. График частот свободных колебаний балки

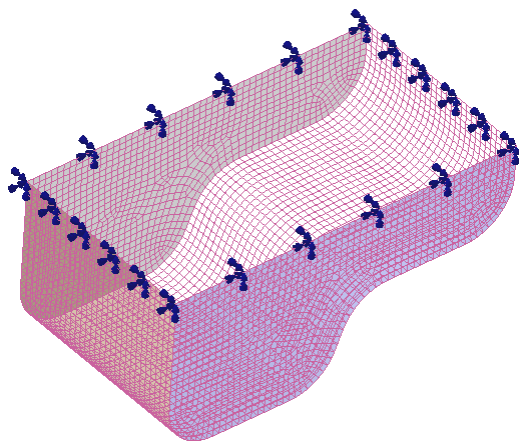


Рис. 3.6. Двумерная конечно-элементная модель масляного картера с наложенными кинематическими граничными условиями (15084 узла, 4849 изопараметрических элементов)

В связи с наложенными кинематическими граничными условиями все десять определяемых форм колебаний соответствуют движениям картера как деформируемого тела. Выполняя описанную ранее в п. 3.1 последовательность расчета, получим результат, показанный на рис. 3.7 (там же приведена одна из форм колебаний).

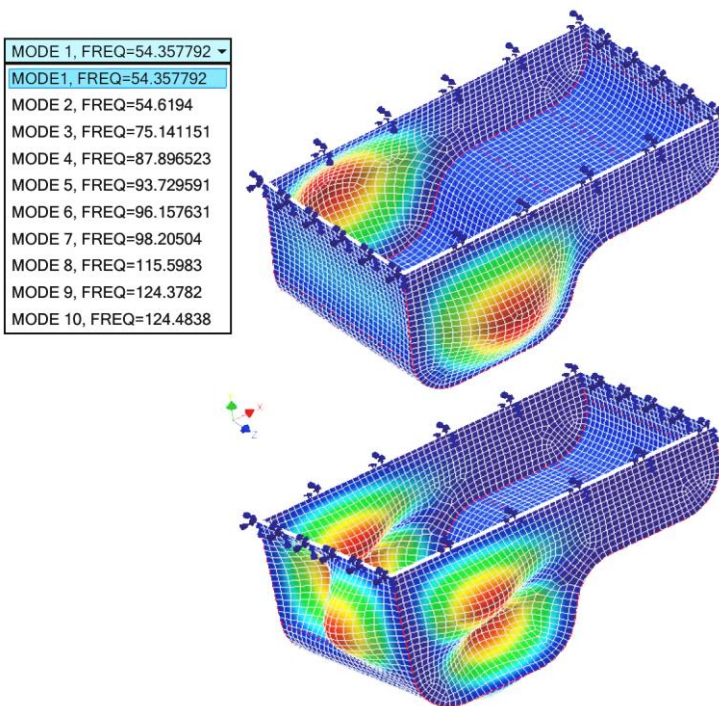


Рис. 3.7. Первая и десятая формы свободных колебаний картера на частотах 54,378 Гц и 124,484 Гц

В таблице приведено сравнение приведенных результатов модального анализа картера с результатами, полученными в среде пакета ANSYS и, следовательно, может быть сделан вывод об их сходимости.

Расчетные частоты собственных колебаний картера, Гц

Форма	Autodesk Nastran In-CAD	ANSYS
1	54,358	53,584
2	54,619	53,849
3	75,141	74,288
4	87,897	86,200
5	93,730	91,932
6	96,158	94,479
7	98,205	96,444
8	115,598	114,24
9	124,378	122,86
10	124,484	122,86

В двигателестроении модальный анализ проводится в ходе выполнения многих расчетов (крутильные колебания коленчатых валов, анализ виброактивности и т. д.). На рис. 3.8 показаны некоторые из найденных форм колебаний дизеля 6ЧН 10,5/12,7.

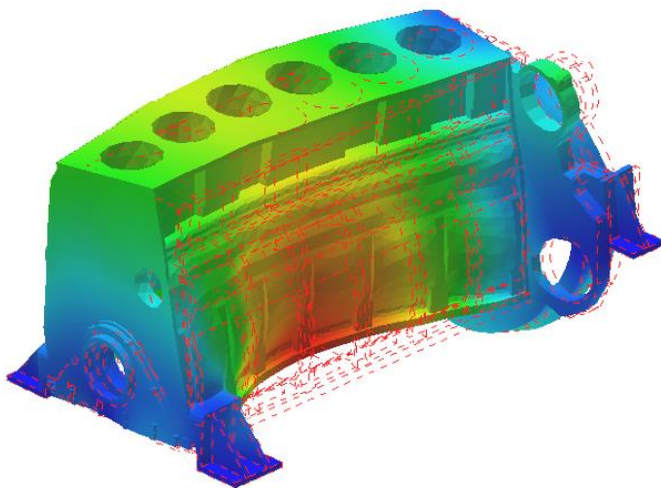


Рис. 3.8. Первая форма свободных колебаний блока цилиндров дизеля 6ЧН 10,5/12,7 на частоте 333,6 Гц

4. УСТОЙЧИВОСТЬ (ЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА)

4.1. Содержание задачи и алгоритм решения

Содержанием линейной задачи устойчивости является определение величины критической силы, по достижении которой конструкция теряет работоспособность (несущую способность) вследствие значительного роста перемещений, несоизмеримого с прикладываемой нагрузкой. Расчеты на устойчивость являются обязательными для строительных конструкций, ферм, стержневых систем (в особенности, когда элементы конструкции могут работать в условиях внецентренного сжатия). В двигателестроении расчетам на устойчивость подвергаются стержни длинных шатунов, детали механизмов газораспределения и т. д.

Расчет устойчивости по МКЭ возможен в среде большинства программных продуктов даже среднего уровня; как правило, итогом такого расчета является определение численного значения коэффициента, на который нужно умножить приложенную к анализируемой конструкции нагрузку, чтобы получить величину критической силы. В среде программ-

ного продукта Autodesk Nastran In-CAD также предусмотрена возможность решения задач устойчивости в линейной и нелинейной постановке. Рассмотрим решение линейной задачи, в ходе которого пользователь должен выполнить следующие действия.

1. Переход в среду Autodesk Nastran In-CAD (импорт геометрии модели при этом из среды Autodesk Inventor происходит автоматически).
2. Задание нового расчета, указание содержания решаемой задачи как задачи устойчивости; задание числа искомых форм потери устойчивости.
3. Описание свойств материала детали.
4. Определение комплекса физических свойств модели (выбор типа КЭ, его функции формы, системы координат, материала и др.) для построения сетки элементов.
5. Задание размеров КЭ и собственно построение сетки.
6. Задание первого случая нагружения, в ходе которого будет решаться задача статики; результат ее решения в дальнейшем будет использоваться в качестве начальных условий.
7. Наложение кинематических граничных условий.
8. Наложение силовых граничных условий (как правило, единичной силы).
9. Задание второго случая нагружения, в ходе которого будет собственно решаться задача устойчивости с ранее определенными начальными условиями.
10. Повторное наложение кинематических граничных условий в среде второго случая нагружения (силовые граничные условия здесь уже не задаются).
11. Запуск задачи на выполнение.
12. Постпроцессорная обработка.

4.2. Порядок выполнения действий

Рассмотрим выполнение этих действий для задачи об определении критической силы, вызывающей потерю устойчивости сжатого центрально приложенной силой стального стержня длиной 250 мм и диаметром 20 мм, неподвижно опертого одним концом.

После нажатия на инструментальной ленте пиктограммой кнопки *New* на экран выводится диалоговое окно *Analysis* (рис. 4.1), в списке *Type* которого следует выбрать строку *Linear Buckling*, а в поле *Number of Modes* ввести число определяемых форм потери устойчивости (при этом расчету автоматически присвоено имя *Analysis 2*, ввод заголовка *Title* не обязателен).

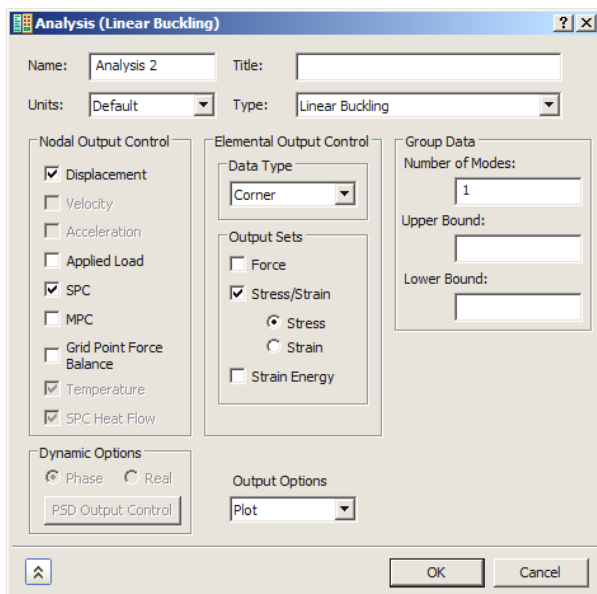


Рис. 4.1. Задание параметров задачи линейной устойчивости

Дальнейшие действия по формированию сетки КЭ не отличаются от рассмотренных в гл. 2, поэтому перейдем к описанию граничных условий. Щелкнув правой кнопкой «мыши» по строке Subcases в «дереве» проекта, выберем в контекстном меню команду New (рис. 4.2). Будет сформирован первый так называемый *случай нагружения*. В появляющейся далее панели Subcase ему могут быть присвоены имя (Name), в рассматриваемом примере здесь введено имя Subcase 2 и числовой идентификатор (ID), а если до этого уже были описаны какие-либо нагрузки и закрепления, то из списков в окнах Loads и Constrains следует выбрать соответствующие.

Далее аналогичным образом к нужным поверхностям (ребрам, точкам) модели прикладывается нагрузка. Впоследствии эта нагрузка будет использована в качестве начальных условий, поэтому ее значение не является важным. В связи с этим на практике часто данную нагрузку принимают равной единице, а в среде Autodesk Nastran In-CAD она рассматривается как распределенная по поверхности.

После описания первого случая нагружения аналогичным образом формируется второй случай (в рассматриваемом примере ему или присвоено имя Subcase 10), для которого задаются только кинематические граничные условия. В ходе этого этапа расчета и вычисляются формы потери

устойчивости и соответствующие значения критической силы. При линейном анализе устойчивости этот расчет основан на вычислении собственных значений.

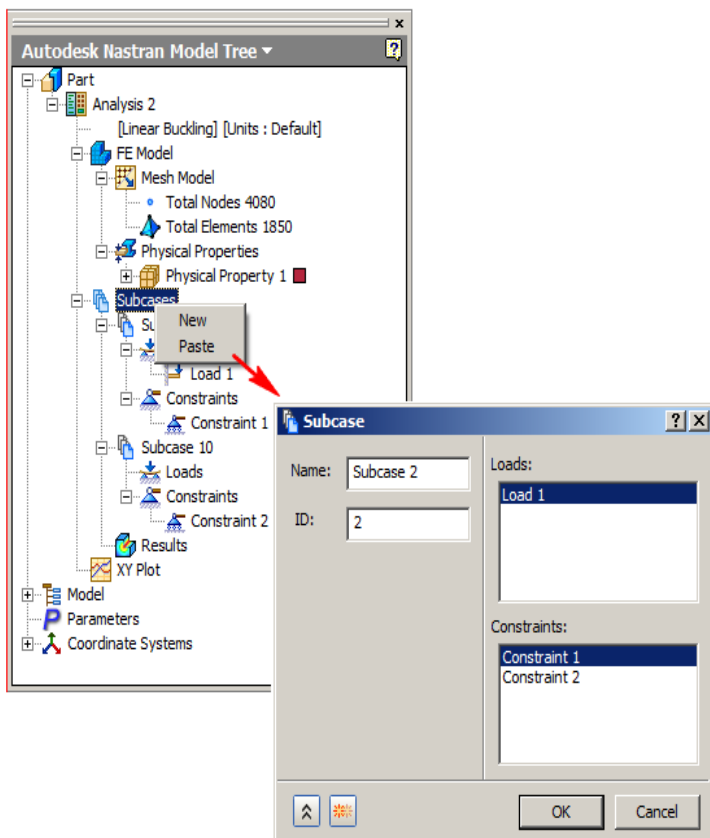


Рис. 4.2. Формирование первого случая нагружения в линейной задаче устойчивости

После этого задача запускается на расчет, по окончании которого выполняется постпроцессорная обработка результатов. Она сводится к выводу значений критических нагрузок и отображению (анимации) форм потери устойчивости. Значения критических нагрузок могут быть выведены в списке с именем, соответствующим имени второго случая нагружения, находящимся в разделе *Results* инструментальной ленты Autodesk Nastran In-CAD (рис. 4.3), или при нажатии на пиктограммную кнопку *XY Plot*

в «дереве» проекта (при этом на экран выводится показанная в нижней части рис. 4.3 одноименная диалоговая панель, на которой следует развернуть списки *Start Set* с названиями случаев нагружения и *End Set* со значениями критических нагрузок).

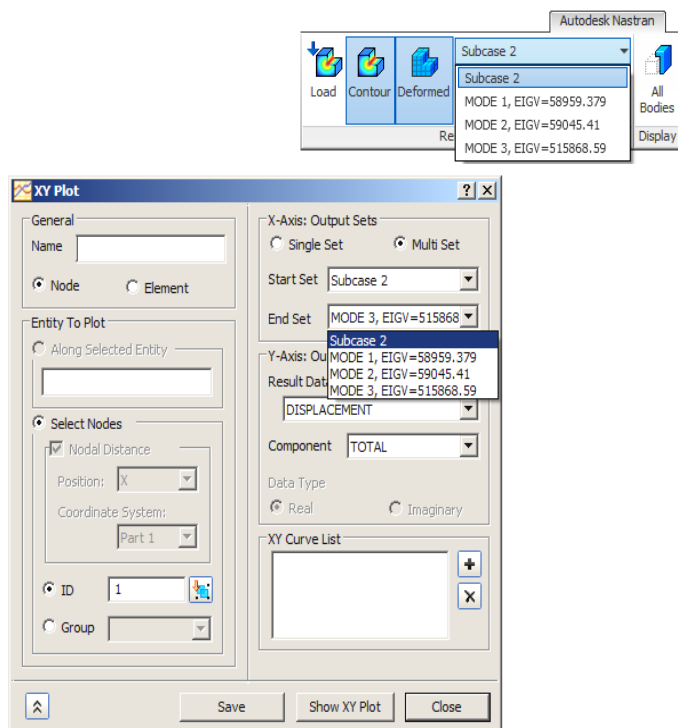


Рис. 4.3. Вывод результатов решения линейной задачи устойчивости

Значения, выводимые в последнем списке, следует воспринимать как величину коэффициента, на который нужно умножить приложенную нагрузку, задававшуюся в качестве начальных условий для первого случая нагружения. Однако, поскольку эта нагрузка была единичной, данные значения численно равны критической силе для каждой формы потери устойчивости.

На рис. 4.4 показаны формы потери устойчивости стержня, соответствующие найденным значениям критической нагрузки. Первая и вторая формы совпадают (изгиб стержня при близких значениях критической нагрузки, равных 58959,379 Н и 59045,410 Н, происходит в направлении осей x и y).

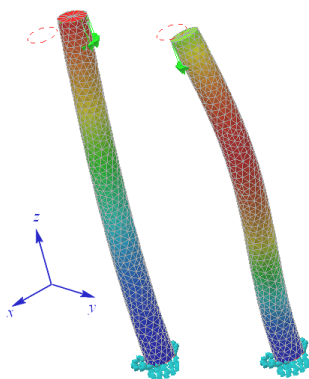


Рис. 4.4. Формы потери устойчивости сжатого стержня

Величина критической нагрузки для низших форм потери устойчивости этого стержня, вычисленная по формуле Эйлера¹ [6] составила 59842 Н; решение той же задачи при помощи программного комплекса ANSYS дало практически тот же результат, равный 59957 Н.



Рис. 4.5. Поршни со штоками дизеля Wartsila RTA96
(фото с сайта <http://www.drive2.ru/>)

Рассмотренная задача может иметь практическое приложение к расчету устойчивости штоков кривошипно-шатунного механизма судовых дизелей [1]. Необходимость такого расчета очевидна из рис. 4.5, на котором показаны штоки кривошипно-шатунного механизма судового дизеля Wartsila RTA96, соединенные с поршнями диаметром 960 мм. При максимальном давлении в цилиндре, равном 15,9 МПа, на шток действует продольная сила, равная 11,51 МН.

¹ В формуле E — модуль упругости материала; J_{\min} — момент сопротивления сечения изгибу; l — длина стержня.

5. КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА В AUTODESK NASTRAN IN-CAD

5.1. Содержание задачи и алгоритм решения

В ходе решения контактной задачи определяются параметры напряженно-деформированного состояния сборок, в которых несколько звеньев взаимодействуют друг с другом. При этом некоторые из этих звеньев могут быть нагружены внешними силами, другие — закреплены, также возможно выполнение звеньев из различных материалов и т. д. В машиностроении задачи прочности, главным образом, приходится решать именно для сборок. В таком случае постановка контактной задачи позволяет корректно наложить граничные условия [13].

При решении контактной задачи в среде Autodesk Nastran In-CAD должны быть выполнены следующие действия.

1. Запуск Autodesk Nastran In-CAD, загрузка (импорт) геометрии модели.
2. Установка типа решаемой задачи (вероятнее всего, здесь следует сохранить настройку по умолчанию, предусматривающую решение линейной задачи статики).
3. Назначение материалов деталей, входящих в анализируемую сборку (или импорт их свойств из среды CAD-системы).
4. Установка физических свойств сетки конечных элементов.
5. Задание размеров конечных элементов и построение сетки.
6. Определение параметров контактного взаимодействия.
7. Наложение кинематических граничных условий.
8. Наложение силовых граничных условий.
9. Запуск задачи на выполнение.
10. Постпроцессорная обработка результатов.

5.2. Порядок выполнения действий

Остановимся более подробно на задании свойств материалов. Если обе (в простейшем случае) взаимодействующие детали выполнены из одного и того же материала или свойства материалов (даже различных) импортированы из среды CAD-системы, то на этом этапе решения не требуются какие-либо действия, отличные от описанных ранее. Свойства каждого их различных материалов деталей сборки в среде Autodesk Nastran In-CAD задаются в системах координат, связанных с этими деталями.

Рассмотрим пример. Пусть два полуцилиндра с показанными на рис. 5.1 размерами сжимаются с усилием в 1 кН.

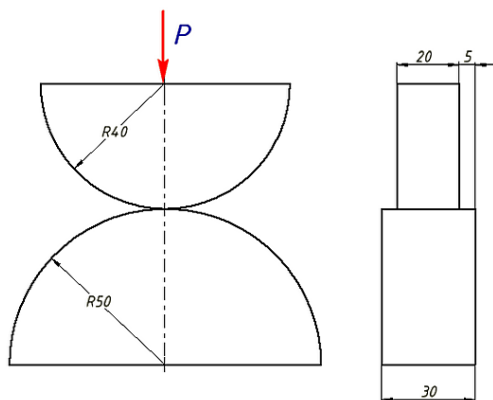


Рис. 5.1. Расчетная схема контактной задачи

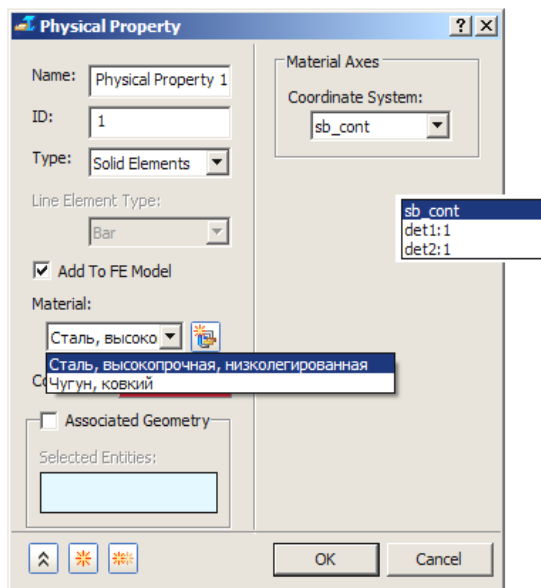


Рис. 5.2. Задание свойств различных материалов деталей сборки

Предположим, что полуцилиндр радиусом 50 мм выполнен из ковкого чугуна, а полуцилиндр радиусом 40 мм — из легированной стали. После импорта геометрии модели в среду Autodesk Nastran In-CAD следует обратиться к пиктограммной кнопке Material (см. рис. 2.2 и 2.3) и выбрать из библиотек нужные материалы. При этом в разделе *Analysis #* окна «дерева» проекта будет отображаться только последний материал. Для того чтобы

задать каждому полуцилиндру свой материал, следует ввести два набора физических свойств модели, используя панель *Physical Property* (рис. 5.2).

Если использовать пиктограммную кнопку *Global*, то производимая настройка будет относиться ко всей сборке и обеим деталям будет назначен один и тот же материал, выбираемый из одноименного списка. В данном случае после выбора значений полей панели *Physical Property* следует выбрать из списка нужный материал (соответствующий одной из деталей сборки) и поставить отметку в поле *Associated Geometry*. При этом активизируется поле *Selected Entities*. Далее следует указать курсором нужную деталь, имя которой отображается в поле *Selected Entities*. Для назначения другого материала следующей детали сборки эти действия следует повторить. Теперь в окне «дерева» проекта в разделе *Model* можно будет увидеть оба материала (рис. 5.3). В связи с наличием у модели двух плоскостей симметрии для решения используется твердотельная модель, включающая четверть сборки (рис. 5.4).

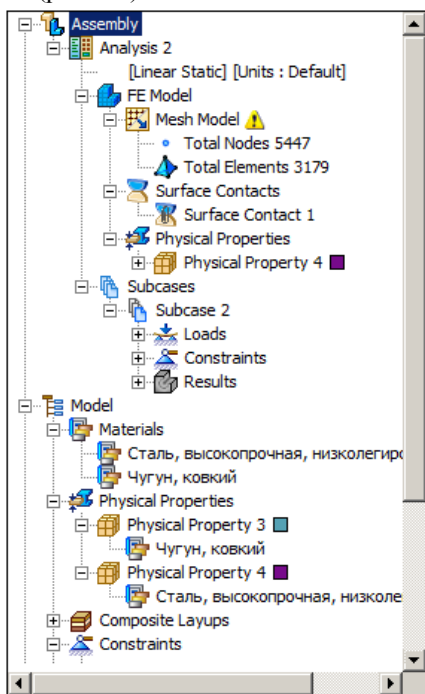


Рис. 5.3. Отображение параметров модели сборки в окне «дерева» проекта

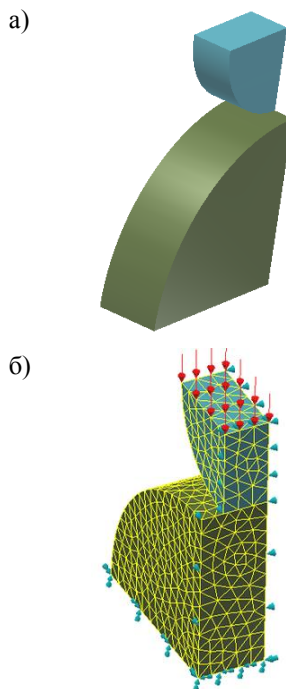


Рис. 5.4. Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели сборки

После построения сетки конечных элементов необходимо определить параметры контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей. В среде Autodesk Nastran In-CAD это действие может быть выполнено автоматически и вручную.

Для определения параметров контактного взаимодействия следует нажать пиктограммную кнопку *Contacts* на инструментальной ленте или щелкнуть мышью по строке *Surface Contacts* в окне «дерева» проекта. При этом на экран выводится диалоговая панель (рис. 5.5).

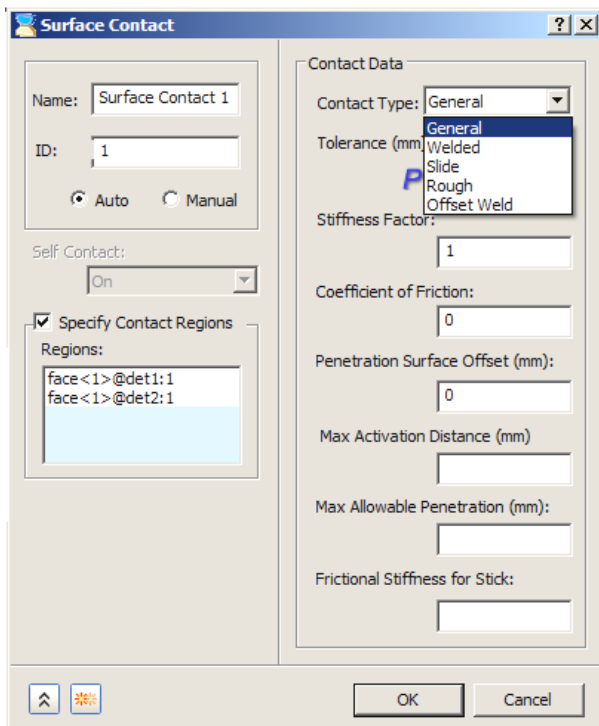


Рис. 5.5. Диалоговое окно автоматического определения параметров контактного взаимодействия

По умолчанию параметры контактного взаимодействия определяются автоматически (при этом отметка располагается в поле *Auto*). Каждой контактной паре присваивается имя (*Surface Contact 1*) и порядковый номер, которые отображаются в полях *Name* и *ID*. Взаимодействующие поверхности (их имена *face <1>@det1* и *face <1>@det2* отображаются в поле *Regions*) образуют контактную пару. Вообще при решении

контактных задач по МКЭ в контактной паре принято различать *целевые* и *контактные* тела и соответствующие поверхности (известно, что их выбор в значительной степени носит условный характер). В среде Autodesk Nastran In-CAD это выполняется пользователем только при ручном описании контакта. В данном случае назначение целевой и контактной поверхностей производится автоматически. Также автоматически в этом случае устанавливается модель контактного взаимодействия типа «поверхность в поверхность» (*Surface to Surface*).

Важным атрибутом контактной пары является тип контактного взаимодействия, выбираемый пользователем из раскрывающегося списка *Contact Type*. Этот атрибут позволяет / запрещает относительное перемещение контактирующих поверхностей, в том числе при наличии (отсутствии) трения, допускает (исключает) разрыв контакта. По умолчанию здесь установлен наиболее распространенный тип контакта *General*, допускающий незначительное относительное движение при умеренном (вплоть до отсутствия) трении. Решение задачи с таким типом контактного взаимодействия, как правило, является наиболее быстрым и требует наименьшего объема вычислительных ресурсов. Помимо этого типа контакта предусмотрены следующие:

- 1) *Welded* — соответствует неразрывному и неподвижному соединению контактирующих поверхностей, так называемой *сварке*;
- 2) *Slide* — контакт поверхностей при возможности их значительного относительного перемещения;
- 3) *Rough* — грубый контакт при наличии значительного трения между контактирующими поверхностями;
- 4) *Offset Weld* — допускает разрыв контактирующих поверхностей.

Известную сложность представляет определение коэффициентов жесткости сопряжения (*Stiffness Factor*), трения (*Coefficient of Friction*), начального взаимного проникновения (*Penetration Surface Offset*), максимального расстояния, начиная с которого возникает контактное взаимодействие (*Max Activation Distance*), максимально допустимого взаимного проникновения (*Max Allowable Penetration*), а также жесткости (*Frictional Stiffness*). Для их ввода на панели *Surface Contact* предусмотрены одноименные поля (см. рис. 5.5). Применительно к поршневым двигателям некоторые рекомендации по выбору значений ряда этих коэффициентов даны в источнике [11].

При необходимости атрибуты контактного взаимодействия устанавливаются вручную (для этого отметка вводится в соответствующую позицию *Manual*). Вид панели *Surface Contact* (рис. 5.6) и некоторые действия пользователя при этом несколько отличаются от описанных ранее. Здесь пользователь должен выбрать модель контактного взаимодействия в списке *Type*. Помимо уже упомянутой модели *Surface to Surface* может быть выбрана модель типа «Узел в поверхность» (*Node to Surface*).

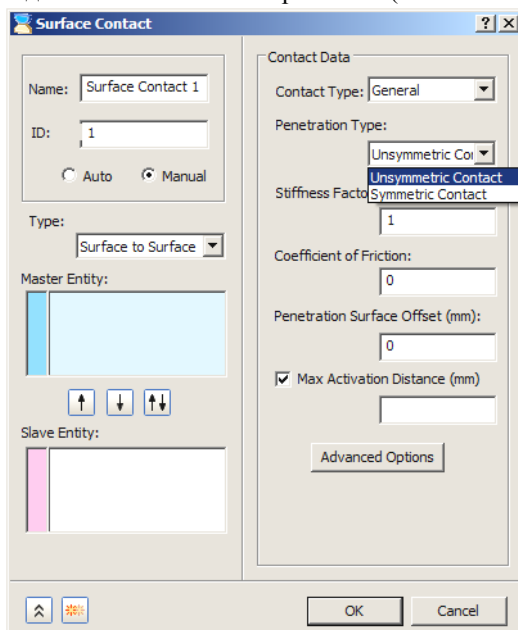





Рис. 5.6. Диалоговое окно ручного определения параметров контактного взаимодействия

При ручном описании становится возможным выбор из списка *Contact Type* еще одного типа контактного взаимодействия *RBE3 Element*, соответствующего случаю, когда между контактирующими поверхностями размещаются твердые поверхности.

Отличием ручного задания параметров контакта является также выбор пользователем контактной и целевой поверхностей взаимодействующих тел (в среде Autodesk Nastran In-CAD они соответственно названы *Master Entity* и *Slave Entity*). Пользователь должен поочередно отметить курсором соответствующие одноименные поля панели *Surface Contact* и далее указать на модели нужные поверхности (их имена при этом отображаются). Для

отношения к нужному типу той или иной поверхности (например, при ошибочном вводе) служат пиктограммные кнопки ,  и .

Взаимное проникновение (*Penetration Type*) контактирующих поверхностей может быть симметричным (*Symmetric Contact*) и несимметричным (*Unsymmetric Contact*, установлен по умолчанию). В последнем случае проникновение деталей определяется жесткостью контакта и прочностными характеристиками материалов. Остальные поля (см. рис. 5.6) имеют то же назначение.

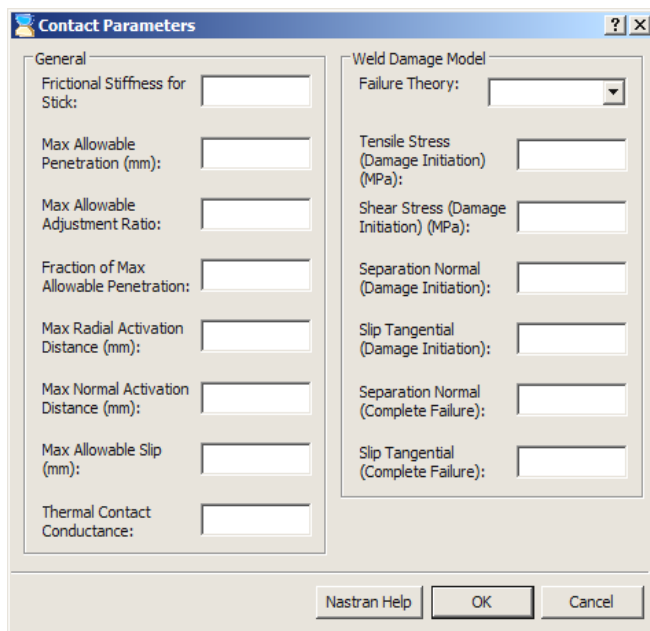


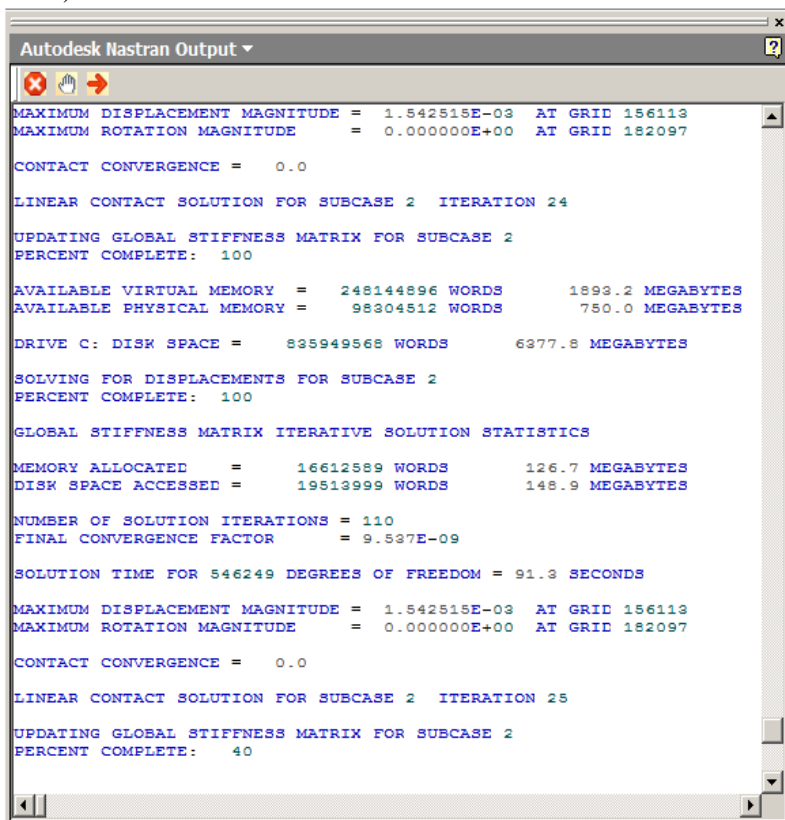
Рис. 5.7. Диалоговая панель для расширенного описания свойств контакта

При необходимости более подробного описания контакта путем нажатия пиктограммной кнопки *Advanced* вызывается диалоговая панель, показанная на рис. 5.7. В дополнение к указанным ранее данным она позволяет выбрать теорию повреждений (*Failure Theory*)¹ и ввести значения коэффициента теплопроводности (*Thermal Contact Conductance*) и напряжений, соответствующих началу разрушения, — тангенциальных

¹ Возможен выбор адгезионной (*Weld Failure Theory*) и когезионной (*Cohesion Zone Model*) моделей разрушения. Последняя в большей степени соответствует полимерным и композиционным материалам.

Tensile Stress и нормальных растягивающих *Shear Stress*, а также ряд других величин. Короткая справка об этом расширенном описании контакта может быть получена при нажатии на пиктограммную кнопку *Nastran Help*.

Затем описанными ранее действиями накладываются силовые и кинематические граничные условия, и задача ставится на выполнение. Решение осуществляется итерационным методом, поэтому может выполняться несколько дольше, чем статическая задача. Ход решения задачи (процент выполнения, информация о сходимости, номер выполняемой итерации и др.) отображается в окне «дерева» проекта (рис. 5.8).



```
Autodesk Nastran Output
MAXIMUM DISPLACEMENT MAGNITUDE = 1.542515E-03 AT GRID 156113
MAXIMUM ROTATION MAGNITUDE      = 0.000000E+00 AT GRID 182097
CONTACT CONVERGENCE = 0.0
LINEAR CONTACT SOLUTION FOR SUBCASE 2 ITERATION 24
UPDATING GLOBAL STIFFNESS MATRIX FOR SUBCASE 2
PERCENT COMPLETE: 100
AVAILABLE VIRTUAL MEMORY = 248144896 WORDS      1893.2 MEGABYTES
AVAILABLE PHYSICAL MEMORY = 98304512 WORDS       750.0 MEGABYTES
DRIVE C: DISK SPACE = 835949568 WORDS          6377.8 MEGABYTES
SOLVING FOR DISPLACEMENTS FOR SUBCASE 2
PERCENT COMPLETE: 100
GLOBAL STIFFNESS MATRIX ITERATIVE SOLUTION STATISTICS
MEMORY ALLOCATED = 16612589 WORDS      126.7 MEGABYTES
DISK SPACE ACCESSED = 19513999 WORDS    148.9 MEGABYTES
NUMBER OF SOLUTION ITERATIONS = 110
FINAL CONVERGENCE FACTOR = 9.537E-09
SOLUTION TIME FOR 546249 DEGREES OF FREEDOM = 91.3 SECONDS
MAXIMUM DISPLACEMENT MAGNITUDE = 1.542515E-03 AT GRID 156113
MAXIMUM ROTATION MAGNITUDE      = 0.000000E+00 AT GRID 182097
CONTACT CONVERGENCE = 0.0
LINEAR CONTACT SOLUTION FOR SUBCASE 2 ITERATION 25
UPDATING GLOBAL STIFFNESS MATRIX FOR SUBCASE 2
PERCENT COMPLETE: 40
```

Рис. 5.8. Текущая информация о выполнении контактной задачи

Некоторое отличие постпроцессорной обработки результатов решения контактной задачи заключается в том, что кроме традиционных для

упругой задачи результатов (поля напряжений, перемещений, деформаций и др.), могут быть выведены специфические для контактной задачи результаты. В списке *Result Data* на панели *Plot* (см. рис. 2.14) для отображения могут быть выбраны:

- 1) силы контактного взаимодействия (*Contact Force*);
- 2) статус контакта, показывающий наличие / отсутствие относительного перемещения контактирующих поверхностей (*Contact Status*);
- 3) контактное давление (*Contact Pressure*);
- 4) составляющие сил сцепления контактирующих поверхностей в направлении координатных осей (*Contact Traction-X*, *Contact Traction-Y*);
- 5) эквивалентные напряжения в области контакта (*Contact Bond Equivalent Stress*).

Некоторые результаты постпроцессорной обработки в МПа показаны на рис. 5.9.

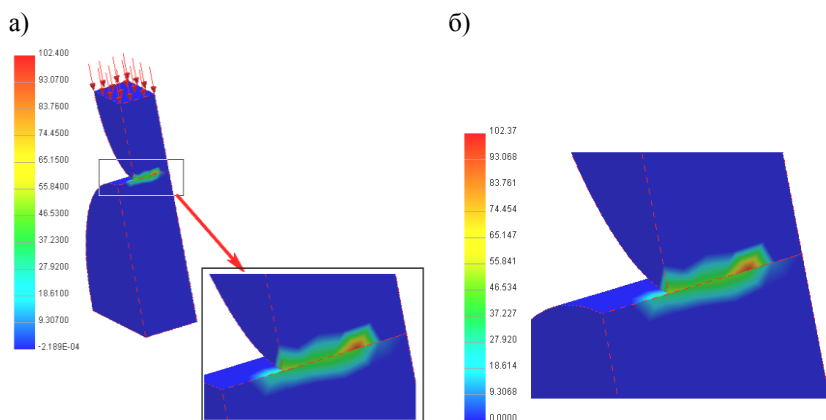


Рис. 5.9. Поле контактных давлений (а) и эквивалентных напряжений (б)

В двигателестроении контактные задачи решаются применительно к деталям механизма газораспределения, топливной аппаратуры и др., в общем машиностроении такие задачи возникают при необходимости выполнения уточненного расчета зубчатых передач, элементов гидроаппаратуры и т. д.

Рассмотрим более сложный пример. Показанная на рис. 5.10 сборка включает фрагмент кулачкового вала 1 и толкатель, состоящий из корпуса 2, оси 3 и ролика 4. Толкатель нагружен суммарной силой, равной $P = 2000$ Н,

приложенной к верхней плоской грани корпуса. Необходимо определить параметры контактных взаимодействий всех звеньев сборки.

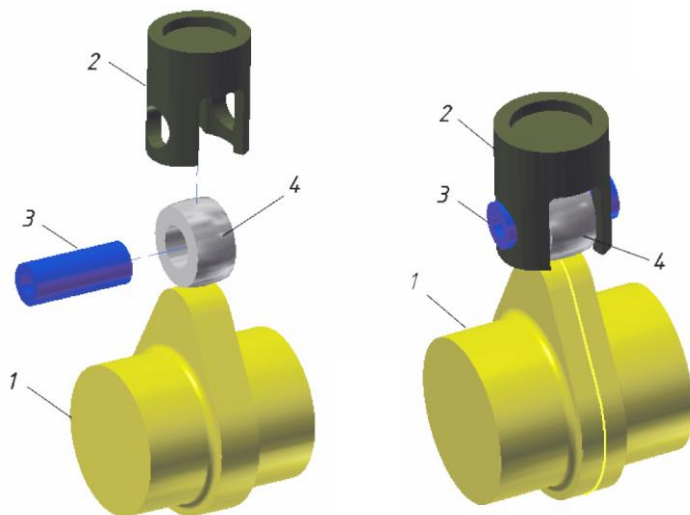


Рис. 5.10. Твёрдотельная модель кулачкового механизма

В этом случае между деталями сборки возникают три контактные пары: «кулачок – ролик», «ролик – ось» и «ось – корпус». Параметры этих контактных пар отличаются, в связи с чем последние формируются вручную (см. рис. 5.6). Первый из указанных контактов является наиболее сложным: теоретически контакт между кулачком и роликом при выпуклой форме последнего является точечным, возможно относительное проскальзывание деталей (в практике даже известны случаи разрыва этой кинематической пары). В связи с этим для него определен тип *Slide*.

Вводимые пользователем параметры этого контакта показаны на рис. 5.11, *а*. Ввод параметров двух других контактов типа *General* (они однотипны) показан на рис. 5.11, *б*.

Дальнейшие действия практически не отличаются от описанных выше. Для примера была использована сетка конечных элементов с умеренными размерами, содержащая 47030 узлов и 28739 элементов. Кинематические граничные условия предусматривали закрепление шеек кулачкового вала в радиальном направлении и наружной поверхности корпуса толкателя в осевом направлении.

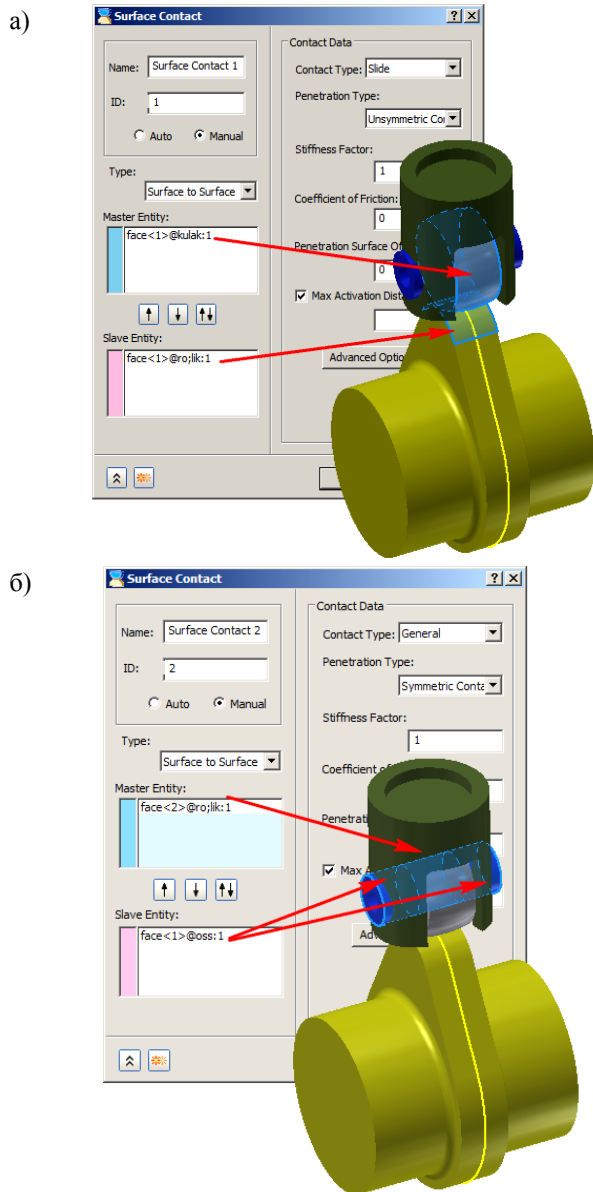


Рис. 5.11. Ввод параметров контактного взаимодействия:
a — кулачка и ролика; *б* — оси и ролика

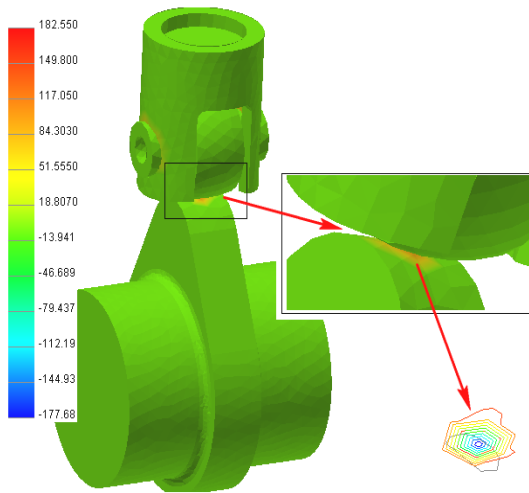


Рис. 5.12. Поле контактных давлений (в МПа) в сопряжении кулачка и ролика

Полученные в результате расчета поле контактных давлений в сопряжении кулачка и ролика и изолинии контактных давлений в пятне контакта представлены на рис. 5.12. Они удовлетворительно согласуются с известными в практике результатами [7].

6. МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

6.1. Алгоритм решения задачи

Параметры напряженно-деформированного и вибрационного состояния деталей изменяются, если детали испытывают так называемое предварительное напряженное состояние. Примерами здесь могут служить напряжения, обусловленные температурным расширением закрепленной детали, на которые накладываются напряжения, вызванные внешними нагрузками. Частоты, а иногда и формы свободных колебаний неподвижной детали могут заметно отличаться от таковых при ее вращении (последнее обуславливает возникновение в этой детали напряжений от действия центробежных сил).

Рассмотрим решение последней задачи применительно к модальному анализу турбины агрегата наддува дизеля, имеющей частоту вращения $n =$

= 45000 мин⁻¹. Алгоритм решения этой задачи для покоящейся детали не отличается от рассмотренного в гл. 1 и 2. При необходимости учета вращения следует выполнить указанные далее действия.

1. Запуск Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели.
2. Назначение нового анализа, выбор его типа как *Linear Static*.
3. Описание свойств материала, либо их импорт из среды CAD-системы.
4. Задание комплекса физических свойств КЭМ, выбор при этом типа и формулировки КЭ.
5. Определение размеров КЭ и формирование конечно-элементной сетки.
6. Наложение необходимых кинематических граничных условий.
7. Наложение силовых граничных условий (в частности, в нашем примере должно быть задано вращение турбины).
8. Выполнение расчета.
9. Редактирование (в дереве проекта) содержания решаемой задачи – замена *Linear Static* на *Prestress Normal Modes*.
10. Замена имени первого случая нагружения (оно могло быть присвоено автоматически в виде *Subcase #* или введено пользователем) на *Initial Stress Case*.
11. Повторное наложение тех же кинематических граничных условий или ссылка на уже наложенные граничные условия.
12. Ввод числа искомых частот и форм колебаний.
13. Запуск задачи на выполнение.
14. Постпроцессорная обработка.

6.2. Порядок действий

При решении задачи будем считать, что действия, указанные в пп. 1 – 8 алгоритма, выполнены. Твёрдотельная и конечно-элементная модели турбины показаны на рис. 6.1. В качестве кинематических граничных условий предусмотрено закрепление цилиндрических участков ротора в радиальном направлении и его торцевой свободной поверхности в осевом направлении; в качестве силовых граничных условий описано нагружение центробежными силами, обусловленными вращением с частотой 750 с⁻¹ (что соответствует 45000 мин⁻¹).

По окончании решения задачи статики следует выполнить щелчок мышью по имени задачи в «дереве» проекта (по умолчанию эти имена принимают вид *Analysis #*) и в появившемся контекстном меню выбрать команду *Edit* (рис. 6.2). В списке *Type* панели *Analysis* необходимо выбрать строку *Prestress Normal Modes*.

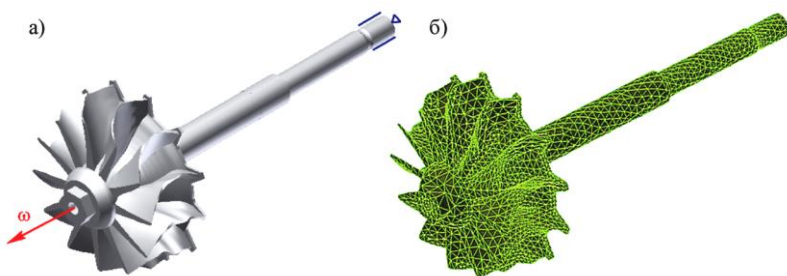


Рис. 6.1. Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели турбины агрегата наддува дизеля (34789 узлов, 17824 элемента)

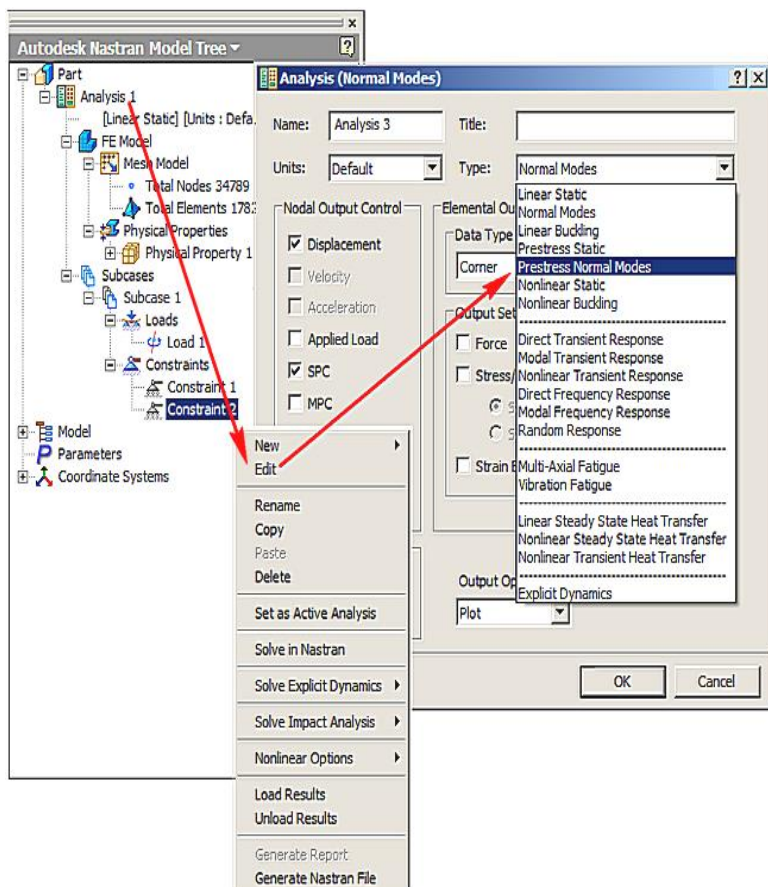


Рис. 6.2. Редактирование содержания решаемой задачи

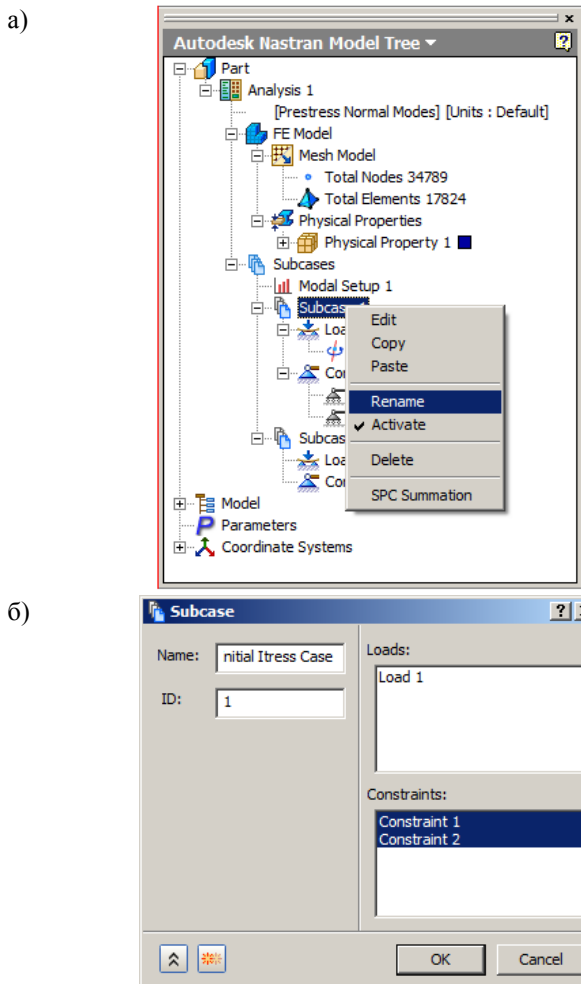


Рис. 6.3. Переименование случаев нагружения в «дереве» проекта:
 а — выбор строки Rename; б — ввод нового имени в поле Name окна Subcase

После этого необходимо переименовать случай нагружения *Subcase 1* для того, чтобы во вновь формируемой задаче модального анализа только что полученные результаты рассматривались как начальные условия. Для этого необходимо щелкнуть мышью по этому названию, и в контекстном меню выбрать строку *Rename* (рис. 6.3, а), после чего ввести новое название *Initial Stress Case*. Тот же результат может быть достигнут при редактировании рассматриваемого случая нагружения, для чего в показанном

контекстном меню выбирается строка *Edit*, и далее в поле *Name* окна *Sub-case* также вводится новое имя (рис. 6.3, б).

Затем аналогично второму случаю нагружения присваивается новое имя *Normal Mode Case*. Далее описанным ранее способом задается число искомым частот и соответствующих им форм свободных колебаний, после этого задача запускается на расчет. Постпроцессорная обработка, как и при решении модальной задачи без предварительного напряженного состояния, заключается в отрисовке и / или анимации форм колебаний, выводе в табличной и / или графической форме найденных частот. Результаты решения рассматриваемой задачи по сравнению с результатами модального анализа без предварительного напряженного состояния приведены в таблице. Формы колебаний при этом не изменились.

**Частоты собственных колебаний турбины без учета
и с учетом предварительного напряженного состояния, Гц**

Форма	Без учета	С учетом
1	2208,151	2226,176
2	2212,533	2230,076
3	2477,404	2477,479
4	2774,988	2801,029
5	2783,874	2810,155
6	6062,141	6120,587
7	6790,213	6791,694
8	6792,892	6797,374
9	7849,411	7939,313
10	7896,977	7985,98
11	7913,679	8002,177
12	7925,901	8014,171

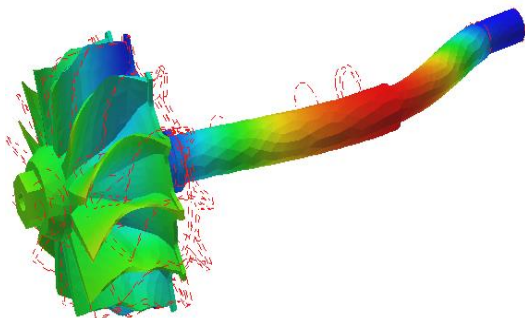


Рис. 6.4. Первая форма колебаний ротора турбины

На рис. 6.4 представлена визуализация первой формы собственных колебаний ротора турбины.

7. СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

7.1. Прямая задача теплопроводности

Задача теплопроводности решается *методом конечных элементов* практически в любой отрасли машиностроения. Для двигателестроения она является одной из важнейших, поскольку позволяет определять уже на начальных стадиях проектирования двигателя тепловое состояние основных деталей с целью снижения их теплонапряженности.

Рассмотрим решение задачи теплопроводности в линейной постановке. Ее содержанием является определение поля температур (как правило, неравномерного) в детали, испытывающей разнообразные тепловые воздействия. Такая задача называется *прямой задачей теплопроводности*. Температуры в узлах конечно-элементной сетки являются основными искомыми неизвестными. Поскольку температура является скалярной величиной, размерность задачи теплопроводности всегда меньше таковой, например, по сравнению с упругой задачей (при использовании одной и той же конечно-элементной модели). Кроме узловых значений температур в задаче теплопроводности могут определяться вторичные неизвестные, которые также могут представлять практический интерес. В частности, анализ поля градиентов температур часто позволяет определить направления наиболее интенсивного подвода и / или отвода теплоты.

Одной из отличительных характеристик задач теплопроводности является обязательное наложение теплотехнических граничных условий на все поверхности, соприкасающиеся с другими звеньями или с окружающей средой. Если на какую-либо поверхность граничные условия не наложены, она считается теплоизолированной.

Рассмотрим решение простейшей стационарной задачи теплопроводности в линейной постановке. При этом граничные условия не зависят от времени, а теплотехнические свойства материалов не зависят от искомых значений температур, т. е. от решения. Пластина из легированной стали (рис. 7.1) на грани CD подвергается воздействию теплового потока интенсивностью 2 Вт/м^2 . На противоположной грани AB осуществляется конвективный теплообмен с окружающей средой, при этом коэффициент конвективного теплообмена равен $1 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$, а температура окружающей среды равна 323 К . На боковой грани BD поддерживается постоянная температура, равная 350 К . Остальные поверхности пластины являются теплоизолированными. Считаем, что твердотельная модель пластины построена в среде приложения Autodesk Inventor.

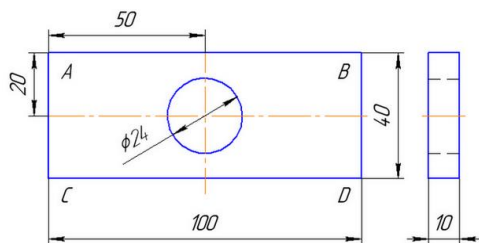


Рис. 7.1. Пластина для решения задачи теплопроводности

Решение начинается с перехода в среду Autodesk Nastran In-CAD и выбора типа решаемой задачи (рис. 7.2).

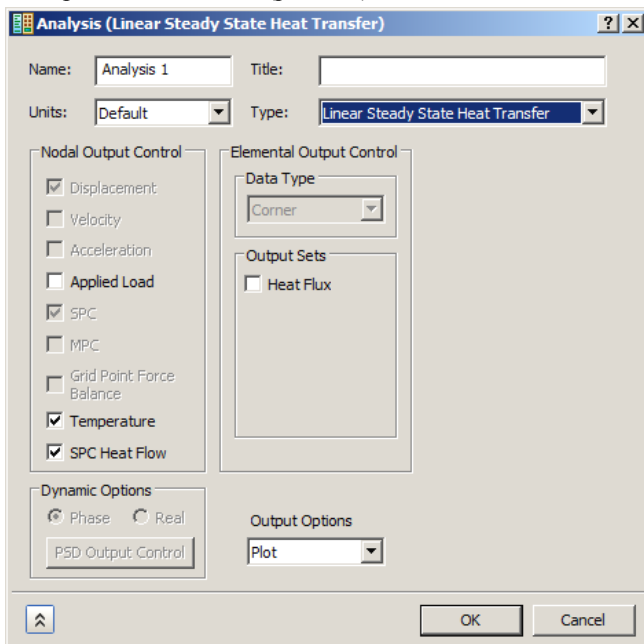


Рис. 7.2. Выбор типа решаемой задачи

Если в поле *Heat Flux* отсутствует отметка , то в качестве результата по окончании расчета будут выведены только температуры в узлах модели. При постановке такой отметки помимо температур могут быть выведены многие другие результаты (тепловые потоки, градиенты температур и др.).

При задании свойств материалов нужно убедиться в том, что для расчета доступны необходимые теплотехнические параметры. В связи с этим

следует использовать панель расширенного ввода характеристик материалов (см. рис. 2.2), в поле *Thermal* которой также должна быть поставлена отметка . Вид такой панели для рассматриваемой задачи показан на рис. 7.3. Для выбранного материала становятся известными теплоемкость C и коэффициент теплопроводности K .

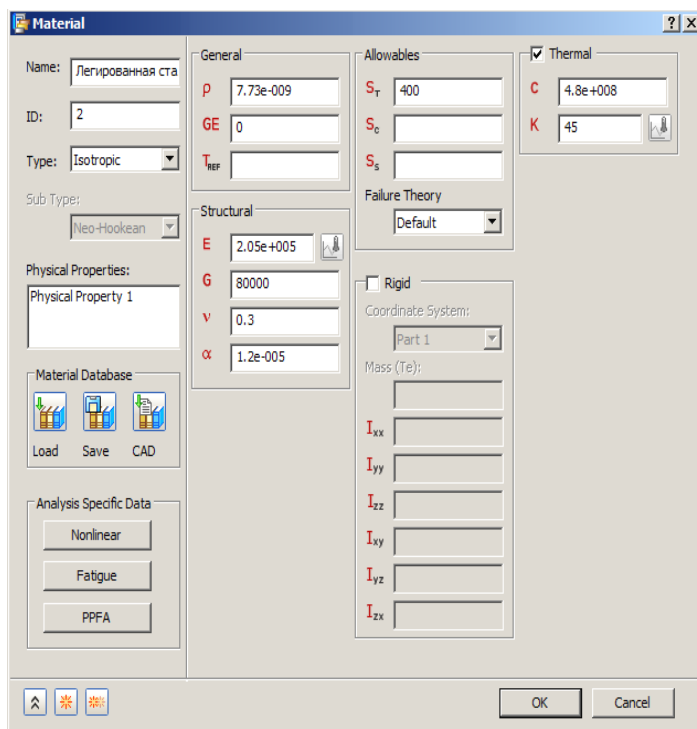


Рис. 7.3. Задание свойств материалов в задаче теплопроводности

Действия по назначению набора физических свойств конечно-элементной модели и формированию сетки конечных элементов не отличаются от ранее описанных.

Наложение теплотехнических граничных условий выполняется при помощи пиктограммной кнопки *Load*. В списке типов нагрузок (см. рис. 2.8) нужно выбрать требуемый тип нагрузки. В задаче теплопроводности могут быть заданы предписанные температуры (*Temperature*), конвекция (*Convection*), радиационный нагрев (*Radiation*), собственный источник теплоты (*Heat Generation*), тепловой поток (*Heat Flux*).

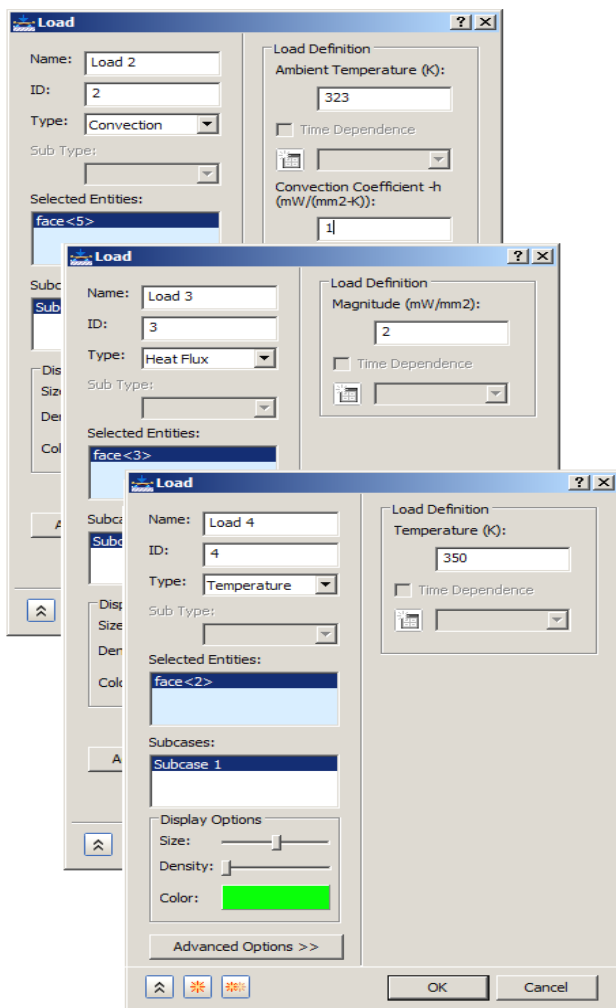


Рис. 7.4. Описание граничных условий в задаче теплопроводности

Вид панели *Load* после наложения заданных в примере граничных условий показан на рис. 7.4 (ее вид после выбора одного из видов граничных условий в поле *Type* несколько изменяется). Для задания конвективного теплообмена в поле *Ambient Temperature* и *Convection Coefficient* вводятся значения температуры окружающей среды и коэффициента конвективного теплообмена (единицы измерения этих величин указаны на панели); для описания теплового потока и предписанной постоянной температуры

необходимо ввести их величины. Наложённые граничные условия отображаются в «дереве» модели и на рис. 7.5 условными символами.

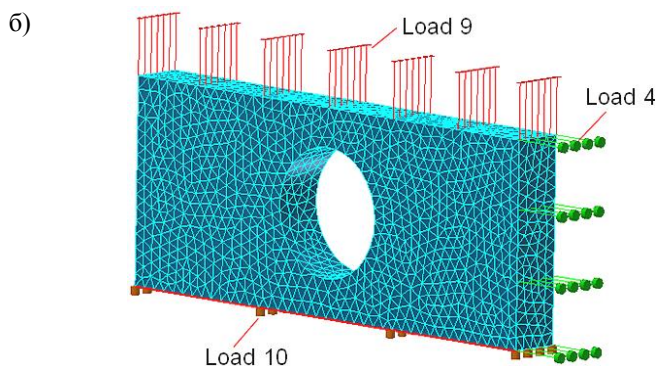
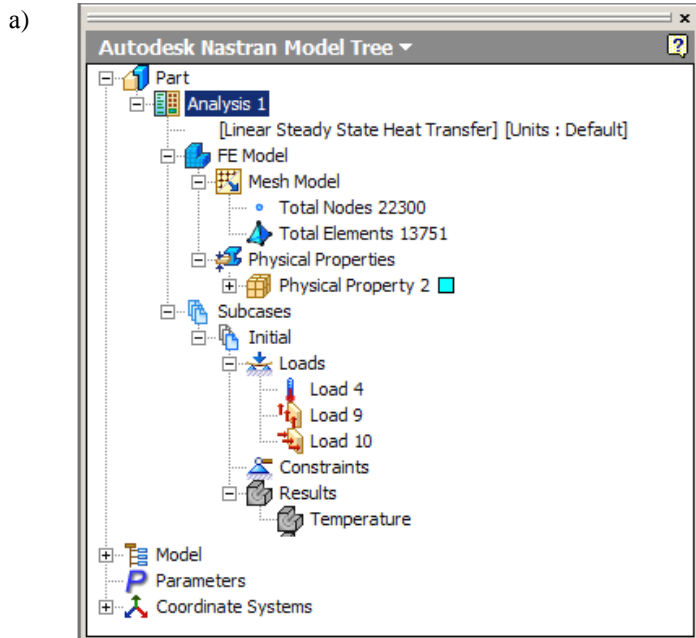


Рис. 7.5. Дерево модели (а) и сама модель (б) пластины с наложенными граничными условиями: *Load 9* — конвективный теплообмен; *Load 10* — тепловой поток; *Load 4* — предписанная температура

Результат решения задачи — температурное поле пластины — показан на рис. 7.6.

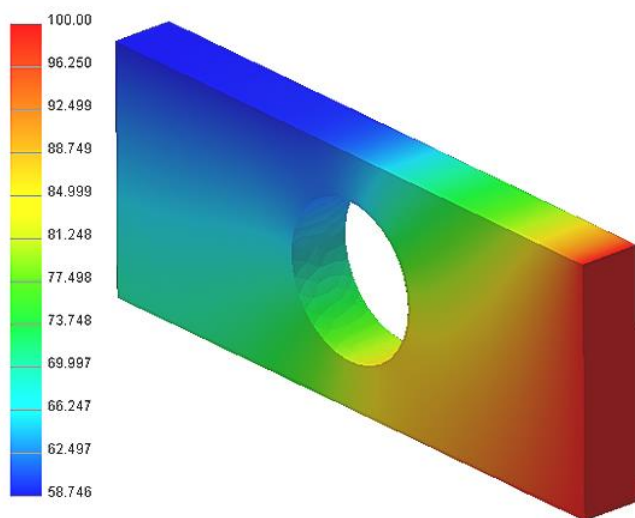


Рис. 7.6. Температурное поле пластины

Перечень прочих доступных для отображения результатов решения задачи показан на рис. 7.7: *Heat Flow, Solid Total Heat Flow* — тепловой поток; *Solid X-Heat Flow, Solid Y-Heat Flow, Solid Z-Heat Flow* — составляющие теплового потока вдоль координатных осей; *Solid Total Thermal Gradient* — градиент температуры; *Solid X-Thermal Gradient, Solid Y-Thermal Gradient, Solid Z-Thermal Gradient* — составляющие температурного градиента вдоль координатных осей. Их графический вывод не отличается от рассмотренного.

В двигателестроении задача теплопроводности решается весьма часто: ее результаты используются при анализе конструкции теплонапряженных деталей. На рис. 7.8 показано температурное поле поршня форсированного дизеля. Однако решение задачи теплопроводности затрудняется описанием граничных условий. Часто в качестве последних используют задание параметров конвективного теплообмена, для чего могут использоваться известные в двигателестроении полуэмпирические формулы ученых Г. Вошни, Г. Эйхельберга, Б. С. Стефановского, Р. З. Кавтарадзе и др. Однако эти формулы часто дают осредненные по поверхности значения коэффициентов теплоотдачи, тогда как их локальные значения различаются весьма значительно. Так, при решении задачи о поршне возникла необходимость задания двадцати двух значений коэффициента теплоотдачи и соответствующих величин температуры среды для центральной части днища поршня, радиуса камеры сгорания, боковой стенки камеры сгорания и др.

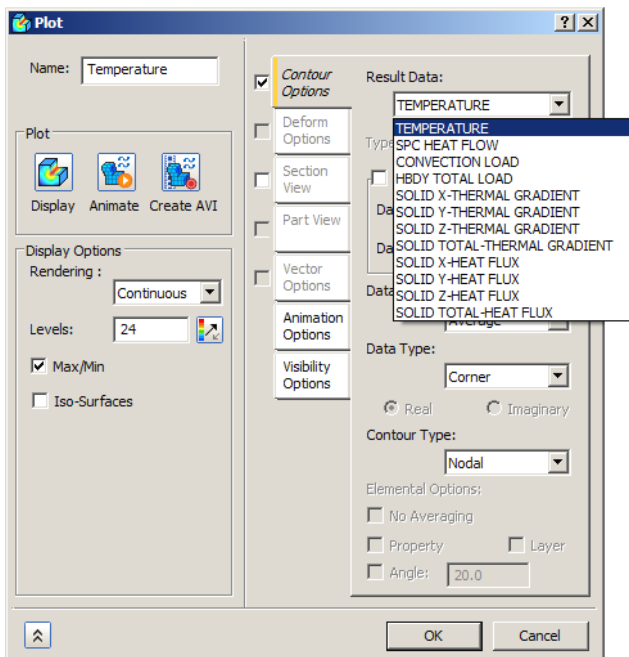


Рис. 7.7. Вывод результатов решения задачи теплопроводности

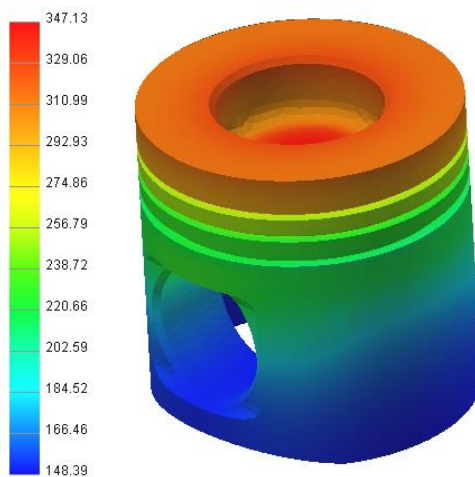


Рис. 7.8. Температурное поле поршня форсированного дизеля, °C

Показанный на рис. 7.8 результат удовлетворительно согласуется с таковым, полученным при помощи программного продукта Ansys WBU — при тех же граничных условиях и на той же твердотельной модели расчетные значения температур находятся в интервале 142,65 ... 361,23 °С.

7.2. Обратная задача теплопроводности

Содержанием обратной задачи теплопроводности является определение параметров напряженно-деформированного состояния закрепленного тела, обладающего неравномерным температурным полем. Закрепления препятствуют перемещению ряда узлов модели вследствие теплового расширения, в связи с чем в ее объеме возникают напряжения сжатия (при этом могут отсутствовать какие-либо другие виды нагружения силами, давлением и др.). Неравномерное температурное поле определяется в ходе решения прямой задачи теплопроводности. Обратная задача теплопроводности может иллюстрировать также эффект наличия предварительного напряженного состояния в задачах о напряженно-деформированном состоянии.

В ходе решения обратной задачи теплопроводности пользователь должен выполнить следующие действия (при условии, что прямая задача теплопроводности решена).

1. Выбор новой задачи для решения в среде Autodesk Nastran In-CAD (для этого используется пиктограммная кнопка *New* на ленте приложения — см. рис. 1.2); тип этой новой задачи должен быть установлен как *Linear Static* (при этом прямая задача теплопроводности становится неактивной).
2. Выбор материала модели.
3. Определение набора физических свойств конечно-элементной сетки.
4. Построение сетки (при этом важно, чтобы сетка соответствовала таковой в прямой задаче теплопроводности).
5. Наложение кинематических граничных условий.
6. Чтение файла узловых значений температур, определенных в прямой задаче теплопроводности.
7. Наложение (при наличии) прочих силовых граничных условий.
8. Запуск задачи на выполнение.
9. Постпроцессорная обработка результатов.

Рассмотрим решение обратной задачи теплопроводности применительно к пластине (см. рис. 7.1), боковые грани *AC* и *BD* которой жестко закреплены. Пластина нагружена только неравномерным температурным полем, показанным на рис. 7.6.

Новая задача формируется в ходе того же сеанса работы с приложением Autodesk Nastran In-CAD, в котором предварительно была решена прямая задача теплопроводности. Допустим, что эти задачи автоматически получили наименования *Analysis 1* (задача теплопроводности) и *Analysis 2* (вновь формулируемая задача) — рис. 7.9, откуда видно, что задача *Analysis 1* неактивна).

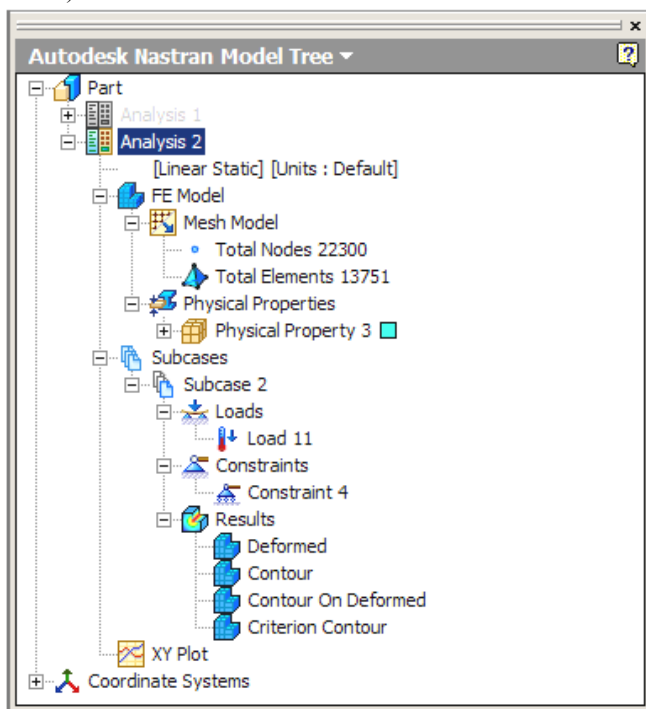


Рис. 7.9. «Дерево» модели в начале решения обратной задачи теплопроводности

Действия пользователя при выполнении указанных в пп. 2 – 5 этапов решения обратной задачи теплопроводности не отличаются от рассмотренных. Для чтения файла, содержащего значения определенных ранее узловых температур, следует нажать пиктограммную кнопку *Load* (см. рис. 2.8) и в списке *Type* выбрать строку *From Output* (показано стрелкой на рис. 7.10). При этом вид панели *Load* несколько изменяется, после чего в строке *Results File* раздела *Load Definition* следует указать путь к этому файлу. Напомним, что он имеет имя, соответствующее имени задачи (прямая задача теплопроводности называется *Part 1* — см. рис. 7.5), и расширение *FNO*.

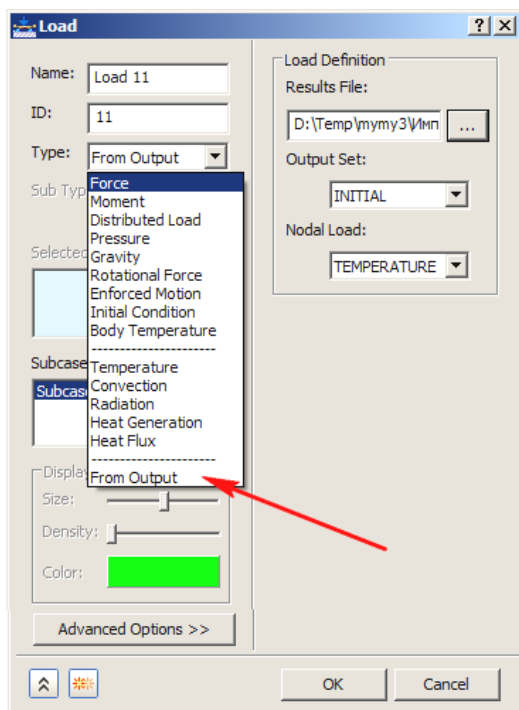


Рис. 7.10. Чтение файла узловых значений температур, определенных в прямой задаче теплопроводности

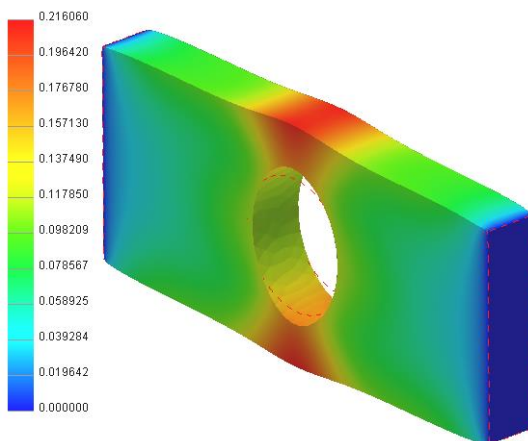


Рис. 7.11. Поле суммарных перемещений закрепленной пластины, нагруженной неравномерным температурным полем, мм

Таким образом, в рассматриваемом случае следует указать путь к файлу *Part1.FNO*. В полях *Output Set* и *Nodal Load* выводятся имя случая нагружения (*INITIAL*) и тип прикладываемой нагрузки (*TEMPERATURE*). В «дереве» модели при этом появляется соответствующая строка (*Load 11* — см. рис. 7.9). Результат решения обратной задачи теплопроводности показан на рис. 7.11.

8. НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА СТАТИКИ

8.1. Геометрически нелинейная задача

В предыдущих случаях рассматривались линейные задачи, в которых зависимость между напряжениями и деформациями (или для задачи теплопроводности между узловыми температурами и их градиентами) была линейной. Решение таких задач выполняется в соответствии с законом Гука. Существуют так называемые *нелинейные задачи*, в которых эти зависимости становятся нелинейными, в связи с чем матрица жесткости (теплопроводности) модели начинает зависеть от решения. Поэтому такие задачи требуют итерационного решения, которое выполняется в соответствии с различными алгоритмами (несколько чаще используются алгоритмы Ньютона–Рафсона).

Различают физически и геометрически нелинейные задачи (геометрически нелинейные задачи называют еще *задачами о больших деформациях*). В первом случае от решения могут зависеть физические свойства материалов, во втором — структура матрицы.

Приложение Autodesk Nastran In-CAD позволяет решать нелинейные задачи обоих типов с любым физическим содержанием.

Рассмотрим решение статической геометрически нелинейной задачи. Длинная тонкая стальная пластина нагружена двумя сосредоточенными силами, вызывающими ее изгиб (схемы нагружения и закрепления пластины аналогичны показанным на рис. 2.1). Длина пластины равна 200 мм, ширина — 40 мм, толщина — 2,5 мм. Каждая из сил равна 100 Н.

Решение геометрически нелинейных задач в среде приложения Autodesk Nastran In-CAD выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Импорт модели в среду приложения.
2. Установка типа решаемой задачи как нелинейной задачи статики. Включение режима расчета с большими деформациями.
3. Описание свойств материала (или его импорт из среды CAD-системы). Установка нелинейных свойств материала (рис. 8.2).

4. Определение набора физических свойств конечно-элементной сетки.
5. Установка размеров конечных элементов, построение сетки.
6. Наложение кинематических граничных условий.
7. Установка (при необходимости) опций решения.
8. Запуск задачи на выполнение.
9. Постпроцессорная обработка результатов.

Многие действия пользователя при реализации этого алгоритма не отличаются от аналогичных действий, выполняемых при решении других задач, поэтому рассмотрим только специфические для геометрически нелинейных задач действия.

После входа в среду Autodesk Nastran In-CAD это приложение автоматически настраивается на решение линейной задачи статики. После выбора в списке *Type* строки *Nonlinear Static* панель *Analysis* приобретает вид, показанный на рис. 8.1. В разворачивающемся списке *Large Displacements* следует выбрать строку *On* (на рисунке показано стрелкой), что позволяет сделать разрешенным режим расчета с большими деформациями.

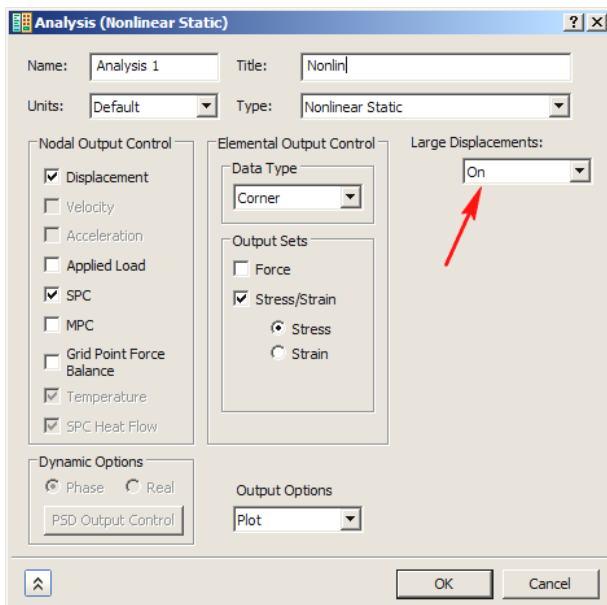
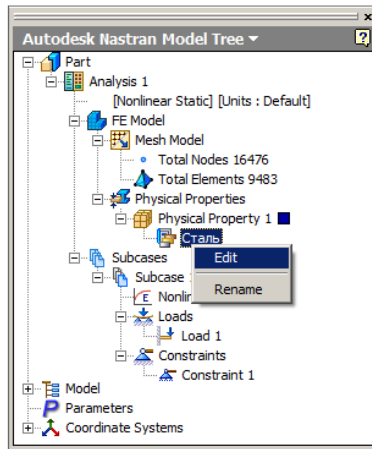


Рис. 8.1. Установка режима больших деформаций

а)



б)

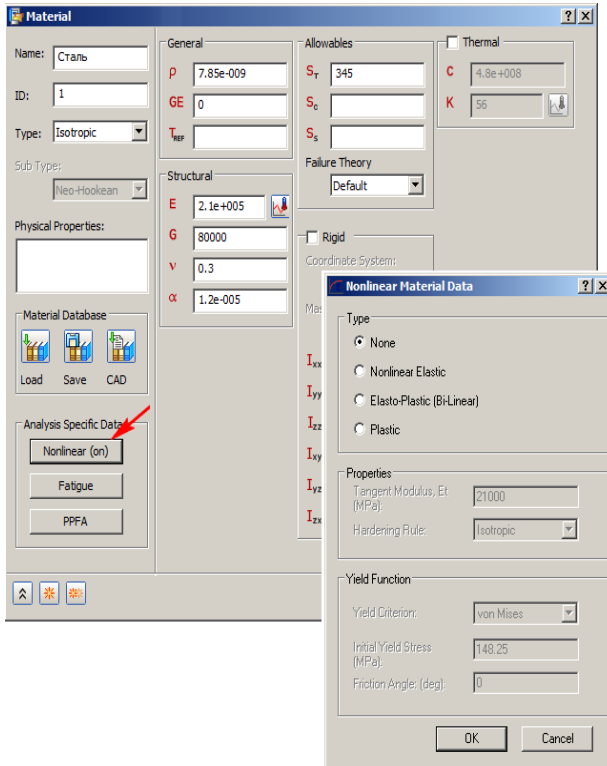


Рис. 8.2. Редактирование нелинейных свойств материала:
а — выполнение действий в строке Material «дерева» модели;
б — выбор модели нелинейного поведения материала

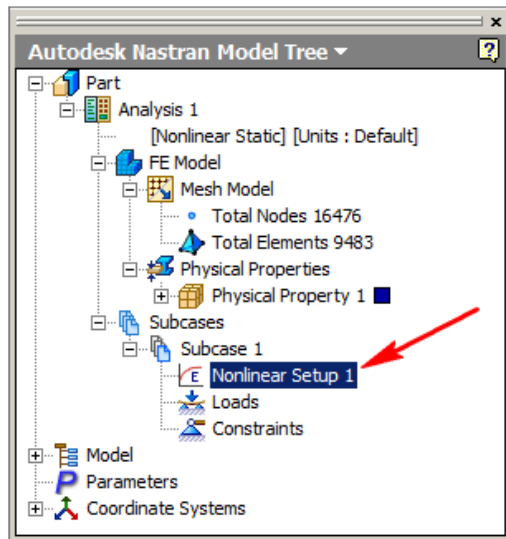
Материал модели может быть импортирован из среды CAD-системы или описан непосредственно в ходе решения нелинейной задачи. Обязательным является выбор модели его поведения при наличии больших деформаций. Для выполнения этого действия следует выполнить щелчок правой кнопкой мыши по строке *Material* в «дереве» модели (рис. 8.2, а) и в появившейся далее одноименной диалоговой панели (рис. 8.2, б) нажать кнопку *Nonlinear*.

Для выбора модели нелинейного поведения материала используется панель *Nonlinear Material Data* (показана в правой части рис. 8.2, б). По умолчанию в простейшем случае специальная модель поведения материала не выбирается, в связи с этим в поле *None* панели *Nonlinear Material Data* установлена отметка . При необходимости такая отметка устанавливается и в другие поля, что позволяет выбрать более сложные модели нелинейного упругого поведения (*Nonlinear Elastic*), упругопластичного поведения с билинейным упрочнением (*Elasto-Plastic*), пластичного поведения (*Plastic*).

В случае выбора какой-либо сложной модели вид панели *Nonlinear Material Data* изменяется в связи с необходимостью ввода дополнительной информации (так, при последующем использовании модели с билинейным упрочнением необходим ввод зависимости «деформация – напряжение»). Действия по построению сетки конечных элементов и наложению граничных условий в данном случае не отличаются от ранее рассмотренных (гл. 1 и 2).

Для задания опций решения следует произвести щелчок правой кнопкой мыши по строке *Nonlinear Setup* в «дереве» модели (рис. 8.3, а). В поле *Number of Increments* одноименной панели вводится число приближений, т. е. количество шагов, на протяжении которых прикладывается нагрузка (на рис. 8.3, б число приближений равно десяти). В разворачивающемся списке *Intermediate Output* может быть выбрано одно из значений — *On* или *Off*, в соответствии с которым в процессе решения будут или нет выводиться промежуточные результаты. При нажатии пиктограммной кнопки *Advanced Settings* на экран выводится панель для дополнительного ввода опций решения (рис. 8.4), к которым относятся выбор метода решения, значения условий сходимости итерационного решения по перемещениям, нагрузкам или работе деформирования. В большинстве случаев эти параметры имеют значения по умолчанию.

a)



b)

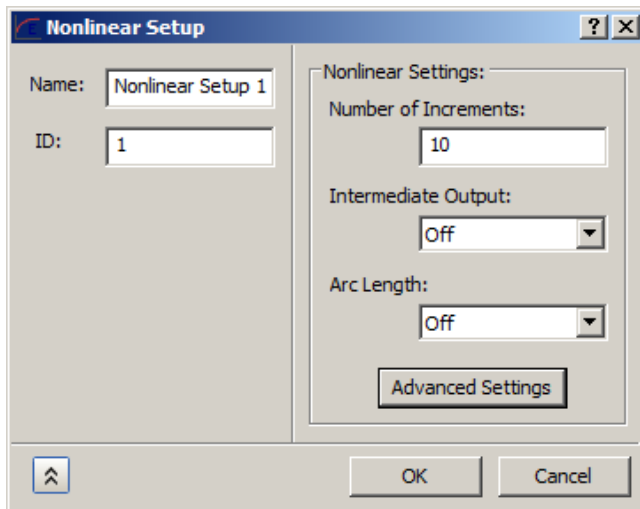


Рис. 8.3. Ввод опций решения нелинейной задачи:

a — задание опций решения;

b — введение числа приближений

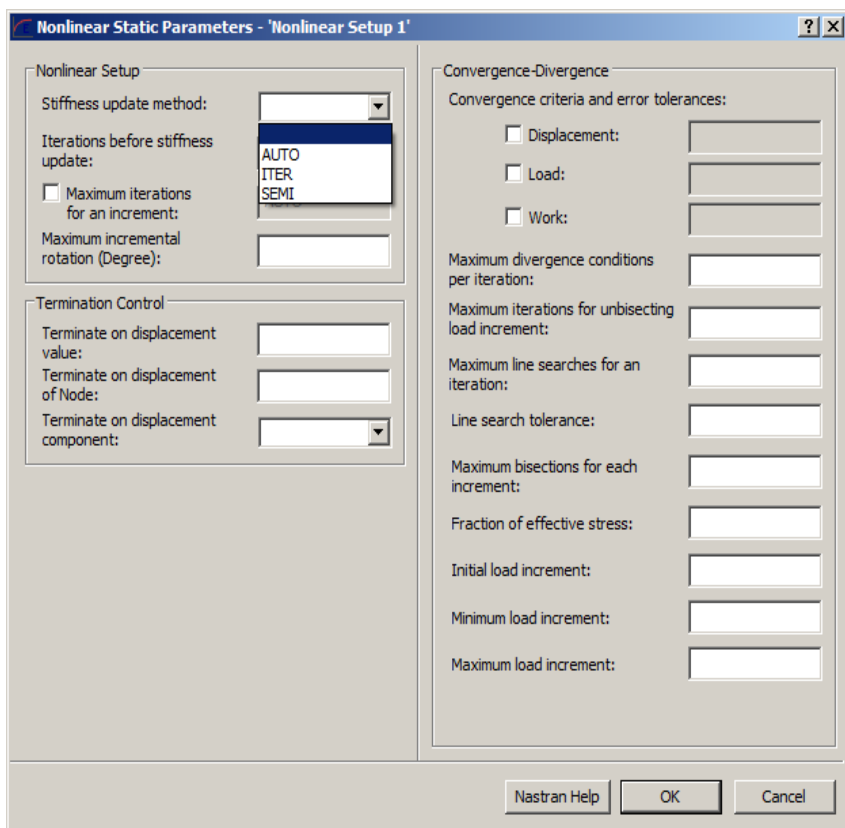


Рис. 8.4. Панель расширенной установки опций решения

После выполнения всех указанных действий задача запускается на выполнение, ход которого (номера случая нагружения *Subcase*, приращения *Increment* и текущей итерации *Iteration*, сходимости итерационного решения по критериям перемещений *Displacement*, сил *Load* и работы *Work* деформирования) отображается на специальной панели (рис. 8.5). Постпроцессорная обработка результатов, показанных на рис. 8.6, выполняется рассмотренными в гл. 1 методами.

Если в списке *Intermediate Output* панели *Nonlinear Setup* (см. рис. 8.3, б) выбрана строка *On*, то в ходе постпроцессинга при помощи панели *Plot* могут быть выведены промежуточные итоги расчета, соответствующие относительной величине приложенной нагрузки (рис. 8.7). Если это не было сделано в начале решения задачи, то по ее окончании может быть сделан щелчок правой кнопкой мыши по строке *Analysis*

в «дереве» модели и в появляющемся контекстном меню необходимо последовательно выбрать строки *Generate Intermediate Results* и *Load and Display Generate Intermediate Results*, после чего обратиться к панели *Plot*.

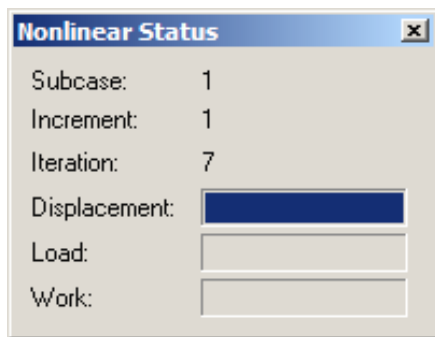


Рис. 8.5. Отображение хода решения задачи

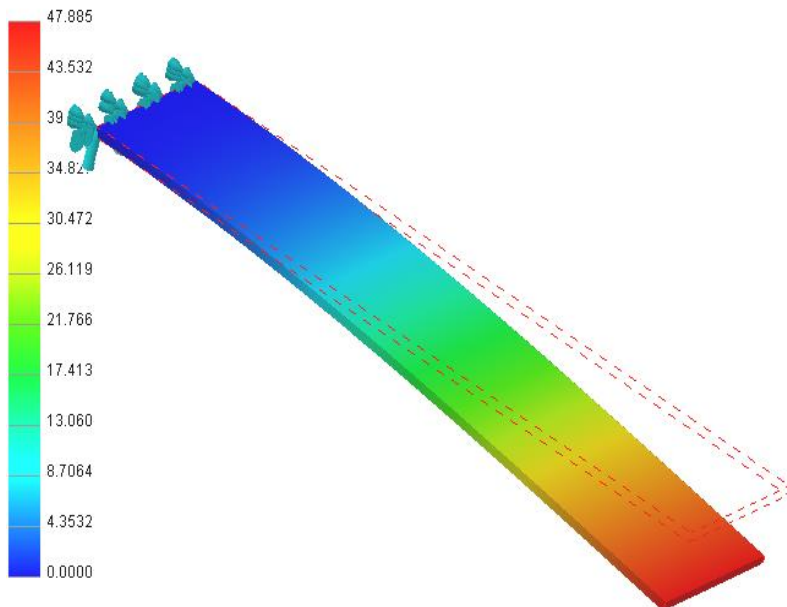


Рис. 8.6. Поле перемещений пластины, мм

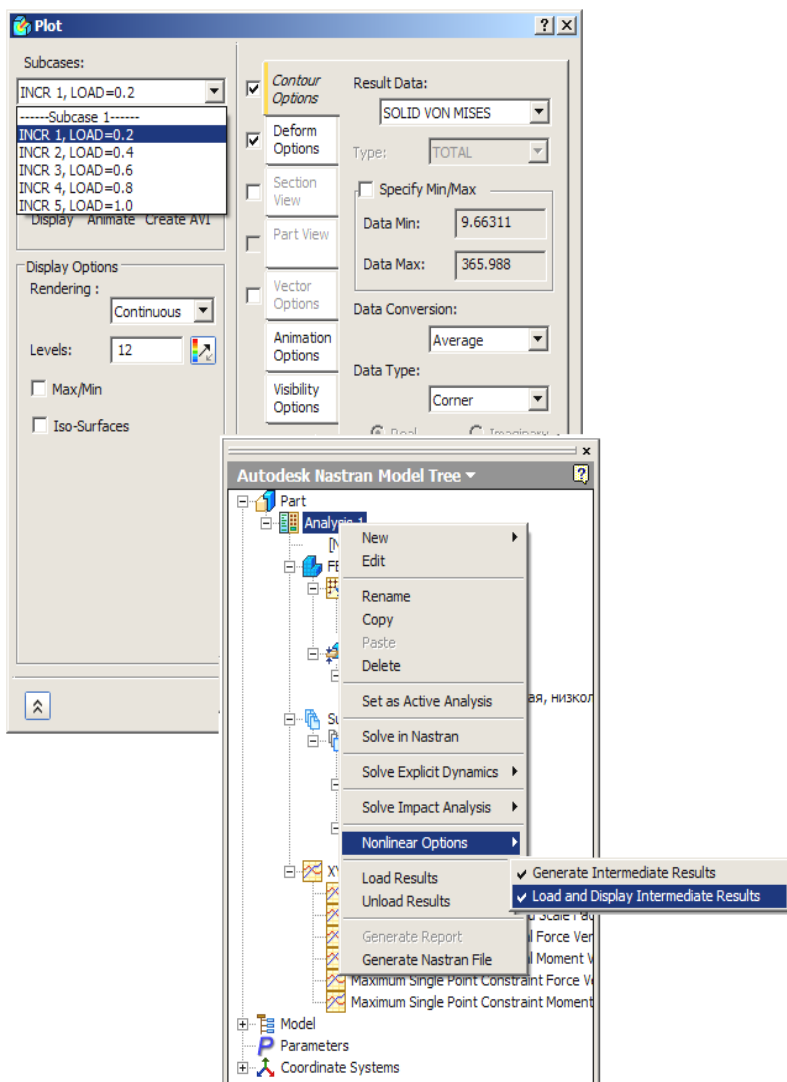


Рис. 8.7. Вывод промежуточных результатов решения задачи

При решении этой задачи в среде пакета ANSYS получено значение максимальных перемещений, равное 47,42 мм. Сходимость имеет место и для значений эквивалентных напряжений, полученных в среде Autodesk Nastran In-CAD и ANSYS — их максимальные значения, соответственно, равны 990 МПа и 987 МПа.

8.2. Физически нелинейная задача (гиперупругие материалы)

В ряде случаев нелинейность возникает в связи с особыми свойствами материалов. Примером могут служить так называемые *гиперупругие материалы* (в частности, резина и некоторые полимерные материалы). В автомобилестроении, например, уже успешно решается задача о деформировании шины при ее взаимодействии с дорожным покрытием [2].

Особенностью гиперупругих материалов является практически отсутствие их сжимаемости, в связи с чем зависимость между напряжениями и деформациями определяется при помощи энергетического потенциала, расчет которого в большинстве случаев требует предварительных экспериментальных исследований. Упругие свойства гиперупругих материалов зависят от их состава. Возможно проявление такой зависимости от температуры, скорости деформирования и ряда других условий. Решение задачи с гиперупругим материалом осложняется также тем, что для расчета энергетического потенциала существует несколько моделей, выбор одной из них применительно к конкретной задаче строго не формализован. В поставленную задачу в данном случае не входит обсуждение обоснования выбора одной из этих моделей.

Для резин чаще используется модель Муни–Ривлина, требующая определения коэффициентов a_{01} , a_{10} и d , а также табличной зависимости «деформация – напряжение». Указанные коэффициенты, как правило, определяются на основании результатов испытаний стандартных образцов на одноосное и двухосное растяжение, сдвиг, одноосное и двухосное сжатие и др.

Рассмотрим решение задачи о растяжении прямоугольного резинового образца продольной силой, вызывающей одноосное напряженно-деформированное состояние. Геометрия модели аналогична показанной на рис. 7.1. Длина пластины равна 100 мм, ширина — 20 мм, толщина — 2,5 мм, диаметр отверстия — 12 мм. Одно из торцевых сечений жестко защемлено, на другом приложена распределенная растягивающая нагрузка, равная 2,5 Н. Материал пластины — резина, включенная в библиотеку стандартных материалов приложения Autodesk Inventor Professional.

После построения геометрии пластины и загрузки приложения Autodesk Nastran In-CAD следует выбрать тип решаемой задачи — *Nonlinear Static* и разрешить расчет с большими перемещениями (*Large Displacements-On*). Эти настройки показаны на рис. 8.1.

Для задания свойств материала следует обратиться к показанной на рис. 8.8 панели *Material* и выполнить следующие действия. В списках *Type* и *Sub Type* выбрать строки *Hyperelastic* и *Mooney-Rivlin* соответственно. После этого вид панели *Material* несколько изменяется по сравнению с показанным на рис. 8.2, б.

Указанные ранее коэффициенты a_{01} , a_{10} и d записываются в одноименные поля раздела *Hyperelastic*.

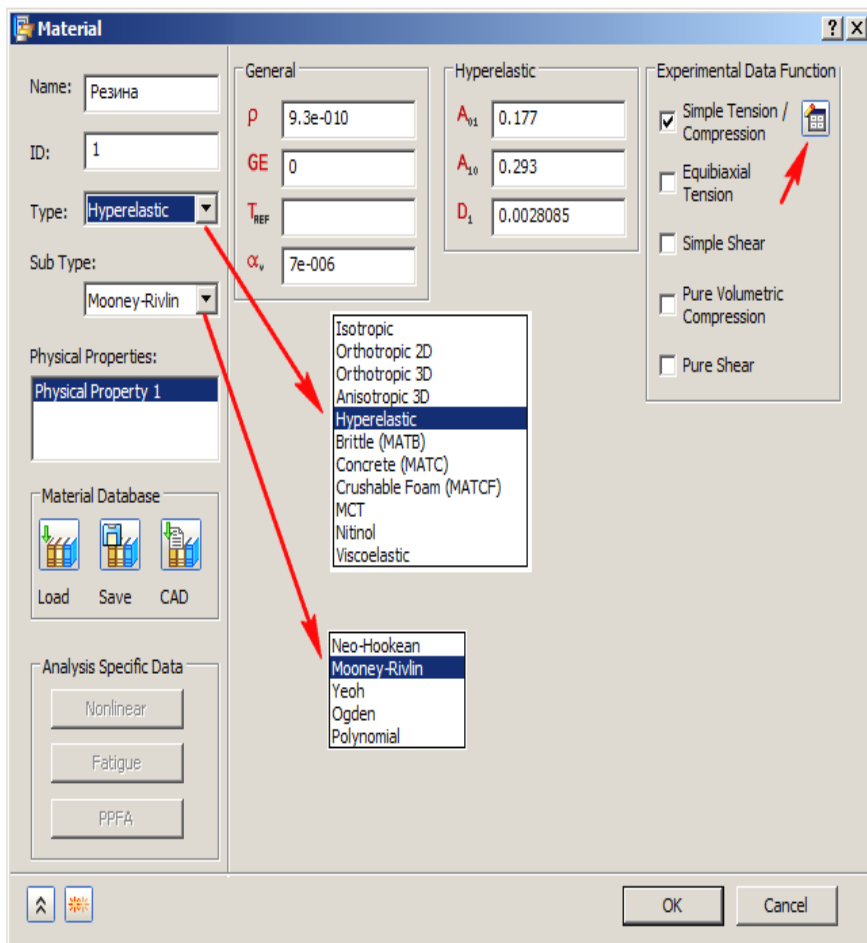

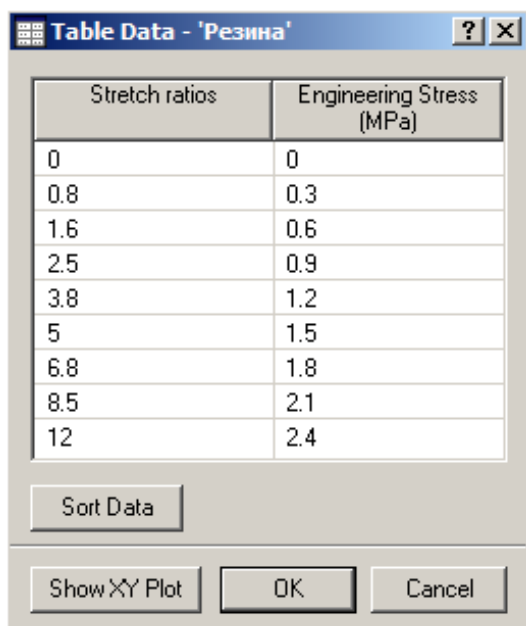


Рис. 8.8. Настройка параметров гиперупругого материала

В правой части панели появляется раздел *Experimental Data Function*. Выберем в нем строку *Simple Tension / Compression* и при помощи пиктограммной кнопки  (показана стрелкой) введем таблицу значений зависимости «деформация – напряжение»¹ (рис. 8.9).



Stretch ratios	Engineering Stress (MPa)
0	0
0.8	0.3
1.6	0.6
2.5	0.9
3.8	1.2
5	1.5
6.8	1.8
8.5	2.1
12	2.4

Рис. 8.9. Ввод экспериментальной зависимости «напряжение – деформация»

Определение набора физических свойств материала, построение сетки конечных элементов, наложение граничных условий, а также ввод опций итерационного решения выполняются описанными ранее методами. Результаты решения задачи показаны на рис. 8.10.

¹ Ввиду отсутствия экспериментальных данных, использованная при решении этого примера зависимость заимствована из электронного издания «Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах», см. электронный ресурс http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/applian_v1.pdf.

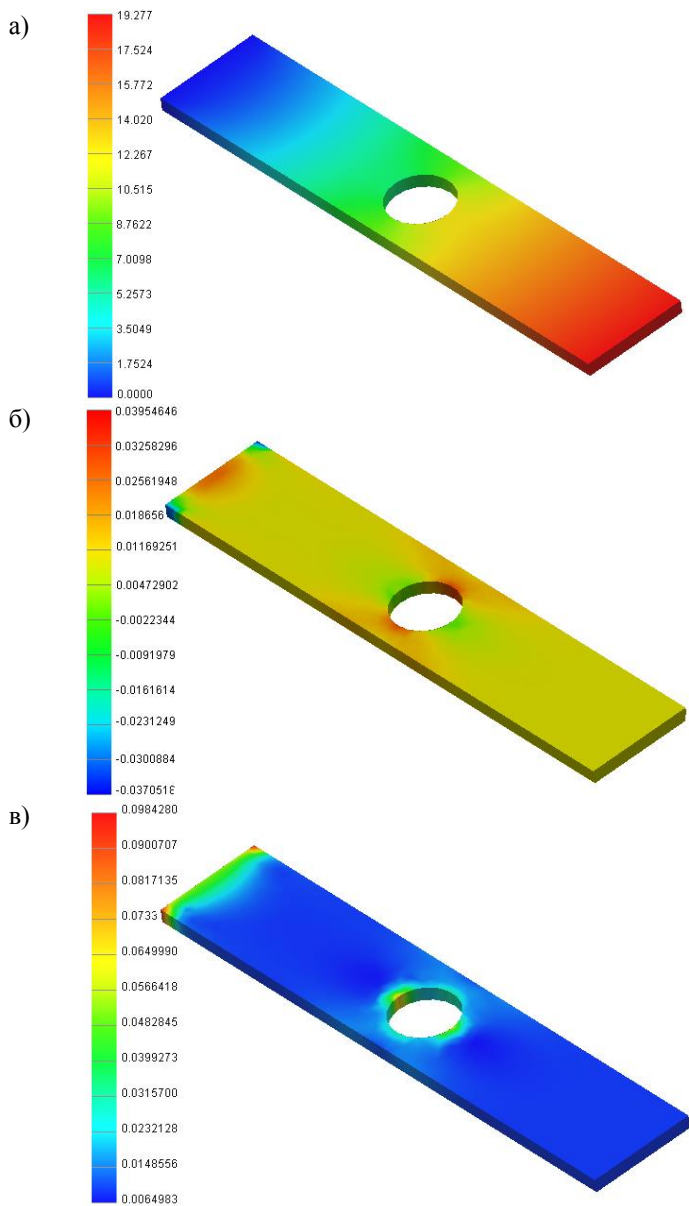


Рис. 8.10. Поле перемещений пластины из гиперупругого материала, мм (*a*), поля нормальных (*б*) и эквивалентных (*в*) напряжений растяжения в пластинах из гиперупругого материала, МПа

8.3. Физически нелинейная задача (пластичность)

Примером физически нелинейной задачи также является задача об упругопластическом деформировании, когда деталь после снятия нагрузки не принимает начальную форму и в ней возникают остаточные перемещения и напряжения. Для решения таких задач используются специальные модели пластичности. Известно, что для таких материалов важной характеристикой является предел текучести. Наступление пластичности сопровождается изотропным и / или кинематическим упрочнением, описываемым билинейной и мультилинейной моделями. Начало пластичного состояния в условиях многоосного напряженного состояния определяют, как правило, при помощи эквивалентного напряжения по Мизесу. Для относительно малых остаточных перемещений рекомендуется использование модели материала с билинейным кинематическим упрочнением.

Алгоритм решения задачи о нахождении параметров упругопластического поведения детали в целом совпадает с аналогичным решением, применяемым для геометрически нелинейных задач. Рассмотрим решение задачи об упругопластическом поведении конструкции на примере пластины, описанной в п. 8.1. Основные свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и др.) в данном случае определены при проектировании пластины в среде Autodesk Inventor. Для задания специфических упругопластических свойств материала следует произвести щелчок правой кнопкой мыши по строке с названием материала в «дереве» проекта (см. рис. 8.2). На панели *Material* следует нажать пиктограммную кнопку *Nonlinear* (показана стрелкой на рис. 8.11). На появляющейся далее диалоговой панели *Nonlinear Material Data* (последняя также показана на рис. 8.11) необходимо выбрать модель упругопластичного поведения материала (обоснование этого выбора не входит в рассматриваемую задачу).

В данном случае выбрана модель с изотропным билинейным упрочнением. В соответствии с этим в поле *Elasto-Plastic* поставлена отметка , а в разворачивающемся списке *Hardening Rule* выбрана строка *Isotropic*. Далее задаются граничные условия, формируется сетка конечных элементов, вводятся опции решения и начинается решение задачи.

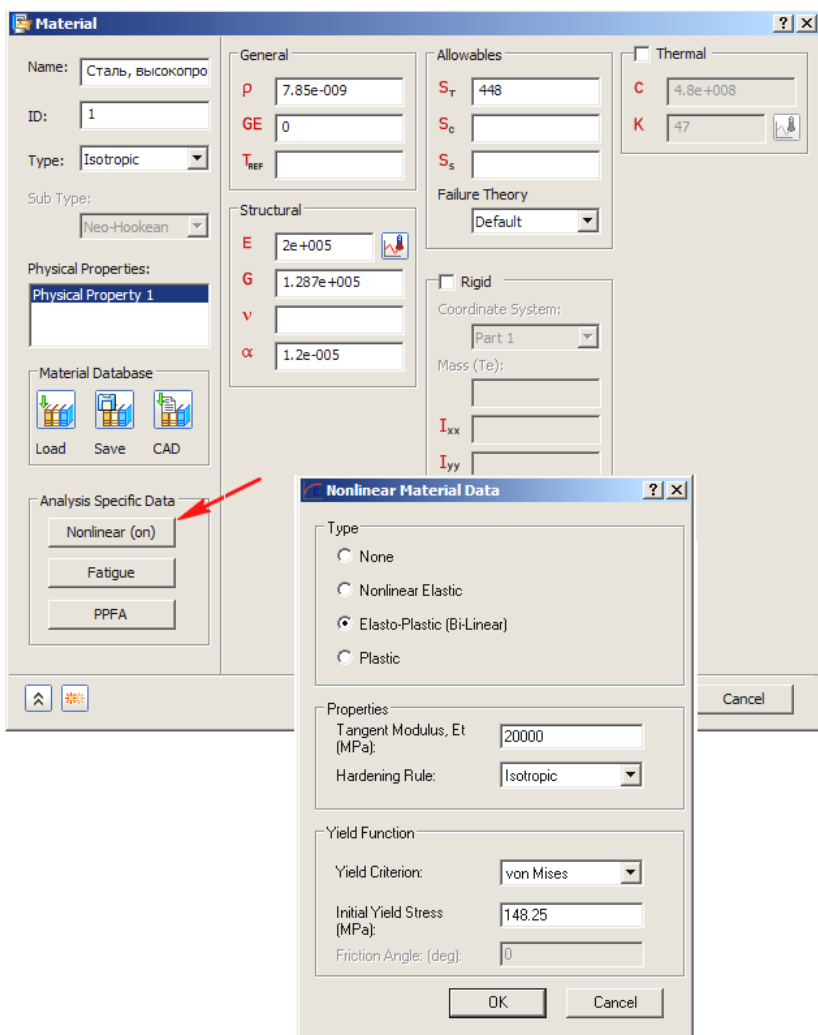


Рис. 8.11. Задание свойств и модели поведения упруго-пластичного материала

Результаты решения задачи показаны на рис. 8.12. Помимо традиционно выводимых полей эквивалентных напряжений, перемещений и других результатов здесь представляют интерес поля остаточных пластических деформаций.

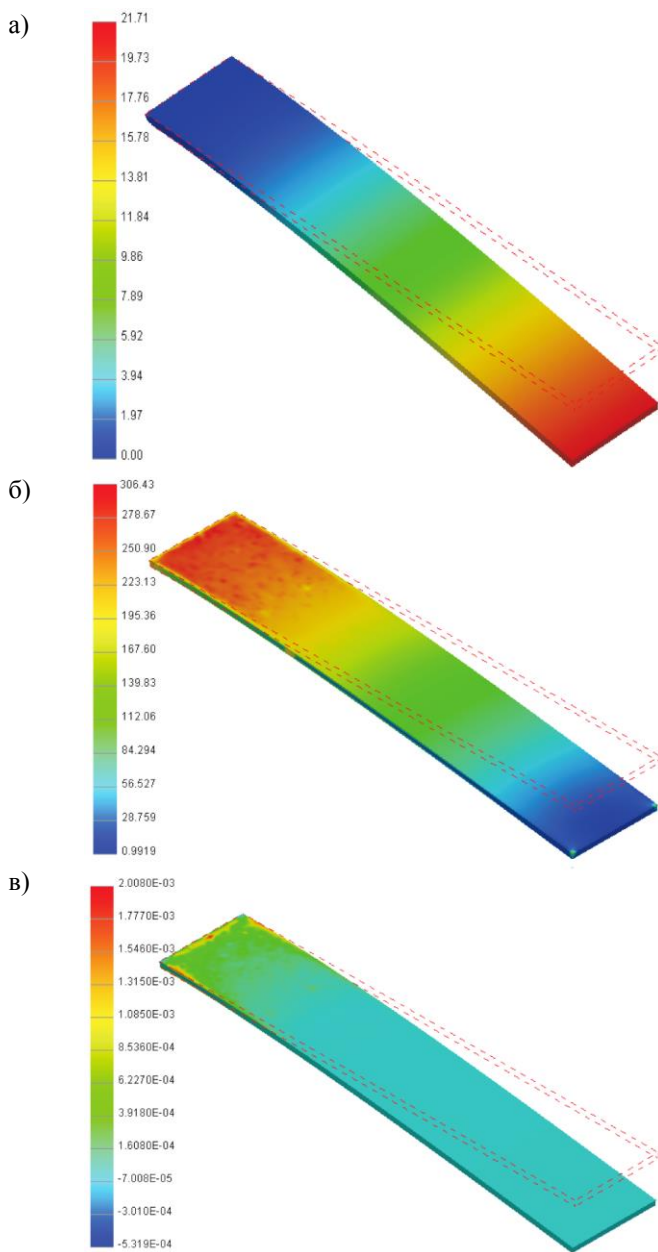


Рис. 8.12. Поле упругопластических перемещений пластины, мм (а), поля эквивалентных напряжений (б) и пластических деформаций (в)

9. НЕЛИНЕЙНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

9.1. Актуальность задач и алгоритм решения

Задачи нелинейной устойчивости на практике встречаются чаще рассмотренных выше задач линейной устойчивости. В таких задачах появляется возможность учета таких особенностей, как начальные отклонения формы, нелинейное поведение материала, начальные возмущения и др. В связи с этим нелинейный анализ устойчивости обеспечивает более точные результаты. На практике такие задачи актуальны, например, при разработке устройств пассивной безопасности автомобильных конструкций.

Алгоритм решения нелинейной задачи устойчивости выполняется в приведенной последовательности.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели. Установка типа решаемой задачи как линейной задачи статики.

2. Задание (импорт) свойств материала (при необходимости могут быть заданы нелинейные свойства).

3. Задание физических свойств сетки конечных элементов.

4. Установка размеров и формирование сетки конечных элементов.

5. Наложение кинематических граничных условий.

6. Наложение силовых граничных условий (напомним, что в данном случае удобно задавать единичную нагрузку, в таком случае вычисленное впоследствии в ходе решения задачи значение коэффициента критической силы будет равно самой критической силе).

7. Решение задачи линейной статики (первый случай нагружения).

8. Формирование второго случая нагружения при редактировании типа анализа: установка типа решаемой задачи как задачи линейной устойчивости. Задание числа определяемых форм потери устойчивости.

9. Установка (при необходимости) опций решения задачи.

10. Решение линейной задачи устойчивости.

11. Формирование третьего случая нагружения при редактировании типа анализа: установка типа решаемой задачи как задачи нелинейной устойчивости, задание (редактирование) числа определяемых форм потери устойчивости.

12. Установка (редактирование) опций решения задачи (полезно разрешить вывод промежуточных результатов решения задачи).

13. Редактирование силовых граничных условий, задание (кроме уже наложенных нагрузок) начального возмущения.

14. Решение нелинейной задачи устойчивости.

15. Постпроцессорная обработка результатов.

9.2. Порядок решения задачи

Рассмотрим решение задачи, приведенной в источнике [8]. Стальной стержень длиной 1 м, имеющий прямоугольное сечение 50×25 мм, жестко закреплен одним концом и нагружен сжимающим усилием на свободном торцевом сечении. Материал стержня упругий. Требуется определить критическую силу, если не исключены какие-либо начальные возмущения.

Задача решается в одномерной постановке с использованием элементов типа «балка». Решение задач линейной статики и линейной устойчивости, в соответствии с пп. 1 – 10 приведенного в п. 9.1 алгоритма, не отличается от ранее рассмотренных. В итоге получены значения критической силы, вызывающей потерю устойчивости в соответствии с тремя формами. Величина критической силы для первой формы потери устойчивости оказалась равна 32850 Н.

Перейдем к третьему случаю нагружения. Для этого произведем щелчок правой кнопкой мыши по строке с названием анализа *Analysis 1* в «дереве» проекта, выполним команду *Edit* из появляющегося контекстного меню и далее выберем новый тип задачи *Nonlinear Buckling* (рис. 9.1).

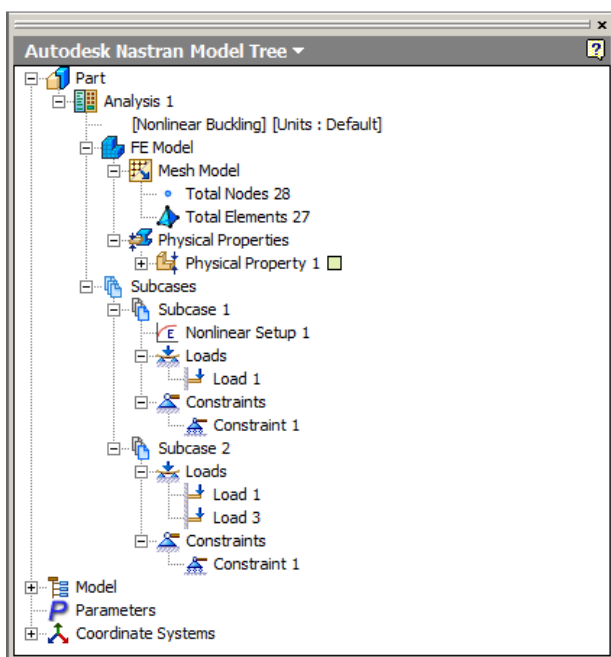


Рис. 9.1. Переход к третьему случаю нагружения при решении задачи нелинейной устойчивости

В качестве начального возмущения приложим к свободному концу стержня силу, действующую перпендикулярно его оси. Величина этой силы должна быть существенно меньше основной сжимающей нагрузки. В рассматриваемом случае основная нагрузка соответствует критической силе для первой формы потери устойчивости, т. е. равна 32850 Н; приложим к свободному концу стержня в качестве начального возмущения силу, равную 10 Н. В «дереве» модели при этом в разделе *Subcase 2* появляется строка *Load 3*.

Произведем щелчок правой кнопкой мыши по строке *Nonlinear Setup 1* и выполним команду *Edit* из появляющегося контекстного меню. В поле *Number of Increments* панели *Nonlinear Setup* (рис. 9.2) установим значение количества шагов, в течение которых будет прикладываться основная нагрузка (в рассматриваемом примере количество шагов равно 20), а в разворачивающемся списке *Intermediate Output* выберем значение *On*, что позволит сохранить результаты расчета на всех промежуточных шагах приложения основной нагрузки.

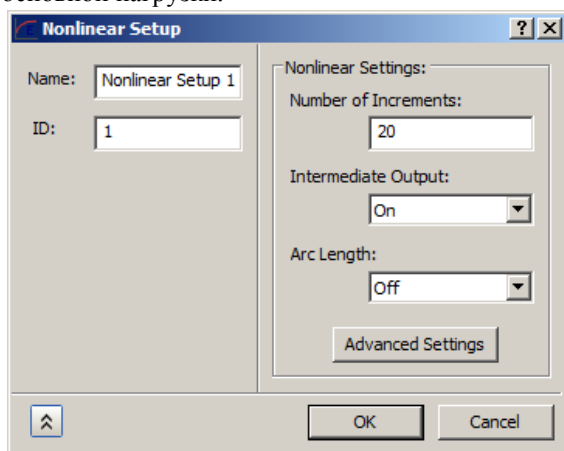


Рис. 9.2. Установка опций решения нелинейной задачи устойчивости

После этого задача запускается на выполнение, результаты которого (значения критической силы и соответствующие им формы потери устойчивости) выводятся описанными выше способами. В качестве специфического результата решения нелинейной задачи устойчивости представляет интерес зависимость от номера шага нагружения какого-либо параметра, по которому можно судить о начале потери устойчивости. В качестве последнего может быть выбрана реакция в закрепленном узле, напряжение в примыкающем к последнему конечном элементе и др. Для вывода такой

зависимости произведем щелчок мышью по строке *XY Plot* (см. рис. 4.2). На появляющейся одноименной панели (рис. 9.3) следует выбрать параметры выводимой зависимости.

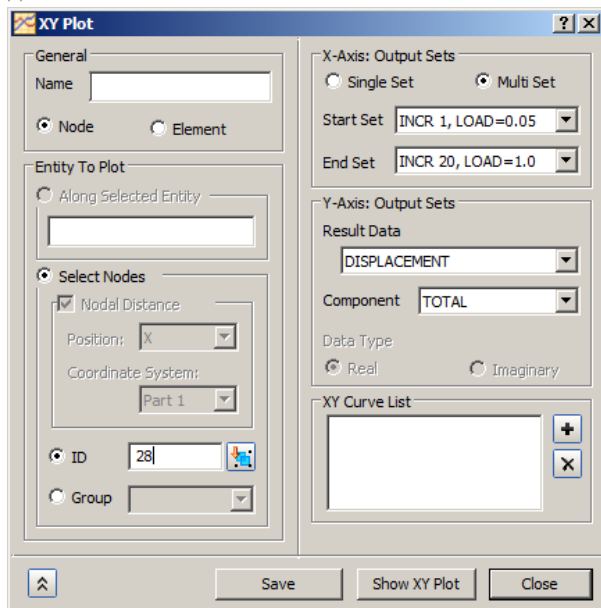


Рис. 9.3. Установка параметров выводимой графической зависимости

Первоначально необходимо поставить отметку в поле *Multi Set* раздела *X-Axis: Output Sets*. Далее в поля *Start Set* и *End Set* необходимо ввести номера начального и конечного шагов нагружения (в рассматриваемом примере используется вся совокупность этих шагов). В разделе *Set Y-Axis: Output Sets* следует выбрать из разворачивающегося списка *Result Data* требуемый результат (в данном случае — суммарное перемещение), который относится к заранее выбранному узлу (*Node*, *Select Nodes*) или элементу (*Element*) с номером *ID*.

На рис. 9.4 показана зависимость перемещения *и* свободного конца стержня в зависимости от величины приложенной сжимающей нагрузки (последняя измеряется здесь в относительных единицах — долях максимальной нагрузки, что соответствует показанным на рис. 9.3 пределам изменения аргумента). Эта зависимость имеет наибольшую наглядность при использовании полулогарифмических координат. Видно, что при достижении величины нагрузки, равной 0,75 от максимальной (т. е. $0,75 \times 32850 = 24637,5$ Н), перемещение свободного конца резко увеличивается. Эту

величину и следует считать предельной, по достижении которой начинается потеря устойчивости при наличии начальных возмущений или иных причин нелинейности.

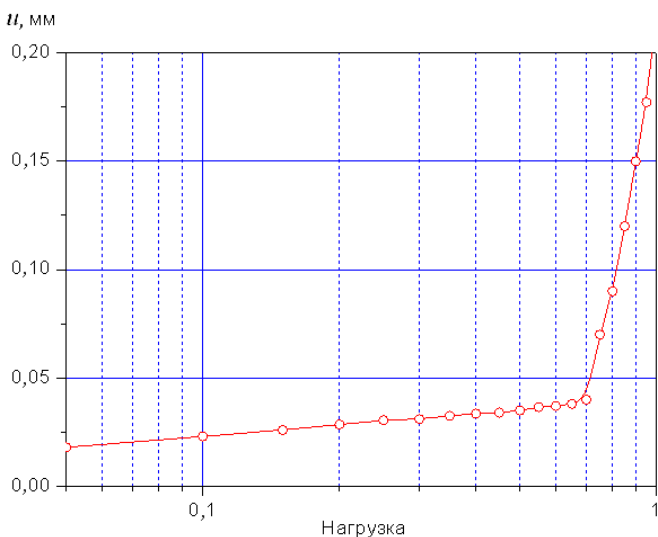


Рис. 9.4. Оценка момента начала потери устойчивости в нелинейной задаче

10. НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

10.1. Итерационный способ решения задачи

Нелинейные задачи теплопроводности относятся к физически нелинейным вследствие зависимости свойств материала, граничных условий и других факторов от искомой температуры, т. е. от их решения.

Процедура решения нелинейной задачи теплопроводности, осуществляемого итерационным способом, предусматривает выполнение следующих действий.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели.
2. Установка типа решаемой задачи как нелинейной задачи теплопроводности.
3. Задание (импорт) свойств материала, в том числе, нелинейных (при их наличии).
4. Задание физических свойств сетки конечных элементов.
5. Формирование сетки конечных элементов.

6. Наложение теплотехнических граничных условий, в том числе, нелинейных (при их наличии).
7. Установка (при необходимости) опций решения задачи.
8. Задание начального значения температуры, необходимой для выполнения первой итерации.
9. Запуск задачи на выполнение.
10. Постпроцессорная обработка результатов.

10.2. Пример решения нелинейной задачи

Рассмотрим решение нелинейной задачи теплопроводности для гильзы цилиндров двигателя внутреннего сгорания [5]. Результат решения данной задачи с использованием пакета ANSYS представлен на рис. 10.1 [12].

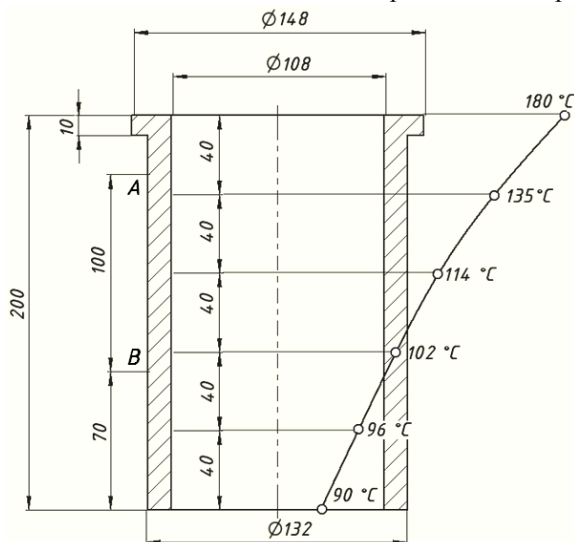


Рис. 10.1. Графическое представление решения нелинейной задачи теплопроводности с использованием пакета ANSYS

С использованием пакета Autodesk Nastran In-CAD требуется определить температурное поле стальной гильзы, в точках внутренней поверхности которой задана температура, изменяющаяся от 90 до 180 °C по квадратичному закону. Коэффициент теплопроводности материала $K = 45,4$ Вт/(м·К), теплоемкость $C = 460$ Дж/(кг·К). Часть наружной поверхности гильзы, находящаяся между точками *A* и *B*, омывается охлаждающей жидкостью, имеющей температуру 60 °C. С этого участка теплота отводится за счет конвекции, причем коэффициент конвективного теплообмена является переменной

величиной, зависящей от температуры наружной поверхности гильзы, что подтверждено следующими табличными данными:

**Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи h
от температуры среды $T_{\text{окл}}$**

$T_{\text{окл}}, \text{ }^\circ\text{C}$	0	25	50	75	100	125
$h, \text{ мВт}/(\text{мм}^2 \cdot \text{К})$	4,6	6,0	7,6	9,6	11,8	14,3

Последнее обстоятельство определяет тип решаемой задачи как нелинейную задачу теплопроводности.

В связи с необходимостью приложения изменяющейся по высоте гильзы граничных условий при построении твердотельной модели были предусмотрены рабочие плоскости и точки, разделяющие внутреннюю и наружную поверхности в соответствии с рис. 10.1 [12].

После загрузки Autodesk Nastran In-CAD описанным итерационным способом определен тип задачи (рис. 10.2).

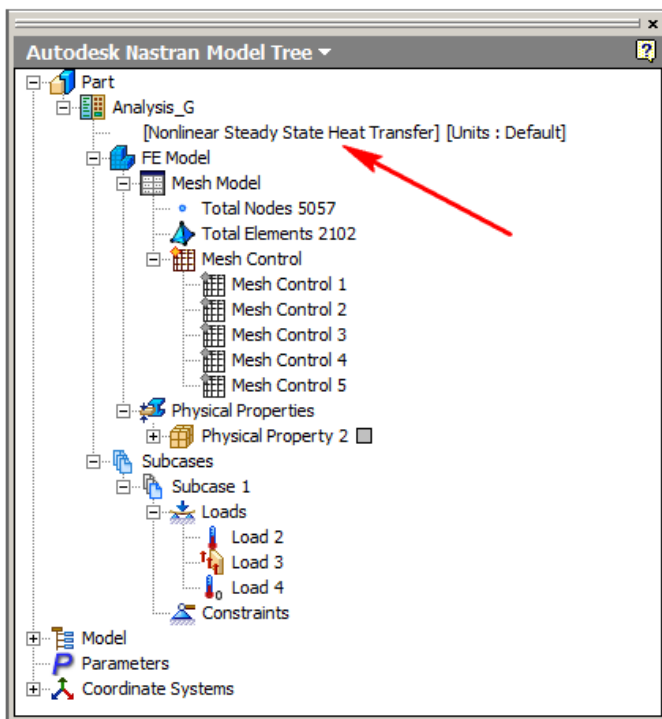


Рис. 10.2. Начало решения нелинейной задачи теплопроводности

Далее были введены теплофизические свойства материала (рис. 10.3). Здесь следует обратить внимание на то, что значение теплоемкости введено в Вт/(т·К), а коэффициент теплопроводности — в мВт/(мм·К). Необходимые подсказки появляются при указании курсором соответствующих полей панели *Material*. Сетка конечных элементов построена также с учетом нескольких участков поверхностей, при этом использован инструмент управления плотностью сетки.

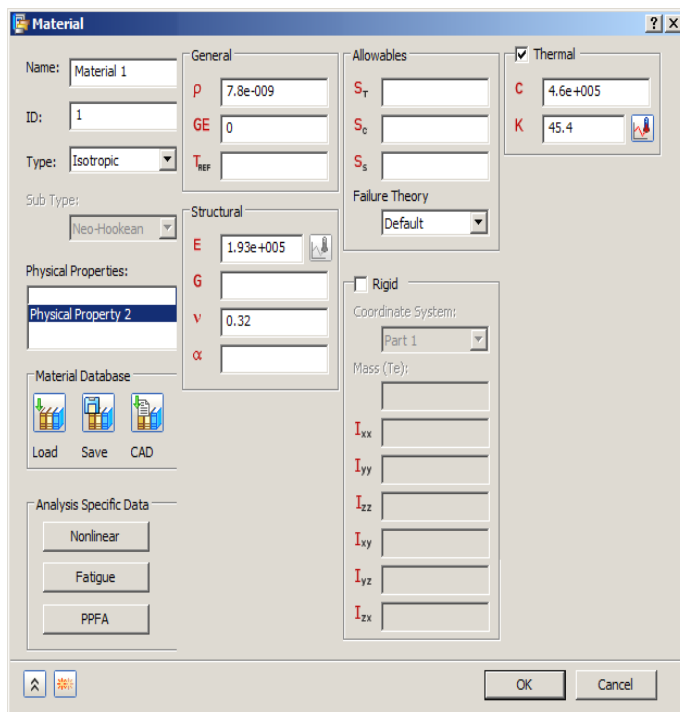


Рис. 10.3. Задание свойств материала в нелинейной задаче теплопроводности

Для задания температуры точек на внутренней поверхности гильзы используем диалоговую панель *Load* (рис. 10.4). Эти граничные условия в модели будут иметь имя *Load 2*. В разворачивающемся списке *Type* выберем тип нагрузки (температуру) и нажмем пиктограммную кнопку *Advanced Options*. При этом в правой части панели появляется раздел *Variable Load Definition*. Для его активизации, т. е. возможности ввода в поля информации, следует поставить отметку в одноименное поле. Далее в поле *Load Definition* введем значение температуры, равное 90 °С (вообще это значение может быть произвольным).

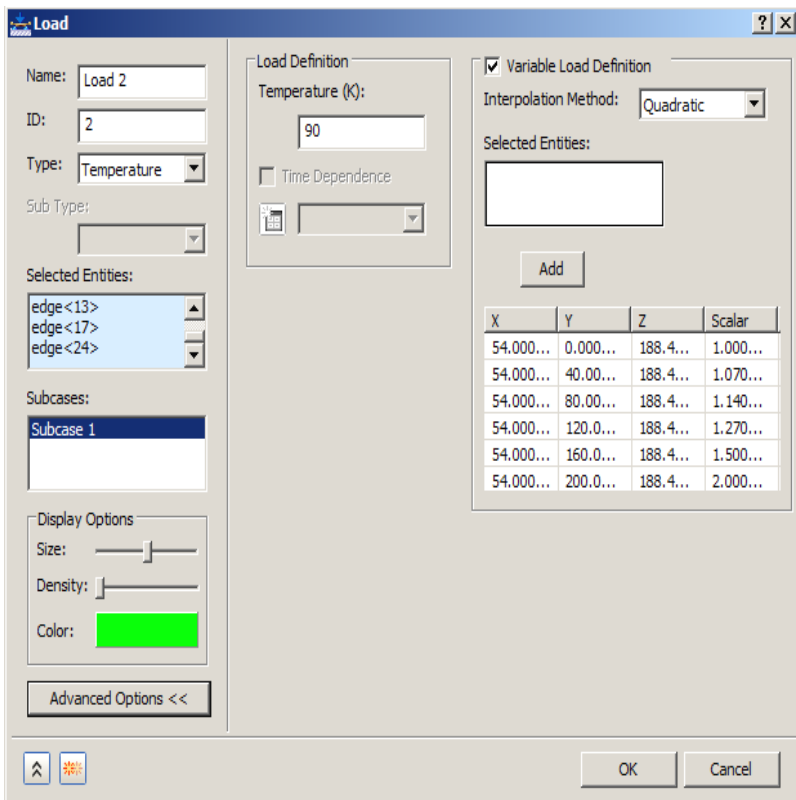


Рис. 10.4. Задание температуры внутренней поверхности гильзы

После этого поочередно следует отметить точку (линию) на модели, в которой температура равна 90 °С. При этом в первой строке таблицы на рис. 10.4 появятся ее координаты (54.000, 0.000, 188.4¹). Нажмем кнопку *Add*. Информация о точке будет выведена в поле *Selected Entities*. В столбец *Scalar* этой же таблицы введем значение 1,000. Это значит, что истинное значение температуры в выбранной точке будет $90 \times 1,0 = 90$ °С. Аналогично введем в таблицу информацию обо всех остальных точках внутренней поверхности гильзы. Для задания квадратичного закона изменения температуры выберем в разворачивающемся списке *Interpolation Method* строку *Quadratic*.

¹ Координаты X, Y здесь соответствуют положениям точек вдоль радиуса и высоты гильзы. Для круглых тел величина третьей координаты Z не имеет значения.

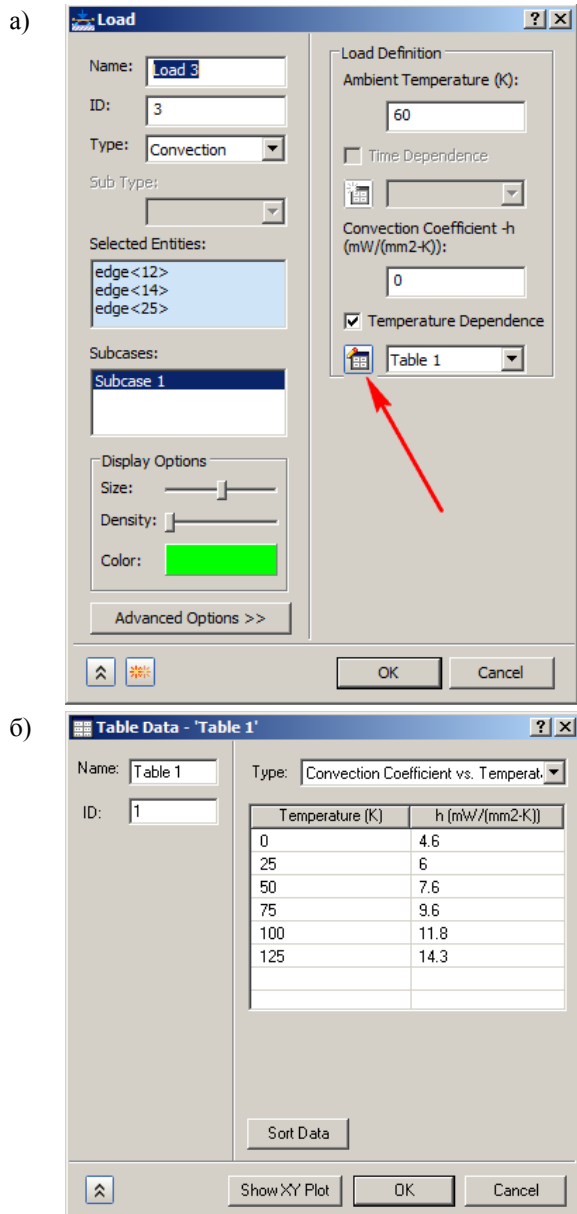


Рис. 10.5. Ввод на экран табличной зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры (а) и вид отображаемой на экране таблицы коэффициента конвективной теплоотдачи (б)

Для задания конвективного теплообмена на участке наружной поверхности гильзы снова вызовем на экран панель *Load* (рис. 10.5, *a*) и в списке *Type* выберем строку *Convection*. На модели укажем участки, составляющие поверхность конвективного теплообмена (их имена отображаются в поле *Selected Entities*), в поле *Ambient Temperature* введем заданное значение температуры жидкости (это температура окружающей среды).

Для задания зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры поставим отметку в поле *Temperature Dependence* (при этом значение, содержащееся в поле *Convection Coefficient*, не имеет значения) и нажмем показанную стрелкой на рис. 10.5, *a* пиктограммную кнопку. При этом откроется окно *Table Data* (рис. 10.5, *б*). В разворачивающемся списке *Type* этого окна следует выбрать строку *Convection Coefficient vs Temperature* и ввести в соответствующие поля значения температуры среды и коэффициента (см. таблицу на с. 105). Сформированная таблица автоматически получает имя *Table 1*, отображаемое впоследствии также в поле *Temperature Dependence* (см. рис. 10.5, *a*).

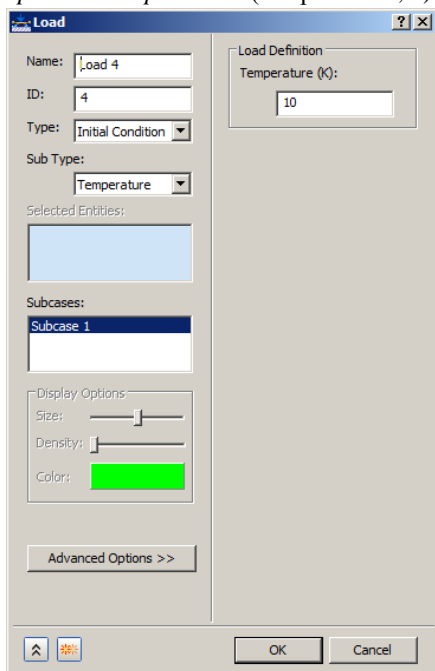


Рис. 10.6. Ввод начального приближения для итерационного решения нелинейной задачи теплопроводности

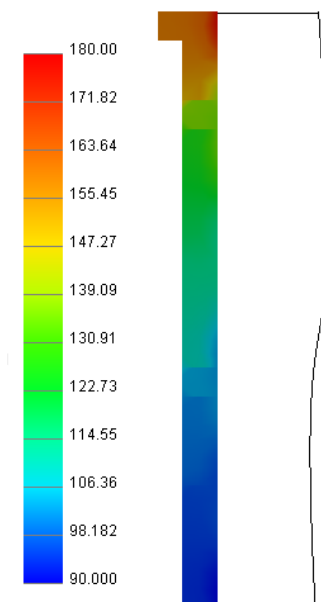


Рис. 10.7. Температурное поле гильзы

Затем необходимо ввести значение температуры, которое будет впоследствии использовано в качестве начального приближения (задача решается итерационным методом). Для этого необходимо в вновь обратиться к диалоговой панели *Load*, в разворачивающихся списках *Type* и *Sub Type* выбрать строки *Initial* и *Condition Temperature* соответственно и в поле *Load Definition* ввести любое значение этой начальной температуры (рис. 10.6).

Далее задача запускается на выполнение. Постпроцессорная обработка выполняется описанными ранее действиями. На рис. 10.7 приведено температурное поле гильзы; результат решения задачи полностью совпадает с найденным в среде программного продукта ANSYS.

11. РАСЧЕТ ВЫНОСЛИВОСТИ

11.1. Многоосная усталость

Приложение Autodesk Nastran In-CAD позволяет выполнять расчет выносливости конструкции, подверженной циклическим нагрузкам, в условиях многоосного напряженно-деформированного состояния. При решении такой задачи пользователь должен выполнить следующие действия.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели. Установка типа решаемой задачи (расчет выносливости при многоосном напряженно-деформированном состоянии).

2. Задание (импорт) свойств материала.
3. Задание физических свойств сетки конечных элементов.
4. Формирование сетки конечных элементов.
5. Наложение кинематических граничных условий.
6. Наложение силовых граничных условий.
7. Установка (при необходимости) опций решения задачи.
8. Запуск задачи на выполнение.
9. Постпроцессорная обработка результатов.

Рассмотрим решение задачи об определении параметров выносливости конструкции, показанной на рис. 7.1, исходя из предположения о том, что пластина жестко закреплена одним из торцевых сечений, а верхняя горизонтальная поверхность нагружена переменным давлением, амплитудная величина которого равна 5 МПа, изменяющимся по синусоидальному закону (таким образом, цикл нагружения пластины является симметричным).

После загрузки Autodesk Nastran In-CAD и импорта геометрии модели следует установить тип решаемой задачи как задача о выносливости в условиях многоосного напряженно-деформированного состояния (рис. 11.1). При этом в разделе *Subcases* «дерева» модели появляется строка *Fatigue Setup 1*.

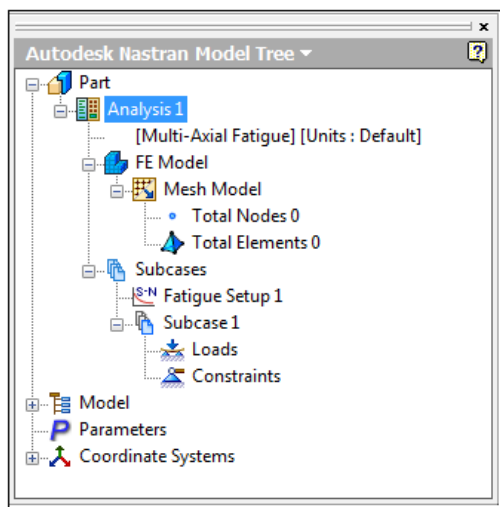


Рис. 11.1. Установка типа решаемой задачи

Описание параметров материала, помимо значений модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν , плотности ρ , предела текучести при растяжении S_T и сжатия S_C , предела прочности S_S , коэффициента линейного расширения α и др. (рис. 11.2), в данном случае должно предусматривать ввод усталостных характеристик. Для этого следует нажать пиктограммную кнопку *Fatigue* (на рис. 11.2 показана стрелкой), после чего на экран выводится показанная на рис. 11.3 диалоговая панель *S-N Fatigue*. Если материал исследуемой детали упругий, необходимо перейти на вкладку *S-N Data* этой панели и ввести в соответствующие поля значения параметров усталостной кривой (кривой Веллера):

B — показатель экспоненты усталостной кривой;

S_U — предел прочности материала, МПа;

N_0 — начальное значение количества циклов нагружения (обычно принимается равным 1000);

K_F — коэффициент, учитывающий возможное наличие повреждений (например, следы коррозии, микротрещин и т. д.) в детали (при отсутствии повреждений $K_F = 1$ по умолчанию $K_F = 0,9$);

B_e — показатель экспоненты второго участка усталостной кривой, соответствующего началу вторичного упрочнения;

S_e — предел выносливости материала, МПа;

N_e — число циклов нагружения, соответствующее пределу выносливости материала (обычно принимается $N_e = 10^7$).

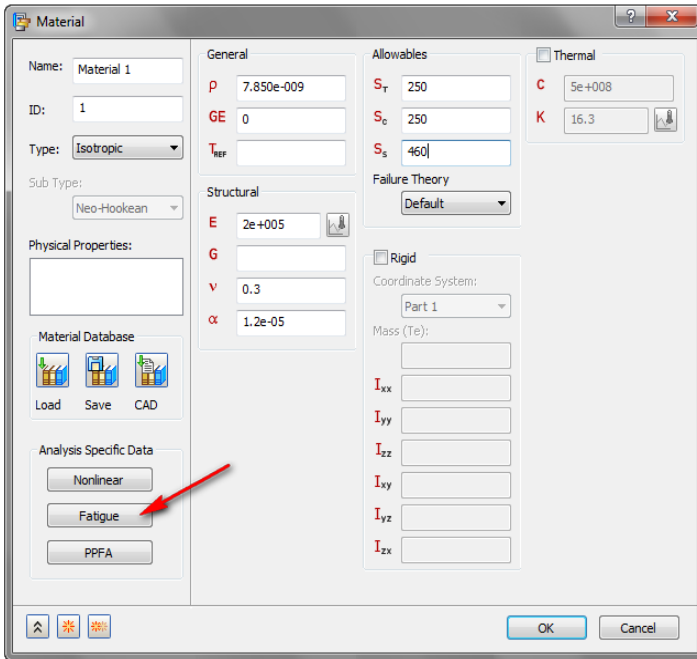


Рис. 11.2. Панель ввода основных механических свойств материала

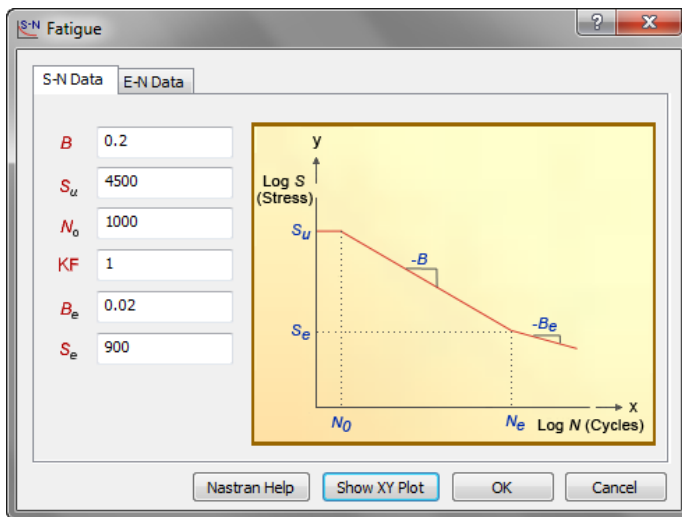


Рис. 11.3. Диалоговая панель ввода параметров усталостной кривой материала

После ввода указанных на рис. 11.3 значений параметров автоматически формируется усталостная кривая, которая может быть отображена после нажатия пиктограммной кнопки *Show XY Plot* (рис. 11.4).

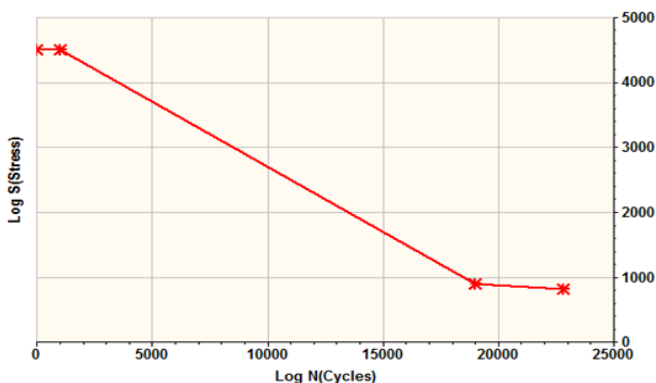


Рис. 11.4. Сформированная усталостная кривая материала

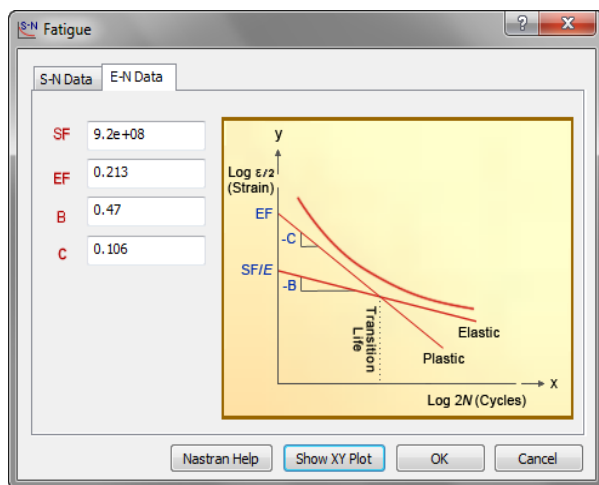


Рис. 11.5. Ввод параметров диаграммы циклического деформирования

Для автоматического формирования циклической диаграммы деформирования (зависимости между числом циклов нагружения и величиной относительной деформации) следует перейти на вкладку *E-N Data* панели *S-N Fatigue* и ввести значения следующих параметров (см. рис. 11.3):

SF — предел выносливости материала, Па;

EF — деформация, соответствующая пределу выносливости (так называемая *усталостная вязкость*);

B, C — показатели экспоненты кривых упругого и пластического деформирования соответственно.

При помощи пиктограммной кнопки *Show XY Plot* (рис. 11.5) сформированная диаграмма циклического деформирования также может быть выведена на экран.

Построение сетки конечных элементов и наложение кинематических граничных условий в данном примере выполняются при помощи описанных ранее действий.

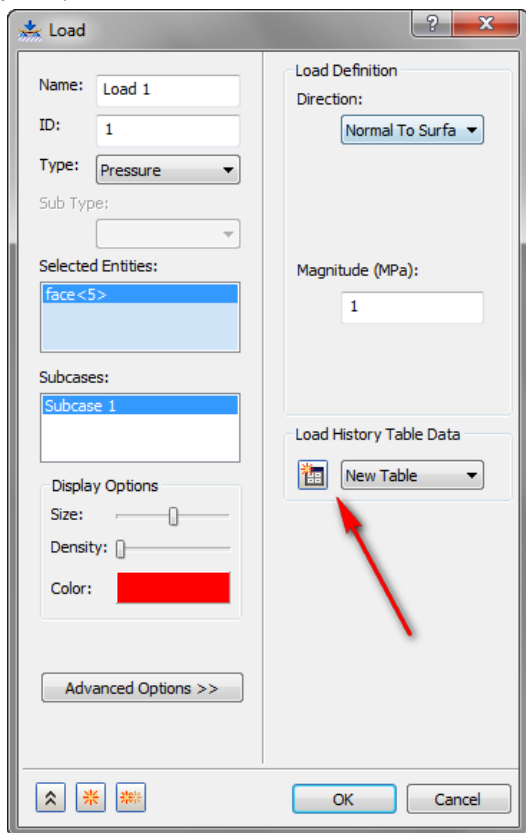


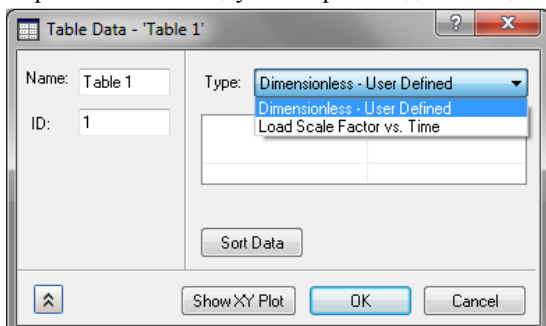
Рис. 11.6. Начало ввода циклической нагрузки

Для описания нагрузки следует обратиться к диалоговой панели *Load* (при задании циклической нагрузки ее вид несколько отличается от показанного на рис. 2.8), выбрать в разворачивающемся списке *Type* вид

нагрузки (сосредоточенная сила, распределенная нагрузка, давление, момент и др.), указать в поле *Selected Entities* точку (ребро, поверхность) приложения нагрузки и ввести в поле *Magnitude* ее амплитудное значение (рис. 11.6).

Далее следует обратиться к разделу *Load History Table Data* и ввести в табличной форме так называемую *историю нагружения*, т. е. вид цикла нагружения. Если история нагружения уже записана в каком-либо текстовом файле, то следует выбрать этот файл в разворачивающемся списке *New Table*. В противном случае такая таблица может быть сформирована в диалоговом режиме после нажатия указанной на рис. 11.6 стрелкой пиктограммной кнопки. При этом на экран выводится окно (рис. 11.7, а), в списке *Type* которого первоначально следует выбрать вид таблицы. Последняя

а)



б)

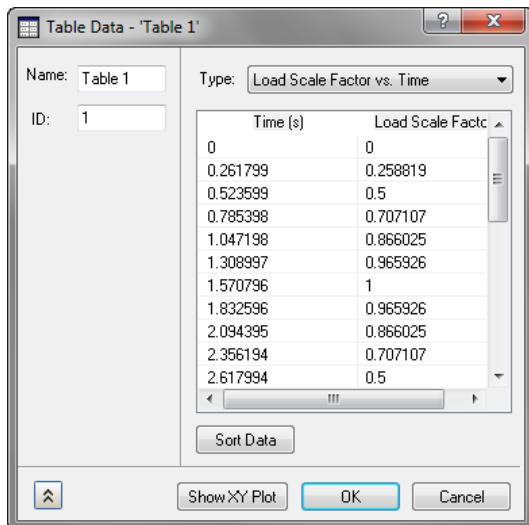


Рис. 11.7. Ввод параметров цикла нагружения:
 а — выбор вида таблицы; б — ввод данных в таблицу

может иметь структуру, заданную пользователем (этому соответствует строка *Dimensionless – User Defined*), или структуру «время – нагрузка» (см. строку *Load Scale Factor vs. Time*). Следует заметить, что зависимость нагрузки от времени здесь является условной, а продолжительность цикла нагружения в данном случае не имеет значения (время рассматривается здесь как независимый аргумент).

Затем в столбцы таблицы вводятся значения аргумента и соответствующие им значения масштабного фактора нагрузки (рис. 11.7, б). Абсолютное значение последней при этом будет равно произведению амплитуды на величину масштабного фактора *Load_Scale_Factor*. В решаемой задаче нагрузка *Load*, соответствующая каждому значению времени *Time*, определяется по выражению

$$Load = Load_{ScaleFactor} \cdot \sin(Time).$$

Заданный таким образом симметричный цикл нагружения пластины может быть отрисован при нажатии пиктограммной кнопки *Show XY Plot*.

Далее необходимо задать опции расчета. Для этого в «дереве» проекта следует произвести щелчок правой кнопкой мыши по строке *Fatigue Setup 1* и в разворачивающихся списках появляющейся одноименной панели выбрать (рис. 11.8) напряжение, по величине которого будет оцениваться усталостная прочность конструкции (список *Method*) и вид усталостной кривой материала (список *Approach*). Из рис. 11.8 следует, что усталостная прочность может оцениваться на величине эквивалентных напряжений фон Мизеса (*von Mises*), главных максимальных напряжений (*Maximum principal*) и максимальных растягивающих напряжений (*Maximum shear*).

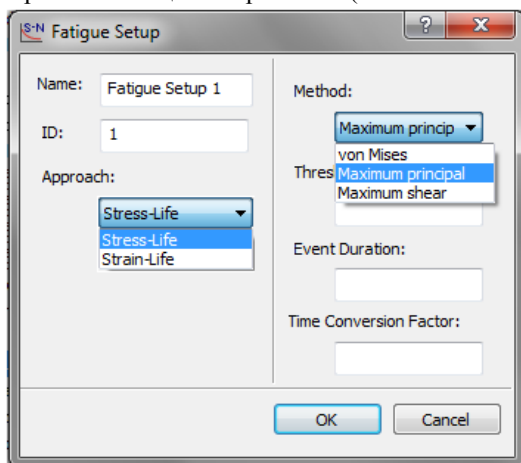


Рис. 11.8. Задание опций расчета

В списке выбирается усталостная кривая вида «число циклов – напряжение» или «число циклов – деформация» (соответственно *Stress-Life* или *Strain-Life*). Кроме этих обязательных опций в поле *Event Duration* может быть введена длительность цикла нагружения (для оценки в абсолютном измерении живучести конструкции), а в поле *Time Conversion Factor* — контрольное значение времени для оценки того, останется ли она работоспособной в течение этого времени.

После этого задача запускается на выполнение, по окончании которого описанным ранее способом могут быть выведены его результаты — живучесть *Solid Life* или повреждаемость *Solid Damage* (рис. 11.9).

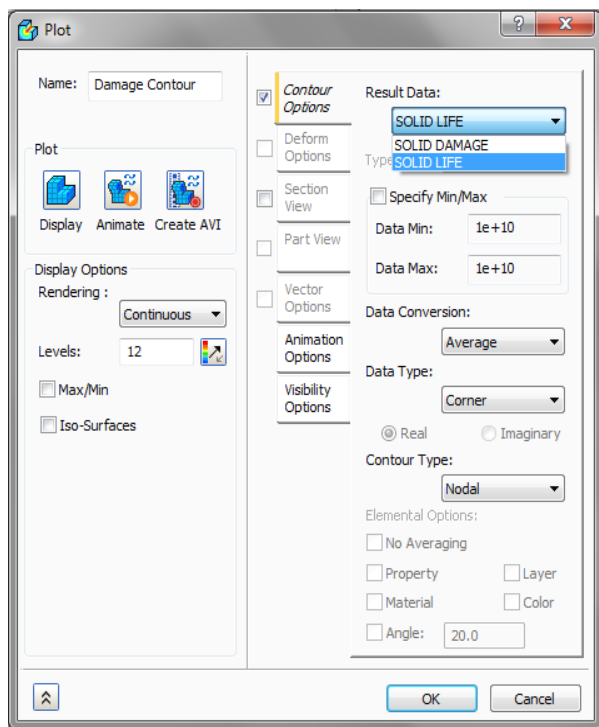


Рис. 11.9. Панель настройки вывода результатов усталостного расчета

Из рис. 11.10 следует, что рассмотренная конструкция, выполненная из материала с указанными усталостными свойствами и испытывающая нагружение давлением по симметричному циклу, остается работоспособной после 470 млн циклов. Лимитирует работоспособность пластины участок, расположенный в окрестности жесткой заделки.

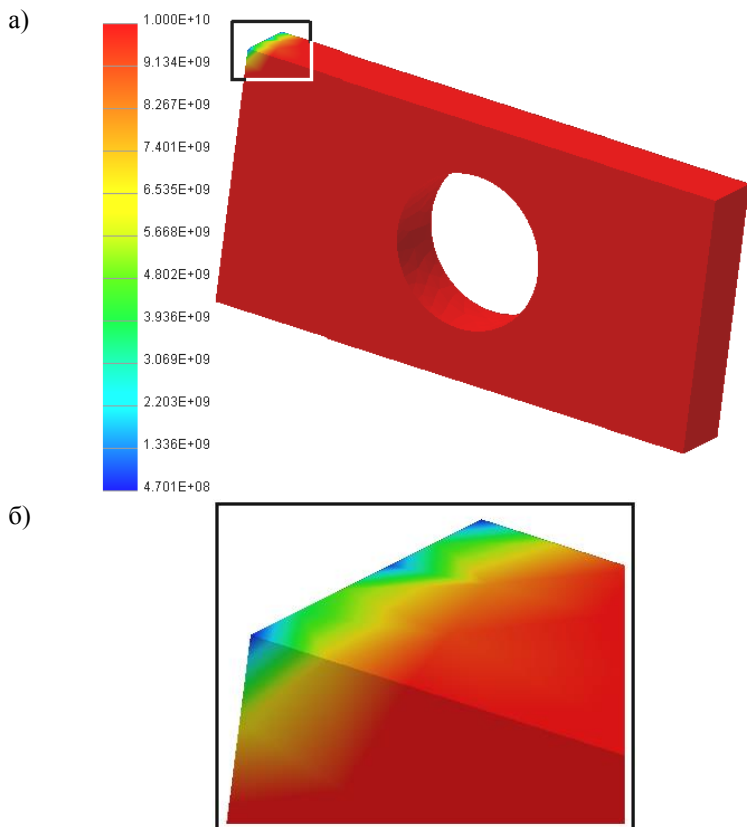


Рис. 11.10. Результат усталостного расчета живучесть конструкции:
a — живучесть *Solid Life*; *б* — состояние после 470 млн циклов работы

11.2. Вибрационная выносливость (виброустойчивость)

Задача вибрационной выносливости, устойчивости и вибропрочности в настоящее время является весьма актуальной для многих устройств, имеющих в своем составе электронные блоки. Современные наземные транспортные средства, как правило, имеют такие блоки (главным образом, это блоки систем управления). В радиоэлектронной промышленности испытания на вибропрочность и виброустойчивость регламентируются многочисленными стандартами.

В этих стандартах под виброустойчивостью понимают способность изделия выполнять свои функции и сохранять свои параметры в условиях воздействия вибрации в заданных режимах.

Содержанием задачи виброустойчивости является определение числа циклов нагружения детали или сборки, подвергаемой воздействию вибрационных возмущений. Последние могут отличаться формой сигнала, уровнем колебательной мощности, резонансными частотами. Установлено [3], что для транспортных средств разных видов такие воздействия характеризуются следующими признаками (табл. 11.1).

Таблица 11.1

Характеристики источников вибраций, действующих на радиоэлектронные приборы транспортных средств

Транспортное средство	Характеристики вибраций
Колесные транспортные средства типа	Частота возбуждающих колебаний подвески машины 2 – 10 Гц, кузова 8 – 15 Гц, частоты возбуждения двигателя 20 – 60 Гц
Гусеничные транспортные средства	Ударно возбуждаемые вибрации в диапазоне частот 400 – 700 Гц
Суда	Частоты возбуждающих колебаний в кормовой части 2 – 35 Гц
Летательные аппараты	Частота возбуждения 3 – 500 Гц. Уровень акустических вибраций с частотой до 130 кГц выше звукового порогового уровня (до 150 дБ)

In-CAD предусматривает выполнение следующих действий.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели. Установка типа решаемой задачи (расчет вибрационной выносливости).
2. Задание (импорт) свойств материала, в том числе, параметров выносливости.
3. Задание физических свойств сетки конечных элементов.
4. Формирование сетки конечных элементов.
5. Формирование (при необходимости) так называемого «твердого тела». При помощи этого инструмента может быть смоделирован объект, на котором установлена испытываемая сборка и к которому впоследствии прикладываются кинематические и силовые граничные условия. Взаимосвязь «твердого тела» и испытываемого объекта осуществляется при помощи инструмента *Connector* (соединитель).
6. Наложение кинематических граничных условий.
7. Наложение силовых граничных условий (в качестве таковых часто задаются параметры вынужденных колебаний объекта, смоделированного как «твердое тело»).

8. Установка опций решения задачи (параметры демпфирования, модального анализа, выносливости).

9. Запуск задачи на выполнение.

10. Постпроцессорная обработка результатов.

Ниже приводится пример решения задачи о виброустойчивости, заимствованный из справочных материалов к приложению Autodesk Nastran In-CAD, обращение к которому может быть выполнено при помощи пиктограммной кнопки *Tutorials* (см. рис. 1.2).

В задаче требуется определить параметры виброустойчивости радиоэлектронной сборки (рис. 11.11), состоящей из платы 1, на которой закреплены корпус 2 батареи 3, микросхемы 4, 5 и 6, трансформатор 7 и центральный процессор 8. Все элементы сборки выполнены из различных материалов, усталостные свойства которых описываются зависимостью «напряжение – число циклов». Между взаимодействующими элементами сборки имеет место постоянный контакт.

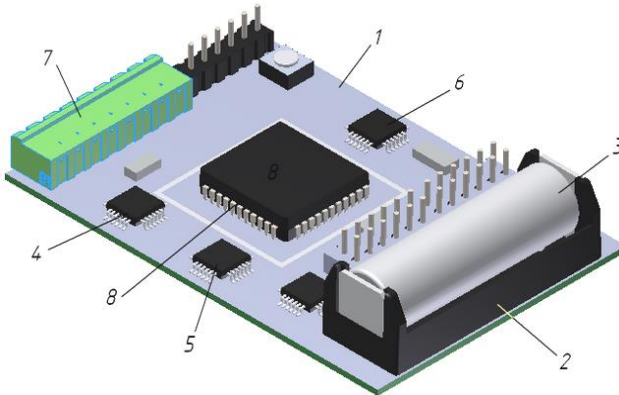


Рис. 11.11. Радиоэлектронная сборка для примера решения задачи о вибрационной выносливости

Сборка установлена на некотором подвижном объекте, вследствие чего воспринимает вибрационные возмущения в диапазоне частот 40 ... 700 Гц. Виброперемещения происходят в направлении, перпендикулярном плоскости платы.

Необходимо определить параметры вибрационной выносливости сборки. Будем считать, что сборка удовлетворяет требованиям, если прогнозируемое число циклов нагружения превышает 10^8 .

Решение начинается с выбора типа решаемой задачи как *Vibration Fatigue*. После выбора этой строки в списке *Type* панели *Analysis* (стрелка 1 на рис. 11.12) следует нажать пиктограммную кнопку *PSD* в разделе *Output*

Control (стрелка 2 на рис. 11.12). На появляющейся далее одноименной панели в разделах *Nodal Output Requests* и *Element Output Requests* установить отметку в строках, соответствующих запросу о форме выводимых результатов. При этом возможны следующие варианты:

Power Spectral Density Functions — в зависимости от значений плотности спектральной мощности вибрации (этот режим считается предпочтительным);

Autocorrelation Functions — в зависимости от значений автокорреляционной функции;

Both — в зависимости от значений обеих функций;

None — запрос о форме вывода не используется.

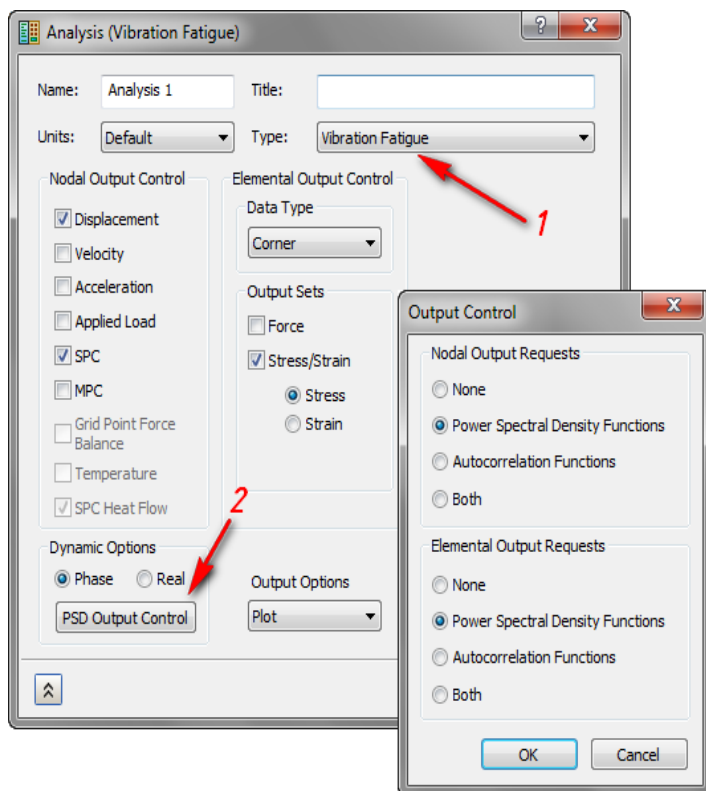


Рис. 11.12. Установка типа решаемой задачи

Далее с использованием показанной на рис. 11.2 панели *Material* вводятся физико-механические свойства материалов: плотность ρ , предел текучести S_t , предел выносливости S_s , модуль упругости при растяжении –

сжатии E , модуль упругости при растяжении – сдвиге G , коэффициент Пуассона ν , коэффициент линейного расширения α (табл. 11.2). Специфические электротехнические материалы обозначены здесь как «Материал 1» (*Material 1*) и «Материал 2» (*Material 2*).

Таблица 11.2

Физико-механические свойства материалов сборки

Показатель	Материал 1	Медный сплав	Сталь	Материал 2
ρ , т/мм ³	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$8,9 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$
S_r , МПа	103	394,38	482,55	56,5
S_s , МПа	–	258,65	248,17	–
E , МПа	7800	$1,1 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	1,93
G , МПа	26000	40000	76000	690,2
ν	0,42	0,37	0,32	0,3902
α , 1/°C	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	–

Помимо приведенных в табл. 11.2 постоянных значений физико-механических свойств для каждого материала вводятся усталостные характеристики. Для этого используется диалоговая панель *SN-Fatigue*. Для упрощения усталостные характеристики всех материалов приняты одинаковыми (рис. 11.13).

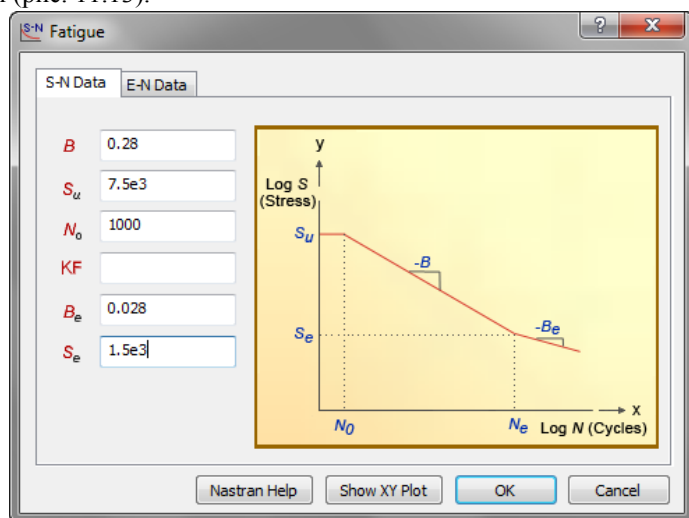


Рис. 11.13. Ввод характеристик выносливости материалов сборки

При построении конечно-элементной модели предусмотрено назначение разных материалов для элементов сборки, а также различная плотность сетки конечных элементов (рис. 11.14).

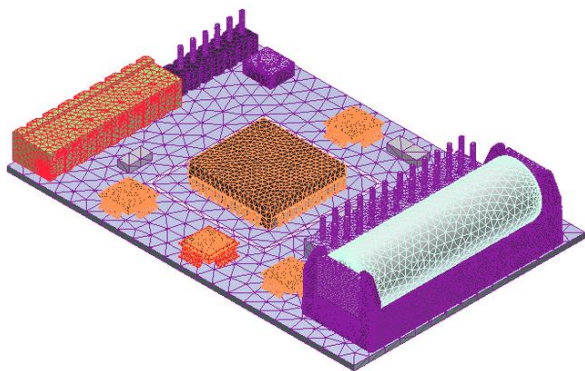


Рис. 11.14. Конечно-элементная модель радиоэлектронной сборки

Для последующего наложения граничных условий используем инструмент «соединитель», с помощью которого имитируется жесткая установка сборки на вибрирующем основании. Для формирования «соединителя» выполним на нижней грани платы эскиз. Для этого перейдем на закладку «Эскиз» инструментальной ленты и построим точку в центре указанной грани пластины (рис. 11.15), после чего примем эскиз.

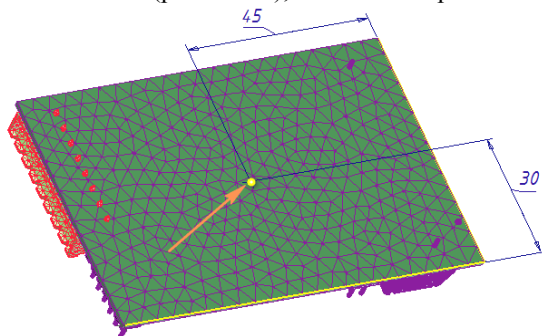


Рис. 11.15. Построение эскиза в сборке

Далее обратимся к разделу *Model* «дерева» проекта, выполним щелчок правой кнопкой мыши по строке *Connectors* и выполним команду *New*. При этом на экран выводится одноименная диалоговая панель (рис. 11.16), в разворачивающемся списке *Type* которой следует выбрать тип соединителя.

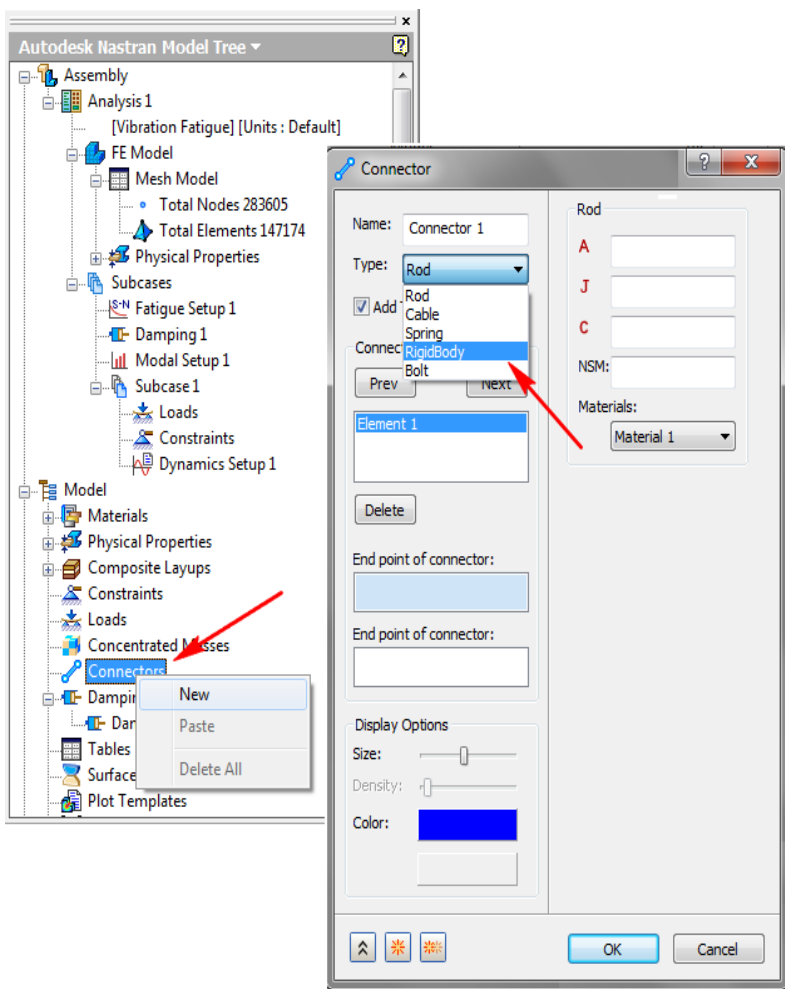


Рис. 11.16. Формирование соединителя *Connector*

Возможны следующие варианты: стержень *Rod*, пружина *Spring*, твердое тело *RigidBody*, гибкая нить *Cable*, шарнир *Bolt*.

Соединители *Connectors* можно уподобить так называемым *нуль-мерным конечным элементам*, предназначенным для описания взаимодействий узлов модели между собой и с другими телами. В рассматриваемом случае соединитель *RigidBody* имитирует жесткое соединение рассматриваемой сборки и транспортного средства, передавая на сборку вибрационное возмущение.

После выбора типа соединителя в полях панели *Connectors* следует ввести его свойства. Для этого необходимо выбрать его тип (в данном примере *RigidBody*), а в разделе *Connector Element* указать соединяемые им элементы модели. В данном примере в качестве независимого элемента *Independent Vertex/Point* мышью на модели выбирается точка (*Point*), построенная в качестве эскиза, а в качестве зависимого объекта *Dependent Entities* — нижняя грань (*face*) платы (рис. 11.17). Постановкой отметки в полях *TX*, *TY*, *TZ*, *RX*, *RY*, *RZ* задается жесткая связь рассматриваемой сборки и твердого тела по всем степеням свободы.

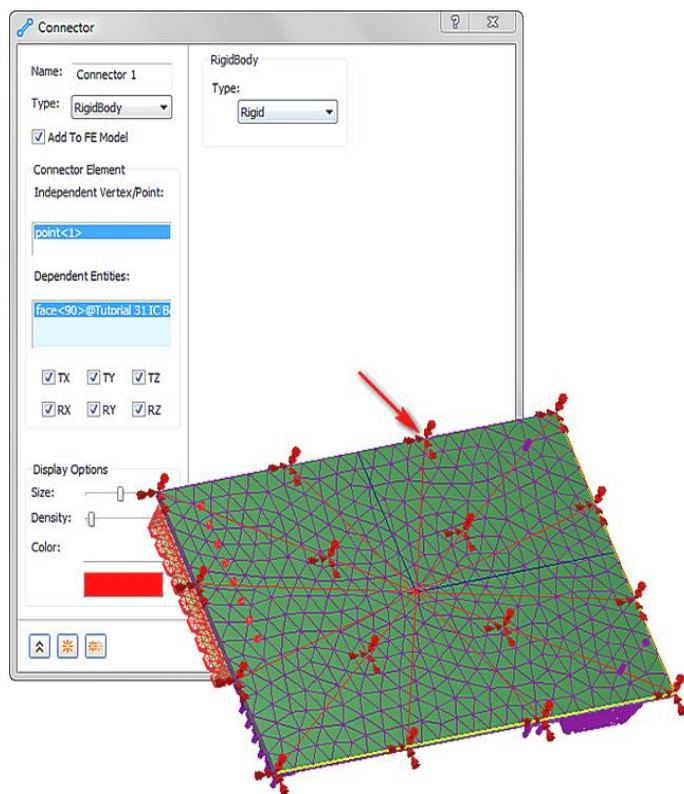
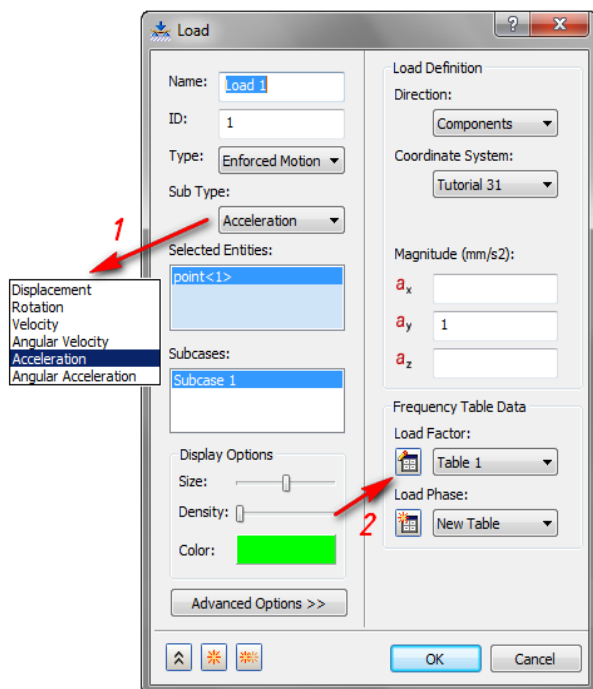


Рис. 11.17. Задание свойств соединителя типа *RigidBody*

В качестве кинематических граничных условий зададим жесткое закрепление по всем степеням свободы точки, построенной ранее в качестве эскиза. При этом никаких дополнительных (по сравнению с ранее описанными) действий не производится.

а)



б)

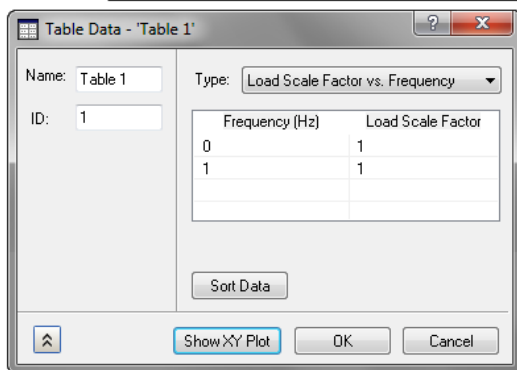


Рис. 11.18. Наложение силовых граничных условий — нагрузок, обусловленных движением сборки: а — пиктограммная кнопка, обозначенная стрелкой 1; б — пиктограммная кнопка, обозначенная стрелкой 2

Для задания силовых граничных условий следует вызвать панель Load и выбрать в разворачивающихся списках *Type* и *Subtype* тип и подтип прикладываемой нагрузки. В данном примере в соответствии с условием задачи выбраны соответственно *Enforced Motion* и *Acceleration* — нагрузки,

обусловленные движением, а именно ускорением (т. е. силы инерции), рис. 11.18. Прочие типы нагрузок указаны на рис. 2.9. Помимо ускорения в качестве подтипов нагрузки, обусловленной движением, могут быть заданы закон движения (*Displacement*), закон вращательного движения (*Rotation*), скорость (*Velocity*), угловая скорость (*Angular Velocity*), угловое ускорение (*Angular Acceleration*). Эти подтипы показаны на рис. 11.18 стрелкой 1. Их значения могут быть постоянными и записываться в соответствующие поля раздела *Magnitude* или задаваться в табличной форме.

В данном случае нагрузка является переменной. В соответствии с этим в поле a_y (считается, что ось O_y направлена перпендикулярно плоскости платы) введено амплитудное значение ускорения, равное 1 м/с^2 . Для задания зависимости амплитуды виброускорения от частоты возмущения сформируем таблицу *Table 1*, для чего следует нажать пиктограммную кнопку, показанную на рис. 11.18, *а* стрелкой 2. Вид таблицы, сформированной вручную, показан на рис. 11.18, *б*. Введенные значения свидетельствуют о том, что амплитуды виброускорений не зависят от частоты возбуждения. Формально нагрузка прикладывается к точке (*point<I>*), ранее построенной в ходе выполнения эскиза в сборке.

Далее необходимо установить опции расчета. Для этого следует в произвольном порядке обратиться к строкам *Dynamic Setup*, *Fatigue Setup* и *Modal Setup* в окне «дерева» проекта. Обращение производится щелчком правой кнопки мыши по указанным строкам и последующим выполнением команды *Edit*. В первом случае на экран выводится диалоговая панель (рис. 11.19).

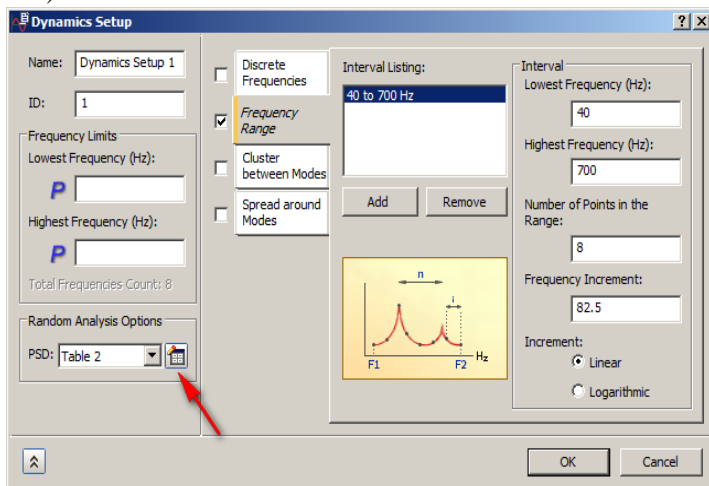


Рис. 11.19. Ввод опций динамического расчета

Если по условию задачи вибрация сборки происходит в частотном диапазоне 40 ... 700 Гц, то следует поставить отметку в поле закладки *Frequency Range* и в окна *Lowest Frequency* и *Highest Frequency* ввести, соответственно, нижний и верхний пределы указанного частотного диапазона, после чего необходимо нажать пиктограммную кнопку *Add*. Этот интервал будет разделен на восемь подынтервалов (в связи с этим в окно *Number of Points in the Range* введено число «8»); величина каждого из подынтервалов будет $(700 - 40)/8$ Гц.

При постановке отметки в поля закладок *Discrete Frequencies*, *Cluster between Modes* или *Spread around Modes* вид правой части панели *Dynamics Setup* несколько изменяется (в первом случае указывается единственная частота возмущающего воздействия, во втором — число мод, укладываемых в заданный частотный диапазон и т. д.).

Спектральная плотность колебательной мощности возмущающего воздействия задана таблицей *Table 2* (рис. 11.20), которая формируется вручную.

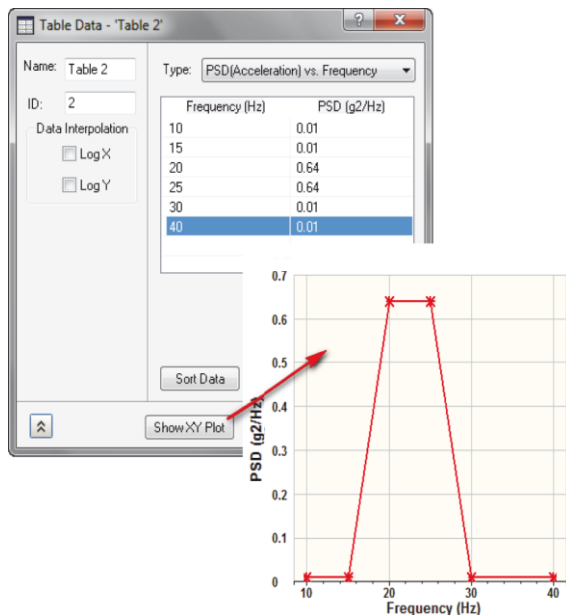


Рис. 11.20. Ввод таблицы спектральной плотности мощности возмущающего колебательного воздействия

Установка параметров усталостного расчета сводится к вводу значений длительности события (*Event Duration*) и значения времени, которое служит условием сходимости (*Time Conversion Factor*), в соответствующих

окна панели *Fatigue Setup* (рис. 11.21). Кроме этого в разворачивающихся списках *Method* и *Approach* нужно выбрать критерий, по которому оценивается работоспособность изделия, и вид используемой усталостной кривой. Из рис. 11.21 следует, что работоспособность изделия оценивается по значениям максимальных главных напряжений (кроме этого здесь возможен выбор эквивалентных напряжений Мизеса и максимальных растягивающих напряжений), а усталостная кривая материала соответствует зависимости: *напряжение – число циклов нагружения* (возможен выбор зависимости: *деформация – число циклов нагружения*).

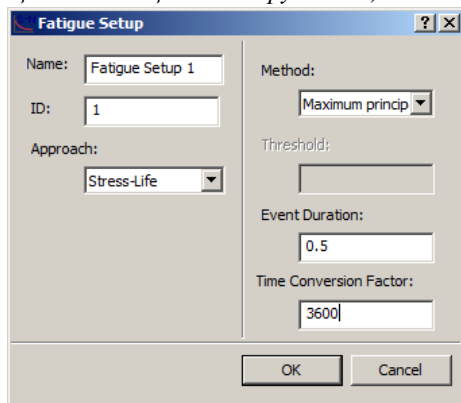


Рис. 11.21. Ввод параметров усталостного анализа

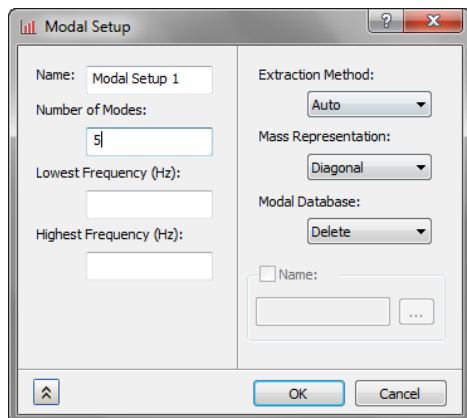


Рис. 11.22. Ввод параметров модального анализа

Установка параметров модального анализа сводится в простейшем случае к вводу числа мод колебаний (*Number of Mods*), частоты которых

входят в заданный частотный диапазон. Остальные параметры (метод определения собственных частот *Extraction Method*, форма матрицы масс *Mass Representation*, требование сохранения или удаления результатов модального анализа *Modal Database*) приняты по умолчанию (рис. 11.22).

а)

б)

Frequency (Hz)	Critical Damping
1	0
30	0.02

Рис. 11.23. Ввод параметров демпфирования: *а* — ввод на экран панели *Damping*; *б* — вывод на экран таблицы *Table 3*

Для задания параметров демпфирования на экран выводится панель *Damping* (рис. 11.23, *а*). В данном случае демпфирование зависит от частоты возмущающего усилия, в связи с чем в разворачивающемся списке *Type*

раздела *Modal Damping* выбрана строка *Variable*. Зависимость демпфирования от частоты задана описанным ранее способом в виде таблицы *Table 3* (рис. 11.23, б). Параметры контактного взаимодействия сопрягаемых деталей установлены автоматически.

Модель подготовлена к расчету. По его окончании при помощи панели *Results* (рис. 11.24) выводится основной результат — ожидаемое число циклов нагружения сборки *Solid Life*.

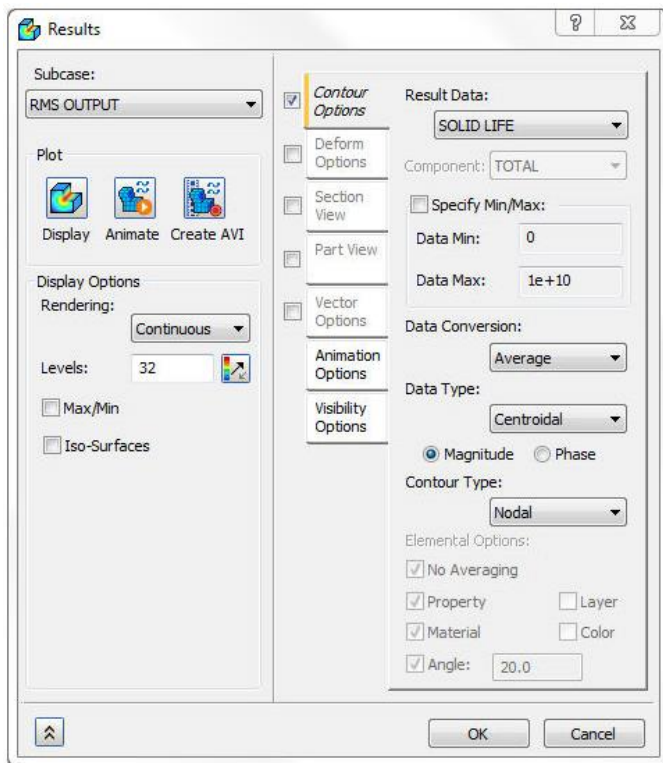


Рис. 11.24. Панель отображения результатов решения задачи вибропрочности

Из рис. 11.25 следует, что все элементы сборки остаются работоспособными в течение, по меньшей мере, 10^8 циклов нагружения (цветовая шкала на рисунке отображает минимальное гарантированное число циклов нагружения элементов модели). При доводке конструкции следует обратить внимание на проблемные участки корпуса батареи.

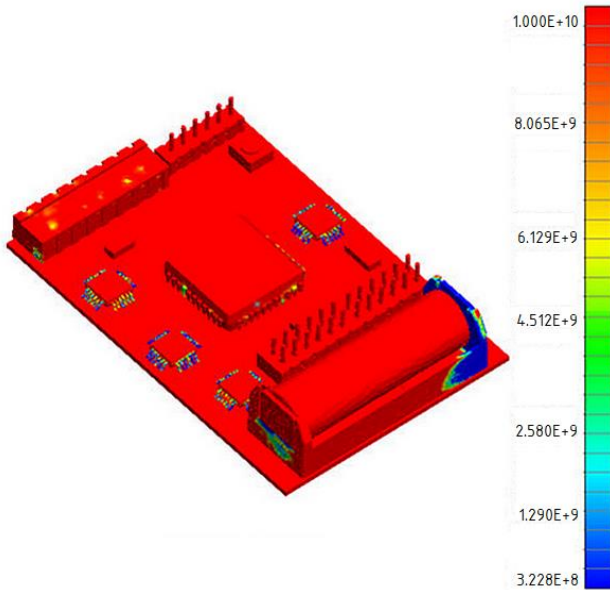


Рис. 11.25. Результат решения задачи вибропрочности

12. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

12.1. Метод прямого интегрирования

В гл. 1 – 11 рассматривались примеры решения задач, в которых исследуемые процессы не зависели от времени. В технике широко представлены так называемые *переходные процессы*, в которых рассматривается зависимость какого-либо выходного параметра (наряду с приложенными нагрузками, закреплениями, свойствами материалов и т. д.) от времени. В этом случае метод конечных элементов используется для решения системы дифференциальных уравнений вида

$$[M] \cdot \{\ddot{U}\} + [D] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} = \{P(t)\},$$

где $[M]$, $[D]$, $[K]$ — матрицы масс, демпфирования и жесткости модели соответственно, $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ — векторы ускорений, скоростей и перемещений узлов модели соответственно; $\{P(t)\}$ — вектор внешних узловых нагрузок, зависящих от времени.

Известно, что задачи о переходных процессах могут решаться различными методами. Наиболее простым является метод прямого интегрирования уравнений движения.

Алгоритм решения задачи в этом случае предусматривает выполнение следующих действий.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели. Установка типа решаемой задачи (расчет переходного процесса методом прямого интегрирования – Direct Transient Response).

2. Задание (импорт) свойств материалов.

3. Задание физических свойств сетки конечных элементов.

4. Формирование сетки конечных элементов.

5. Наложение кинематических граничных условий.

6. Наложение силовых граничных условий (как правило, в табличной форме).

7. Установка (при необходимости) параметров демпфирования.

8. Установка значений времени наблюдения и шага по времени.

9. Запуск задачи на выполнение.

10. Постпроцессорная обработка результатов, включающая отображение результатов решения задачи (перемещений узлов, напряжений и др.) в зависимости от времени.

Рассмотрим решение простой задачи. Требуется определить закон движения заданных точек A , B , C , D стальной пластины, неподвижно закрепленной одним из торцевых сечений, если на противоположном конце она воспринимает ударную нагрузку, прикладываемую в двух точках (рис. 12.1) и изменяющуюся в соответствии с приведенной в таблице зависимостью от времени.

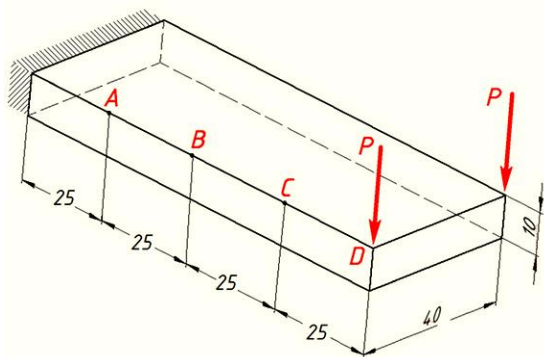


Рис. 12.1. Графическое пояснение к решению задачи об ударном нагружении пластины

Закон ударного нагружения пластины

$t, \text{ с}$	0	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
$P, \text{ Н}$	0	50	150	500	250	100

Силы P приложены в вершинах пластины и направлены перпендикулярно ее плоскости вдоль наиболее коротких ребер (будем считать, что эти ребра параллельны оси Oz глобальной системы координат). Время наблюдения равно 0,05 с.

Расчет переходных процессов может быть выполнен различными способами. Прямое интегрирование уравнений движения рекомендуется применять в задачах, в которых возмущающие силы изменяются относительно плавно, а исследуемый процесс осуществляется в области умеренных частот. При этом расчет сводится к решению большого числа квазистатических задач, в каждой из которых нагрузка может приниматься постоянной.

Построение конечно-элементной модели в основном выполняется описанными в гл. 1 и 2 приемами. Поэтому рассмотрим только те действия пользователя, которые являются специфическими для данной задачи. Одним из таких действий является задание переменной нагрузки. Для этого на ленте приложения Autodesk Nastran In-CAD следует нажать пиктограммную кнопку *Load* и ввести в поля одноименной панели значения составляющих действующей нагрузки вдоль координатных осей.

В рассматриваемом случае нагрузка действует вдоль оси Oz (см. рис. 12.1), поэтому в поле F_z вводится только одна составляющая (рис. 12.2). Вводимая величина силы может быть произвольной, так как ее мгновенные значения будут определяться при помощи таблицы *Transient Table Data* (пиктограммная кнопка для ее формирования показана стрелкой). В разворачивающемся списке *Type* выбирается тип прикладываемой нагрузки *Force* (сила), а на модели указываются «мышью» точки ее приложения. При этом в окне *Selected Entities* отображаются их системные имена *vertex<3>* и *vertex<4>*.

Для ввода таблицы мгновенных значений силы с помощью указанной стрелкой пиктограммной кнопки следует вызвать на экран таблицу *Table Data* (рис. 12.3), в разворачивающемся списке *Type* выбрать строку *Load Scale Factor* и ввести в соответствующие столбцы значения времени и масштабные множители. Тогда истинное значение силы в момент времени $t = 0,015$ с определится как $500 \cdot (-1) = -500$ Н.

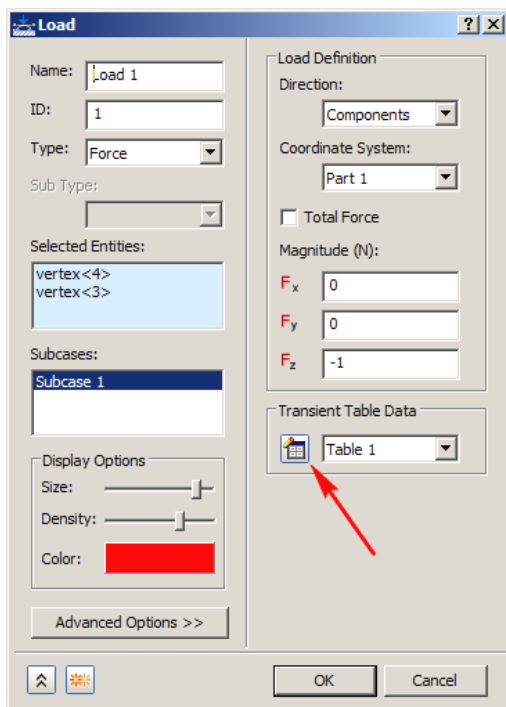


Рис. 12.2. Ввод переменной нагрузки в задаче о переходном процессе

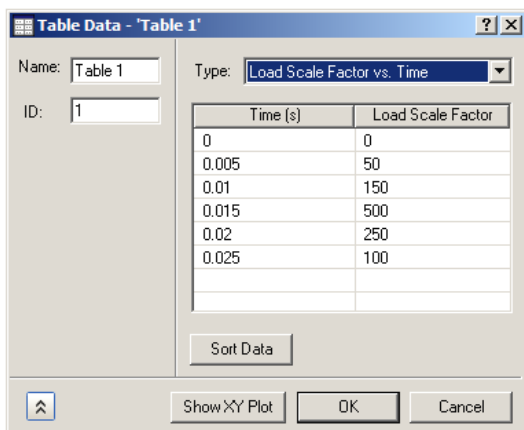


Рис. 12.3. Ввод значений переменной нагрузки в задаче о переходном процессе

При решении задачи методом прямого интегрирования обязательным является задание параметров демпфирования. Пусть в данном случае его относительная величина *Damping Value* составляет 5 % при основной частоте *Dominant Frequency*, равной 500 Гц (рис. 12.4). В качестве таковой зачастую используют низшую частоту собственных колебаний детали.

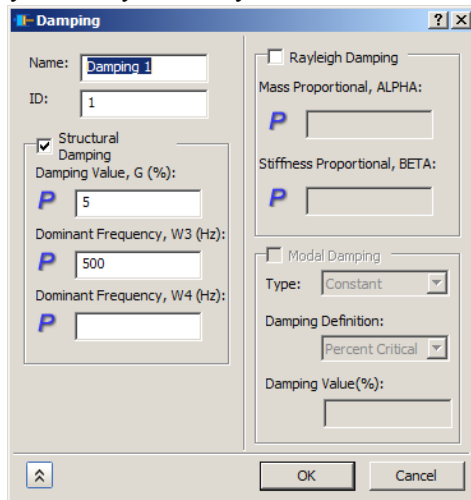


Рис. 12.4. Процедура демпфирования в задаче о переходном процессе

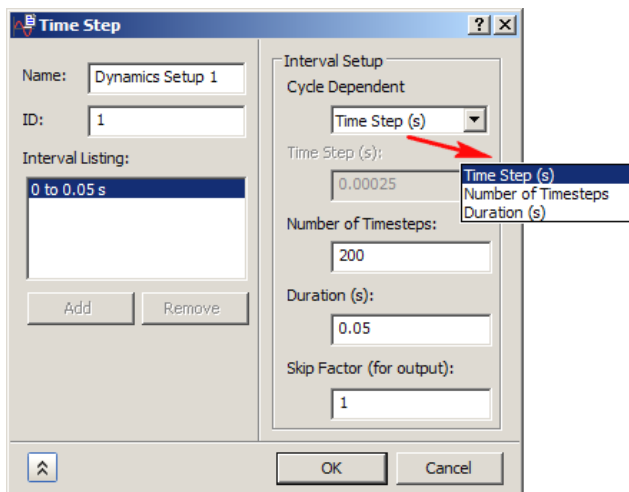


Рис. 12.5. Ввод динамических параметров в задаче о переходном процессе

Для задания времени наблюдения и шага расчета по времени обратимся к строке *Dynamic Setup* и введем эти данные в поля панели *Time Step* (рис. 12.5).

Первоначально из разворачивающегося списка *Cycle Dependent* следует выбрать так называемую *зависимую величину*, значение которой определяется двумя другими вводимыми параметрами. Если время наблюдения по условию задачи равно 0,05 с (это число введено в поле *Duration*), а в качестве зависимой величины выбрана длительность шага расчета по времени (*Time Step*), то она определится делением времени наблюдения на принятое число расчетных шагов *Number of Timesteps*. Если последнее принято равным 200, то шаг становится равным $0,05/200 = 0,00025$ с (это значение автоматически выводится в неактивном окне *Time Step*).

Другими зависимыми величинами могут быть число расчетных шагов (оно тогда определится как $0,05/0,00025 = 200$) или время наблюдения, равное $200 \cdot 0,00025 = 0,05$ с. После этого запускается выполнение задачи, по окончании которого переходят к постпроцессорной обработке результатов.

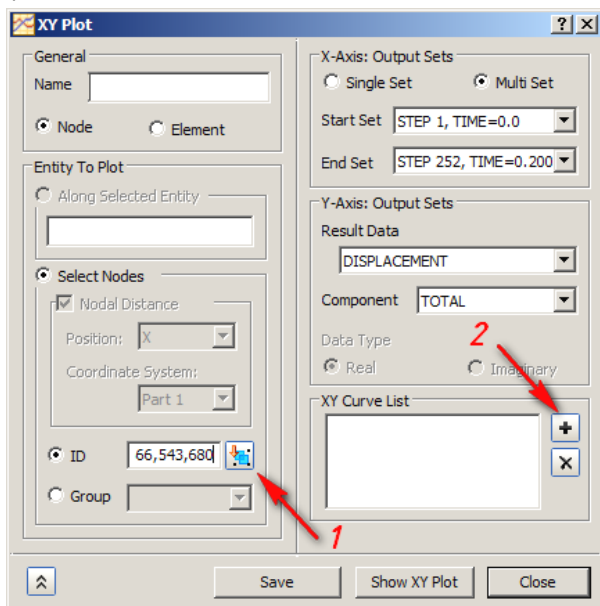


Рис. 12.6. Вывод графиков зависимости перемещений точек пластины от времени

Наиболее простой является отрисовка последовательных положений деформированной детали, соответствующих различным моментам времени. Более информативным является вывод графика зависимости перемещения выбранной точки от времени. Для этого следует произвести щелчок правой кнопкой «мыши» по строке *XY Plot* в окне «дерева» проекта (см. рис. 7.9), указать курсором интересующую расчетчика точку или ввести ее номер в поле *ID* одноименного окна, показанное стрелкой 1 на рис. 12.6 и нажать пиктограммную кнопку *XY Plot*.

Для точки, расположенной на свободном конце пластины и на оси симметрии ее верхней грани, такой график показан на рис. 12.7. Здесь хорошо видны высокочастотные свободные колебаний пластины, возбужденные ударным нагружением.

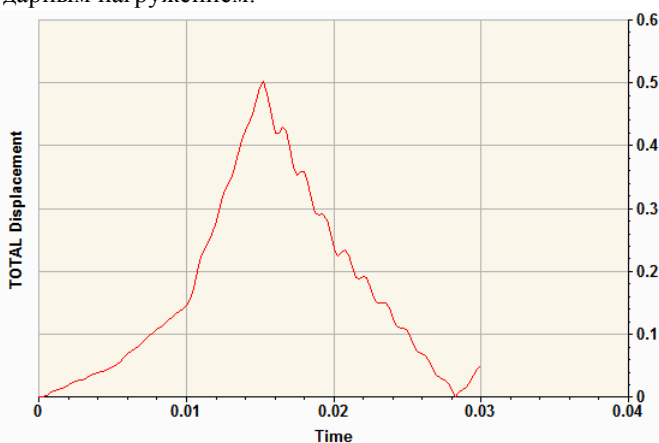


Рис. 12.7. Результат расчета переходного процесса

С помощью ввода номера начального и конечного моментов времени (*Start Set* и *End Set*) можно выбрать интересующий интервал времени (в данном случае 0 – 0,30 с).

При необходимости отрисовки подобного графика для нескольких точек, показанных на рис. 12.1, предварительно следует установить их номера. Для этого выполним щелчок правой кнопкой мыши по строке *Total Nodes* в окне «дерева» проекта (рис. 12.8), выберем команду *Query Display* и укажем последовательно нужные точки курсором. Их номера и координаты отображаются на экране. Введем установленные номера необходимых точек в окно *ID* и нажмем пиктограммную кнопку, показанную на рис. 12.6 стрелкой 2.

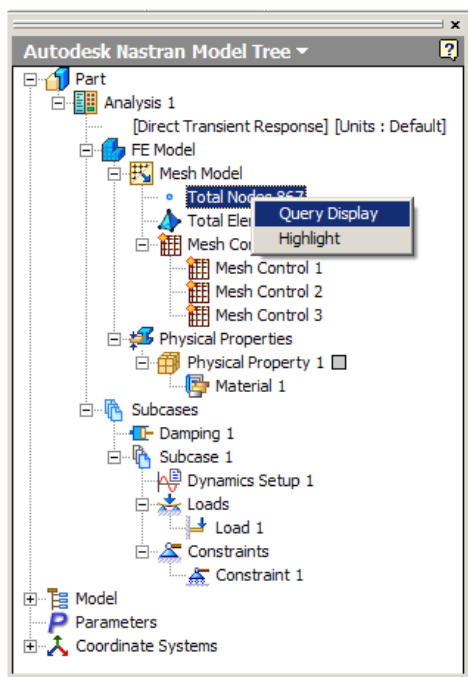


Рис. 12.8. Ввод команд отображения результатов решения задачи о переходном процессе

Дальнейшие действия по построению графика (рис. 12.9) не отличаются от описанных выше при построении рис. 12.7.

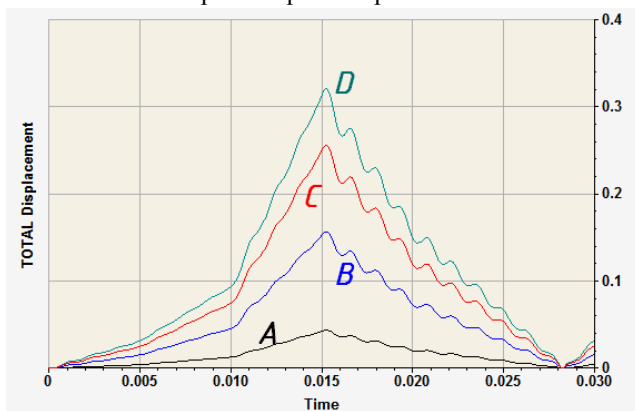


Рис. 12.9. Результаты решения задачи о переходном процессе (буквенные обозначения соответствуют точкам на рис. 12.1)

12.2. Метод суперпозиции собственных форм колебаний

Метод суперпозиции собственных форм колебаний (известен также как метод главных координат) основан на свойстве их ортогональности. Этот метод используется тогда, когда анализируемый переходный процесс может быть представлен в виде суммы нескольких независимых гармонических колебаний, происходящих с низшими частотами. Для этого прикладываемая нагрузка должна описываться относительно малым числом низкочастотных гармонических составляющих (в этом случае она уже практически не является ударной).

При реализации метода суперпозиции демпфирование может быть только конструкционным и, в связи с этим учитывается в меньшей степени, чем при расчетах методом прямого интегрирования. Кроме того, шаг расчета не может автоматически корректироваться, а единственной допускаемой нелинейностью является контакт типа «узел в узел».

Алгоритм решения задачи в данном случае практически полностью совпадает с рассмотренным в предыдущем случае и предусматривает выполнение следующих действий.

1. Вход в среду Autodesk Nastran In-CAD, импорт геометрии модели. Установка типа решаемой задачи (расчет переходного процесса методом суперпозиции собственных форм — Modal Transient Response).

2. Задание (импорт) свойств материалов.

3. Задание физических свойств сетки конечных элементов.

4. Формирование сетки конечных элементов.

5. Наложение кинематических граничных условий.

6. Наложение силовых граничных условий (как правило, в табличной форме).

7. Установка (при необходимости) параметров демпфирования.

8. Установка параметров модального анализа.

9. Установка параметров динамического анализа

10. Запуск задачи на выполнение.

11. Постпроцессорная обработка результатов, включающая отображение результатов решения задачи (перемещений узлов, напряжений и т. д.) в зависимости от частоты.

Рассмотрим пример расчета переходного процесса при ударном нагружении стальной пластины, имеющей размеры $100 \times 340 \times 35$ мм, которая жестко закреплена одной из боковых сторон и нагружена силой P , перпендикулярной плоскости пластины и изменяющейся в соответствии с зависимостью (схемы закрепления и нагружения аналогичны таковым для пластины, показанной на рис. 12.1):

$$P = \sum A_k \cdot \sin(k \cdot f)$$

В табл. 12.2 приведены значения амплитуд A_k , коэффициентов k и частот f .

Таблица 12.2

Параметры закона нагружения пластины

k	0,1	10	20	30
f , Гц	0,1	10	20	30
A_k , Н	1	25	10	15

Закон нагружения пластины принимает вид рис. 12.10.

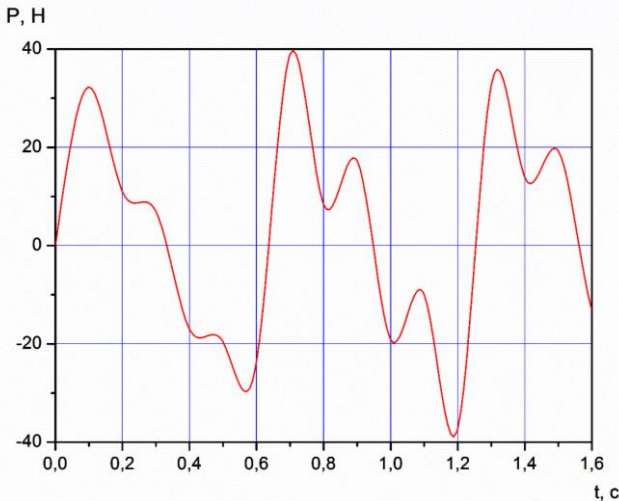


Рис. 12.10. Закон нагружения пластины

Действия при реализации пп. 1 – 4 алгоритма решения задачи не отличаются от описанных ранее, поэтому здесь не рассматриваются.

«Дерево» модели, отображаемое в боковом окне интерфейса при решении рассматриваемой задачи, показано на рис. 12.11. Отметим курсором строку *Modal Setup*, нажмем правую кнопку мыши и выбрав в контекстном меню строку *Edit*, получим следующее диалоговое окно (рис. 12.12), позволяющее установить опции предварительно выполняемого модального анализа. Из рис. 12.12 следует, что выполняется поиск десяти значений частот собственных колебаний, для чего из трех возможных методов решения в разворачивающемся списке *Extraction Method* выбран итерационный (указан стрелкой).

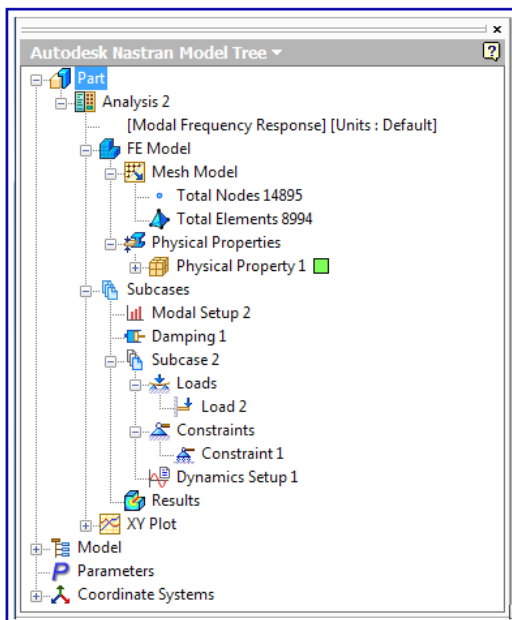


Рис. 12.11. «Дерево» модели при решении задачи методом суперпозиции собственных форм колебаний

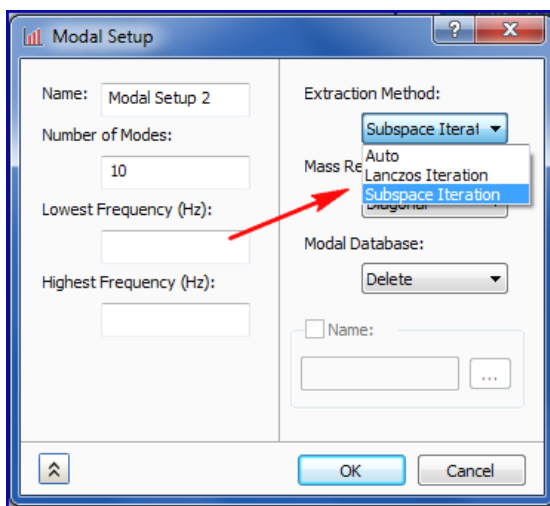


Рис. 12.12. Ввод опций модального анализа при решении задачи методом суперпозиции собственных форм колебаний

Задание возмущающих сил выполняется при помощи диалогового окна, показанного на рис. 12.13. В соответствии с условием задачи к двум узлам пластины (при выборе курсором их имена отображаются в поле *Selected Entities*) прикладываются сосредоточенные силы, представляемые в виде совокупности составляющих вдоль координатных осей (см. разворачивающийся список *Direction*). Поскольку силы действуют только вдоль оси *OZ* и одинаковы по величине, значение их относительной амплитуды вводится в поле *Fz*. Истинные значения возмущающей силы определяются при помощи таблицы *Table 1* (пиктограммная кнопка для ее редактирования указана стрелкой).

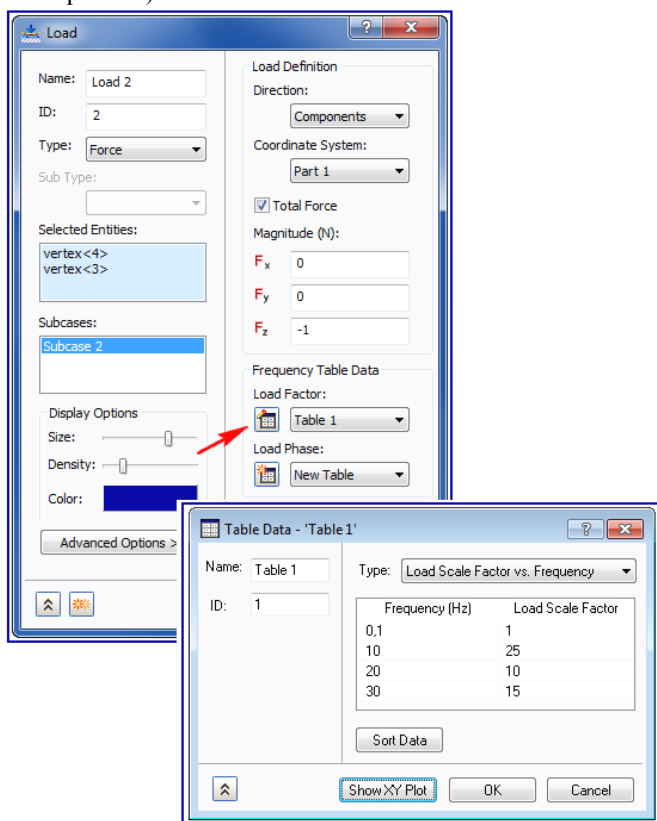


Рис. 12.13. Ввод возмущающей силы в задаче, решаемой методом суперпозиции собственных форм колебаний

При формировании таблицы в списке *Type* следует выбрать строку *Load Scale Factor vs Frequency* и ввести в соответствующие столбцы значе-

ния частот спектра возмущающего усилия и соответствующих им амплитуд последнего (упомянутый выше гармонический анализ возмущающего усилия как раз обеспечивает корректность формирования таблицы). Пиктограммная кнопка *Show XY Plot* позволяет вывести данные таблицы в разнообразных графических формах.

В соответствии с ранее указанной особенностью решения задачи методом суперпозиции собственных форм колебаний введем минимальное значение коэффициента так называемого *модального демпфирования*, с помощью которого вычисляется матрица демпфирования. Для этого выберем в «дереве» модели строку *Damping 1* и в поле *Damping Value* введем значение 0,01 % (рис. 12.14).

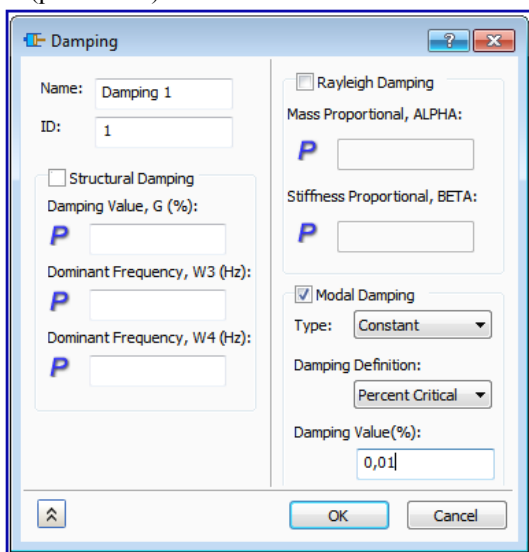


Рис. 12.14. Ввод значения коэффициента модального демпфирования

Далее необходимо ввести опции динамического анализа (см. строку *Dynamics Setup 1* в «дереве» модели). При вводе этой команды на экран выводится диалоговое окно (рис. 12.15), откуда следует, что решение отыскивается в диапазоне частот 10 – 100 Гц (этому соответствует выбор закладки *Frequency Range* и значения минимальной и максимальной частот, вводимые в поля *Lowest Frequency, Hz* и *Highest Frequency, Hz*). Этот интервал разбивается на пятнадцать подынтервалов (см. поле *Number of Points Between Modes*), значения внутри которых аппроксимируются логарифмической функцией (см. отметку \odot в соответствующем поле раздела *Increment*).

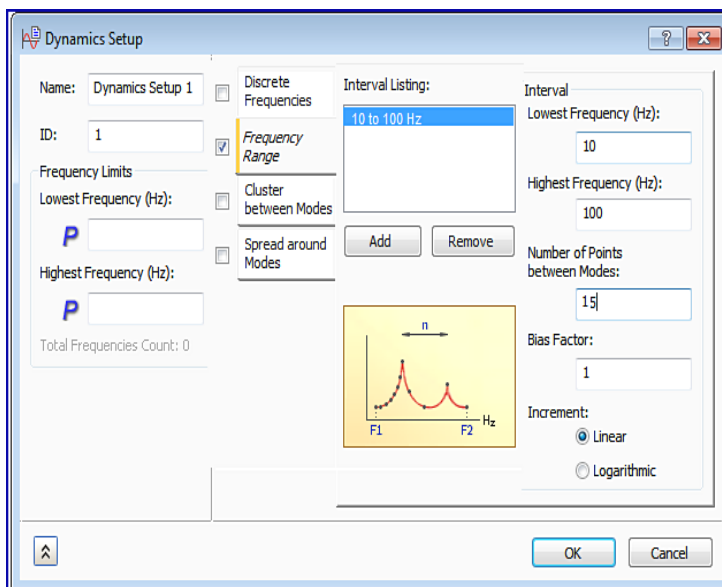


Рис. 12.15. Ввод опций динамического анализа при решении задачи методом суперпозиции собственных форм колебаний

После этого задача запускается на выполнение, по окончании которого могут быть выведены зависимости от частоты амплитуд различных параметров вибрационного состояния пластины (рис. 12.16).

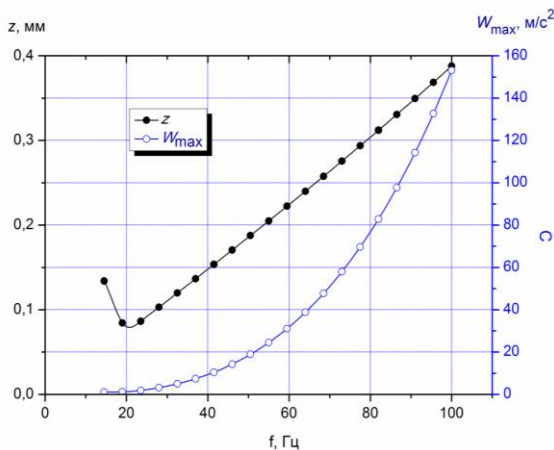


Рис. 12.16. Амплитудно-частотная характеристика максимальных значений перемещений и ускорений точек пластины

Практически тот же алгоритм реализуется при решении задачи методом случайного отклика (Random Response). Такой анализ выполняется для механических систем, подверженных воздействию случайных возмущений. В связи с этим при решении такой задачи дополнительно должна быть задана функция спектральной плотности возмущающего усилия.

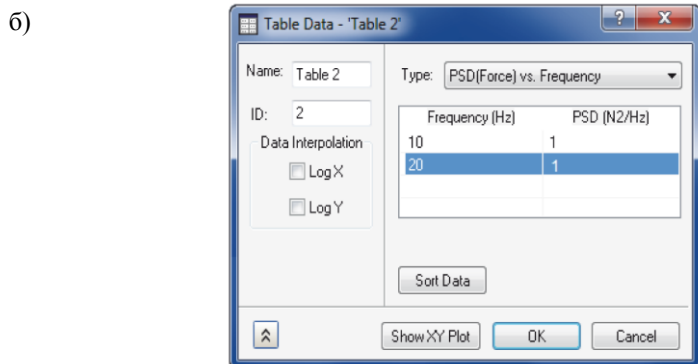
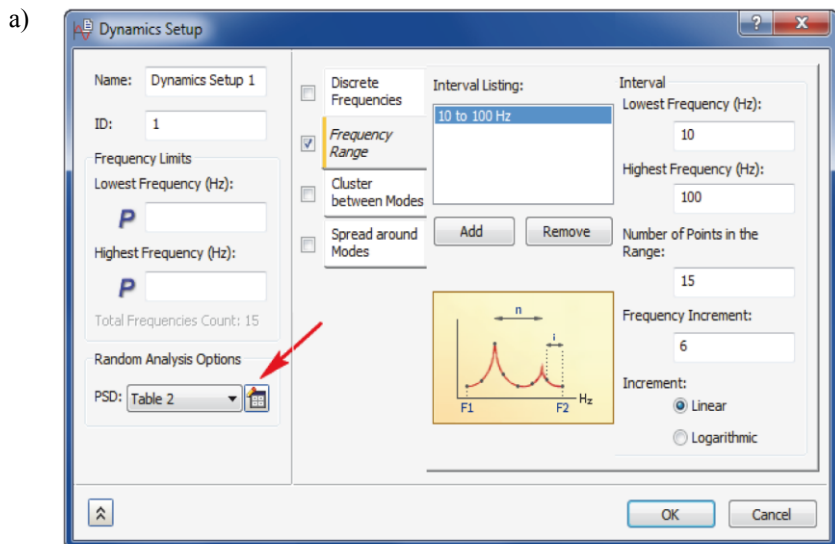


Рис. 12.17. Ввод опций динамического анализа при решении задачи методом случайного отклика

Следует отметить, что спектральной плотностью какой-либо случайной величины называют частотную функцию, определяющую ее спектр и характеризующую распределение мощности возмущающей силы по

частотам спектра. В среде Autodesk Nastran In-CAD такая функция задается в табличной форме в процессе ввода опций динамического анализа (как правило, эта таблица формируется вручную). Панель ввода опций динамического анализа для рассмотренной в этой главе модели пластины принимает вид, показанный на рис. 12.17. После задания ранее указанных параметров динамического анализа (интервала частот, числа шагов и др. — рис. 12.17, а) следует нажать пиктограммную кнопку *PSD* (на рисунке указана стрелкой). При этом на экран выводится таблица (рис. 12.17, б), из которой видно, что в диапазоне частот 10 ... 20 Гц составляющие возмущающего усилия обладают одинаковой мощностью. Значения последней могут соответствовать величине составляющих спектра возмущающей силы или возмущающего вынужденного движения (характеристикой последнего как правило является ускорение). Выбор при формировании таблицы силы или ускорения производится при помощи разворачивающегося списка *Type* (при необходимости задать спектральную плотность возмущающего движения в этом списке следует предварительно выбрать строку *PSD (Acceleration) vs. Frequency*).

Решение методом случайного отклика рассмотренной в этой главе задачи с такими же прочими настройками дает аналогичный результат (см. рис. 12.16). Следует отметить, что в среде приложения Autodesk Nastran-in CAD версии 2015 г. возможна только подготовка к решению явным методом задачи о быстропеременном переходном процессе.

13. НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА О ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

Необходимость решения нелинейной задачи о переходном процессе может возникать, например, при анализе быстропеременного взаимодействия двух тел, обладающих различной жесткостью, в том числе при их контактно-механическом взаимодействии. Как правило, при реализации алгоритма решения подобных задач выполняются следующие действия (предполагается, что геометрия модели построена в среде приложения Autodesk Inventor или импортирована).

1. Вход в среду приложения Autodesk Nastran In-CAD, выбор типа решаемой задачи *Nonlinear Transient Response*.
2. Выбор свойств сетки конечных элементов для тел, входящих в модель: материалы (если они не были импортированы из среды CAD-системы), тип, размеры и т. д.
3. Построение сетки конечных элементов.

4. Задание (при необходимости) свойств контактного взаимодействия тел (при анализе сборок).
5. Задание нагрузок.
6. Задание кинематических граничных условий.
7. Задание параметров демпфирования.
8. Задание опций нелинейности.
9. Задание опций динамического анализа.
10. Запуск задачи на выполнение.
11. Постпроцессорная обработка результатов.

Рассмотрим реализацию этого алгоритма на примере анализа соударения стального сплошного шара, падающего на квадратную стальную тонкую пластину (рис. 13.1). Пластина закреплена по всему периметру, падение осуществляется под действием силы тяжести шара.

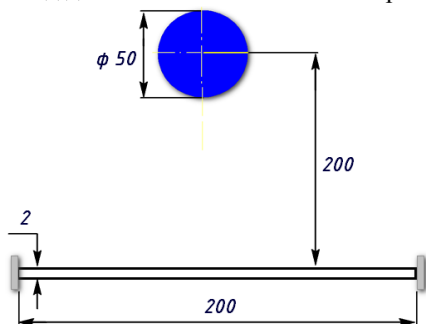


Рис. 13.1. Расчетная схема для решения нелинейной задачи о переходном процессе

После создания модели в среде *Autodesk Inventor* и загрузки приложения *Nastran In-CAD* следует выбрать тип задачи *Nonlinear Transient Response* (для этого используется пиктограммная кнопка *Edit* на инструментальной ленте). Допустим, что материалы для шара и пластины были заданы при разработке модели. Поскольку толщина пластины существенно меньше остальных размеров модели, выберем для ее моделирования двумерные конечные элементы типа *Shell*; шар при этом будет моделироваться объемными элементами типа *Solid*. Для установки размеров элементов необходимо нажать на инструментальной ленте приложения пиктограммную кнопку *Table* и установить размеры ребер конечных элементов. С целью упрощения модели принято, что для обоих типов конечных элементов максимальный размер ребер равен 10 мм. Панели *Physical Properties* и *Mesh Table*, предназначенные для выполнения этих настроек, показаны на рис. 13.2.

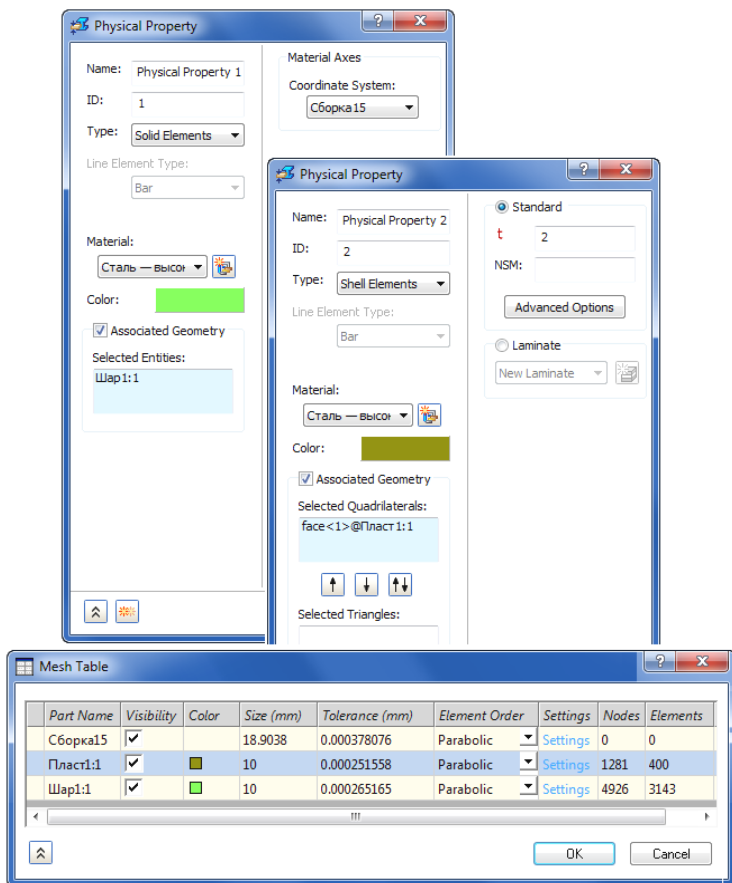


Рис. 13.2. Установка свойств и размеров конечных элементов в нелинейной задаче о переходном процессе

Далее следует установить параметры контактного взаимодействия деталей. Для этого нажмем пиктограммную кнопку *Contact Type* на инструментальной ленте или строку *Surface Contact 1* в «дереве» модели и установим вид контактного взаимодействия (*General* — контактное взаимодействие общего вида) и его тип (*Surface to Surface* — поверхность в поверхность). Примем, что контактное взаимодействие осуществляется без трения и без начального взаимного проникновения деталей. В связи с этим приняты равными нулю коэффициент трения и глубина начального проникновения (соответственно *Coefficient of Friction* и *Penetration Surface Offset*). Поскольку в начальном положении шар и пластина не соприкаса-

ются, установим контактную и целевую поверхности вручную. Пусть целевой (*Slave Entity*) будет часть поверхности пластины, а контактной (*Master Entity*) — часть сферической поверхности шара¹ (рис. 13.3).

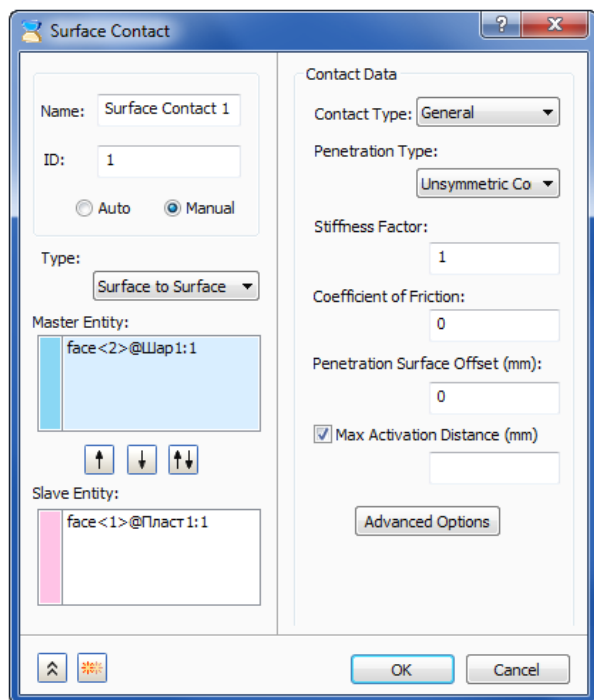


Рис. 13.3. Установка параметров контактного взаимодействия в нелинейной задаче о переходном процессе

Подготовленная к наложению граничных и начальных условий модель показана на рис. 13.4.

Задание параметров конструкционного демпфирования в целом не отличается от описанного в гл. 12. Выполним двойной щелчок мышью по строке *Damping* в «дереве» модели и в поле *Dominant Frequency, W4* одноименной панели (рис. 13.5) зададим значение доминантной частоты колебаний, равное 100 Гц. Это позволит учесть все низкочастотные возмущающие сигналы.

¹ Целесообразно при разработке моделей тел разделить их наружные поверхности на логические части, что позволит уменьшить размеры области контакта.

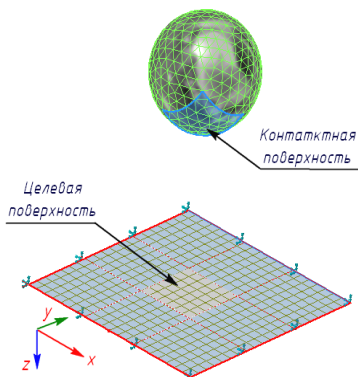


Рис. 13.4. Конечно-элементная модель для расчета нелинейного переходного процесса соударения шара и пластины

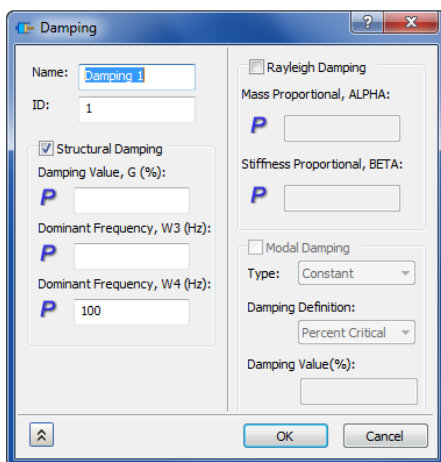


Рис. 13.5. Задание параметров демпфирования в нелинейной задаче о переходном процессе

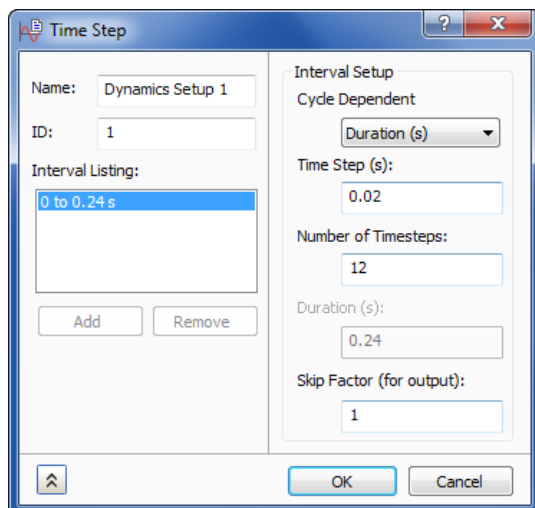


Рис. 13.6. Задание параметров динамического анализа демпфирования в нелинейной задаче о переходном процессе

Далее последовательно введем параметры динамического анализа и нелинейности, производя в каждом случае двойные щелчки мышью по строкам, соответственно, *Dynamic Setup* и *Nonlinear Setup* в «дереве»

модели. В первом случае следует задать значение шага по времени и числа шагов, что в совокупности определит расчетное время переходного процесса (это время может быть предварительно оценено по общеизвестным физическим формулам). В данном случае приняты значения шага (*Time Step*) и числа шагов (*Number of Timesteps*), соответственно равные 0,02 с и 12 с. Эти значения вводятся в одноименные поля панели *Time Step* (рис. 13.6).

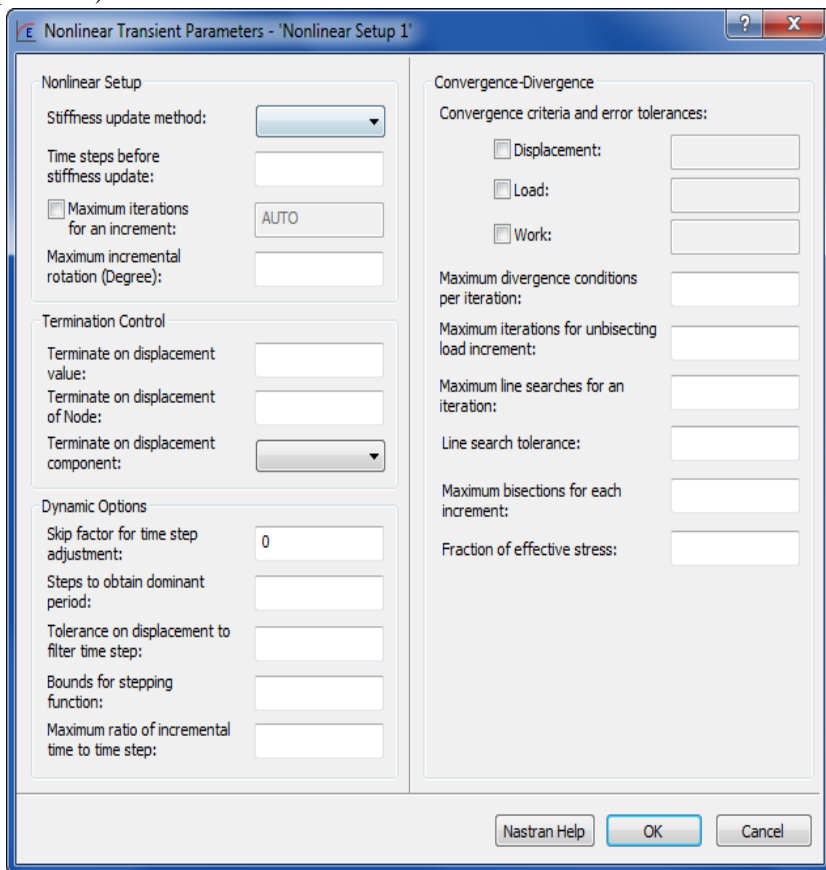


Рис. 13.7. Задание параметров нелинейности

В простейшем случае настройка параметров нелинейности сводится к заданию максимального числа итераций (*Maximum Iterations*). Кроме того, в поля диалоговой панели *Nonlinear Transient Parameters* могут быть введены (выбраны) величина шага расчета по времени, соответствующего

переопределению матрицы жесткости¹ системы (*Time Step Before Stiffness Update*), метод этого переопределения (*Stiffness Update Method*), условия окончания итерационного процесса (*Termination Control*) и ряд других параметров. Из рис. 13.7 следует, что значения всех этих параметров приняты по умолчанию.

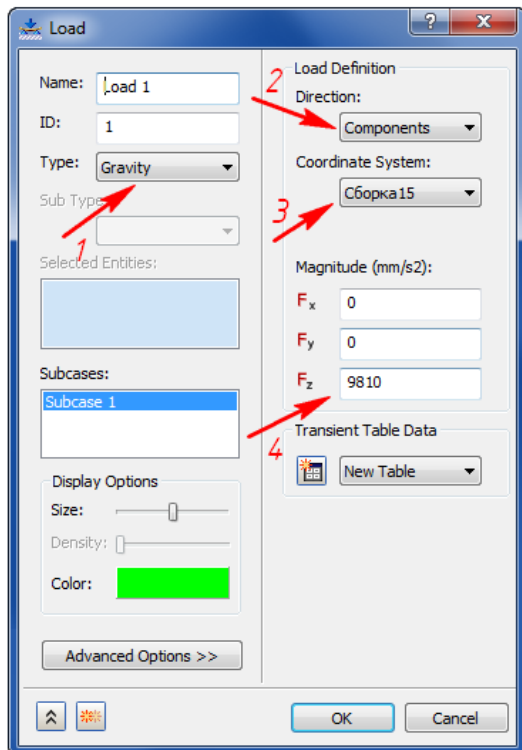


Рис. 13.8. Задание силовых граничных условий

В качестве кинематических граничных условий зададим закрепление узлов по всему периметру пластины по всем степеням свободы. Для задания силовых граничных условий двойным щелчком мыши по строке Loads в «дереве» модели или нажатием одноименной пиктограммной кнопки на инструментальной ленте вызовем на экран диалоговую панель (рис. 13.8), при помощи которой выберем в разворачивающихся списках тип нагрузки

¹ Матрица жесткости системы может переопределяться в связи с контактным взаимодействием тел, если оно является длительным.

(в списке *Type* выбрана сила тяжести *Gravity*, указанная стрелкой 1); способ ввода величины и направления (список *Direction*, выбран ввод составляющих *Components* — стрелка 2) в системе координат модели (*Coordinate System* — стрелка 3). Поскольку сила тяжести действует в направлении координатной оси z (см. рис. 13.4), в поле F_z введено значение ускорения свободного падения — стрелка 4. Далее задача запускается на выполнение.

Графические зависимости от времени значений скорости и ускорения шара показаны на рис. 13.9.

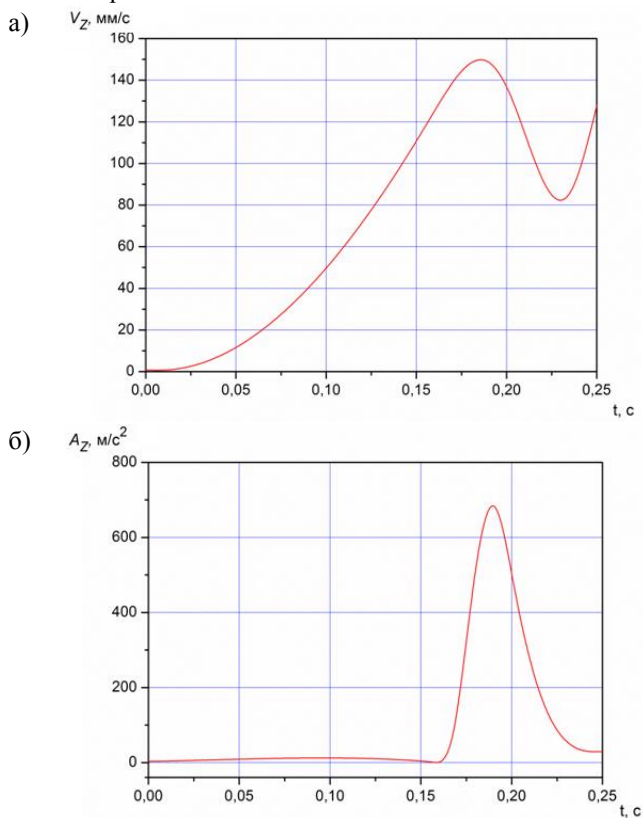


Рис. 13.9. Изменение скорости (а) и ускорения (б) центра масс шара при его падении на пластину

Если произвести щелчок правой кнопкой мыши по строке *XY Plot* и далее выбрать команду *New* в контекстном меню (рис. 13.10), то с помощью одноименной панели (рис. 13.11) могут быть выбраны различные другие результаты расчета.

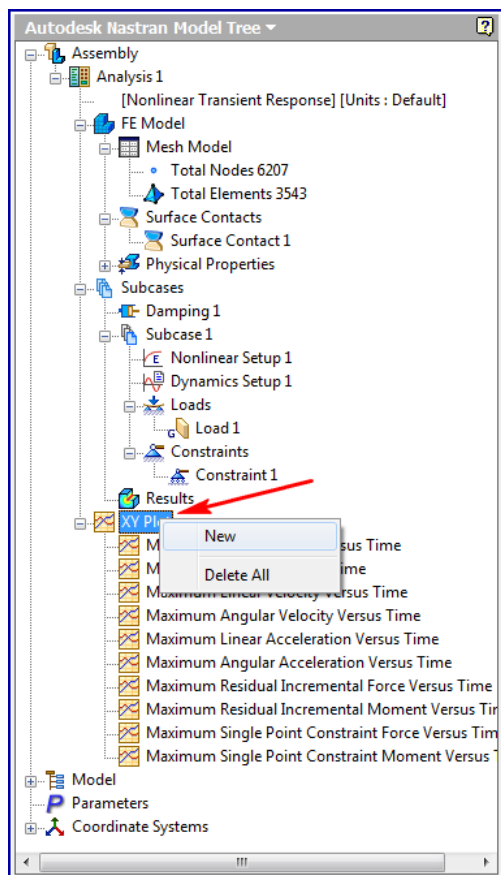


Рис. 13.10. Вывод результатов расчета нелинейного переходного процесса падения шара на тонкую пластину

Из рис. 13.11 следует, что в графической форме могут быть выведены зависимости от времени многочисленные результаты расчета, которые выбираются в разворачивающемся списке *Results Data* (показан стрелкой 1). Эти результаты могут относиться к узлам или элементам, в соответствии с чем отметка \odot должна быть поставлена в поле *Node* или *Element*. Выбор этих объектов производится курсором на модели; при выборе их номера отображаются в поле *ID*.

Начальное и конечное значения времени для отображения графика выбираются из раскрывающихся списков *Start Set* и *End Set*. В поле *Name* может быть введено название графика, вывод которого производится в отдельном окне после нажатия пиктограммной кнопки *Show XY* (см. стрелку 2).

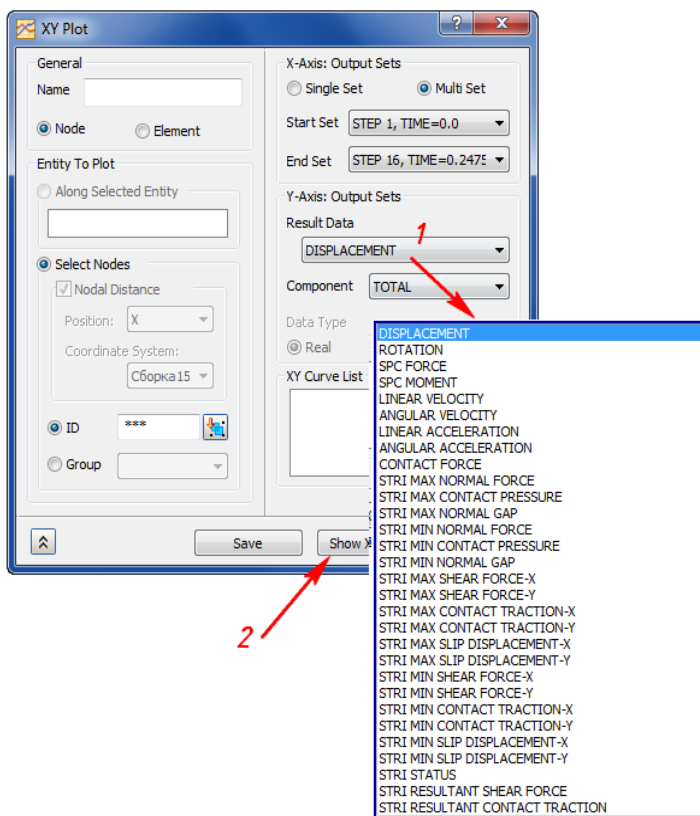


Рис. 13.11. Вывод результатов расчета

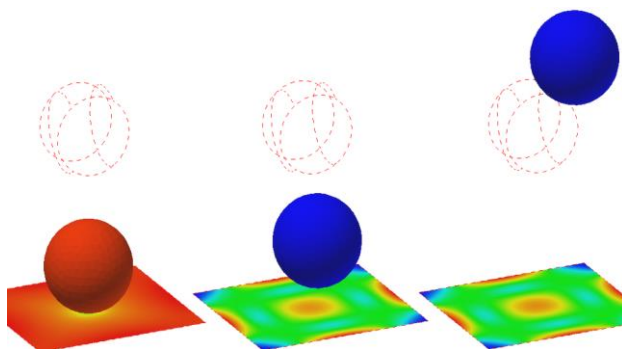


Рис. 13.12. Поля эквивалентных напряжений в шаре и пластине в моменты времени, соответствующие соударению (а), началу обратного движения (б) и максимальному подъему после отскока от пластины (в)

При помощи пиктограммной кнопки *Animate* на инструментальной ленте выбранные результаты расчета могут быть анимированы (рис. 13.12).

Заключение

В пособии были рассмотрены примеры решения типовых задач в среде приложения среднего уровня Autodesk Nastran In-CAD, применение которого значительно расширяет возможности конструктора по оперативному принятию решений, способствующих повышению прежде всего оперативности при разработках изделий различного назначения. Понятно, что этот программный продукт не должен рассматриваться как альтернатива наиболее известным CAE-продуктам тяжелого уровня: ANSYS, MSC Nastran, NE Nastran и др. При этом результаты расчета в среде Autodesk Nastran In-CAD хорошо согласуются с аналогичными, полученными как при численном моделировании в среде «тяжелых» продуктов, так и аналитически. Все это позволяет рекомендовать применение рассматриваемого приложения для решения практических задач в различных отраслях техники и получать при этом корректные и достоверные результаты.

Задачи, рассмотренные в пособии, подтверждают возможность использования программного продукта Autodesk Nastran In-CAD для динамического анализа, оценки виброактивности и прочности деталей и механизмов двигателей внутреннего сгорания, таких как в работах [4], [14], [15] и других машиностроительных конструкций.

Возможности этого приложения постоянно расширяются. Описанные в пособии задачи успешно реализуются при помощи продукта версии 2015 г., впервые ставшей доступной для работы, однако в среде продукта Autodesk Nastran In-CAD-2016 предполагается осуществить уже не только подготовку задачи о быстропеременном переходном процессе к решению явным методом (Explicit Dynamics), но и непосредственно само ее решение.

Библиографический список

1. Ваншейдт, В. А. Конструкция и расчеты прочности судовых дизелей / В. А. Ваншейдт. — Л.: Судостроение, 1969. — 639 с.
2. Вольская, Н. С. Моделирование автомобильной пневматической шины, взаимодействующей с твердой неровной опорной поверхностью / Н. С. Вольская, Я. Ю. Левенков, О. А. Русанов // Наука и образование: электронный науч.-техн. журнал. — 2013. — № 5. — С. 107–124.
3. Воробьев, Д. В. Характеристики и источники механических воздействий на радиоэлектронные средства / Д. В. Воробьев, Н. С. Реута, Н. В. Горячев // Молодой ученый. — 2014. — № 19. — С. 182–185.
4. Жуков, В. А. Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами / В. А. Жуков, А. И. Яманин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 109–118.
5. Рычков, С. П. MSC. VisualNastran для Windows / С. П. Рычков. — М.: NT Press, 2004. — 552 с.
6. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. — М.: Наука, 1986. — 512 с.
7. Чайнов, Н. Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский [и др.]. — М.: Машиностроение, 2008. — 496 с.
8. Шимкович, Д. Г. Расчет конструкций в MSC / Nastran for Windows / Д. Г. Шимкович. — М.: ДМК Пресс, 2003. — 448 с.
9. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC. Visual Nastran for Windows / Д. Г. Шимкович. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 704 с.
10. Шимкович Д. Г. FEMAP & NASTRAN. Инженерный анализ методом конечных элементов / Д. Г. Шимкович. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 701 с.
11. Яманин, А. И. Расчет быстропеременных процессов в среде ANSYS/LS-Дуна. / А. И. Яманин, В. Ф. Кутенев, Г. Г. Тер-Мкртчян. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2011. — 96 с.
12. Яманин, А. И. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении / А. И. Яманин, Ю. В. Голубев, А. В. Жаров [и др.]. — М.: Машиностроение, 2005. — 480 с.
13. Яманин, А. И. Расчет напряженно-деформированного состояния шатунов транспортных поршневых двигателей / А. И. Яманин, М. Д. Бойков, И. А. Яманин // Турбины и дизели. — 2009. — № 3. — С. 9–12.

14. Яманин, А. И. Численное моделирование виброактивности поршневых двигателей с продолженным расширением рабочего тела / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. науч.-техн. журнал. — 2014. — № 1. — С. 27–30.

15. Яманин, А. И. Оценка прочности шатунов с различным поперечным сечением стержня / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — № 2 (42). — С. 355–363.

Яманин Александр Иванович,
д-р техн. наук, проф.,
Жуков Владимир Анатольевич,
д-р техн. наук, проф.,
Барышников Сергей Олегович,
д-р техн. наук, проф.

**РАСЧЕТ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ В СРЕДЕ
Autodesk Nastran In-CAD**

Учебное пособие



199106, Санкт-Петербург, 22 линия, 9
тел./факс 812 -322-33-42, 322-77-26
e-mail:izdat@gumrf.ru

Ответственный за выпуск
Редактор
Компьютерная верстка

Сатикова Т. Ф.
Карамзина Н. А.
Тюленева Е. И.

Подписано в печать 27.12.2017
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New
Roman Усл. печ. л. 10,0. Тираж 100 экз. Заказ № 448/17