

**Методические указания к
выполнению лабораторных
работ по теме “Линейный
статический анализ
конструкций в Siemens NX”**

Глава 1. Линейный статический анализ

Как показывает практика, большую часть задач механики деформируемого твердого тела составляют задачи статического анализа. Статический анализ предназначен для определения напряжений, деформаций, перемещения, реакций, возникающих в конструкции в условиях статического нагружения. В свою очередь, статический анализ делится на линейный и нелинейный, так как в некоторых ситуациях адекватное описание поведения конструкции невозможно без учета ее нелинейных свойств (нелинейное поведение материала, учет больших деформаций и перемещений, контактное взаимодействие и прочее).

Так как линейный статический анализ требует меньше вычислительных ресурсов по сравнению с нелинейными либо динамическими задачами, то не стоит забывать и про его вспомогательную функцию. Рекомендуется проведение линейного статического анализа конструкций в качестве предварительного проверочного этапа перед решением нелинейных и динамических задач с целью общего понимания поведения конструкции и проверки качества КЭ модели.

Данная глава посвящена описанию основных возможностей для проведения линейного статического анализа конструкций, реализованных в приложении **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** при использовании решателя NX Nastran.

Стоит отметить, что препостпроцессор **NX Расширенная симуляция (NX Advanced FEM)** также поддерживает решения для линейного статического анализа сторонних решателей:

- *ANSYS – Linear Statics;*
- *Abaqus – Static Perturbation.*

1.1. Линейный статический анализ

Линейный статический анализ конструкций – определение напряженно-деформированного состояния конструкций в условиях действия статических нагрузок при заданных граничных условиях.

Допущения, применяемые для линейного статического анализа:

- матрица жесткости не зависит от деформированного состояния;
- граничные условия не зависят от деформированного состояния;

- возникающие перемещения малы;
- только линейно-упругие свойства материалов;
- компоненты тензора напряжений и тензора деформаций связаны линейными соотношениями;
- не учитываются динамические эффекты.

В рамках линейного статического анализа решается система уравнений статического равновесия конструкции:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (1.1)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости элементов;
 $\{U\}$ – вектор узловых перемещений;
 $\{F\}$ – вектор внешних сил.

Линейный статический анализ поддерживает практически все типы конечных элементов решателя NX Nastran, за исключением некоторых для расширенного нелинейного анализа. Более полный перечень и краткое описание типов конечных элементов решателя NX Nastran дано в главе 3 части I, а также в [25].

Для линейного статического анализа можно использовать изотропные, ортотропные и анизотропные материалы. Тип материала и используемых конечных элементов определяет модель свойств материала с характерной картой решателя NX Nastran. Перечень карт материалов представлен в таблице ниже.

Карта NX Nastran	Тип элементов	Тип материала	Описание
MAT1	1D, 2D, 3D и 2D1/2 (осесимметричные)	Изотропный	Задание изотропных свойств
MAT2	2D	Анизотропный	Задание анизотропных свойств только для оболочечных элементов
MAT3	2D, осесимметричные	Ортотропный	Задание ортотропных свойств для осесимметричных элементов, а также для элементов анализа плоско-напряженного и плоско-деформированного состояний
MAT8	2D	Ортотропный	Задание ортотропных свойств только для оболочечных элементов
MAT9	3D	Анизотропный	Задание анизотропных свойств для 3D элементов
MAT11	3D	Ортотропный	Задание ортотропных свойств для 3D элементов

1.2. Методы решения системы уравнений равновесия

Для решения системы уравнений состояния равновесия в решателе NX Nastran применяются прямые либо итерационные методы [11]. К прямым методам относятся:

- прямой метод правого разложения (Right-Handed Method);
- прямой метод левого разложения с использованием метода Холецкого (Left-Handed Method);
- метод разреженных матриц (Sparse Method);
- метод для реализации параллельных вычислений (Parallel Method).

Так как декомпозиция матрицы жесткости происходит один раз, то с точки зрения экономии вычислительных и, соответственно, временных ресурсов применение прямых методов наиболее эффективно при решении задач с несколькими расчетными подслучаями. В случае если необходимо решить один расчетный случай и КЭ модель представлена в основном 3D конечными элементами, с точки зрения быстродействия и ресурсов оперативной памяти эффективнее использовать итерационные методы, позволяющие решать задачи большой размерности.

В решателе NX Nastran реализованы следующие итерационные методы:

- глобальный метод (Global), использующий полную матрицу для всей конструкции;
- элементный метод (Elemental), использующий матрицы элементов.

Для этих методов применяются следующие алгоритмы проведения предварительных эквивалентных преобразований (Preconditioning Methods):

- блочный метод неполного разложения сопряженных градиентов Холецкого (Block Incomplete Cholesky);
- метод Якоби (Jacobi);
- метод разложения Холецкого (Cholesky);
- упрощенный метод неполного разложения сопряженных градиентов Холецкого (Reduced Incomplete Cholesky).

1.3. Типы решений для линейного статического анализа

В рамках решателя NX Nastran реализованы три типа решений для линейного статического анализа:

- *SESTATIC 101 – Одно ограничение (Single Constraint)* – позволяет создавать несколько расчетных случаев с одинаковыми закреплениями, но разными нагрузками;
- *SESTATIC 101 – Много ограничений (Multi Constraint)* – позволяет создавать несколько расчетных случаев, при этом для каждого расчетного случая – свои закрепления и нагрузки;
- *SESTATIC101 – Суперэлемент (Superelements)* – тип решения для статического редуцирования матриц масс и жесткостей компонента общей расчетной модели, используемый при создании внешних суперэлементов (подструктур) конструкции.

В данной главе подробно будут рассмотрены первые два типа решений, основное отличие которых заключается в том, что при использовании второго типа (*SESTATIC 101 – Multi Constraint*) каждый расчетный случай будет содержать свой контейнер ограничений.

Для примера на рисунке 1.1 во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** представлено дерево расчетной модели с двумя решениями *Single Constraint* и *Multi Constraint*, каждый из которых содержит по два расчетных случая.

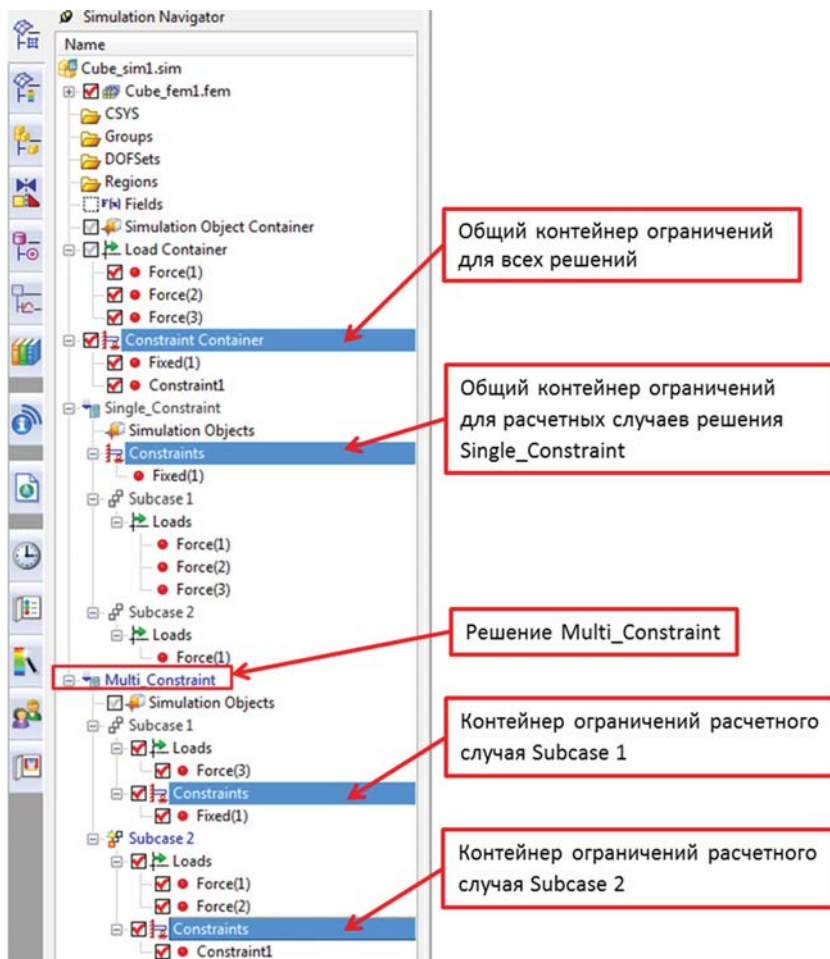


Рисунок 1.1. Дерево расчетной модели

Более подробное описание структуры дерева расчетной модели представлено в главе 4 части I.

Для создания нового расчетного случая необходимо в контекстном меню активного решения выбрать команду **Новый подкласс (New Subcase)**. В результате появляется диалоговое окно **Шаг решения (Solution Step)** с настройками для расчетного случая, которые будут описаны позже (рисунок 1.2).

Для удобства работы с решениями, содержащими несколько расчетных случаев с различными наборами нагрузок и ограничений, в приложении **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** реализован дополнительный инструмент **Менеджер подслучаев (Subcase Manager)**. Данный инструмент предназначен для контроля набора ограничений и нагрузок для каждого расчетного случая.

Для того чтобы вызвать этот инструмент, необходимо в контекстном меню активного решения выбрать команду **Менеджер подслучаев (Subcase Manager)**, как показано на рисунке 1.3. В по-

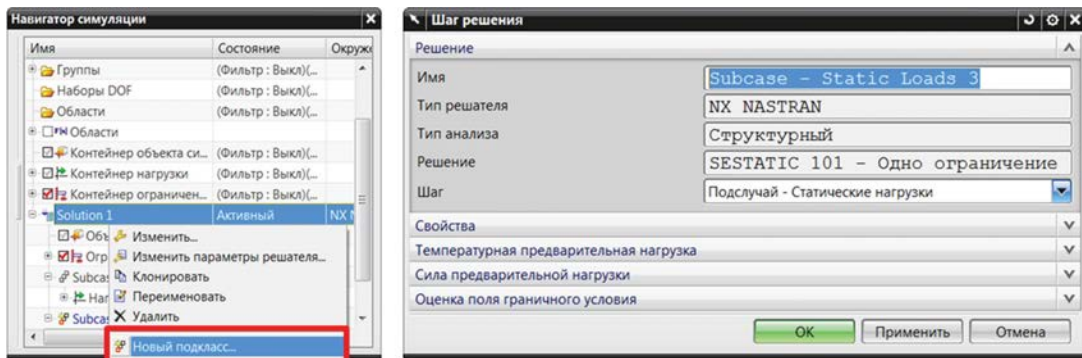


Рисунок 1.2. Создание нового расчетного случая

явившемся диалоговом окне **Менеджер ассоциативности подслучаев (Subcase Association Manager)** в выпадающем списке **Тип (Type)** в зависимости от выбранного типа решения **SESTATIC 101** присутствуют:

- только **Нагрузки (Loads)** для **SESTATIC 101 – Одно ограничение (Single Constraint)**;
- **Ограничения (Constraints)** и **Нагрузки (Loads)** для **SESTATIC 101 – Много ограничений (Multi Constraint)**.

Группа **Список подслучаев (Subcase List)** содержит таблицу со следующими столбцами:

- **Идентификатор подслучаев (Subcase ID)**;
- **Имя подкласса (Subcase Name)**;
- столбцы с именами всех присутствующих в коллекторах нагрузок или ограничений в зависимости от выбранного типа.

Количество строк в данной таблице равно количеству расчетных случаев активного решения, количество столбцов – количеству нагрузок либо ограничений для каждого расчетного случая. Все используемые нагрузки/ограничения расчетного случая обозначаются зеленой галочкой, соответственно, неиспользуемые – красным крестиком. Для включения в расчетный случай незадействованных нагрузок/ограничений достаточно одиночного нажатия правой клавиши мыши по соответствующему красному кресту и, наоборот, для исключения – по зеленой галочке.

Помимо этого, через контекстное меню столбцов или строк в **Менеджер подслучаев (Subcase Manager)** доступны следующие способы включения либо исключения нагрузок/ограничений в расчетные случаи решения (рисунок 1.3):

- **Set Column On** и **Set Column Off** – включение/исключение нагрузки или ограничения для всех расчетных случаев;
- **Set Row On** и **Set Row Off** – включение/исключение всех нагрузок или ограничений одного расчетного случая;
- **Set All On** и **Set All Off** – включение/исключение всех нагрузок или ограничений для всех расчетных случаев активного решения.

Подробное описание всех видов нагрузок, ограничений и способов их задания представлено в главе 4 части I.

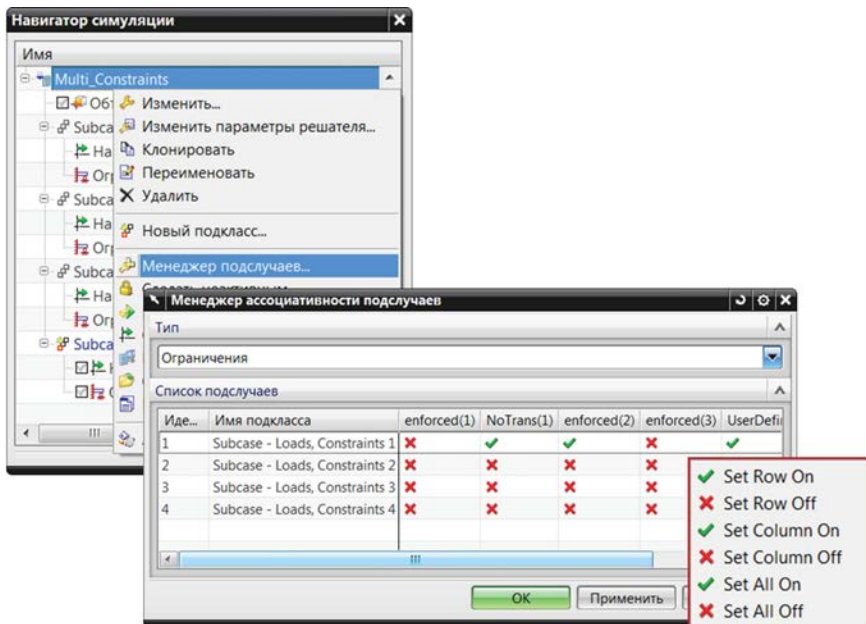


Рисунок 1.3. Менеджер подслучаев

Следующие дополнительные инструменты вызываются через контекстное меню активного решения (рисунок 1.4):

- *Клонировать (Clone)* – копия активного решения;
- *Удалить (Delete)* – удаление решения;
- *Проверка настройки модели (Model Setup Check)* – проверка настройки модели на правильность задания физических свойств, типов конечных элементов, нагрузок и ограничений, объектов симуляции;
- *Отчет механической нагрузки (Mechanical Load Summary)* – вывод суммарных усилий с возможностью выбора конкретной заданной нагрузки;
- *Обзор (Browse)* – прямой доступ к директории хранения файлов расчетной модели.

1.4. Задание параметров решения

Для создания решения линейного статического анализа необходимо во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** в дереве расчетной модели нажатием правой клавиши мыши на название расчетной модели вызвать контекстное меню и выбрать команду **Новое решение (New Solution)**. В появившемся диалоговом окне **Решение (Solution)** можно задать имя нового решения, выбрать

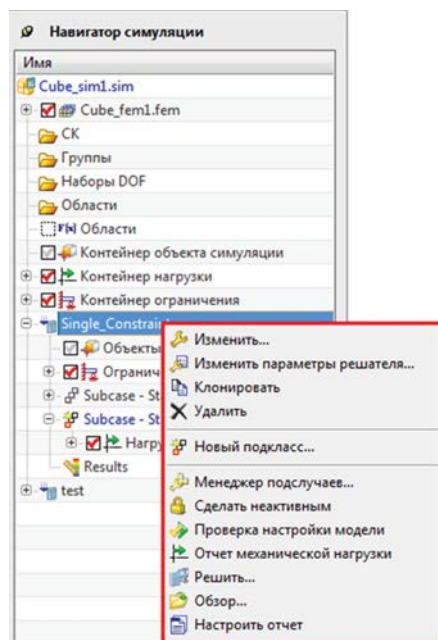


Рисунок 1.4. Контекстное меню активного решения

Решатель (Solver) – NX Nastran, Тип анализа (Analysis Type) – Структурный (Structural), Тип решения (Solution Type) – указать один из двух типов решений для линейного статического анализа (рисунок 1.5).

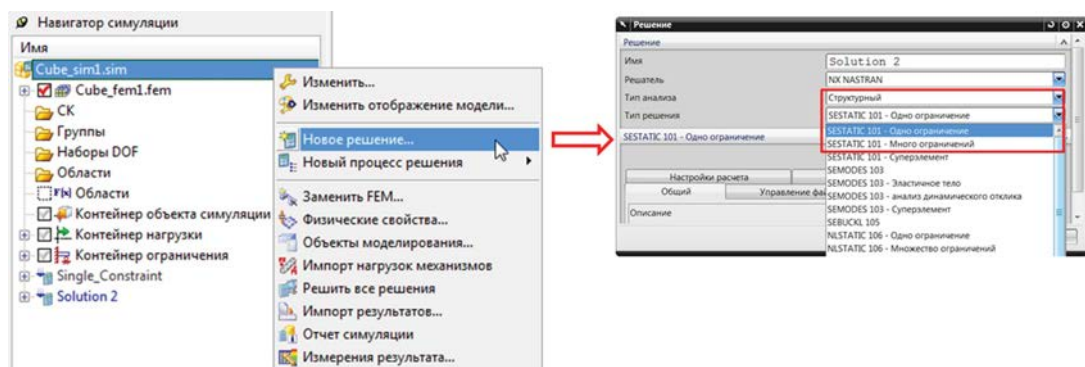


Рисунок 1.5. Создание решения линейного статического анализа

Также в диалоговом окне **Решение (Solution)** осуществляется установка параметров решения либо сразу при создании нового решения, либо при изменении уже созданного решения через контекстное меню узла решения посредством команды **Изменить (Edit)**.

Все параметры решения, задаваемые через интерфейс **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** в диалоговом окне **Решение (Solution)**, записываются во входной файл *.dat решателя NX Nastran. При этом названия всех вкладок данного диалогового окна, за исключением вкладки **Общий (General)**, соответствуют названиям блоков входного файла решателя NX Nastran.

1.4.1. Параметры вкладки **Общий**

Базовые параметры и опции решения расположены во вкладке **Общий (General)**:

- 1) **Описание (Description)** – введение дополнительной информации по текущему решению;
- 2) **Системные параметры (System Cells)** – параметры организации работы решателя NX Nastran (рисунок 1.6). Набор системных параметров с заданными значениями, установленных по умолчанию, является предпочтительным для большинства задач. Все системные параметры имеют порядковый номер в соответствии с их описанием [8]. Для задания дополнительных системных параметров либо изменения заданных необходимо вызвать команду **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)** и в появившемся диалоговом окне **System Cells n** выбрать интересующие параметры и присвоить необходимые значения, далее нажать **Добавить (Add)**. Для примера системный параметр **PARALLEL(107)** используется для распараллеливания вычислительного процесса, а задаваемое значение соответствует количеству процессоров, на которые будет происходить распределение вычислительных операций;
- 3) по умолчанию для решения задач линейного статического анализа используются прямые методы решения системы уравнений. Для использования итерационного метода необходимо установить параметр **Итерационный решатель элемента (Element Iterative Solver)**. При этом становится доступной команда **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)**, выбор которой вызывает диалоговое окно **Element Iterative Solver Options 1** для установки параметров итерационного метода;

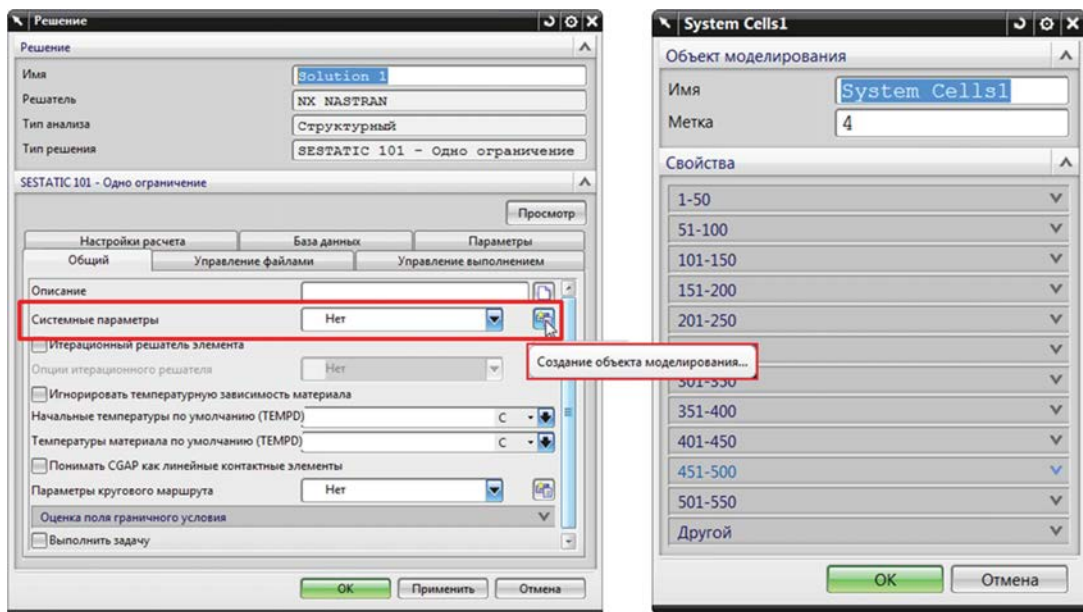


Рисунок 1.6. Параметры вкладки **Общий**

- 4) *Игнорировать температурную зависимость материала (Ignore Material Temperature Dependence)* – в процессе решения будут учитываться свойства материалов для температуры окружающей среды (если задано для материала) либо для температуры, заданной для параметра *Температура материала по умолчанию (Material Temperature Default)*;
- 5) *Понимать CGAP как линейные контактные элементы (Treat CGAP as Linear Contact Elements)* – при расчете все CGAP элементы будут приняты как линейные контактные элементы;
- 6) группа параметров *Оценка поля граничного условия (Boundary Condition Field Evaluation)* – используется в случае, если заданы нагрузки, переменные по времени, частоте или температуре:
 - *Расчет времени (Evaluation Time)* – для расчета используется значение для конкретной заданной временной точки;
 - *Расчет частоты (Evaluation Frequency)* – для расчета используется значение для конкретной заданной частоты;
 - *Рассчитанная температура (Evaluation Temperature)* – для расчета используется значение для конкретной заданной температуры;
- 7) *Выполнить задачу (Run Job in Foreground)* – при установке данного параметра при запуске задачи на решение (запуск решателя NX Nastran) отключается возможность параллельной работы в NX в течение вычислительного процесса и, соответственно, мониторинга вычислительного процесса в окне *Монитор решения (Solution Monitor)*.

1.4.2. Параметры вкладки **Управление файлами**

Параметры вкладки *Управление файлами (File Management)* (рисунок 1.7):

- *Текст, заданный пользователем (User Defined Text)* – введение команд, которые будут записаны в блок *FILE MANAGEMENT* входного файла решателя NX Nastran;

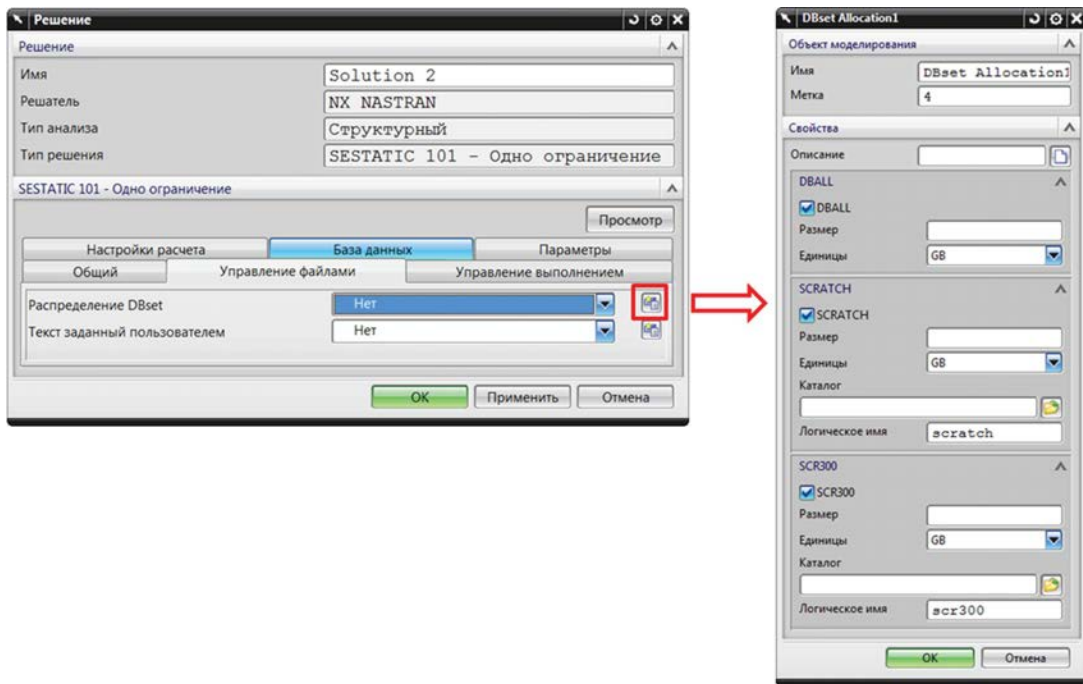


Рисунок 1.7. Параметры вкладки Управление файлами

- *Распределение DBset (DBset Allocation)* – установка параметров для управления максимальным размером и местоположением следующих файлов NX Nastran:
 - DBALL* – блоки DMAP, которые сохраняются для использования в последующих запусках;
 - SCRATCH* – размер и местоположение временных данных и файлов;
 - SCR300* – временное рабочее пространство для модулей.

1.4.3. Параметры вкладки Управление выполнением

Основным инструментом для проверки качества КЭ модели в NX Advanced Simulation является команда **Проверка модели (Model Check)**, критерии оценки которой связаны с пороговыми значениями используемого решателя. Подробное описание команды **Проверка модели (Model Check)** дано в главе 3 части I. Помимо этого, для оценки качества конечных элементов существует дополнительный параметр **Проверка геометрии (Geometry Check)** во вкладке **Управление выполнением (Executive Control)** диалогового окна **Решение (Solution)**. Значения для критериев качества конечных элементов, заданные по умолчанию, в большинстве случаев подходят для большинства КЭ моделей. Однако пользователь может задать свои собственные значения, выбрав в выпадающем списке **Задаваемый пользователем (User Defined)** и вызвав команду **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)**. Далее в появившемся диалоговом окне **Geometry Check Options** необходимо задать пороговые значения для различных типов конечных элементов и настроить тип вывода сообщения: в виде информации, предупреждения или фатальной ошибки. При выборе в выпадающем списке **Нет (None)** проверка осуществляться не будет.

Для ограничения времени решения в поле **Макс. время работы (Max Job Time)** можно ввести значение в секундах, после которого вне зависимости от результатов вычислительный процесс будет остановлен.

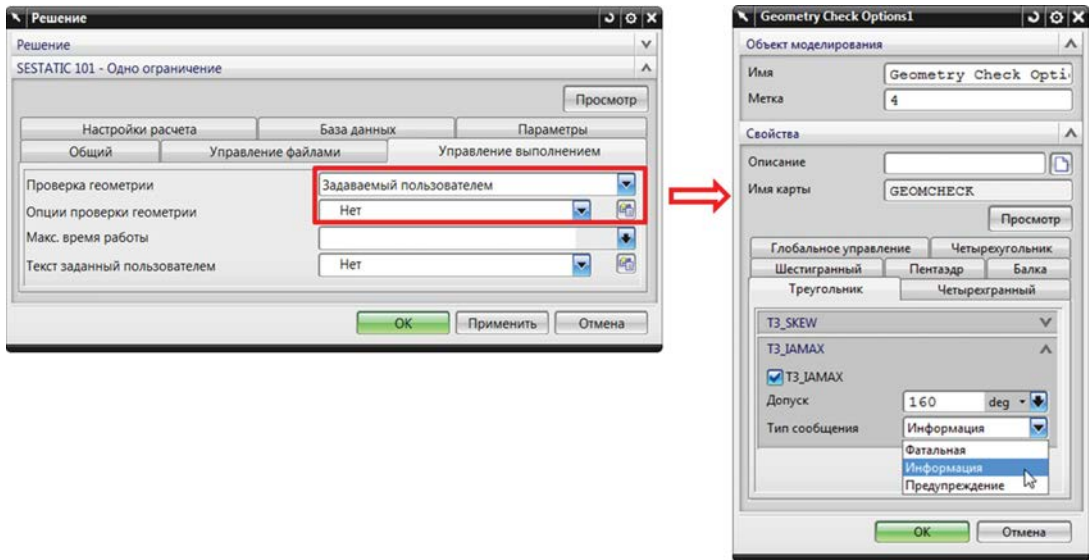


Рисунок 1.8. Параметры вкладки Управление выполнением

Запись дополнительных команд в блок *EXECUTIVE CONTROL* входного файла решателя NX Nastran осуществляется в поле списка *Текст, заданный пользователем* (*User Defined Text*).

1.4.4. Параметры вкладки Настройки расчета

Следующая вкладка *Настройки расчета* (*Case Control*) диалогового окна **Решение** (**Solution**) служит для установки параметров решения, записываемых в блок *CASE CONTROL* входного файла решателя NX Nastran. Здесь по порядку находятся следующие параметры (рисунок 1.9):

- 1) параметр *Эхо-запрос к массиву данных* (*Bulk Data Echo Request*) предназначен для управления выводом блока *BULK DATA* входного файла на печать в файл результатов *.f06;
- 2) *Проверки жесткого тела* (*Rigid Body Checks*) – проверка модели на возможность перемещений, близких по характеру к движению как жесткого тела [4, 8];
- 3) *Метод для жестких связей* (*Rigid Element Method*) – выбор метода обработки жестких элементов (*RBAR, RBE1, RBE2, RBE3* и *RR0D*):
 - *Линейное исключение* (*Linear Elimination*) – метод, используемый по умолчанию, не учитывает температурного расширения;
 - *Множители Лагранжа* (*Lagrange Multiplier*) – позволяет учитывать температурное расширение жестких элементов;
- 4) *Запросы вывода* (*Output Requests*) – задание набора величин для вывода в файл результатов *.op2 и последующей обработки во вкладке **Навигатор постпроцессора** (**Post Processing Navigator**). По умолчанию в приложении **NX Расширенная симуляция** (**NX Advanced Simulation**) задан объект моделирования *Structural Output Request1*, включающий следующий набор величин:
 - *Перемещение* (*Displacement*);
 - *Напряжение* (*Stress*);
 - *СПС силы* (*SPC Forces*) – силы реакции в закреплениях.

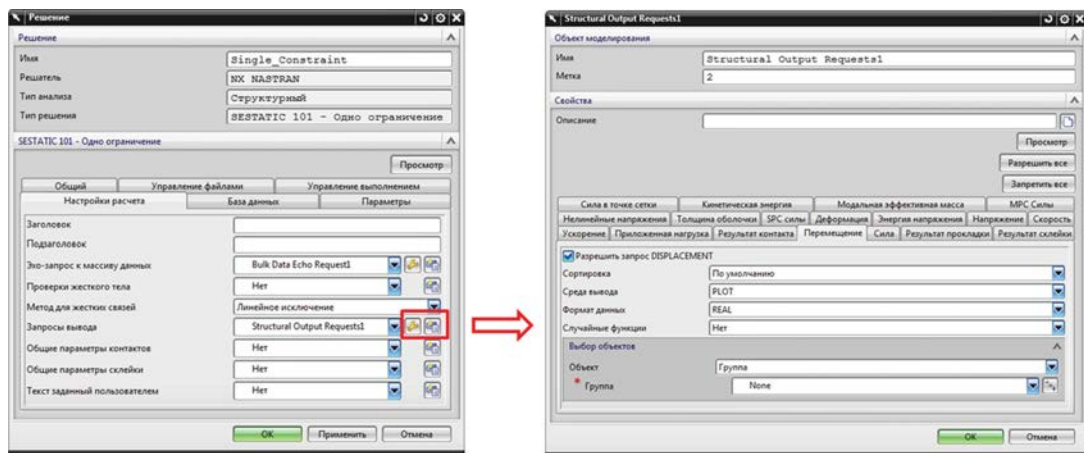


Рисунок 1.9. Параметры вкладки Настройки расчета

Для создания нового набора величин для вывода в файл результатов используется команда **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)**. Для редактирования уже созданного набора применяется команда **Изменить (Edit)**. Выполнение данных команд сопровождается вызовом диалогового окна **Structural Output Request «n»**, содержащего набор вкладок с настройками вывода результатов по одной для каждой величины (рисунок 1.9). Для добавления новой величины в набор результатов необходимо выбрать вкладку с одноименным названием и установить флажок, например для перемещения – **Разрешить запрос Displacement (Enable Displacement Request)**. Далее можно установить параметры для определения способа вывода информации в файл результатов *.f06, формата вывода данных, типа сортировки, а также выбрать ограниченную группу конечных элементов, для которой следует вывести данный результат.

Дополнительные команды диалогового окна **Structural Output Request «n»**:

- **Просмотр (Preview)** – вызов окна Информация, содержащего перечень всех заданных для вывода величин;
 - **Разрешить все (Enable All)** – выбор всех величин;
 - **Запретить все (Disable All)** – отмена всех выбранных величин;
- 5) **Общие параметры контактов (Global Contact Parameters)** – будут рассмотрены далее при описании линейного контакта в пп. 1.5.2;
 - 6) **Общие параметры склейки (Global Glue Parameters)** – будут рассмотрены далее в пп. 1.6.1;
 - 7) запись дополнительных команд в блок **CASE CONTROL** входного файла решателя NX Nastran осуществляется в **Текст, заданный пользователем (User Defined Text)**.

1.4.5. Параметры вкладки База данных

Параметр **Печать диагностики CWELD/CFast (Print CWELD/CFast Diagnostic Information)** используется, если модель содержит CFast и CWELD соединения (моделирование точечной сварки и заклепочных соединений). Установка параметра выводит дополнительную информацию в файл *.f06 при возникновении ошибок в данных соединениях.

Группа параметров **Наборы DOF (DOF Sets)** – для создания наборов степеней свободы.

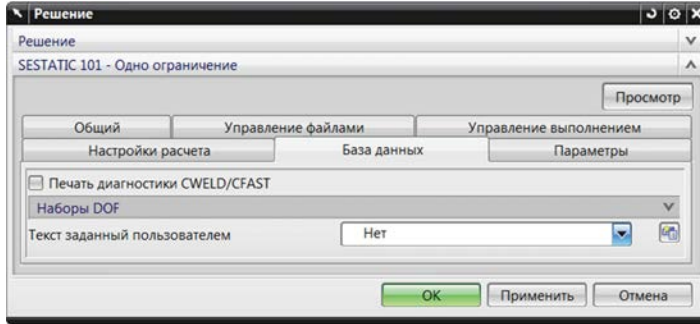


Рисунок 1.10. Параметры вкладки База данных

В основном применяется при решении задач динамического анализа, при создании суперэлементов и использовании суперэлементов в КЭ сборках [8].

Запись дополнительных команд в блок *Bulk Data* входного файла решателя NX Nastran осуществляется в поле списка *Текст, заданный пользователем* (*User Defined Text*).

1.4.6. Задание дополнительных параметров решения

Выбор и установка дополнительных параметров решателя NX Nastran осуществляются через диалоговое окно ***Solution Parameters*** «n», для вызова которого необходимо использовать команду ***Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)*** во вкладке *Параметры* (*Parameters*). Параметры организованы в группы в алфавитном порядке в соответствии с первой буквой названия параметра (рисунок 1.11). В диалоговом окне ***Solution Parameters*** «n» необхо-

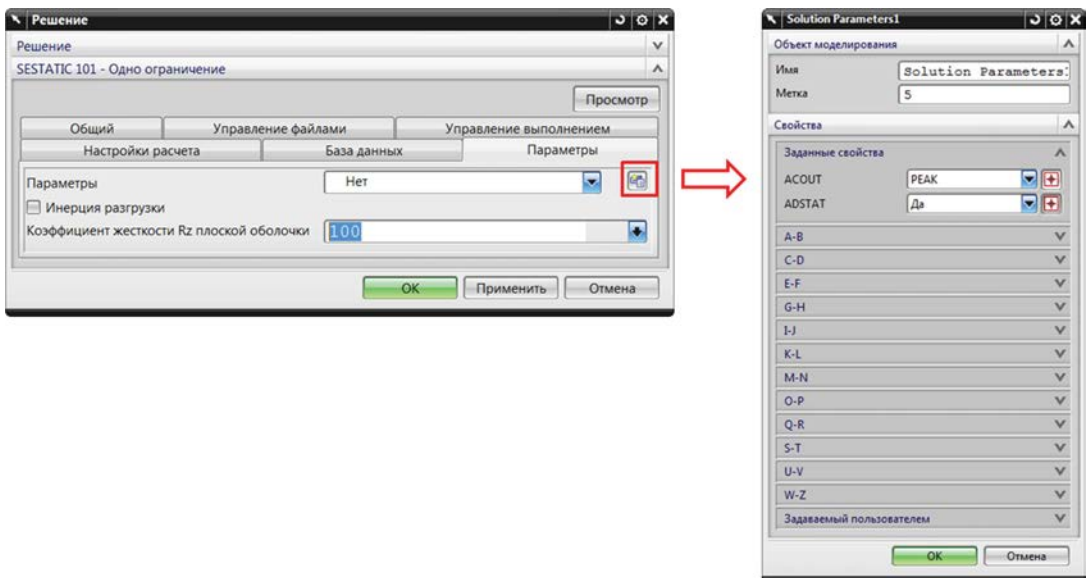


Рисунок 1.11. Задание дополнительных параметров решения

можно выбрать интересующие параметры и присвоить нужные значения, далее нажать *Добавить* (*Add*). После добавления параметров в диалоговом окне ***Solution Parameters «n»*** появляется дополнительная группа *Заданные свойства* (*Specified Properties*), содержащая заданные пользователем параметры.

Полный список параметров и их описание представлены в [8].

Решение задач статического анализа методом КЭ предполагает невозможность движения модели как твердого тела без возникновения деформаций. В противном случае матрица жесткости становится сингулярной, что ведет к аварийному завершению расчета либо результатам, не имеющим физического смысла.

Однако в решателе NX Nastran реализована возможность расчета незакрепленных конструкций, что имеет место, например, при исследовании поведения космических летательных аппаратов на орбите, самолетов во время полета и др. Для этого применяется инерционное уравнивание, основанное на использовании массы модели для создания инерционных сил, уравнивающих приложенные нагрузки, что, в свою очередь, приводит модель к состоянию равновесия. Для применения данного подхода необходимо установить параметр *Инерция разгрузки* (*Inertia Relief*) во вкладке *Параметры* (*Parameters*) диалогового окна ***Решение*** (***Solution***).

Параметру *Коэффициент жесткости Rz плоской оболочки* (*Flat Shell Rz Stiffness Factor*) по умолчанию присвоено значение 100. Данный параметр используется для предотвращения бесконечных значений вращательной степени свободы в узле при применении 2D оболочечных элементов. Значение параметра является добавочным для жесткости кручения по нормальной оси и применимо только для типов элементов *CQUAD4* и *CTRIA3*.

Финальный мониторинг всех заданных команд, параметров, опций решения осуществляется использованием команды ***Просмотр*** (***Preview***) диалогового окна ***Решение*** (***Solution***). В результате вызывается окно *Информация* (*Information*), содержащее фрагмент входного файла решателя NX Nastran.

1.4.7. Задание параметров решения для расчетного случая

Существует возможность задания параметров решения для каждого расчетного подслучая отдельно. Для этого в контекстном меню расчетного подслучая необходимо выбрать команду ***Изменить*** (***Edit***). В появившемся диалоговом окне ***Шаг решения*** (***Solution Step***) можно задать (рисунок 1.12):

- *Запрос вывода результатов* (*Output Request*) – изменить набор величин для вывода в результаты конкретного расчетного подслучая;
- задать дополнительные команды в поле *Управление регистром пользовательского текста* (*Case Control User Defined Test*) для блока *Case Control* входного файла решателя NX Nastran;
- *Температурная предварительная нагрузка* (*Temperature Pre-Load*) – использование в качестве предварительной нагрузки результатов тепловых расчетов, выполненных в других решателях (NX Thermal, Abaqus, Ansys);
- *Силовая предварительная нагрузка* (*Force Pre-Load*) – использование в качестве предварительной нагрузки поля давления (из результатов газодинамического расчета в решателе NX Flow).

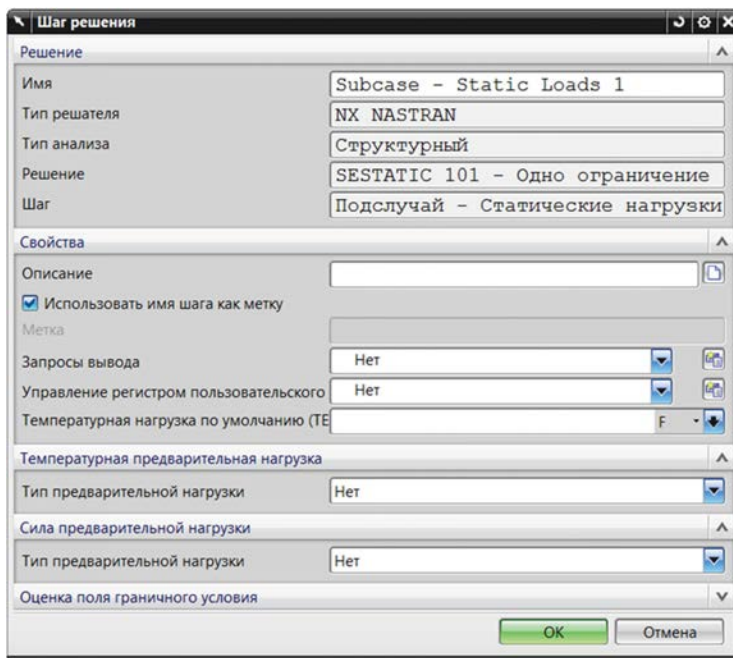


Рисунок 1.12. Задание параметров решения для расчетного случая

1.5. Линейное контактное взаимодействие

В рамках решений линейного статического анализа существует возможность моделирования линейного контактного взаимодействия между поверхностями.

Все создаваемые контактные взаимодействия относятся к объектам симуляции типа **Контакт поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Contact)**, задаваемым через панель инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** в списке команд **Тип объекта симуляции (Simulation Object Type)**. Подробно процедура создания объектов симуляции типа **Контакт поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Contact)** описана в пп. 4.3.3 части I. Отметим лишь то, что задание контактных поверхностей возможно автоматически либо вручную в пределах заданного диапазона поиска, при этом контактные поверхности подразделяются на **Исходные области (Source Region)** и **Конечные области (Target Region)**.

Условия контактного взаимодействия между свободными гранями конечных элементов контактирующих поверхностей создаются решателем автоматически после запуска расчетной модели на решение при выполнении следующих условий:

- пересечение свободных граней конечных элементов контактирующих поверхностей;
- длина отрезка нормали между гранями элементов равна либо меньше значения, соответствующего диапазону поиска.

В отличие от нелинейного контакта, где пары контактирующих элементов переопределяются на каждой итерации, при решении линейной статической задачи создание пар происходит один раз в начале расчета без дальнейшего обновления.

1.5.1. Основы линейного контакта

Основы линейного контактного взаимодействия в NX Nastran [4] приведены ниже.

В процессе выполнения контактного алгоритма используются следующие соотношения:

- кинематические уравнения – описание движения поверхностей относительно друг друга;
- условия линейного контакта;
- уравнения статического равновесия с учетом добавочной контактной жесткости и контактных сил;
- преобразование кинематических уравнений и основных уравнений (равновесия и условий контакта) в КЭ терминах.

На рисунке 1.13 условно представлены свободные грани элементов целевой (А) и исходной (В) поверхностей. В ходе деформации исследуемой модели происходит движение точки исходной грани (воздействующая точка – D) относительно целевой грани. В процессе решения через воздействующую точку D строятся три взаимно перпендикулярных единичных вектора: тангенциальные e_1 и e_2 , а также направленный по нормали к исходной грани вектор n . Точка пересечения нормального вектора n с целевой гранью является целевой точкой С. При выполнении контактного алгоритма предполагается, что проникновение воздействующей точки в целевую грань происходит в целевой точке С. Тогда величина проникновения определяется по следующему выражению:

$$p = p_0 + (u_h - u_t)n, \tag{1.2}$$

где p_0 – начальное проникновение, обусловленное исходной недеформированной геометрией;

u_h – перемещение (движение) воздействующей точки D;

u_t – перемещение (движение) целевой точки С.

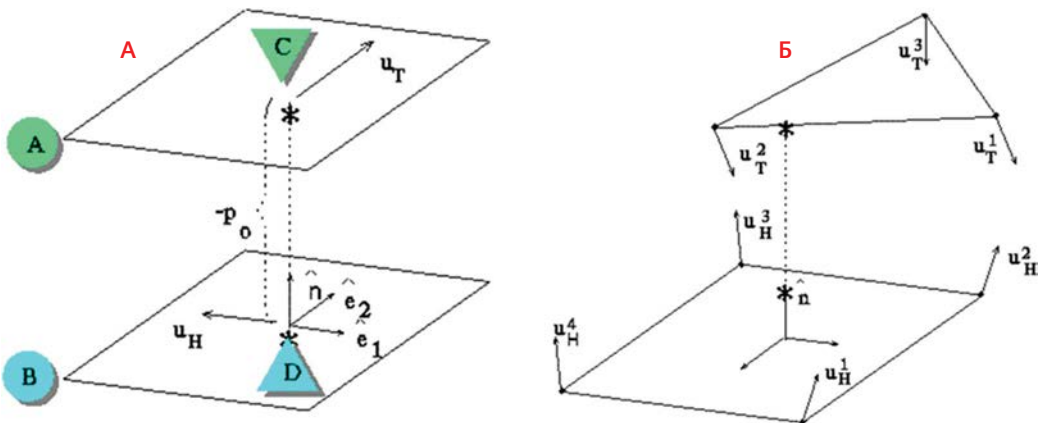


Рисунок 1.13. Схема взаимодействия контактной пары элементов

Для учета сил кулоновского трения необходимо определить относительное приращение тангенциального перемещения:

$$\Delta u_t = (\Delta u_n - \Delta u_t) - [n(\Delta u_n - \Delta u_t)]n. \quad (1.3)$$

В терминах решателя NX Nastran под контактной парой следует понимать совокупность воздействующей и целевой точки, а также узловые степени свободы исходной и целевой граней элементов (рисунок 1.13, Б).

Тогда проникновение для определенной контактной пары определяется через интерполяционные функции для узлов исходной и целевой граней элементов и имеет вид:

$$p = p_0 + [q_n] \begin{pmatrix} u_n \\ u_t \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

где $[q_n]$ – матрица-строка, состоящая из произведения интерполяционных функций на нормали; u_n и u_t – узловые перемещения исходной и целевой граней.

Аналогичное уравнение для тангенциального (касательного) скольжения:

$$\Delta \xi = \xi_0 + [q_t] \begin{pmatrix} u_n \\ u_t \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

Для всех контактных элементов в матричном представлении выражения (1.4) и (1.5) принимают вид:

$$\{p\} = [Q_n]\{U\} + \{P_0\} \text{ и } \{\Delta \xi\} = [Q_t]\{U\} + \{\xi_0\}. \quad (1.6)$$

Решение алгоритма контактного взаимодействия подразумевает выполнение следующего условия линейного контакта:

$$t_n \cdot p = 0, \quad (1.7)$$

где $p \leq 0$ – условие нулевого взаимопроникновения контактирующих поверхностей;
 $t_n > 0$ – контактное давление (передача контактных сил между контактирующими телами).

Условие (1.6) выполняется в двух случаях:

- 1) $p = 0$ при $t_n \geq 0$ – нулевое взаимопроникновение;
- 2) $t_n = 0$ при $p \leq 0$ – тела не контактируют.

В случае учета сил кулоновского трения необходимо выполнение условия (1.8):

$$|t_t| - \mu t_n \leq 0, \quad (1.8)$$

где t_t – сила трения;
 μ – коэффициент кулоновского трения;
 при $|t_t| < \mu t_n$ – контактирующие поверхности сцеплены;
 при $|t_t| = \mu t_n$ – «скольжение» контактирующих поверхностей относительно друг друга.

В NX Nastran для решения линейного контактного взаимодействия используется расширенный метод Лагранжа (augmented Lagrange method) [4]. В отличие от метода штрафных функций, помимо добавления штрафных жесткостей к глобальной матрице жесткости, удовлетворение условия линейного контакта (нулевое взаимопроникновение) достигается корректировкой контактных сил \mathbf{t} на каждой итерации алгоритма линейного контакта в соответствии со следующим выражением (1.9):

$$\mathbf{t}^i = \mathbf{t}^{i-1} + \varepsilon \mathbf{p}, \quad (1.9)$$

где \mathbf{t} – контактная сила;

\mathbf{p} – текущее значение проникновения в точке;

ε – штрафная жесткость.

Решение алгоритма линейного контакта делится на два итерационных цикла – «внешний» и «внутренний» [4]. «Внешний» цикл – цикл определения статуса контактных элементов. «Внутренний» цикл – цикл итераций обновления контактных усилий для выполнения условия нулевого проникновения для всех активных контактных элементов.

Алгоритм решения линейного контактного взаимодействия:

1. Создание контактных элементов на основе указанных пользователем областей и заданного диапазона поиска.
2. Расчет жесткостных характеристик элементов, включая штрафные жесткости контактных элементов.
3. Определение знаков сил взаимодействия элементов с учетом граничных условий и приложенных нагрузок.
4. Запуск «внешнего» цикла – определение статуса контактных элементов в зависимости от взаимопроникновения и контактного усилия.
5. Добавление контактной жесткости к глобальной матрице жесткости активных контактных элементов.
6. Запуск «внутреннего» цикла. На каждой итерации «внутреннего» цикла определяется проникновение в контактных парах, на основе которого по выражению (1.9) в соответствии с заданными нормальным ($PENN$) и касательным ($PENT$) значениями штрафной функции вычисляются контактные силы для следующей итерации. Завершение «внутреннего» цикла происходит либо при достижении максимально допустимого числа итераций ($MAXF$), либо при выполнении условия сходимости контактных сил – изменение контактных сил на предыдущей и последующей итерациях не превышает значения параметра $STOL$. После чего осуществляется возврат на «внешний» цикл.
7. На «внешнем» цикле алгоритма на основе расчета контактных сил на «внутреннем» цикле происходит следующее обновление статуса (активация/деактивация) контактных элементов. В случае если обнаруживается проникновение неактивных контактных элементов, то их статус меняется на активный. В результате определяется новый набор активных контактных элементов и заново запускается «внутренний» цикл алгоритма.

Решение алгоритма линейного контакта завершается и считается сошедшимся при следующих условиях:

- выполнение условия сходимости по параметру $STOL$ и количество изменений статусов контактных элементов не превышает заданного порогового значения параметра $NCHG$;

- количество шагов «внешнего» цикла достигло максимального числа итераций (MAXS), заданного в настройках для «внешнего» цикла.

1.5.2. Параметры линейного контакта

В решателе NX Nastran используются следующие параметры для решения алгоритма линейного контактного взаимодействия. Возможно задание глобальных параметров линейного контакта, используемых для всех объектов симуляции типа *Контакт поверхность–поверхность* (Surface-to-Surface Contact), и локальных параметров, назначаемых для конкретного объекта симуляции. При этом значения локальных параметров применительно к данному объекту симуляции будут приоритетными.

Задание локальных параметров осуществляется при создании объекта симуляции типа *Контакт поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Contact)* в одноименном диалоговом окне (рисунок 1.14). В случае моделирования контактного взаимодействия с учетом сил трения необходимо задать значение параметра *Коэффициент статического трения (Coefficient of Static Friction)*. По умолчанию данный коэффициент равен 0, то есть силы трения не учитываются. Группа *Параметры локальной контактной пары (Local Contact Pair Parameters)* позволяет задавать параметры как для линейного, так и для нелинейного контакта. В рамках данной главы рассматриваются параметры для линейного контакта *Линейная перезапись (Linear Overrides)* (BCTPARM). Для задания локального набора параметров необходимо вызвать команду *Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)*. В появившемся диалоговом окне *Contact Parameters – Linear Pairs overrides «n»* доступны следующие параметры:

- *Штрафное направление нормали (Penalty Normal Direction) (PENN)* – нормальная составляющая штрафной функции;

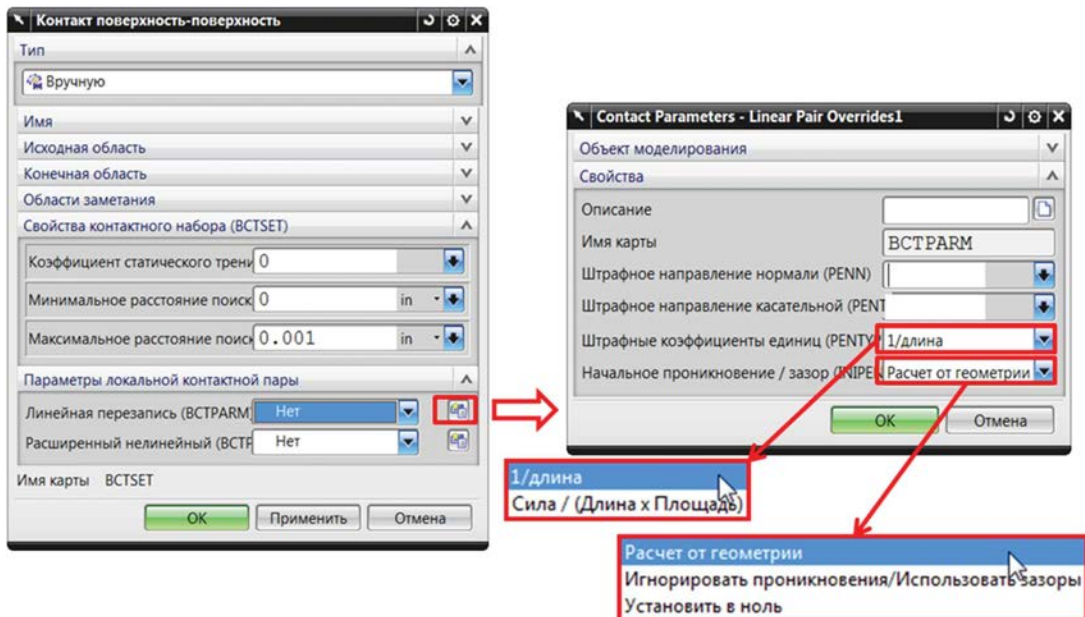


Рисунок 1.14. Задание локальных параметров контактной пары

- Штрафное направление касательной (*Penalty Tangential Direction*) (*PENT*) – тангенциальная составляющая штрафной функции;
- Штрафные коэффициенты единиц (*Penalty Factor Units*) (*PENTYP*) – единица измерения штрафных функций:
 - а) $1/\text{длина}$ ($1/\text{Length}$) – используется по умолчанию, в этом случае контактная жесткость элемента вычисляется по выражению:

$$K_{\text{cont}} = e \cdot E \cdot dA, \quad (1.10)$$

где e – *PENN* или *PENT*;

E – модуль упругости материала контактирующих тел;

dA – площадь.

Физический эквивалент контактной жесткости – осевая жесткость стержня площадью сечения dA , с модулем упругости E и длиной $1/e$.

- б) $\text{Сила}/(\text{Длина} \times \text{Площадь})$ ($\text{Force}/(\text{Length} \times \text{Area})$) – эквивалентно отношению жесткости пружины к площади, в этом случае контактная жесткость элемента вычисляется по выражению

$$K_{\text{cont}} = e \cdot dA. \quad (1.11)$$

- Начальное проникновение/зазор (*Initial Penetration/gap*) (*INIPENE*) – контролирует начальное состояние контактирующих поверхностей. Применение данного параметра полезно, когда контактирующие поверхности криволинейные, а конечно-элементная аппроксимация геометрии приводит к тому, что узлы элементов не принадлежат точно поверхности (рисунок 1.15, А). Это, в свою очередь, может привести к наличию локальных точек с по-

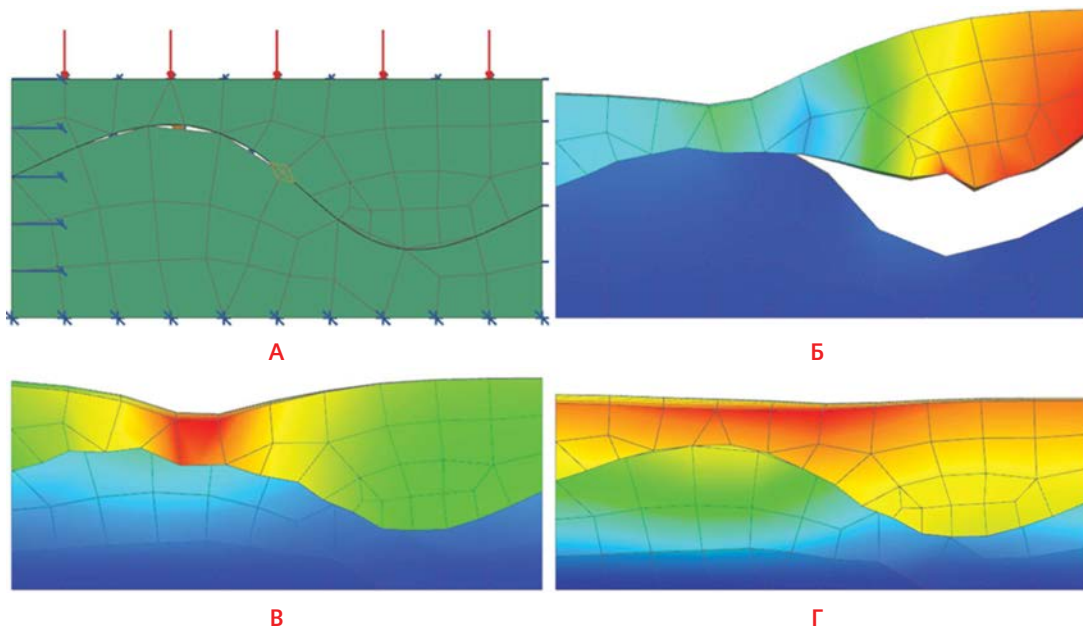


Рисунок 1.15. Варианты учета начальных проникновений и зазоров

вышенными значениями контактного давления вместо равномерного сглаженного распределения. Рассмотрим возможные варианты:

- а) *Расчет от геометрии (Calculate from geometry)* – используется по умолчанию: учет всех зазоров и проникновений на основе координат узлов конечных элементов (рисунок 1.15, Б). Данный параметр удобно использовать для моделирования контактного взаимодействия с учетом преднатяга при специально заданном проникновении одного тела в другое;
- б) *Игнорировать проникновения/использовать зазоры (Ignore penetration/Use gaps)* – все проникновения будут обработаны как соприкосновения, то есть дополнительных жестких штрафных функций для этих зон введено не будет (рисунок 1.15, В);
- в) *Установить в ноль (Set to zero)* – в диапазоне поиска все зазоры и проникновения будут обработаны как соприкосновения.

Кроме того, в NX Nastran доступны глобальные параметры алгоритма линейного контакта. Задание глобальных параметров осуществляется во вкладке *Настройки расчета (Case Control)* диалогового окна **Решение (Solution)**. Для задания глобальных параметров линейного контакта необходимо выполнить команду **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)** для *Общие параметры контактов (Global Contact Parameters)*, в результате чего появляется диалоговое окно **Contact Parameters – Linear Global «n»** (рисунок 1.16). Параметры *Штрафное направление нормали (Penalty Normal Direction) (PENN)*, *Штрафное направление касательной (Penalty Tangential Direction) (PENT)*, *Штрафные коэффициенты единиц (Penalty Factor Units) (PENTYP)*, *Начальное проникновение/зазор (Initial Penetration/ gap) (INIPENE)* аналогичны локальным параметрам объекта симуляции типа *Контакт поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Contact)*.
Дополнительные параметры:

- *Контактный допуск силы (Contact Force Tolerance)(CTOL)* – критерий сходимости контактной силы, определяемый по разности контактных сил на предыдущей и последующей итерациях «внутреннего» цикла алгоритма линейного контакта. Решение «внутреннего» цикла считается сошедшимся, если разность контактных сил меньше значения *CTOL*;
- *Петля силы макс. итерации (Max Iteration Force Loop) (MAXF)* – максимально допустимое число итерации на «внутреннем» цикле контактного алгоритма;
- *Изменить контакт для сходимости (Contact Changes for Convergence)* – определяет формат критерия сходимости *NCHG* для «внешнего» цикла. В зависимости от выбранного формата изменяется название критерия *NCHG*:
 - а) *Процент от активных контактов (Percentage of Active Contacts)* – *Процент от активных элементов контакта (Percentage of Active Contact Elements) (NCHG)* – задается число меньше 1, то есть определяется в долях от количества активных контактных элементов. В этом случае на каждом шаге «внешнего» цикла значение критерия допустимого количества изменений контактных статусов будет разное, так как оно будет вычисляться с использованием количества контактных пар с активным статусом;
 - б) *Число изменений контакта (Number of Contact Changes)* – *Допустимое число изменений контактов (Allowable Number of Contact Changes) (NCHG)* – задается целое число, то есть определяется допустимое значение изменений статусов контактных элементов. В этом случае значение критерия допустимого количества изменений контактных статусов неизменно от шага к шагу «внешнего» цикла и равно заданному в поле значению.
- *Смещение толшины оболочки (Shell Thickness Offset) (SHLTHK)* – используется при КЭ моделировании с использованием 2D оболочечных элементов. При задании *Включить (Include)* толщина 2D оболочечных элементов будет учтена, то есть контакт будет реализован на расстоянии, равном половине толщины. При выборе *Исключить (Exclude)* толщина не учитывается;

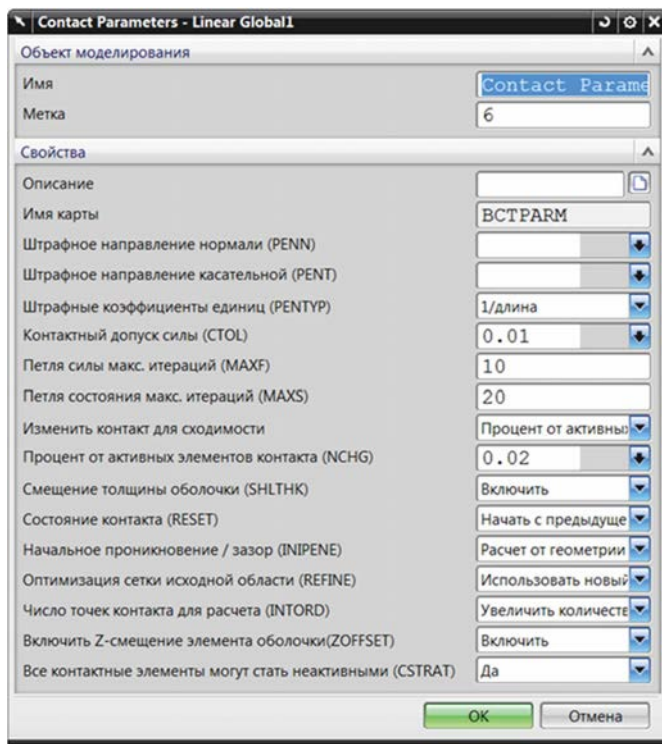


Рисунок 1.16. Задание глобальных параметров линейного контакта

- *Contact Status (Состояние контакта) (RESET)* – используется при наличии в решении нескольких расчетных случаев. Для сокращения времени счета можно для первого шага «внешнего» цикла использовать результаты статусов контактных пар, полученные при решении первого расчетного случая, этому соответствует параметр *Начать с предыдущего (Start from Previous)*. В случае выбора *Начать с первого (Start from Initial)* для каждого расчетного случая определение статуса контактных элементов будет происходить заново;
- *Оптимизация сетки исходной области (Refine Source Region Mesh) (REFINE)* – перестроение конечно-элементной сетки контактной поверхности в процессе выполнения алгоритма для создания наиболее подходящего разбиения;
- *Число точек контакта для расчета (Number of Contact Evaluation Points) (INTORD)* – задается количество точек на одной грани элемента исходной поверхности для расчета контакта. Большее значение точек расчета позволяет получить более точные результаты, но, соответственно, время вычислительного процесса увеличивается. Данное количество точек зависит от значения параметра *INTORD* и типа грани элемента.

Грань элемента	Количество точек		
	INTORD=1	INTORD=2	INTORD=3
Линейная треугольная (Linear Triangle)	1	3	7
Параболическая треугольная (Parabolic Triangle)	3	7	12
Линейная четырехугольная (Linear Quad)	1	4	9
Параболическая четырехугольная (Parabolic Quad)	4	9	16

- Включить Z-смещение элемента оболочки (*Include Shell Element Z-Offset*) (*ZOFFSET*) – при расчете контактного взаимодействия в расчет будут взяты параметры смещения, заданные для 2D оболочечных элементов;
- Все контактные элементы могут стать неактивными (*All Contact Can Become Inactive*) (*CSTRAT*) – при выборе *Вероятность сокращена программным обеспечением* (*Likelihood reduced by the software*) позволяет снизить вероятность появления сингулярности из-за деактивации всех контактных пар.

Исходя из практики, значения параметров линейного контакта, заданные по умолчанию, являются подходящими для решения большинства задач. Более подробное описание параметров линейного контакта приведено в [4, 8].

1.5.3. Рекомендации при решении линейного контакта

При формировании контактного элемента (контактной пары граней элементов) из каждой свободной грани конечного элемента исходной поверхности опускается нормаль на грань элемента целевой поверхности. Поэтому когда на один элемент исходной поверхности приходится несколько элементов целевой поверхности (рисунок 1.17, А), создается один контактный элемент. Когда одному элементу целевой поверхности соответствует несколько элементов исходной поверхности (рисунок 1.17, Б), будет создано несколько контактных элементов. Таким образом, для точного описания контактного взаимодействия рекомендуется, чтобы характерный размер КЭ сетки исходной поверхности был меньше, чем целевой.

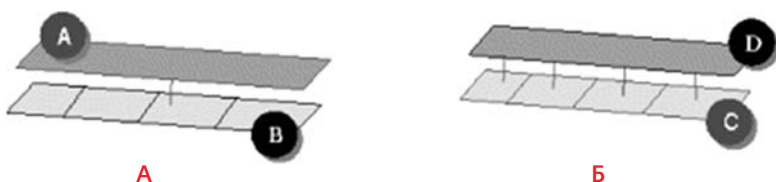


Рисунок 1.17. Создание контактных пар при различных размерах КЭ контактирующих поверхностей

При задании контактных областей на сложной (ломаной) геометрии следует создавать несколько контактных пар (рисунок 1.18).

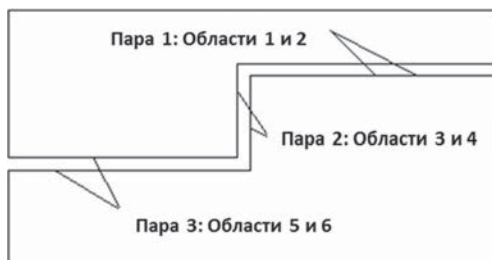


Рисунок 1.18. Создание нескольких контактных пар на сложной геометрии

При выборе контактирующих областей не рекомендуется использовать одну грань элемента для нескольких контактных зон. На рисунке 1.19, А приведен пример, в котором контактные области 2 и 3 имеют общую грань элемента. В некоторых ситуациях это может привести к увеличению времени счета. Для данного случая лучше воспользоваться заданием контактных областей, как показано на рисунке 1.19, Б.

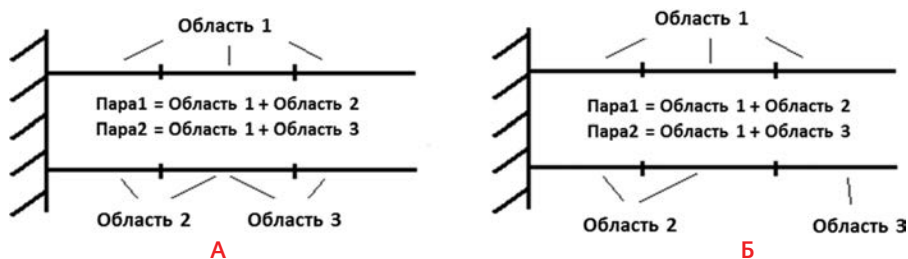


Рисунок 1.19. Задание области для сложной контактной пары

1.5.4. Вывод результатов линейного контакта

Помимо величин, характерных для линейного статического анализа, в качестве результатов решения задачи с учетом линейного контакта выводятся следующие величины (рисунок 1.20):

- *Трассировка контакта – По узлам (Contact Traction – Nodal)* – усилие трения-сцепления, вызываемое либо наличием силы трения, либо особенностями контактируемых поверхностей;
- *Контактное давление – По узлам (Contact Pressure – Nodal)* – контактное давление в узлах;
- *Сила контакта – По узлам (Contact Force – Nodal)* – контактные силы в узлах;
- *Начальный зазор между контактами – По узлам (Initial Contact Separation – Nodal)* и *Конечный зазор между контактами – По узлам (Final Contact Separation – Nodal)* – расстояние между элементами в активных контактных парах в начале и конце решения.

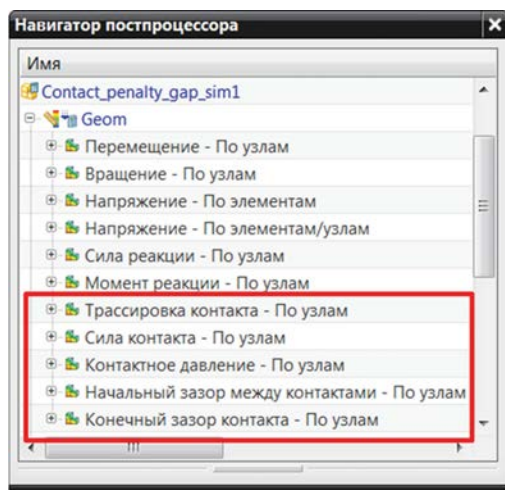


Рисунок 1.20. Результаты линейного контакта во вкладке Навигатор постпроцессора

Для вывода вышеописанных результатов необходимо в диалоговом окне **Решение (Solution)** во вкладке *Настройки расчета (Case Control)* в поле списка *Запросы вывода (Output Requests)* либо изменить используемый *Объект моделирования (Modeling Object)*, либо создать новый. В появившемся диалоговом окне **Structural Output Requests «n»** во вкладке *Результат контакта (Contact Result)* активировать *Разрешить запрос BCRESULTS (Enable BCRESULTS Request)*. Далее необходимо выбрать величины для вывода в файл результатов *.op2 для возможности просмотра в постпроцессоре (рисунок 1.21).

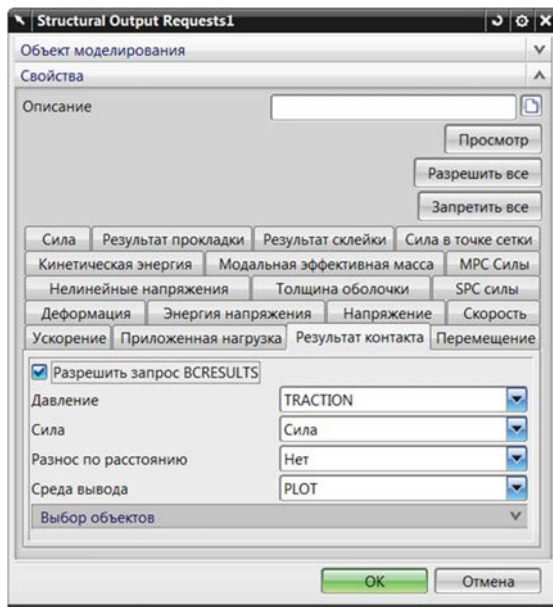


Рисунок 1.21. Задание вывода результатов линейного контакта в файл результатов *.op2

1.6. Соединение со склеиванием

Зачастую при решении задач механики деформируемого твердого тела существует необходимость ограничения взаимного перемещения объектов моделирования относительно друг друга во всех направлениях. Например, если элементы конструкции соединены посредством сварки либо болтового соединения и при этом детального КЭ моделирования самого соединения не требуется, а интересует только передача воздействия от одного элемента конструкции к другому. При этом соединяемые элементы конструкции имеют несовпадающую КЭ сетку на границах взаимодействия. Для моделирования подобного рода соединений в NX Расширенная симуляция (Advanced Simulation) реализованы объекты симуляции **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)** и **Склеивание ребра с поверхностью (Edge-to-Surface Gluing)**. Подробно процедура создания данных типов объектов симуляции описана в главе 4 части I. Задание областей соединений (далее – склеивание) возможно автоматически или вручную в пределах заданного диапазона поиска, при этом области склеивания подразделяются на *Исходные области (Source Region)* и *Конечные области (Target Region)*.

Склеивание осуществляется за счет создания между свободными гранями элементов областей склеивания жестких пружин либо соединений, эквивалентных точечной сварке. В терминах NX Nastran совокупность свободных граней конечных элементов исходной и целевой областей склеивания и создаваемых решателем жестких пружин называется элементом склеивания, а пара свободных граней конечных элементов исходной и целевой областей склеивания – парой склеивания. Склеивание формируется добавлением для элементов склеивания больших штрафных жесткостей по нормали и в касательном направлении.

Элементы склеивания создаются решателем автоматически после запуска расчетной модели на решение при выполнении следующих условий:

- пересечение свободных граней конечных элементов областей склеивания;
- длина нормали между гранями элементов равна либо меньше значения, соответствующего диапазону поиска.

При использовании объекта симуляции **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)** необходимо указать целевую и исходную поверхности, при этом, в отличие от задания линейного контакта, не важно, какая из смежных поверхностей будет целевой, а какая – исходной гранью.

При использовании объекта симуляции **Склеивание ребра с поверхностью (Edge-to-Surface Gluing)** в качестве целевой поверхности указываются свободные грани 3D элементов либо оболочечных элементов, а в качестве исходной области указываются ребра оболочечных элементов. При этом решателем автоматически будут создаваться псевдоповерхности вдоль заданных ребер исходной области. Далее решатель создает соединение типа сварки между данными псевдоповерхностями и целевыми поверхностями.

Для примера на рисунке 1.22 показано склеивание между целевой поверхностью (зеленая линия) и ребром исходной области (синяя линия), где красным обозначена создаваемая псевдоповерхность, а t – толщина оболочечных элементов исходной области.

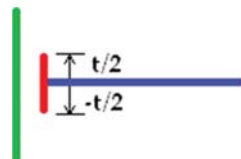


Рисунок 1.22. Схема создания склеивания между ребром и поверхностью

1.6.1. Параметры склеивания

В NX Advanced Simulation возможно задание глобальных параметров склеивания, используемых для всех объектов симуляции типа **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)** и **Склеивание ребра с поверхностью (Edge-to-Surface Gluing)**, и локальных параметров, назначаемых для конкретного объекта симуляции. При этом значения локальных параметров применительно к данному объекту симуляции являются приоритетными.

Для задания локальных параметров необходимо создать объект моделирования **Параметры перезаписи (Override Parameters) (BGPARM)** в диалоговом окне **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)** либо **Склеивание ребра с поверхностью (Edge-to-Surface Gluing)** (рисунок 1.23).

Набор параметров, представленный в диалоговом окне **Glue Parameters – Linear Pair Overrides «n»**, зависит от выбранного типа склеивания **Формулировка склейки (Glue Formulation) (GLUETYPE)**. Если выбран тип **Нормальная и тангенциальная пружина (Normal and Tangential Springs)**, то в диалоговом окне **Glue Parameters – Linear Pair Overrides «n»** задаются следующие параметры:

- значения для нормальной и тангенциальной составляющей штрафных функций, соответственно для параметров **Штрафное направление нормали (Penalty Normal Direction) (PENN)** и **Штрафное направление касательной (Penalty Tangential Direction) (PENT)**;
- **Штрафные коэффициенты единиц (Penalty Factor Units) (PENTYPE)** – единица измерения штрафных функций:

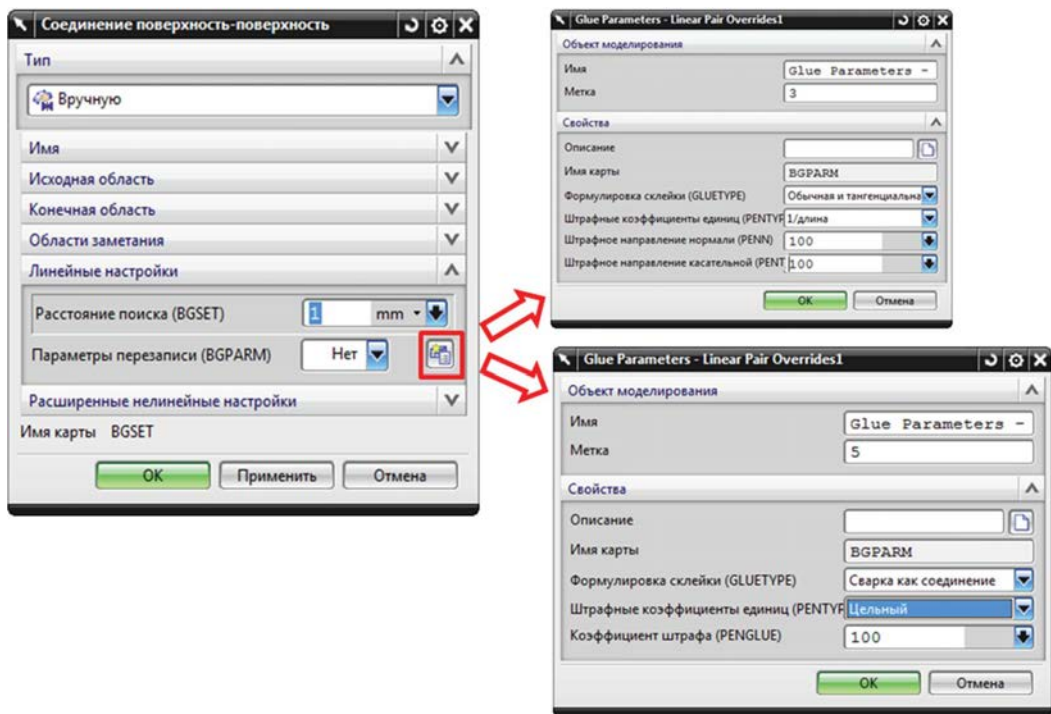


Рисунок 1.23. Задание локальных параметров склеивания

- а) $1/\text{длина}$ ($1/\text{Length}$) – используется по умолчанию, аналогично параметру линейного контакта;
- б) $\text{Сила}/(\text{Длина} \times \text{Площадь})$ ($\text{Force}/(\text{Length} \times \text{Area})$) – аналогично параметру линейного контакта.

При выборе типа *Сварка как соединение* (*Weld Like Connection*) в диалоговом окне **Glue Parameters – Linear Pair Overrides «n»** задаются следующие параметры:

- значение штрафной функции для параметра *Коэффициент штрафа* (*Penalty Factor*) (*PENGLUE*);
- *Штрафные коэффициенты единиц* (*Penalty Factor Units*) (*PENTYPE*) – единица измерения штрафных функций:
 - а) *Цельный* (*Unitless*) – используется по умолчанию;
 - б) $\text{Сила}/(\text{Длина} \times \text{Длина})$ ($\text{Force}/(\text{Length} \times \text{Length})$).

Задание глобальных параметров осуществляется во вкладке *Настройки расчета* (*Case Control*) диалогового окна **Решение (Solution)**, подробно описанного в пп. 1.4.4 данной главы. Для задания глобальных параметров склеивания необходимо выполнить команду **Создание объекта моделирования (Create Modeling Object)** для *Общие параметры склейки* (*Global Glue Parameters*), в результате чего появится диалоговое окно **Glue Parameters – Linear Global n** (рисунок 1.24). Обратите внимание, что в данном диалоговом окне доступны те же параметры, что и при задании локальных параметров. Назначение параметров *INTORD* и *REFINE* аналогично параметрам для линейного контакта. Описание параметров *INTORD* и *REFINE* приведено в пп. 1.5.2 данной главы.

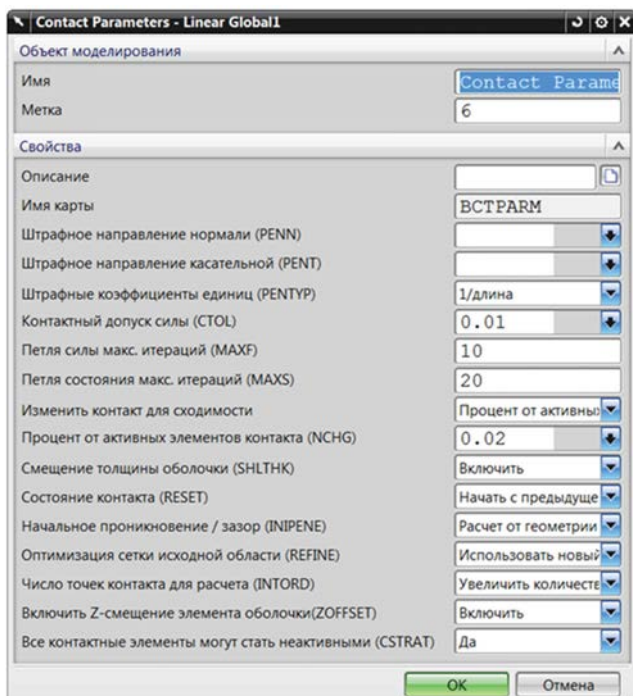


Рисунок 1.24. Задание глобальных параметров склеивания

1.6.2. Вывод результатов склеивания

Для соединения типа склеивания возможен вывод следующих величин (рисунок 1.25):

- Давление склейки – По узлам (*Glue Pressure – Nodal*) – давление в узлах;
- Сила склейки – По узлам (*Glue Force – Nodal*) – силы в узлах;
- Растяжение склейки – По узлам (*Glue Traction – Nodal*) – усилие сцепления.

Для вывода вышеописанных результатов необходимо в диалоговом окне **Решение (Solution)** во вкладке *Настройки расчета (Case Control)* в поле *Запросы вывода (Output Requests)* либо изменить используемый *Объект моделирования (Modeling Object)*, либо создать новый. В появившемся диалоговом окне **Structural Output Requests «n»** во вкладке *Результат склейки (Glue Result)* следует активировать *Разрешить запрос BGRESULTS (Enable BGRESULTS Request)*. Далее необходимо выбрать величины для вывода в файл результатов *.op2 для возможности просмотра в постпроцессоре (рисунок 1.25).

1.7. Термоупругий анализ

Для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих в условиях различных температурных воздействий, таких как неоднородная температура, тепловой поток, тепловыделение, излучение, необходим учет температурных деформаций и напряжений. Данный класс задач механики деформируемого твердого тела относится к задачам термоупругости.

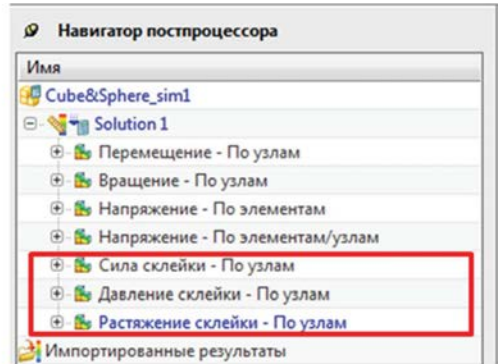
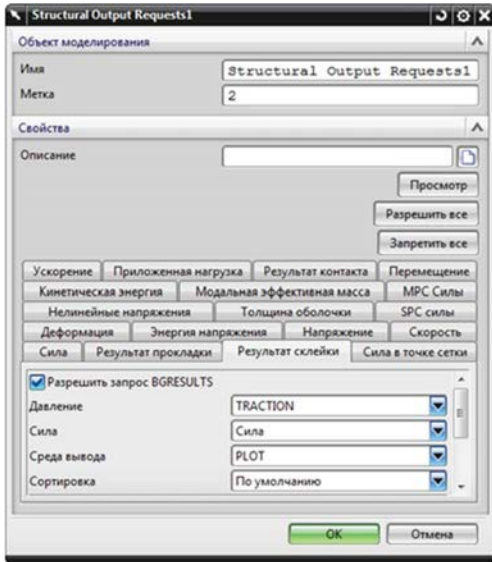


Рисунок 1.25. Вывод результатов склеивания в файл результатов *.ор2

В приложении **NX Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** решение задач термоупругости возможно тремя способами:

1. Прямое задание распределения температур из решенной заранее задачи теплопроводности.
2. Указание файла результатов теплового анализа в качестве предварительной температурной нагрузки.
3. Применение модуля NX Multi-Physics Solution для проведения последовательного или связанного решения статического и температурного анализов.

Так как для первых двух способов используется последовательность температурного и статического анализов, далее они рассматриваются на примере решения стационарной задачи теплопроводности.

Интерфейс приложения NX Multi-Physics Solution рассматривается отдельно в пп. 1.7.2 данной главы.

1.7.1. Пример решения задачи термоупругости

Рассматривается стальной полый толстостенный шар с диаметром 10 см и толщиной стенки 7 см. Внутри шара поддерживается температура 100 °С, снаружи – 20 °С (рисунок 1.26, А). С учетом симметрии КЭ модель строится для 1/8 шара (рисунок 1.26, Б). Необходимо определить деформации и напряжения, вызываемые неоднородным температурным расширением. Понимается, что результаты температурного анализа будут использованы в качестве температурных нагрузок в статическом анализе.

Для получения распределения поля температур в шаре решается стационарная задача теплопроводности. Решение задачи разделяется на следующие этапы:

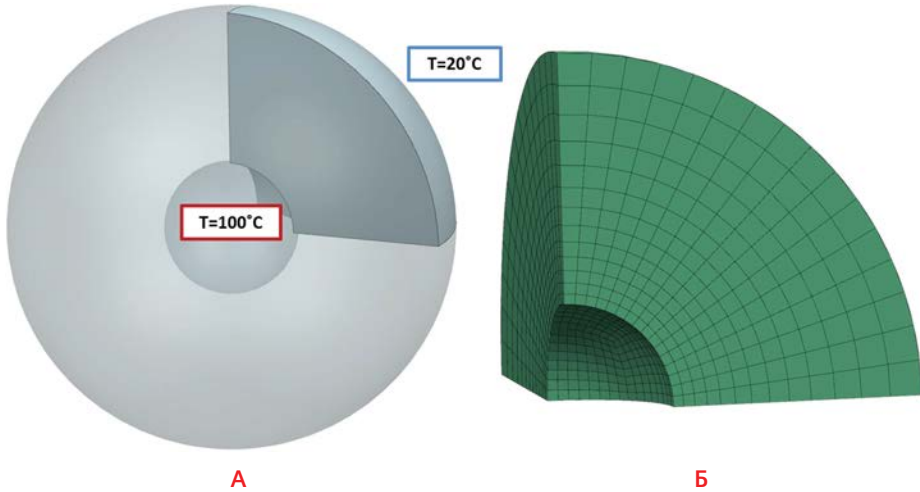


Рисунок 1.26. Модель шара: А – температурные граничные условия, Б – КЭ модель с учетом симметрии

- решение задачи теплопроводности;
- запись файлов результатов анализа теплопроводности для первого и второго способов;
- учет температурного распределения в статической задаче первым и вторым способами.

Для создания нового решения стационарной задачи теплопроводности необходимо через контекстное меню файла симуляции во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** выбрать **Новое решение (New Solution)** и в появившемся диалоговом окне **Решение (Solution)** задать (рисунок 1.27):

- Тип анализа (Analysis Type) – Тепловой (Thermal);
- Тип решения (Solution Type) – доступны два типа решения:
 - а) NLSCSH 153 – для стационарной задачи теплопроводности;
 - б) NLTCSH 159 – для решения нестационарных задач теплопроводности.

Для проведения температурного анализа выбирается тип решения NLSCSH 153.

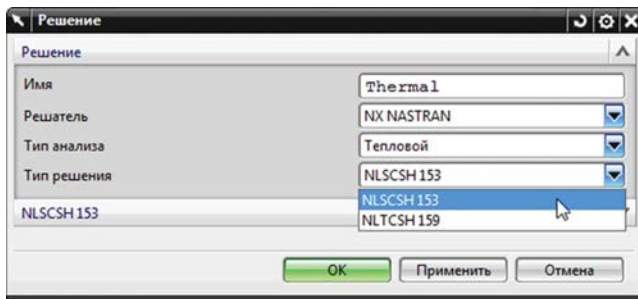


Рисунок 1.27. Задание типа решения для задачи теплопроводности

Во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** с помощью панели инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** вызывается команда **Тепловое ограничение (Thermal Constraints)** из набора команд **Тип ограничений (Constraint Type)**. В появившемся диалоговом окне задаются температурные граничные условия: на внутреннюю грань – 100 °С, на внешнюю – 20 °С. По умолчанию на всех остальных гранях реализовано условие равенства нулю теплового потока.

Для решения стационарной задачи теплопроводности, помимо свойств материала, необходимых для решения линейной статической задачи, требуется задать значение коэффициента теплопроводности.

На рисунке 1.28 показаны результаты решения задачи – распределение температур в шаре.

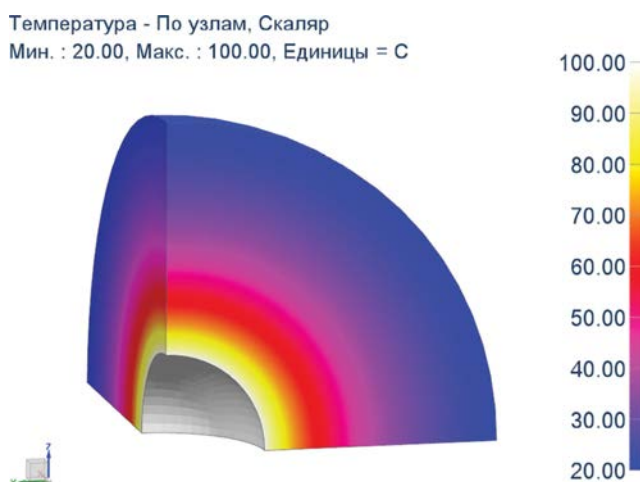


Рисунок 1.28. Поле распределения температуры

Далее необходимо выполнить запись результатов анализа теплопроводности в файл.

Для первого способа решения задачи термоупругости следует записать результаты температур по узлам либо координатам.

При отображаемом распределении температур во вкладке **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** вызывается команда **Определить значения (Identify Results)** панели инструментов **Постпроцессор (Post Processing)** (см. пп. 5.4 части I). Выбрав все узлы рассматриваемой конструкции, нужно произвести **Экспорт выбора в файл (Export Selection to a File)**. В дальнейшем созданный файл будет использован с помощью команды **Импорт из файла (Import From File)**.

При экспорте важно учитывать, как именно будут прикладываться температурные нагрузки в линейной статической задаче. В случае, когда используемая для решения задачи теплопроводности КЭ модель совпадает с КЭ моделью для решения линейно-статической задачи, записывается температура по узлам. В случае использования различных КЭ моделей необходимо сохранять результаты распределения температуры по координатам.

В диалоговом окне **Идентификация файла экспорта (Identify File Export)** в группе **Управление столбцов (Column Control)** следует выбрать компоненты, которые будут необходимы при дальнейшем импорте.

Для второго способа решения задачи термоупругости для задания температурной нагрузки используется файл результатов *.op2.

Для получения напряженно-деформированного состояния шара с учетом температурных нагрузок решается линейно-статическая задача. В качестве КЭ модели используется та же модель 1/8 шара (рисунок 1.26, А), что и в температурном расчете. На плоских гранях модели реализовано условие симметрии. При решении задачи линейной статики с учетом температурных деформаций в свойствах материала должен быть задан коэффициент температурного расширения.

Для первого способа задание температурной нагрузки осуществляется с помощью команды **Температурная нагрузка (Temperature Load)** из набора команд **Тип нагрузки (Load Type)** панели инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** (рисунок 1.29).

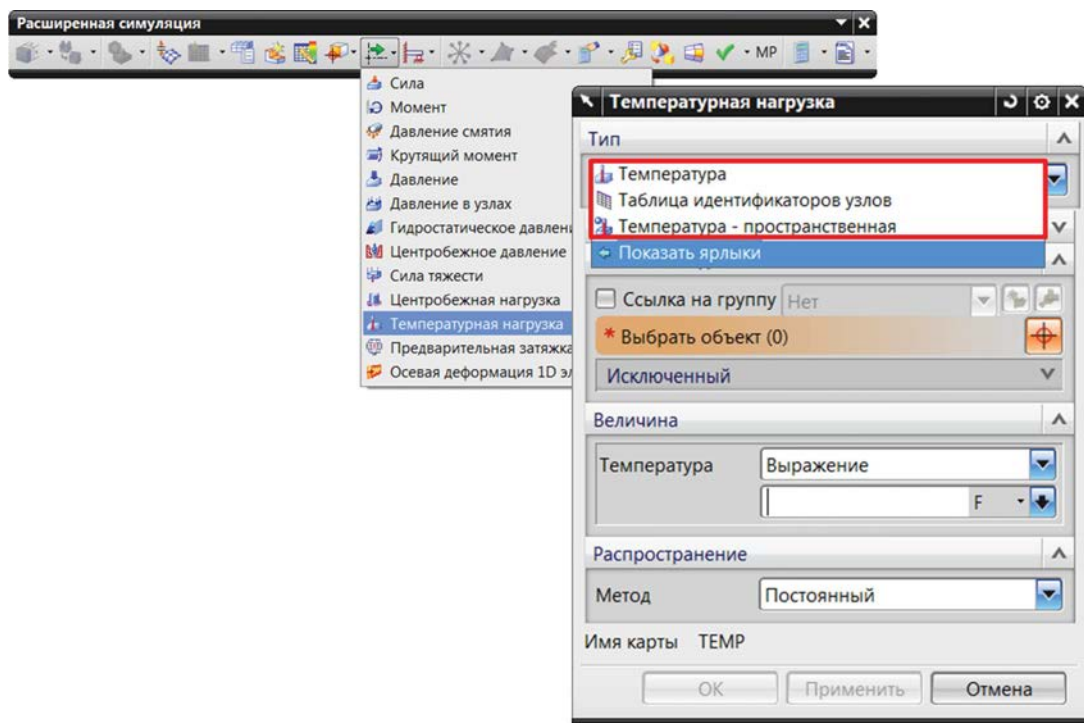


Рисунок 1.29. Задание температурной нагрузки

В появившемся диалоговом окне в группе **Тип (Type)** есть возможность задать температурную нагрузку указанием файла с данными распределения. Подробно процесс задания поля распределения данных при задании нагрузок описан в пп. 4.3 части I. В рассматриваемом примере удобнее воспользоваться типом **Таблица идентификаторов узлов (Node ID Table)**, так как при решении температурной задачи и линейной статики используется одна и та же КЭ модель.

Для второго метода задание температурной нагрузки осуществляется указанием файла результатов *.or2 задачи теплопроводности.

В контекстном меню расчетного случая решения для линейной статической задачи нужно вызвать команду **Изменить (Edit)**, в появившемся диалоговом окне **Шаг решения (Solution Step)** в группе **Температурная предварительная нагрузка (Temperature Pre-Load)** для параметра **Тип предварительной нагрузки (Pre-Load Type)** в выпадающем списке определяется, результаты какого решателя будут использованы для задания предварительной нагрузки (рисунок 1.30).

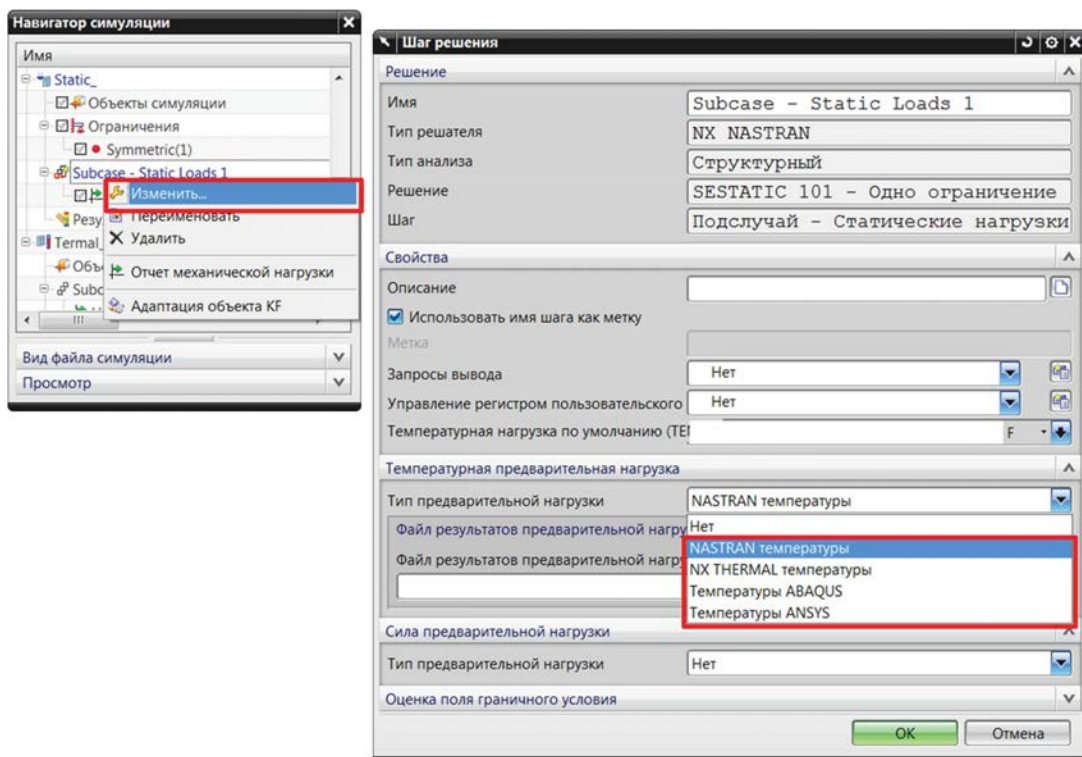


Рисунок 1.30. Задание температурной нагрузки указанием файла результатов *.or2

Допускается использование результатов решения задачи теплопроводности для следующих решателей:

- *NASTRAN температуры (NASTRAN Temperatures)*;
- *NX THERMAL температуры (NX THERMAL Temperatures)*;
- *Температуры ABAQUS (Temperatures ABAQUS)*;
- *Температуры ANSYS (Temperatures ANSYS)*.

Важно отметить, что при использовании решателя *NX THERMAL температуры (NX THERMAL Temperatures)* решение для задачи теплопроводности может быть получено с использованием КЭ модели, не совпадающей с КЭ моделью для линейно-статического решения. Для всех остальных решателей (при использовании файла результатов температурного анализа напря-

мую) должна использоваться одинаковая КЭ модель как для задачи теплопроводности, так и для линейной статики.

Результаты решения задачи термоупругости, полученные при использовании первого и второго способов, совпадают и представлены на рисунке 1.31.



Рисунок 1.31. Результаты решения задачи термоупругости, поле распределений радиальных напряжений, МПа

1.7.2. Приложение NX Multi-Physics Solution

NX Multi-Physics Solution является разработанным в среде NX Open приложением для решения мультидисциплинарных задач. Для NX версии 8 реализовано решение задачи с последовательным или одновременным учетом уравнений температурной задачи и линейной статики. Применение решения с одновременным учетом нескольких физик процесса необходимо, если постановка линейно-статической задачи зависит от результатов температурного анализа, и наоборот. Например, когда зона контактирующих поверхностей зависит от теплового расширения тел, а передача тепла зависит от площади контакта.

Для запуска рассматриваемого приложения необходимо добавить кнопку соответствующей команды на панель инструментов. При вызове созданной команды появляется диалоговое окно **Multi-Physics Solution** с четырьмя вкладками (рисунок 1.32).

Во вкладке *MP* указываются следующие параметры:

- *Имя решения (Solution Name)* – имя мультифизического решения;
- параметр *Coupling Mode*:
 - а) *Итерационный (Iterative)* – определяет решение за несколько шагов задач статики и температурного анализа;

- б) *Последовательный (Sequential)* – определяет последовательное решение задачи статики и температурного анализа за один шаг;
- параметр *Dynamics Type*:
 - а) *Установившийся режим (Steady State)* – соответствует решению стационарной задачи теплопроводности;
 - б) *Переходный процесс (Transient)* – соответствует решению нестационарной задачи теплопроводности.

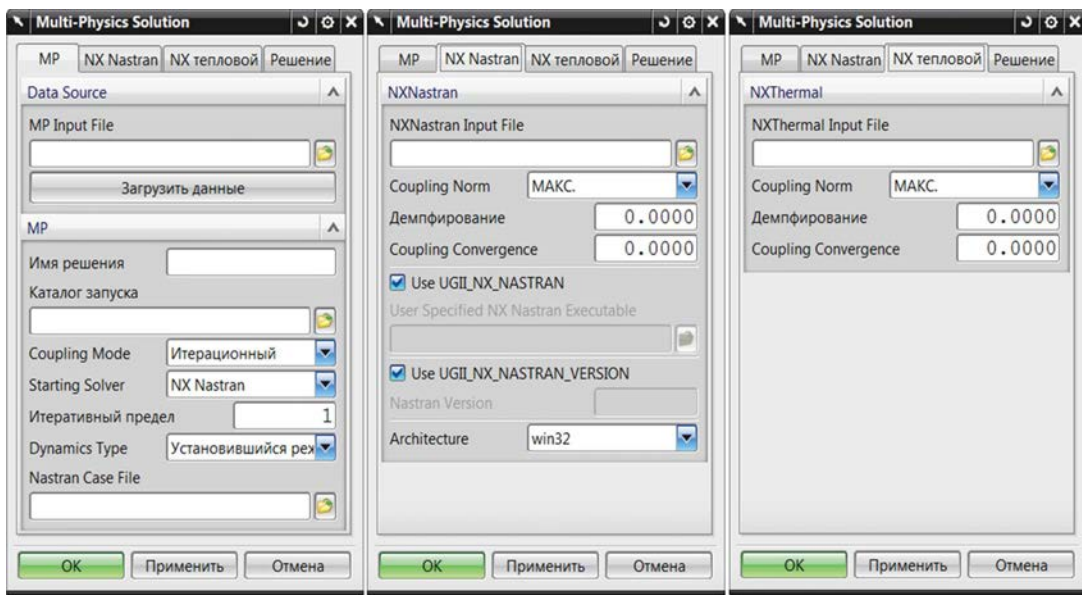


Рисунок 1.32. Интерфейс приложения NX Multi-Physics Solution

Во вкладке *NX Nastran* в поле *NXNastran Input File* необходимо задать заранее подготовленный входной *.dat файл линейной статической задачи.

Во вкладке *NX Thermal* в поле *NXThermal Input File* следует задать заранее подготовленный входной *.dat файл температурного анализа.

После задания всех данных нужно выполнить команду Решить (*Solve*) для запуска расчета.

1.8. Оптимизационный анализ

При проектировании нового изделия часто ставится задача по определению его оптимального конструктивного исполнения. Процесс оптимизации использует варьирование параметров конструкции и дает возможность получить множество альтернативных вариантов ее исполнения, среди которых выбирается лучший. Практическая оптимизация – это итерационный процесс достижения оптимального соотношения проектных параметров. В терминах оптимизации конструкций в NX Nastran существуют три типа проектных параметров:

- целевая функция – параметр, рассчитываемый для каждой итерации, характеризует основную цель оптимизации, например минимизация веса, увеличение жесткости, уменьшение напряжений, возникающих в конструкции;
- проектные переменные – это набор параметров конструкции, варьированием которых достигаются цели оптимизации. При этом задается диапазон возможного изменения каждой проектной переменной;
- проектные ограничения – задаваемые пользователем предельные значения физических величин результатов. В качестве проектных ограничений могут использоваться значения напряжений и перемещений, вес и объем, собственные частоты конструкции и др. В процессе оптимизации сравниваются значения получаемых физических величин со значениями проектных ограничений. В том случае, если найденное на какой-либо итерации значение не удовлетворяет заданным условиям, процесс поиска оптимального решения продолжается с предыдущей итерации.

Оптимизационная модель может содержать десятки или сотни проектных переменных, поэтому поиск их оптимального соотношения в пределах проектных ограничений для выполнения целевых функций, которых также может быть несколько, является сложно выполнимой задачей. В проектной деятельности для решения задач оптимизации нашли широкое применение специализированные инструменты численного анализа.

Приложение **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** включает следующие решения для проведения оптимизации:

- геометрическая оптимизация;
- параметрическая оптимизация;
- топологическая оптимизация;
- анализ чувствительности конструкций.

В рамках данной главы подробно рассмотрим решение для геометрической оптимизации, реализованной в модуле **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)**.

1.8.1. Геометрическая оптимизация

Приложение **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** позволяет проводить геометрическую оптимизацию конструкции, или, другими словами, оптимизацию ее формы. Для этих целей используется модуль Оптимизация геометрии (**Geometry Optimization**), поддерживающий следующие типы решений NX Nastran:

- линейный статический анализ (*SESTATIC 101*);
- анализ частот и форм колебаний (*SEMODES 103*);
- анализ устойчивости (*SEBUCKL 105*);
- нелинейный статический анализ (*NLSTATIC 106*);
- анализ стационарной теплопроводности (*NLSCSH 153*).

Алгоритм оптимизации, реализованный в решателе NX Nastran, относится к градиентным методам [26]. Процесс поиска может быть кратко представлен следующим образом: для конкретной точки в пространстве проектных параметров определяются градиенты целевой функции и ограничений, на основе которых определяется направление поиска. Далее вычислительный процесс продолжается в этом направлении до крайней точки, в которой не происходит нару-

шения проектных ограничений. Затем определяется, является ли эта точка оптимальной. Если точка не соответствует оптимуму, то процесс запускается заново и повторяется до тех пор, пока не будет достигнута точка, где невозможны дальнейшие улучшения для достижения цели без нарушения ограничений.

Запуск модуля **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)** осуществляется двумя способами:

- через контекстное меню файла симуляции во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator): Новый процесс решения (New Solution Process) → Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)** (рисунок 1.33);
- через главное меню: **Вставить (Insert) → Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)**.

В результате выполнения одного из данных способов появляется диалоговое окно **Создать решение оптимизации геометрии (Create Geometry Optimization Solution)**, в котором необходимо выбрать, на основе какого решения будет проводиться оптимизация геометрии (рисунок 1.33), а также тип оптимизации:

- *Altair HyperOpt* – выполнение непосредственно геометрической оптимизации;
- *Global Sensitivity (Общая чувствительность)* – анализ чувствительности конструкции, целью которого является определение проектных переменных, к изменению которых наиболее чувствительны целевые функции исследуемой конструкции в пределах заданных проектных ограничений. Получаемые значения в терминах **NX Расширенная симуляция (NX Advanced Simulation)** называются коэффициентами чувствительности конструкции. Данный анализ используется как отдельное решение, результаты которого могут быть применены в качестве предварительного этапа для геометрической оптимизации.

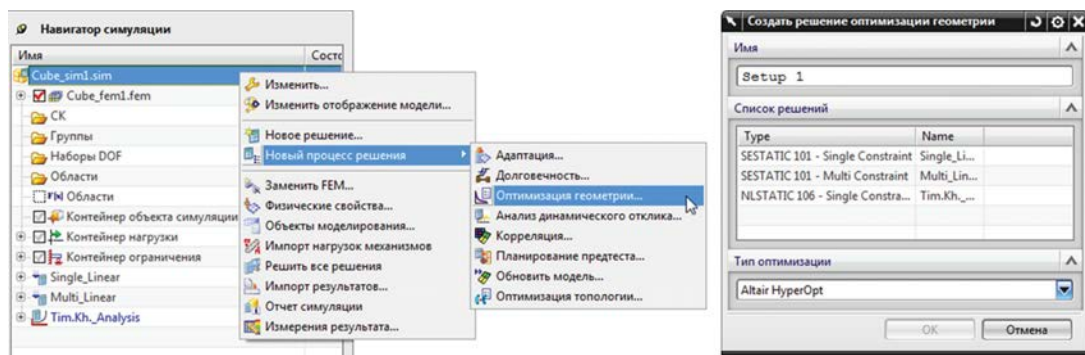


Рисунок 1.33. Запуск модуля Оптимизация геометрии

После нажатия **OK** открывается диалоговое окно **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)**, состоящее из пяти вкладок. За исключением первой вкладки *General Setup*, в которой присваивается имя текущему решению оптимизации и может быть выбран тип оптимизации, остальные предназначены для задания параметров оптимизации. Далее описывается пошаговый процесс создания решения оптимизации в соответствии с заданием параметров оптимизации во вкладках диалогового окна **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)**.

При выборе вкладки *Define Objective* в диалоговом окне **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)** задаются целевая функция и соответствующие ей параметры (рисунок 1.34):

- *Категория (Category)* – выбор типа КЭ, участвующих в оптимизации: *1D цели (1D Objectives)* – участвуют только 1D КЭ сетки; *2D цели (2D Objectives)* – участвуют 2D КЭ сетки; *3D цели (3D Objectives)* – участвуют только 3D КЭ сетки; *Объекты модели (Model Objectives)* – участвуют все КЭ сетки. При выборе *Объекты модели (Model Objectives)* параметр *Применить к (Apply to)* неактивен;
- *Тип (Type)* – в качестве оптимизируемых переменных используются такие физические величины, как напряжения, перемещение, деформации, собственные частота, вес, объем и температура;
- *Применить к (Apply to)* – выбор геометрического объекта модели для оптимизации. Набор доступных геометрических объектов зависит от заданной физической величины. Например, оптимизация по весу и объему доступна только для твердых тел, а при выборе оптимизации по напряжению возможно указать твердые тела, грани, ребра, точки. Если заданная физическая величина векторная или тензорная, то необходимо выбрать соответствующую компоненту;
- *Параметры (Parameters)* – доступны минимизация, максимизация и приведение к заданному значению целевой функции.

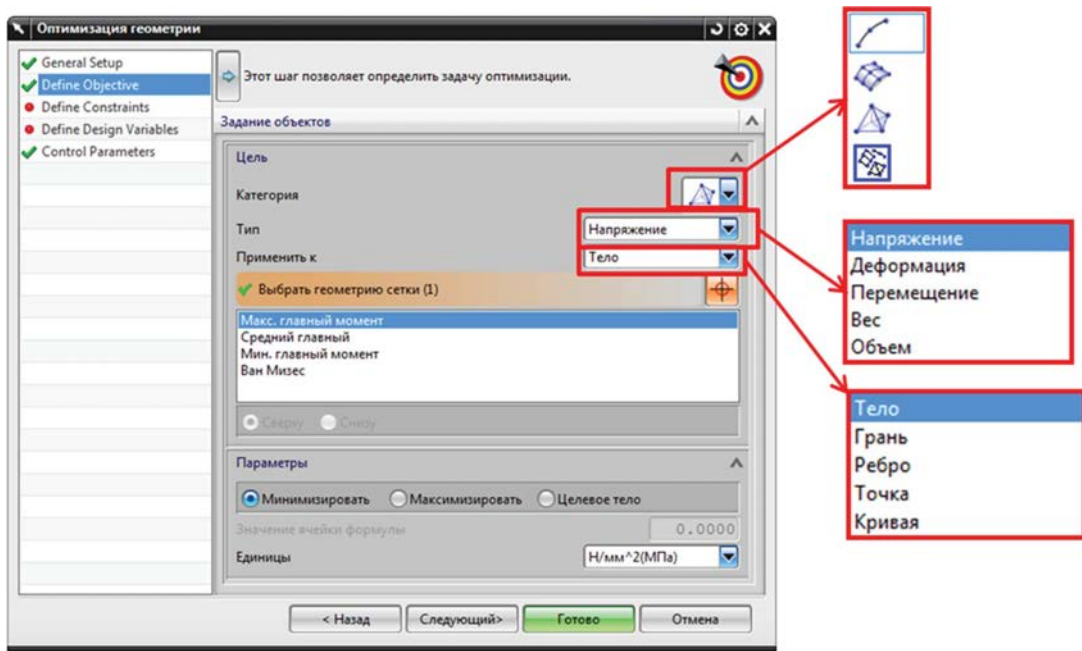


Рисунок 1.34. Задание целевых функций

В качестве проектных ограничений используются перемещение, напряжение и деформация, усилие реакции, собственная частота, значения температур, вес и объем. Для вызова диалогового окна **Задать ограничения (Define Constraints)** необходимо выполнить команду **Создать ограничения (Create Constraints)** в диалоговом окне **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)** во вкладке *Define Constraints* (рисунок 1.35). При задании проектных ограничений,

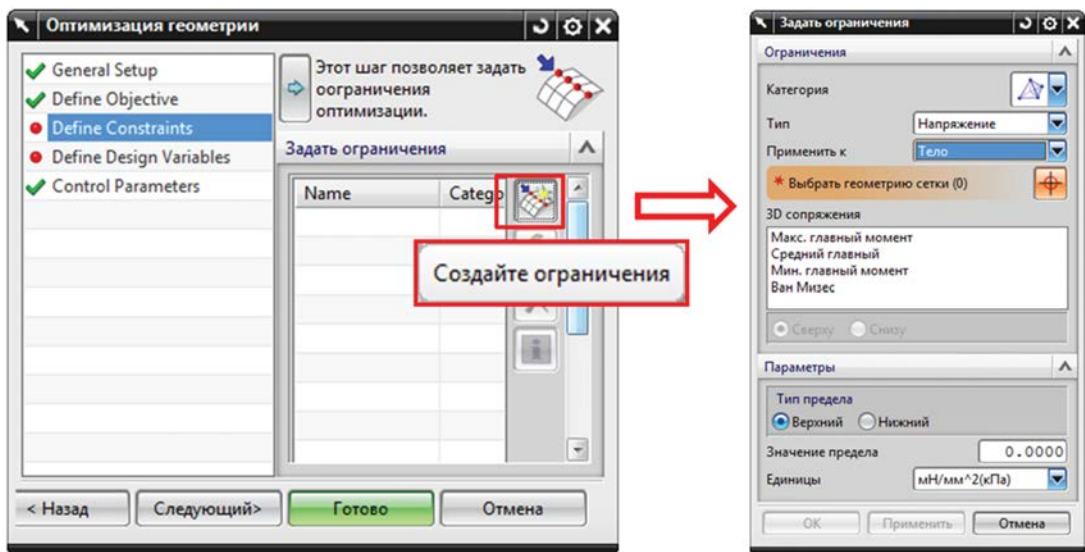


Рисунок 1.35. Задание проектных ограничений

так же как и целевой функции, следует выбрать тип элементов – *Категория (Category)*, физическую величину – *Тип (Type)*, геометрический объект модели – *Применить к (Apply to)*. В группе *Параметры (Parameters)* задается *Значение предела (Limit Value)* и выбирается его тип, соответственно, либо верхний предел – *Верхний (Upper)*, либо нижний предел – *Нижний (Lower)*.

Под проектными переменными, изменением которых достигается оптимум целевой функции в пределах заданных проектных ограничений, понимаются следующие параметры модели (рисунок 1.36):

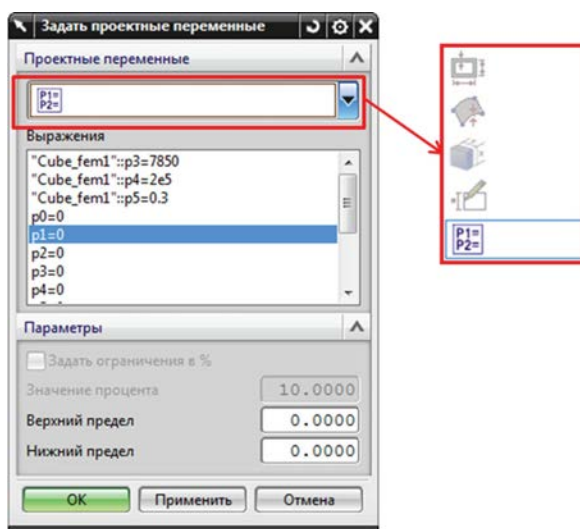


Рисунок 1.36. Задание проектных переменных

- параметры сечений для 1D стержневых элементов;
- толщины 2D оболочечных элементов;
- геометрические параметры CAD-модели;
- размеры эскизов, на основе которых создается КЭ модель.

Для вызова диалогового окна **Задать проектные переменные (Define Design Variables)** необходимо выбрать вкладку *Define Design Variables* и выполнить команду **Создайте переменные проекта (Create Design Variables)**. Все типы проектных переменных представлены в выпадающем списке. В группе *Параметры (Parameters)* задается диапазон изменения проектных переменных.

При выборе вкладки *Control Parameters* в диалоговом окне **Оптимизация геометрии (Geometry Optimization)** задаются параметры для решения алгоритма оптимизации (рисунок 1.37):

- *Максимальное число итераций (Maximum Number of iterations)* – количество итераций, при достижении которого вычислительный процесс будет остановлен независимо от результата;
- *Нарушение максимального ограничения (%) (Maximum Constraint Violation)* – процент, на который условия проектных ограничений могут быть нарушены для достижения результата;
- *Относительная сходимость (Relative Convergence)(%)* – изменение в процентах значения целевой функции за последние две итерации. Решение считается сошедшимся, если изменение меньше данного значения;
- *Абсолютная сходимость (Absolute Convergence)* – действительное изменение значения целевой функции за две последовательные итерации. Решение считается сошедшимся, если изменение меньше заданного в этом поле значения;
- *Фракция возмущения (Perturbation Fraction)* – разрешенное изменение проектных переменных в долях в течение первых итераций;
- *Сохранить результат и все итерации (Save results for all iterations)* – контроль сохранения результатов для итераций.

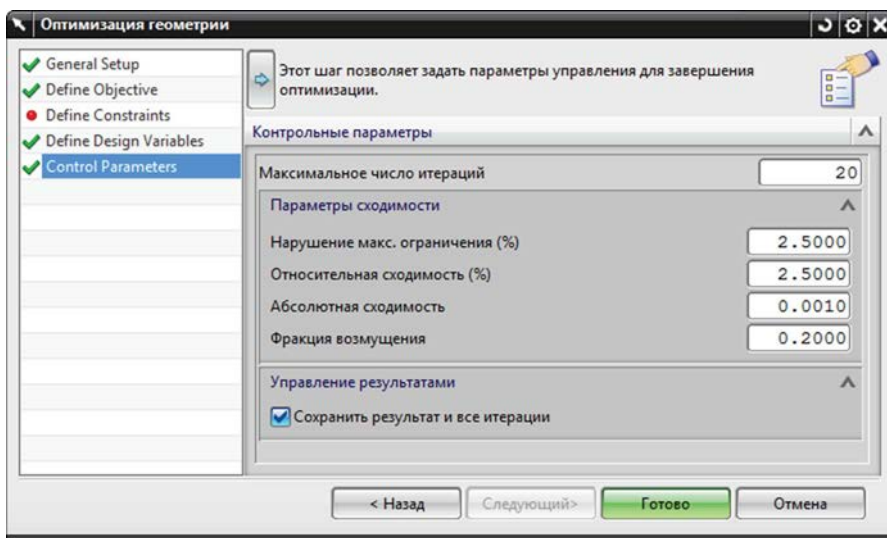


Рисунок 1.37. Задание параметров решателя оптимизации

1.8.2. Другие решения для оптимизации конструкций

В приложении NX Advanced Simulation реализован инструмент для проведения топологической оптимизации. Модуль *Топологическая оптимизация* (Topology Optimization) позволяет получить оптимальное распределение материала для разрабатываемой конструкции на основе ее геометрической и конечно-элементной модели с учетом заданных нагрузок и ограничений при удовлетворении эксплуатационным и технологическим требованиям. В процессе выполнения топологической оптимизации создается конфигурация детали, соответствующая заданным целевым функциям и проектным ограничениям.

В таблице представлены целевые функции и проектные ограничения в зависимости от типа решения NX Nastran.

Тип анализа	Целевые функции	Проектные ограничения
Линейный статический (<i>SESTATIC 101</i>)	Объем Напряжение/Деформация Перемещения	Объем Перемещения Реакции
Частотный (<i>SEMODES 103</i>)	Объем Частота	Объем Частота

В топологической оптимизации в качестве проектной переменной используется относительная плотность конечных элементов модели, изменением которой определяется оптимальное распределение материала. В результате расчета создается модель, состоящая из «жестких» элементов, относительная плотность которых равна единице, и «пустых» элементов с нулевой относительной плотностью. Исходя из напряженно-деформированного состояния конечного элемента, определяются области, где нет необходимости в материале («пустые» элементы). Таким образом, при оптимизации происходит исключение из модели наименее нагруженных конечных элементов, и в результате генерируется новая конфигурация модели в пределах пространства первоначальной геометрии (рисунок 1.38).

Результат распределения материала по объему рассматриваемой конструкции зависит от связанных с технологией производства ограничений:

- «заморозка» элементов – задание области конечно-элементной модели, которую нельзя изменять по конструктивным соображениям;
- условия симметрии – задание параметров для зеркальной либо циклической симметрии;
- максимальный и минимальный размеры – контроль толщин образуемых в процессе оптимизации новых конструктивных элементов детали;
- параметры литья – предотвращение образования впадин и пустот.

На основании полученных результатов распределения плотности материала генерируется файл формата *.STL* или *.IGES*, содержащий модель в виде фасетного представления. Данный файл может использоваться в приложении **NX Моделирование (NX Modeling)** в качестве исходной конфигурации для получения новой оптимальной геометрии, что особенно актуально на стадии разработки нового изделия.

Тип решения *DESOPT 200* решателя NX Nastran дает возможность проводить оптимизацию конструкции посредством изменения физических свойств расчетной модели.

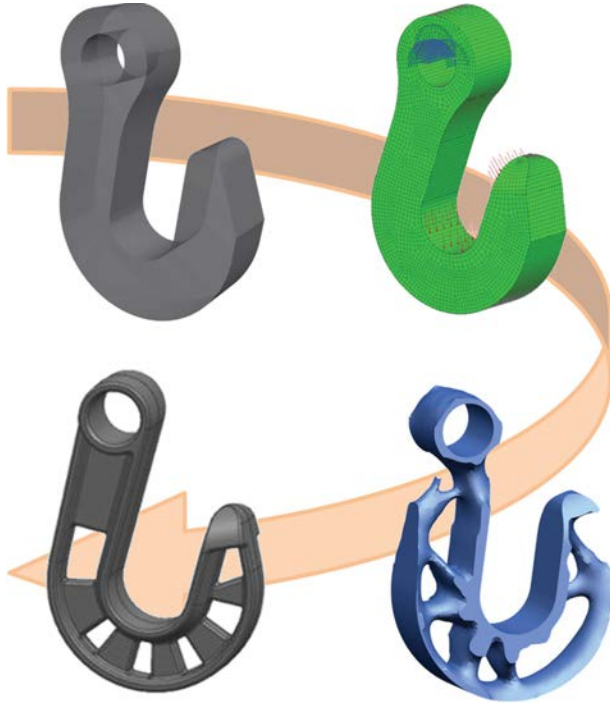


Рисунок 1.38. Топологическая оптимизация

В рамках одного процесса оптимизации можно использовать несколько разных типов решений, что позволяет одновременно учесть широкий набор проектных переменных и ограничений.

Доступные типы решений для NX Nastran *DESOPT 200*:

- линейный статический (*SESTATIC 101*);
- определение собственных частот и форм колебаний (*SEMODES 103*);
- анализ устойчивости (*SEBUCKL 105*);
- частотные анализы (*SEDCEIG 107*, *SEDFREQ 108*, *SEMSEIG 110*, *SEMFREQ 111*);
- модальный переходной анализ (*SEMTRAN 112*).

Выбор целевой функции зависит от типа решения.

Тип анализа	Целевые функции
Линейный статический (<i>SESTATIC 101</i>)	Объем, напряжение/деформация, перемещения, усилие реакции
Модальный (<i>SEMODES 103</i>)	Объем, номер формы собственной частоты
Устойчивость (<i>SEBUCKL 105</i>)	Номер формы потери устойчивости
Частотные	Динамические напряжения, перемещение, скорость, ускорение, значения частот
Модальный переходной (<i>SEMTRAN 112</i>)	Динамические напряжения, перемещение, скорость, ускорение, значения частот

В качестве проектных переменных используются:

- свойства материалов (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность материала, коэффициент температурного расширения);
- физические свойства 2D элементов, в том числе свойства многослойных оболочек (толщины слоев, ориентация материалов);
- свойства 1D и 0D элементов (параметры сечений, инерционные и жесткостные характеристики, демпфирование);
- расположение узлов 2D, 1D и 0D элементов.

1.9. Лабораторная работа. Решение задачи с учетом линейного контактного взаимодействия

В данном примере на основе подготовленной КЭ модели рассматривается решение задачи термоупругости с учетом контактного взаимодействия. Конструкция состоит из тонкостенного цилиндра, зажатого между плоскими листами (рисунок 1.39).

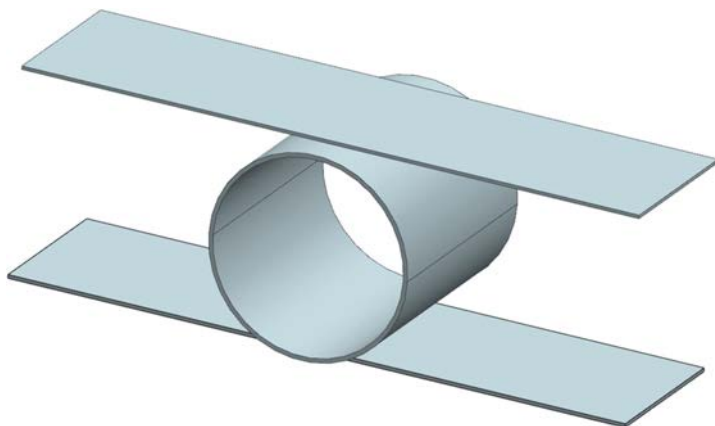


Рисунок 1.39. Тонкостенный цилиндр между плоскими листами

Предполагается, что боковые ребра пластин закреплены, как показано на рисунке 1.40, и на них поддерживается температура 100 °С, на боковых ребрах цилиндра поддерживается температура 500 °С.

При подготовке КЭ модели использовались срединные поверхности, построенные на основе тонкостенных тел с учетом симметрии. Конструкция, и заданные граничные условия, и нагрузки являются симметричными относительно плоскостей XOY, XOZ и YOZ (рисунок 1.41). Толщины для 2D оболочечных элементов присваиваются автоматически, исходя из толщин геометрии. В качестве материала тел задана сталь из библиотеки материалов NX Advanced Simulation.

Для моделирования соприкасающихся поверхностей при решении задачи теплопроводности используется условие «склеивание», при решении линейного статического анализа задается линейный контакт.

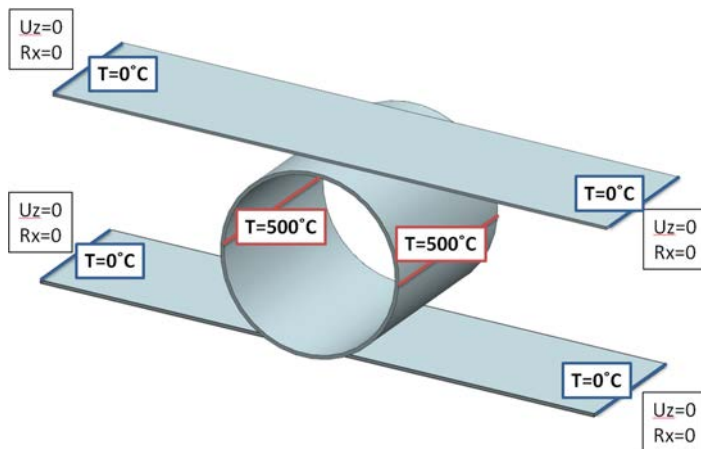


Рисунок 1.40. Температуры и закрепления конструкции

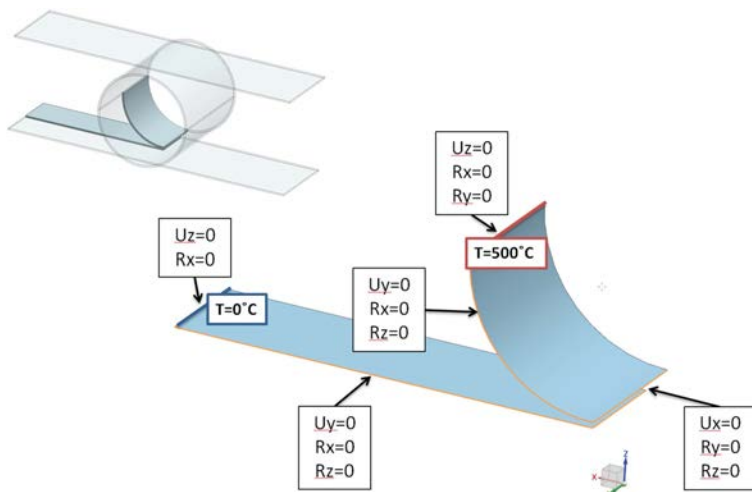


Рисунок 1.41. Оболочечная модель конструкции с учетом симметрии

Проведение инженерного анализа для данной задачи состоит из нескольких этапов:

1. Открытие КЭ модели и создание нового файла расчетной модели.
2. Постановка задачи температурного анализа: задание условий склеивания, температурных нагрузок и граничных условий с учетом симметрии.
3. Выполнение температурного анализа.
4. Создание решения для линейного статического анализа.
5. Задание граничных условий и распределения температур, линейного контакта.
6. Выполнение линейного статического анализа и просмотр результатов.

В предложенном примере для вызова команд используется панель инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)**.

Открытие КЭ модели и создание нового файла расчетной модели

Запустите NX и откройте файл *Cylinder_fem.fem*, перейдите в модуль **NX Расширенная симуляция (Advanced Simulation): Начало** → **Расширенная симуляция, Start** → **Advanced Simulation**.

Задайте все настройки диалоговых окон по умолчанию, выберите через главное меню: **Настройки** → **Интерфейс пользователя** → **Общий** → **Сбросить настройки меню (Preferences)** → **User Interface** → **General** → **Reset Dialog Box Settings**, нажмите **OK**.

Нажмите правую клавишу мыши на КЭ модель в **Навигаторе симуляции (Simulation Navigator)** или окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)**. Выберите **Новая симуляция (New Simulation)** для создания расчетной модели. В появившемся диалоговом окне создания расчетного файла введите имя *Cylinder_sim1* и директорию для нового файла. Убедитесь, что в качестве шаблона выбран NX Nastran, нажмите **OK**. В диалоговом окне создания файла симуляции нажмите **OK**. В новом окне **Решение (Solution)** выберите решатель и новое решение:

- **Имя (Name)** – введите *Thermal_cyl*;
- **Тип анализа (Analysis Type)** – **Тепловой (Thermal)**;
- **Типа решения (Solution Type)** – **NLSCSH153**.

Нажмите **OK**.

Таким образом, на основе исходной КЭ модели создается расчетная модель. В окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)** активным является файл расчетной модели. Обратите внимание, что дерево модели файла симуляции наполнилось пустыми контейнерами, которые необходимо заполнить при создании полноценной расчетной модели.

Постановка задачи температурного анализа: задание условий склеивания, температурных нагрузок и граничных условий с учетом симметрии

Рассматриваемая КЭ модель содержит 2D оболочечные конечные элементы, которые не связаны друг с другом. Для корректного описания теплового соединения между телами создается объект симуляции типа **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)**. Для этого из выпадающего меню **Тип объекта симуляции (Simulation Object Type)** панели **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** выберите команду **Соединение поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Gluing)**.

В появившемся диалоговом окне выполните следующие действия (рисунок 1.42):

- для типа **Автоматическое соединение (Automatic Pairing)** нажмите на команду **Создание пар граней (Create Face Pairs)**;
- в новом окне выберите все грани, как показано на рисунке 1.42;
- так как необходимые грани отстоят друг от друга на расстояние, равное половине суммы толщин тонкостенных тел, задайте 4 мм в поле **Линейный допуск (Distance Tolerance)**;
- нажмите **OK**;
- установите 1 мм в поле **Расстояние поиска (Search Distance)**;
- нажмите **OK**.

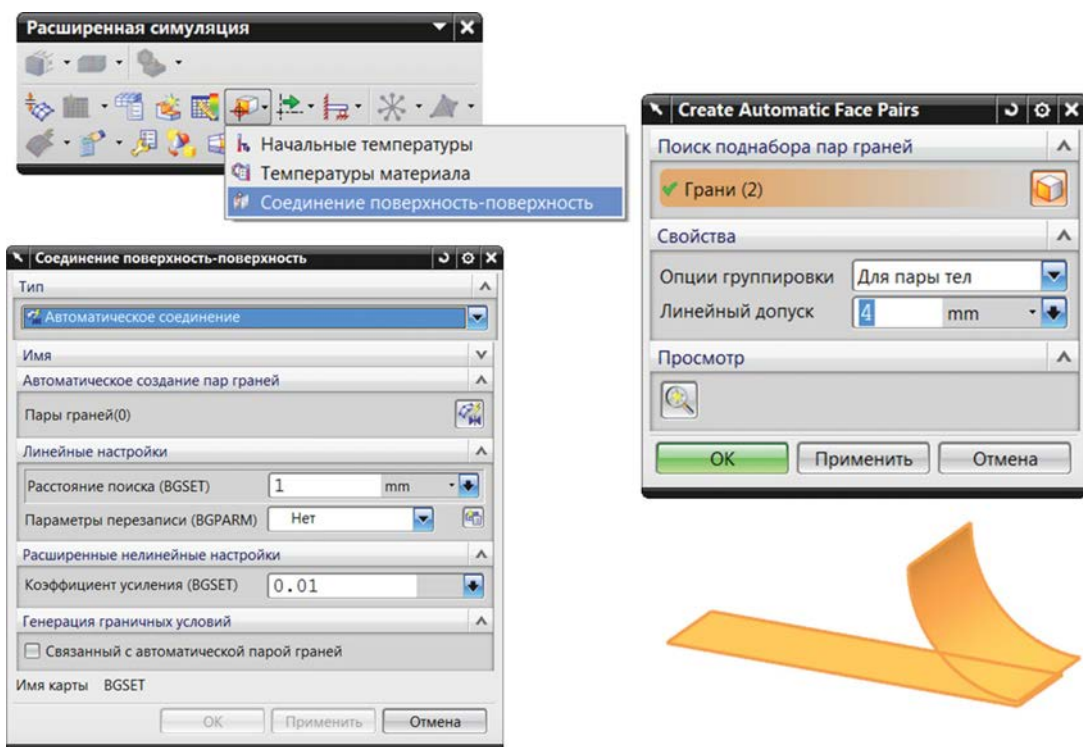


Рисунок 1.42. Задание объекта симуляции Соединение поверхность–поверхность

Обратите внимание, что в дереве модели в узле *Контейнер* объекта симуляции (*Simulation Object Container*) появился новый объект, соответствующий созданному соединению.

Для задания граничных условий в панели инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** из выпадающего меню **Тип ограничения (Constraint Type)** выполните команду **Тепловое ограничение (Thermal Constraint)**. В появившемся диалоговом окне выберите левое боковое ребро на плоской оболочке в соответствии с рисунком 1.43 и задайте в поле *Температура (Temperature)* значение $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нажмите **Применить (Apply)**.

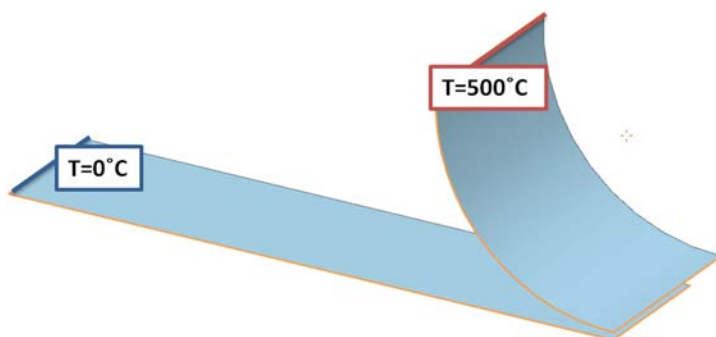


Рисунок 1.43. Задание температурных граничных условий

Повторите действия для задания второго ограничения, указав верхнее ребро цилиндрической поверхности и задав температуру 500 °С. Нажмите **ОК**.

Выполнение температурного анализа и просмотр результатов

В дереве расчетной модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** отображены контейнеры нагрузок, ограничений и объектов симуляции, раскройте их и проверьте правильность их задания. Модель готова для запуска на расчет. Сохраните модель, для этого в **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** нажмите правой клавишей мыши на *Cylinder_sim1* в окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)** и выберите **Сохранить (Save)**.

Для запуска созданной расчетной модели на решение нажмите правой клавишей мыши на *Thermal_cyl* и выберите **Решить... (Solve...)**. Нажмите **ОК**.

При появлении надписи «*Задача выполнена (Job Finished)*» в **Монитор решения (Solution Monitor)** закройте все новые окна, отвечающие за решение.

Для загрузки и анализа полученных результатов в дереве расчетной модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** дважды нажмите левой клавишей мыши на узел *Results* активного решения *Thermal_cyl*. Во вкладке **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** для просмотра результатов раскройте узел *Thermal_cyl* и выберите *Температура – По узлам (Temperature – Nodal)* двойным нажатием левой клавиши мыши.

В графической области отображается распределение температуры по узлам (рисунок 1.44, А).

Самостоятельно, используя команды панели инструментов **Постпроцессор (Post Processing)**, отобразите результаты только для цилиндрической поверхности (для этого потребуется создать группу соответствующих элементов или узлов) (рисунок 1.44, Б).

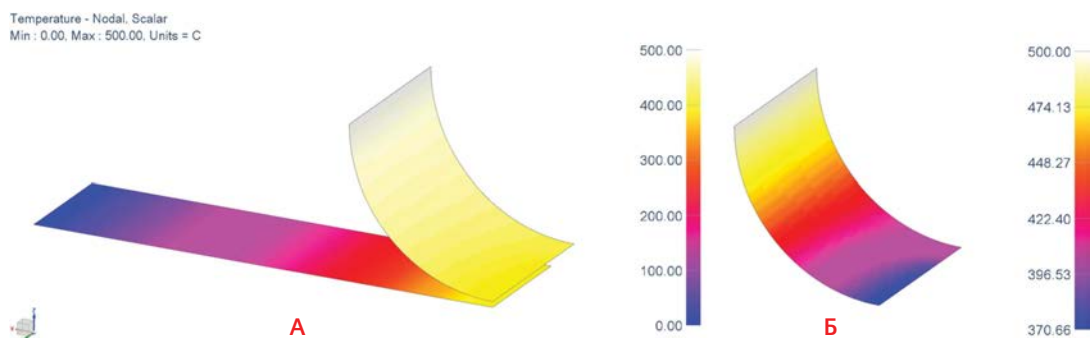


Рисунок 1.44. Поля распределения температуры по узлам: А – для всей конструкции, Б – для тонкостенного цилиндра

Создание решения для линейного статического анализа

Создайте еще один расчетный случай, соответствующий статическому анализу. Для этого во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** нажмите правой клавишей мыши на *Cylinder_sim1* и выберите **Новое решение (New Solution)**.

В появившемся окне **Решение (Solution)** выберите решатель и новое решение:

- *Имя (Name)* – *Static_cyl*;
- *Тип анализа (Analysis Type)* – *Структурный (Structural)*;
- *Типа решения (Solution Type)* – *SESTATIC 101 – Одно ограничение.*

Нажмите **ОК**.

Обратите внимание, что в дереве модели файла симуляции в узле решения *Static_cyl* находится автоматически созданный расчетный случай *Subcase – Static Loads 1*.

Задание граничных условий, распределения температур, линейного контакта

С помощью панели инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** вызовите команду **Ограничения, задаваемые пользователем (User Defined Constraint)**. Задайте для ребер граничные условия, соответствующие закреплениям и условиям симметрии, как показано на рисунке 1.45.

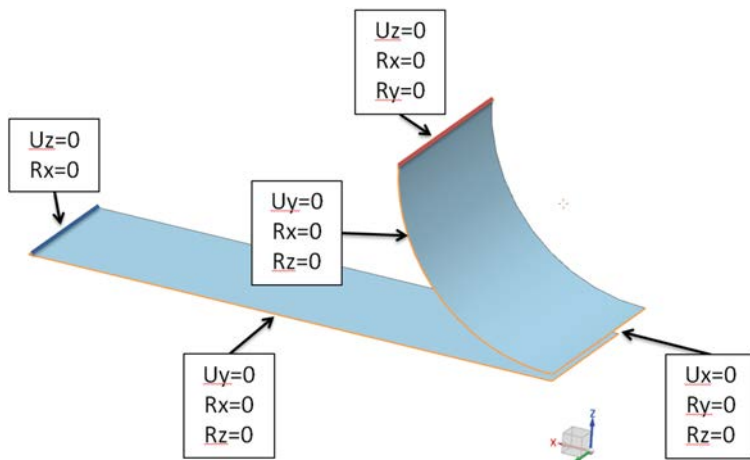


Рисунок 1.45. Задание граничных условий

Появившийся значок **Обновить** на узле решения *Static_cyl* во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** демонстрирует наличие конфликта ограничений. Для разрешения конфликта нажмите правой клавишей мыши на *Static_cyl* и выберите в контекстном меню команду **Решение ограничений... (Resolve Constraints...)**. В появившемся диалоговом окне представлен список конфликтов. Для каждого проделайте следующие действия (рисунок 1.46):

- правой клавишей мыши вызовите контекстное меню;
- выполните команду *Keep Overlapping*, то есть используйте оба ограничения в соответствующих зонах.

Для задания линейного контакта между телами выполните команду **Контакт поверхность–поверхность (Surface-to-Surface Contact)** на панели **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)**.

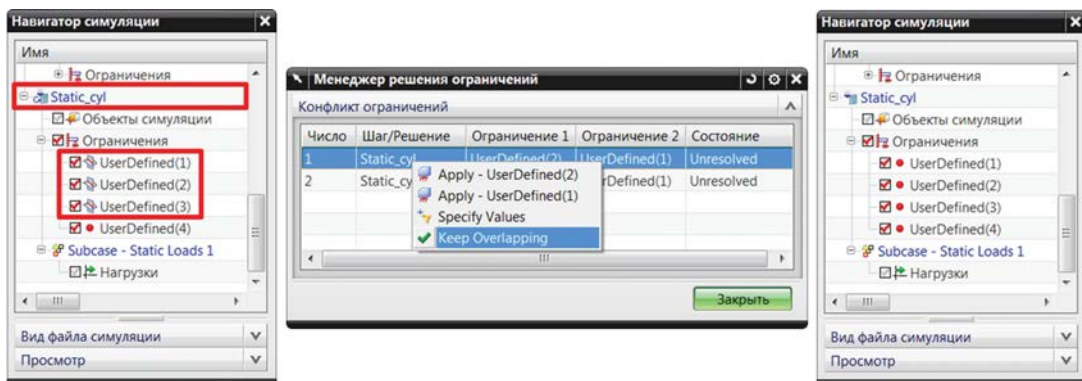


Рисунок 1.46. Решение конфликтов ограничений

В диалоговом окне выполните следующие действия (рисунок 1.47):

- для типа *Автоматическое соединение (Automatic Pairing)* выполните команду **Автоматическое создание пар граней (Automatic Face Pair Creation)**;
- в новом окне выберите все грани;

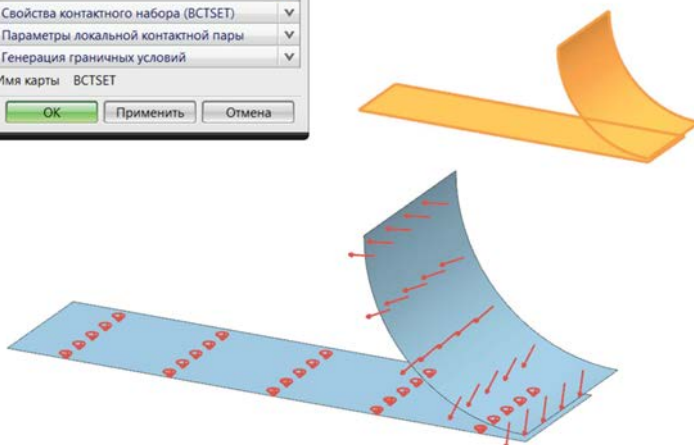
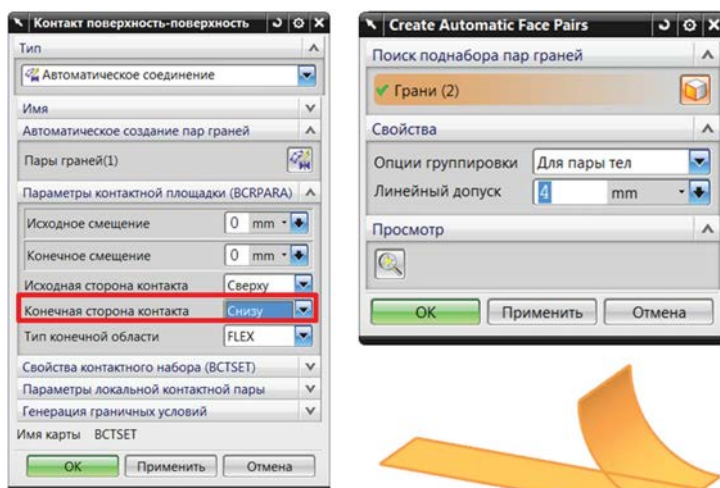


Рисунок 1.47. Задание контактного взаимодействия

- в поле параметра *Линейный допуск (Distance Tolerance)* задайте 4 мм;
- нажмите **ОК**;
- для параметра *Конечная сторона контакта (Target Contact Side)* выберите из выпадающего списка значение *Снизу (Bottom)*;
- нажмите **ОК**.

После вышеописанных действий во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** в дереве модели в узле *Контейнер объекта симуляции (Simulation Object Container)* появляется новый объект, соответствующий созданному контакту.

Так как предполагается, что на модель действует поле температуры, то также необходимо задать начальную температуру. Для этого на панели инструментов **Расширенная симуляция (Advanced Simulation)** вызовите команду *Начальная температура (Initial Temperatures)*. В появившемся диалоговом окне выберите все тела и укажите значение температуры 20 °С.

Для задания температурной нагрузки с помощью файла результатов задачи теплопроводности во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** в контекстном меню узла расчетного случая *Subcase – Static Loads 1* выберите команду *Изменить (Edit)*. В появившемся диалоговом окне *Шаг решения (Solution Step)* в группе *Температурная предварительная нагрузка (Temperature Pre-Load)* задайте следующие данные:

- для параметра *Тип предварительной нагрузки (Pre-Load Type)* из списка возможных значений выберите *NASTRAN температуры (NASTRAN Temperatures)*;
- для появившегося параметра *Файл результатов предварительной нагрузки NASTRAN (NASTRAN Pre-Load Results File)* укажите файл *.op2 решения задачи теплопроводности – *Cylinder_sim1-thermal_cyl.op2*.

Выполнение расчета и просмотр результатов статического анализа

В дереве расчетной модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** в узле решения *Static_cyl* отображены контейнеры нагрузок, ограничений и объектов симуляции, раскройте их и проверьте правильность их задания. Теперь модель готова для запуска на расчет. Сохраните модель, для этого во вкладке **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** нажмите правой клавишей мыши на *Cylinder_sim1* в окне **Вид файла симуляции (Simulation File View)** и выберите *Сохранить (Save)*.

Запустите созданную расчетную модель на решение, нажав правой клавишей мыши на *Static_cyl* и выбрав *Решить... (Solve...)*. Нажмите **ОК**.

При появлении надписи «*Задача выполнена (Job Finished)*» в окне **Монитор решения (Solution Monitor)** закройте все новые окна, отвечающие за решение.

Для загрузки и анализа полученных результатов в дереве расчетной модели вкладки **Навигатор симуляции (Simulation Navigator)** дважды нажмите левой клавишей мыши на узел *Results* активного решения *Static_cyl*. Во вкладке панели ресурсов **Навигатор постпроцессора (Post Processing Navigator)** для просмотра результатов раскройте узел *Static_cyl* и выберите *Перемещение по узлам (Nodal Displacement)* двойным нажатием левой клавиши мыши.

В графической области отобразится поле распределения перемещений по узлам (рисунок 1.48, А).

Самостоятельно, используя команды панели инструментов **Постпроцессор (Post Processing)**, отобразите результаты только для пластины (рисунок 1.48, Б) (для этого потребуется создать группу соответствующих элементов или узлов). Прогиб в пластине возникает вследствие контактного взаимодействия с тонкостенным цилиндром, который расширяется под действием температуры.

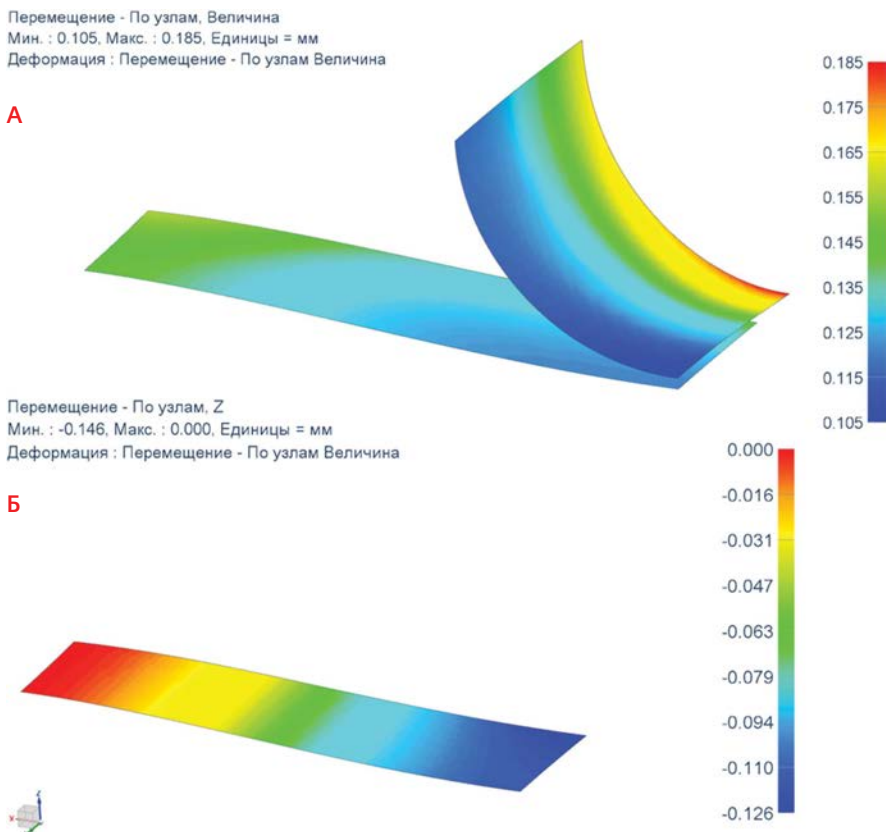


Рисунок 1.48. Распределение:

А – модуля вектора перемещения для всей конструкции,
Б – компоненты вектора перемещения по оси Z для пластины