



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

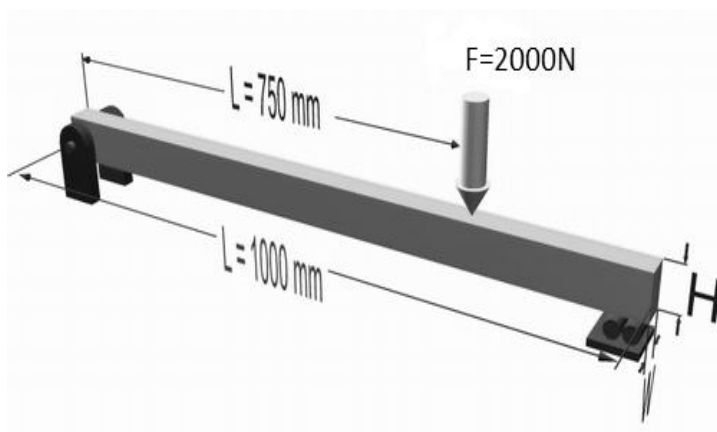
Белорусский национальный  
технический университет

---

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»

# ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ НА ОСНОВЕ ANSYS

*Методические указания*



Минск  
БНТУ  
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования»

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ НА ОСНОВЕ ANSYS

Методические указания к выполнению лабораторных, курсовых  
и дипломных работ для студентов специальностей  
1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации»,  
1-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий»,  
1-40 01 02 «Информационные системы и технологии»

Минск  
БНТУ  
2012

УДК 004.4  
ББК 32.973.26-018  
О62

С о с т а в и т е л и :

канд. техн. наук, доцент *В. В. Напрасников*  
(Белорусский национальный технический университет);  
преподаватель *Ю. В. Напрасникова*  
(Белорусский национальный технический университет);  
канд. техн. наук, доцент *А. В. Бородуля*  
(Белорусский национальный технический университет);  
д-р физ.-мат. наук, профессор *А. Н. Соловьев*  
(Донской государственный технологический университет);  
канд. физ.-мат. наук, доцент *А. Л. Кочеров*  
(Военная академия Республики Беларусь)

Р е ц е н з е н т ы :

*Н. Н. Гурский, Ю. Е. Лившец*

Материал предназначен для использования в качестве методических указаний при выполнении лабораторных, курсовых и дипломных работ студентами специальностей 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации», 1-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий», 1-40 01 02 «Информационные системы и технологии».

Указания будут полезны для магистрантов и аспирантов технических специальностей, научные интересы которых связаны с конечно-элементным моделированием.

© Белорусский национальный  
технический университет, 2012

## 1. Введение

Программа ANSYS располагает возможностями не только для расчета конструкции [1-11], но и для отыскания ее оптимального варианта (оптимального проекта) [16-18]. Оптимальным [12] является проект, отвечающий всем предъявляемым требованиям и имеющий минимальные значения определенных показателей, таких как вес, площадь поверхности, объем, напряжения, жесткость, собственные частоты и так далее.

Целью данного учебного пособия является ознакомление с методами оптимизации проекта в ANSYS. Предполагается, что читатель знаком с интерфейсом ANSYS.

Для создания оптимизационной модели необходимо:

- создать геометрическую модель с использованием переменных в качестве параметров;
- определить переменные, которые выступают в качестве переменных проекта, переменных состояния;
- определить целевую функцию;
- назначить погрешности сходимости.

Работа по проведению вычислительных экспериментов выполнена И. С. Якимушем.

## 2. Постановка задачи

Продемонстрируем этапы создания оптимизационной модели и получения на ее основе конструкции минимальной массы на простом примере шарнирно опертой балки, расчетная схема которой представлена на рис. 1.

К балке приложена сосредоточенная сила 2000 Н. Целью оптимизации является минимизация веса (объема) балки без превышения допустимого напряжения. Для этого требуется отыскать оптимальные параметры поперечного сечения балки, однако ширина и высота поперечного сечения балки не могут быть меньше 0,010 м. Максимальное напряжение в любой точке балки не должно превышать 200 МПа. Сталь, из которой изготовлена балка, обладает следующими характеристиками: модуль упругости равен 200 ГПа, коэффициент Пуассона равен 0.3.

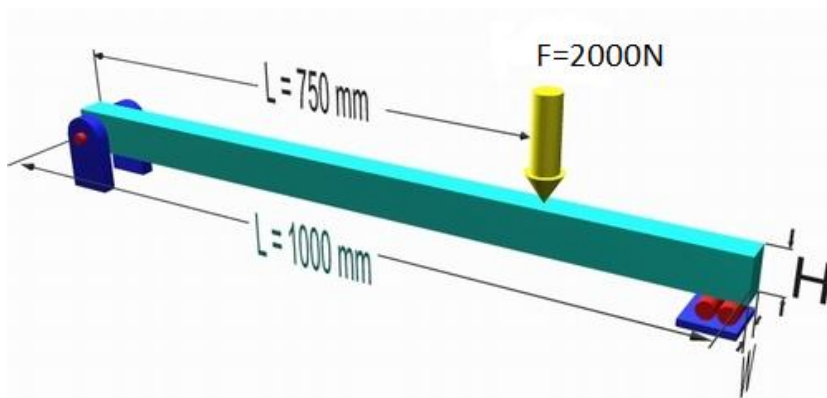


Рис. 1. Расчетная схема

### 3. Решение задачи однократного анализа

#### 3.1 Подготовка к решению

##### 3.1.1 Задание имени для проекта

Utility Menu > File > Change Title ...

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
/title, Design Optimization
```

##### 3.1.2 Создание параметров

Для решения задачи оптимизации в ANSYS, для всех параметров должны быть определены начальные значения, что соответствует начальному варианту проекта конструкции. Все значения вводим в системе СИ. Введем ширину  $W$  и высоту  $H$  балки.

Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...

В появившемся окне в поле 'Selection' (рис. 2) напечатайте  $w=0.02$

Нажмите 'Accept'. Окно 'Scalar Parameters' остается открытым.

Теперь в поле 'Selection' напечатайте  $H=0.02$ .

Нажмите 'Асепрт'.

Нажмите 'Close' в окне 'Scalar Parameters'.



Рис. 2. Вид окна Scalar Parameters

Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:

```
*SET,W,0.02  
*SET,H,0.02
```

### 3.1.3 Создание точек

Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS...

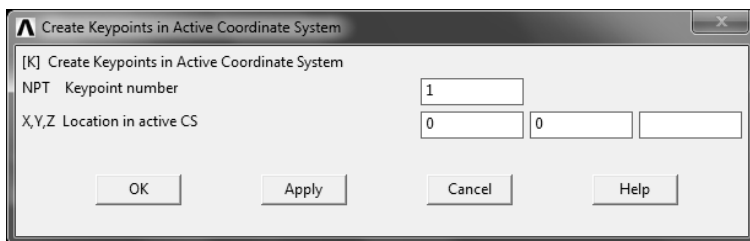


Рис. 3. Создание координат по точкам

Для этой балки мы собираемся создать 2 точки, с координатами (0,0) и (1,0).

Те же самые действия можно выполнить, последовательно введя в командной строке:

```
/PREP7  
K,1,0,0,  
K,2,1,0,
```

### 3.1.4 Создание линий

Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord

Нажмите на точку 1, затем на точку 2, для создания линии

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

L, 1, 2

### 3.1.5 Создание «hardpoint»

«Hardpoint» обычно используются для задания нагрузок и перемещений в месте, где не заданы «обычные» точки. В нашем случае мы хотим приложить силу на расстоянии  $3/4$  от начала балки. В этом месте нет точек, и мы не можем гарантировать, что именно здесь появится узел после разбиения балки на конечные элементы. Именно поэтому нам необходимо создать «Hardpoint»

Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on line > Hard PT by ratio.

Это позволит нам создать «Hardpoint» при помощи задания коэффициента, который определяет расстояние от первой точки линии, на котором будет создана точка «Hardpoint», в долях длины линии.

Выберите линию, на которой будет создана точка.

Введите коэффициент 0.75 в появившемся окне (рис. 4).

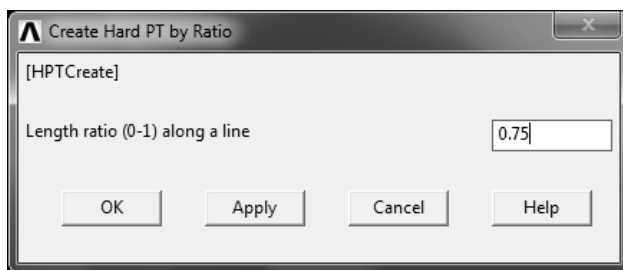


Рис. 4. Создание «Hardpoint» при помощи задания коэффициента

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

HPTCREATE, LINE, 1, 0, RATIO, 0.75,

### 3.1.6 Задание типа конечных элементов

Для данной задачи будем использовать элемент BEAM3 (Beam 2D elastic). Он имеет 3 степени свободы в каждом узле (смещение вдоль оси X и Y, и вращение вокруг оси Z). На рис. 5 представлена расчетная схема элемента из справочной системы ANSYS. Для вызова справки введите в командной строке: `HELP, BEAM3`

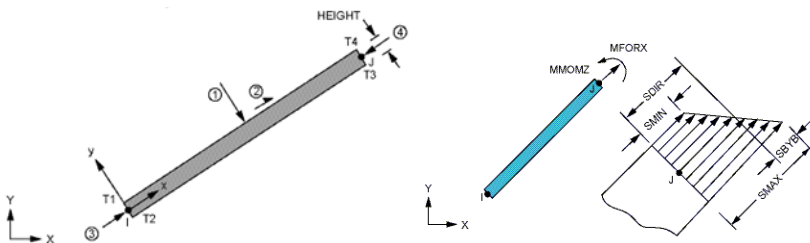


Рис. 5. Расчетная схема элемента BEAM3

Воспользуйтесь теперь меню  
Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...  
Выберите пункты. Как показано на рис. 6.

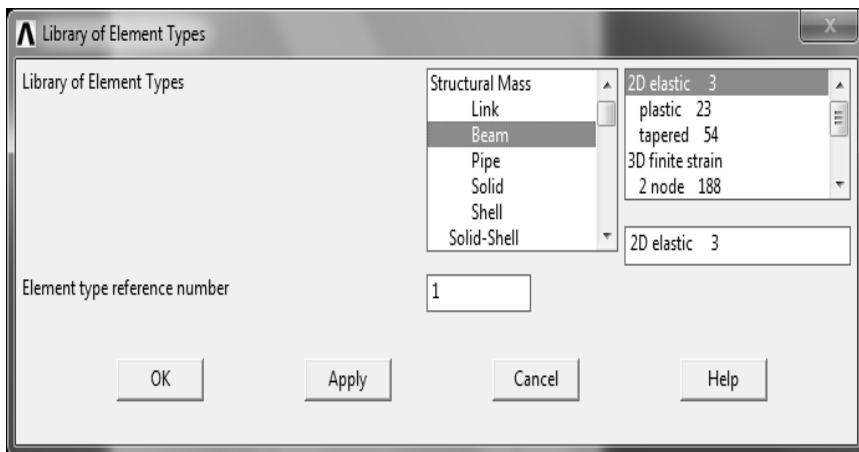


Рис. 6. Добавление в модель элемент BEAM3 (Beam 2D elastic)

Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:

`ET, 1, BEAM3`



### 3.1.7 Задание констант элементов

Preprocessor > Real Constants... > Add...

В окне 'Real Constants for BEAM3', введите следующие выражения, определяемые через параметры (рис. 7): (Замечание: символы '\*\*' используются для обозначения операции возведения в степень).

Площадь поперечного сечения	AREA:	$W \cdot H$
Момент инерции сечения	IZZ:	$(W \cdot H^{**3})/12$
Высота сечения балки	HEIGHT:	H

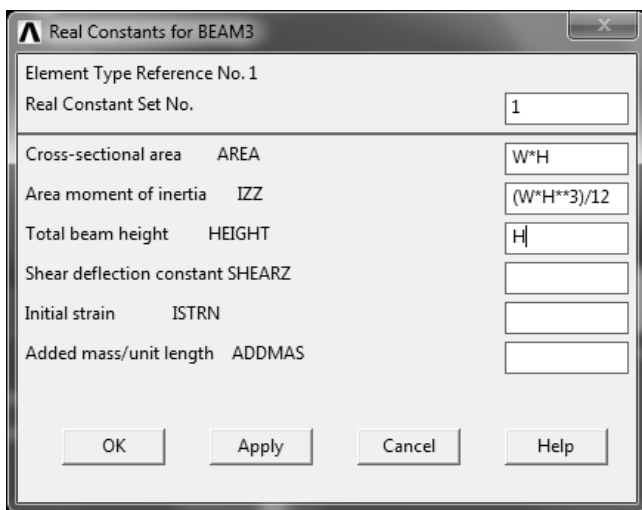


Рис. 7. Ввод геометрических характеристик сечения (Real Constants)

Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:

R, 1, W\*H, (W\*H\*\*3)/12, H, , , ,

**Замечание:** Для задания зависимых переменных, таких как площадь и момент инерции сечения важно использовать независимые переменные. В процессе оптимизации значение высоты и ширины поперечного сечения балки будут меняться, поэтому другие параметры, зависящие от них, должны задаваться не постоянными значениями, а значениями, зависящими от переменных W и H.

### 3.1.8 Задание свойств материала

Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

В появившемся окне введите следующие параметры для стали (рис. 8):

Модуль упругости	EX:	200E9
Коэффициент Пуассона	PRXY:	0.3

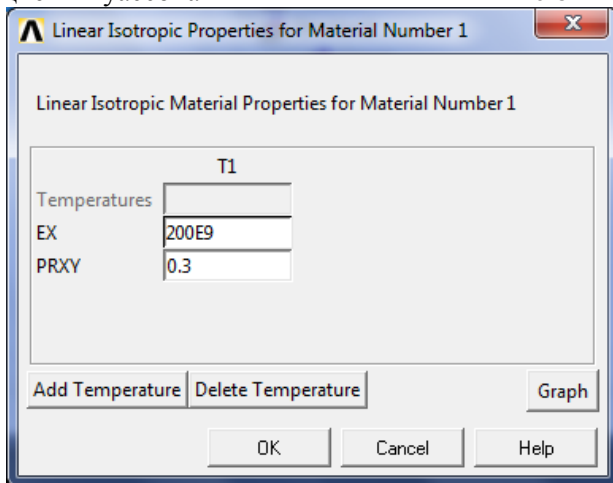


Рис. 8. Задание свойств материала

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
MPTEMP, 1, 0  
MPDATA, EX, 1, , 200E9  
MPDATA, PRXY, 1, , 0.3
```

### 3.1.9 Задание размера конечного элемента

Preprocessor > Meshing > SizeCtrls > ManualSize > Lines > All Lines...

Для решения этой задачи будем использовать длину конечного элемента 0.1 м (при таком выборе длины линия будет разбита на 10 элементов).

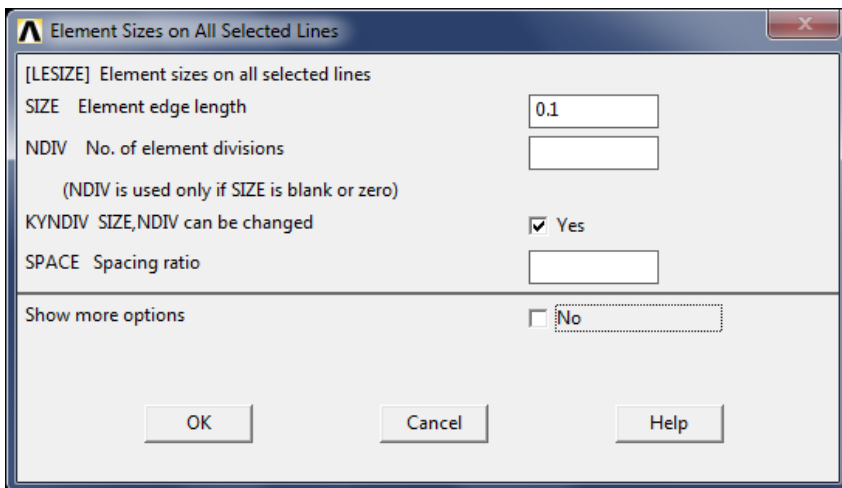


Рис. 9. Задание размера конечного элемента

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
LESIZE, ALL, 0.1, , , 1, , , 1,
```

### 3.1.10 Создание сетки конечных элементов

Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > click 'Pick All'

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
LMESH, ALL
```

## 3.2 Задание нагрузок и решение

### 3.2.1 Задание типа анализа (Статический анализ)

Solution > Analysis Type > New Analysis > Static

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
/SOL  
ANTYPE, 0
```

### 3.2.2 Задание значений для перемещений в соответствии с расчетной схемой

Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints

Выберите точку 1 и нажмите ОК.

В появившемся окне выберите степени свободы UX и UY (рис. 10) и нажмите ОК. Если поле VALUE Displacement value осталось не заполненным, то это соответствует значению «0».

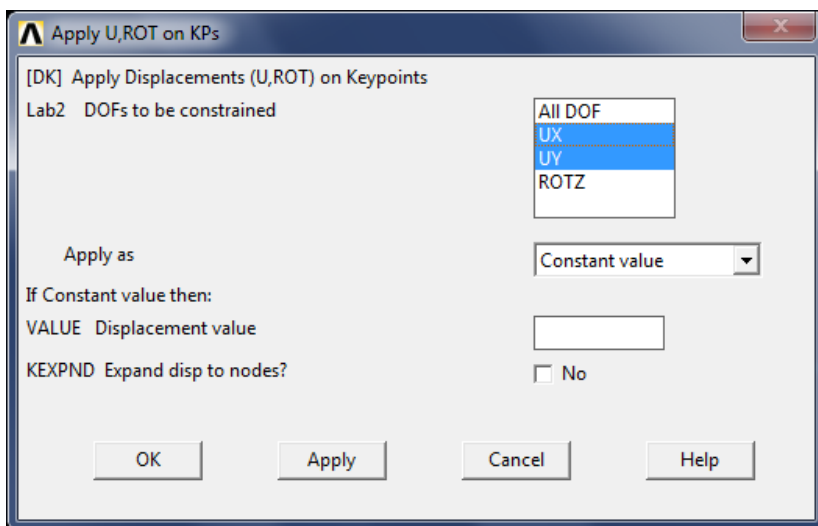


Рис. 10 Задание значений для перемещений

Таким же образом введем значение перемещения по UY в точке номер 2.

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
/GO  
DK, 1, UY, 0  
DK, 1, UX, 0  
DK, 2, UY, 0
```

### 3.2.3 Приложение силы

Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints

Выберите точку 3 и нажмите ОК.

Задайте вертикальную силу -2000 Н (рис. 11).

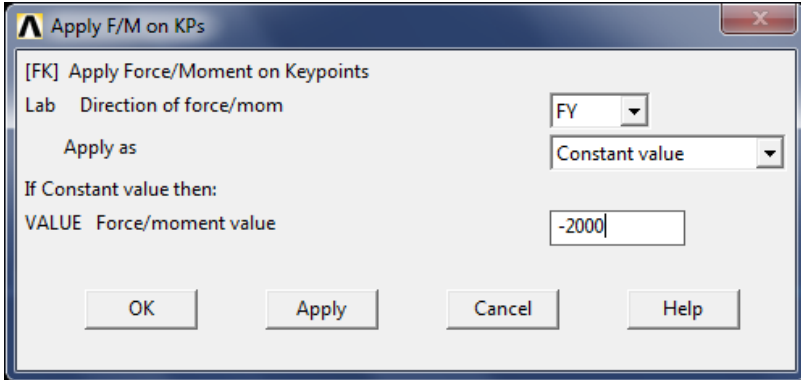


Рис. 11 Задание значения вертикальной силы величиной -2000 Н

После выполнения всех действий на экране должна отображаться картинка, показанная на рис. 12.



Рис. 12. Построенная конечно-элементная расчетная схема

### 3.2.4 Решение задачи однократного анализа

Solution > Solve > Current LS

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
SOLVE
```

### 3.3 Получение и просмотр результатов

Для выполнения оптимизации мы должны получить необходимую информацию.

Сейчас мы вычислим максимальное напряжение, возникающее в балке и её объем балки, как результат переменных ширины и высоты поперечного сечения.

### 3.3.1 Создание таблицы, содержащей объемы конечных элементов

Выберите General Postproc > Element Table > Define Table... > Add...

Заполните появившееся окно, как показано на рис. 13 для получения объема балки. Таблице присвоено имя EVolume.

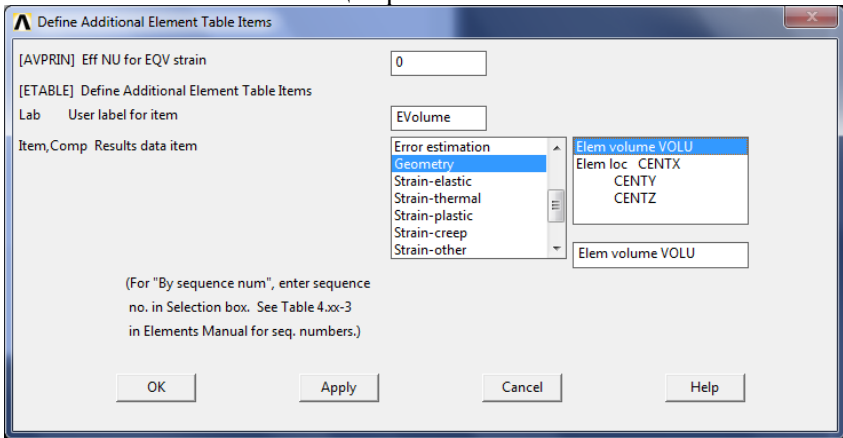


Рис. 13. Создание таблицы, содержащей объемы конечных элементов

В полученной таблице хранятся объемы всех конечных элементов. Для того чтобы узнать объем всей балки, необходимо определить сумму всех элементов таблицы.

Выберите General Postproc > Element Table > Sum of Each Item...

Нажмите 'OK'

В появившемся окне (рис. 14) отображена сумма элементов таблицы EVolume  $0.4E-03 \text{ м}^2$ .

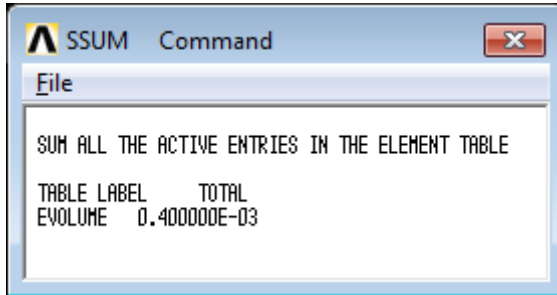


Рис. 14. Сумма элементов таблицы EVolume

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
/POST1
ETABLE, EVolume, VOLU,
SSUM
```

### 3.3.2 Получение объема балки в качестве параметра

Выберите Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data...

В появившемся окне выберите: 'Results Data' затем 'Elem table sums'. Заполните появившееся окно, как показано на рис. 15.

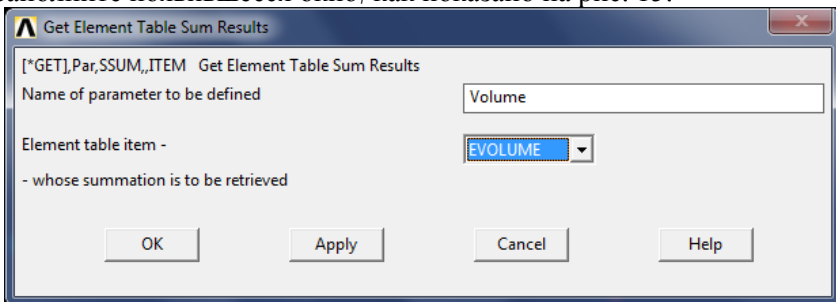


Рис. 15. Получение объема балки в качестве параметра

Теперь, если вы просмотрите параметры, (Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...) то вы увидите, что добавлен новый параметр Volume.

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
*GET, Volume, SSUM, , ITEM, EVOLUME
```

**Замечание:** Для этой модели есть и более короткий путь, однако изложенный подход более общий.

### 3.3.3 Создание таблицы, содержащей максимальные напряжения в узле $i$ (первый узел элемента) для всех элементов балки

Для получения дополнительной информации о том, с помощью каких указателей можно получить данные о нужных напряжениях, введите в командной строке `help, beam3`. В нашем случае значение указателя `NMISC` должно быть равно 1.

Выберите `General Postproc > Element Table > Define Table... > Add...`

Заполните появившееся окно, как показано на рис. 16, для получения максимального напряжения в узле  $i$  для каждого элемента балки и сохранения в таблице с именем `SMAX_1`.

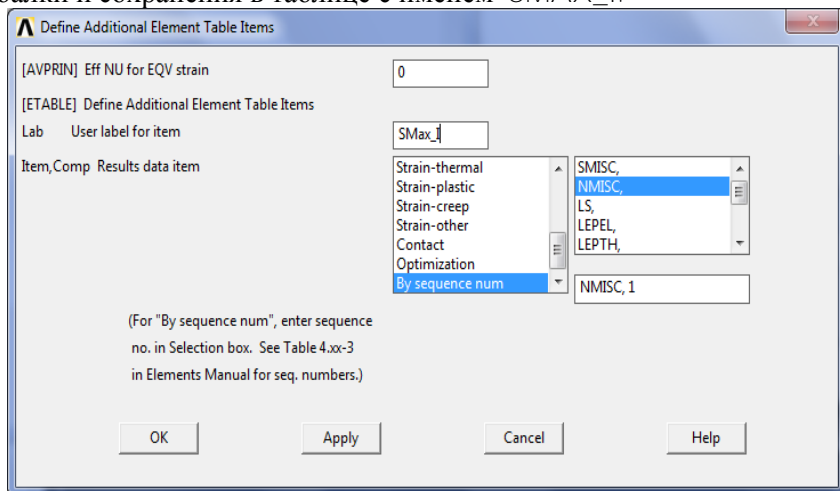


Рис. 16. Создание таблицы, содержащей максимальные напряжения в узле  $i$

Для просмотра таблицы используйте `General Postproc > List Results > Elem Table Data`.

Теперь необходимо отсортировать полученную таблицу по убыванию абсолютных значений для нахождения максимального абсолютного значения напряжения.

Выберите `General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems`.

Заполните появившееся окно, как показано на рис. 17, для сортировки таблицы `'SMAX_1'` по убыванию.



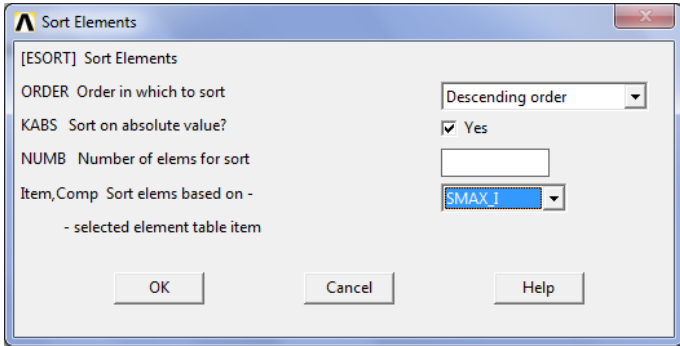


Рис. 17. Окно для сортировки таблицы 'SMAX\_I' по убыванию

Для просмотра таблицы используйте General Postproc > List Results > Elem Table Data.

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
ETABLE, SMax_I, NMISC, 1
ESORT, ETAB, SMAX_I, 0, 1, ,
PRETAB, SMAX_I
```

### 3.3.4 Получение максимального напряжения в узле i в качестве параметра

Select Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data...

В появившемся окне выберите 'Results Data' затем 'Other operations'.

Заполните появившееся окно, как показано на рис. 18, для получения максимального значения.

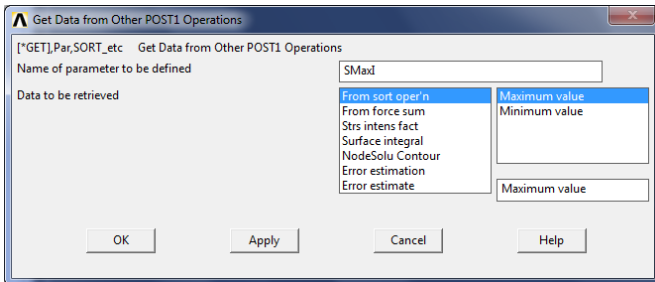


Рис. 18. Получение максимального значения

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
*GET, SMaxI, SORT, , MAX
```

### **3.3.5 Создание таблицы, содержащей максимальные напряжения в узле j (второй узел элемента) для всех элементов балки**

Выберите General Postproc > Element Table > Define Table... > Add...

Заполните таблицу, как в пункте 3.4.3, приняв следующие изменения:

Имя таблицы 'SMAX\_J' (вместо 'SMAX\_I')

Укажите NMISC,3 (вместо NMISC,1). Это позволит получить максимальное напряжение в узле j.

Выберите General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems для сортировки таблицы 'SMAX\_J' по убыванию.

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
ETABLE, SMax_J, NMISC, 3  
ESORT, ETAB, SMAX_J, 0, 1, ,
```

### **3.3.6 Получение максимального напряжения в узле j в качестве параметра**

Выберите Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data...

В появившемся окне выберите 'Results Data' затем 'Other operations'

Заполните появившееся окно как показано ранее на рис. 18, приняв имя параметра 'SMaxJ'.

*Те же самые действия можно выполнить, введя в командной строке:*

```
*GET, SMaxJ, SORT, , MAX
```

### 3.3.7 Определение наибольшего из значений SMAXJ и SMAXI

Введите в командной строке  $SMAX=SMAXI>SMAXJ$

В параметр SMAX запишется наибольшее из двух значений SMAXJ и SMAXI.

### 3.3.8 Просмотр значений параметров

Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters

Отметим тот факт, что максимальное напряжение  $SMAX=281,25$  МПа больше допустимого напряжения в 200 МПа

## 4 Оптимизация проекта

### 4.1 Терминология, принятая в ANSYS для оптимизационной модели

Теперь у нас есть параметрическое представление нашей модели в ANSYS, зависящее от начальных значений ширины и высоты сечения балки. Мы готовы приступить к оптимизации.

В ANSYS доступны методы и средства оптимизации. Следует сразу указать разницу между ними [16-18].

**Методы оптимизации (methods)** обеспечивают оптимизацию целевой функции путем варьирования входных параметров.

**Средства оптимизации (tools)** обеспечивают получение нескольких наборов выходных параметров (целевая функция, переменные состояния) при изменении входных параметров по заданному закону, оптимизацию целевой функции они не производят.

Перед описанием методики оптимизации проекта в ANSYS, необходимо определить некоторые термины.

**Переменные проекта (design variables)** – это параметры, которые изменяются с целью нахождения оптимального проекта. Для переменных проекта указываются ограничения – минимальное и максимальное значения. Эти значения определяют диапазон изменения переменных проекта. Переменными проекта обычно являются геометрические параметры, такие как длина, толщина, диаметр или координаты точек. Переменные проекта могут принимать только положительные значения.

**Переменные состояния (state variables)** – это параметры, на которые накладываются ограничения для проекта. Они также называются зависимыми переменными. Как правило, они представляют собой параметры отклика, являющиеся функциями переменных проекта. Переменные состояния могут быть ограничены максимальным и минимальным значениями или иметь только одно из этих ограничений. Примерами переменных проекта являются напряжения, температуры, скорости тепловых потоков, собственные частоты, деформации и так далее. Однако переменная состояния не обязательно должна быть вычисляемой величиной, в качестве переменной состояния может быть указан любой параметр.

**Целевая функция (objective)** – это зависимая переменная, которую требуется минимизировать. Она должна быть функцией переменных проекта, то есть изменение значений переменных проекта должно изменять значение целевой функции. В оптимизационной задаче может быть определена только одна целевая функция.

Переменные проекта, переменные состояния и целевая функция обобщенно называются **переменными оптимизации (optimization variables)**. Пользователь должен указать, какие параметры в модели являются переменными проекта, переменными состояниями, и целевой функцией.

**Набор параметров проекта, или проект (design set, design)** – это набор значений параметров, представляющих какую-либо конфигурацию модели. Как правило, набор параметров проекта характеризуется значениями переменных оптимизации, однако в него включаются все параметры модели, в том числе и те, которые не являются переменными оптимизации.

**Возможный проект (feasible design)** – это проект, удовлетворяющий всем указанным ограничениям – на переменные состояния и переменные проекта. Если хотя бы одно из ограничений не соблюдается, проект называется **невозможным (infeasible design)**.

**Наилучший проект (best design)** – тот, который удовлетворяет всем ограничениям и обеспечивает минимальное значение целевой функции. Если все проекты являются невозможными, наилучшим является проект, наиболее близкий к тому, чтобы быть возможным, вне зависимости от значения целевой функции.

## 4.2 Подготовка к оптимизации (написание командного файла)

Выберите Utility Menu > File > Write DB Log File...

В появившемся окне напишите имя командного файла, например 'optimize.txt'

Нажмите 'ОК'.

Если вы откроете командный файл в текстовом редакторе, таком как Notepad, то он будет выглядеть примерно так:

```
/BATCH
! /COM,ANSYS RELEASE 12.0.1 UP20090224 12:29:36 03/20/2011
/input,start120,ans,'C:\ProgramFiles\ANSYSInc\v120\ANSYS\apdl\',,,,,,,,,,,,,,1
/TITLE,Design Optimization
*SET,W,0.02
*SET,H,0.02
/PREP7
K,1,0,0,,
K,2,1,0,,
L, , , 1, 2
!*
HPTCREATE,LINE,1,0,RATI,0.75,
!*
ET,1,BEAM3
!*
R,1,W*H,(W*H**3)/12,H, , , ,
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,200e9
MPDATA,PRXY,1,,0.3
LESIZE,ALL,0.1,
LMESH, 1
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,1
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0,UX,UY, , , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,2
!*
/GO
DK,P51X, , , ,0,UY, , , , ,
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,3
```

```

!*
/GO
FK, P51X, FY, -2000
! /STATUS, SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
AVPRIN, 0, ,
ETABLE, EVolume, VOLU,
!*
SSUM
!*
*GET, Volume, SSUM, , ITEM, EVOLUME
AVPRIN, 0, ,
ETABLE, SMax_I, NMISC, 1
!*
ESORT, ETAB, SMAX_I, 0, 1, ,
! PRETAB, SMAX_I
!*
*GET, SMaxI, SORT, , MAX
AVPRIN, 0, ,
ETABLE, SMax_J, NMISC, 3
!*
ESORT, ETAB, SMAX_J, 0, 1, ,
!*
*GET, SMaxJ, SORT, , MAX
*SET, SMAX, SMAXI>SMAXJ
! LGWRITE, 'optimize', 'txt', 'D:\ANSYS\OPTIMIZATION\ENG\', COMMENT

```

### 4.3 Назначение командного файла для оптимизации

Выберите Main Menu > Design Opt > Analysis File > Assign

Выберите имя того файла, который вы создали при написании командного файла.

Нажмите 'OK'.

### 4.4 Назначение переменных оптимизации и погрешностей сходимости

Программе необходимо знать, какие переменные имеют решающее значение для оптимизации. Для определения переменных, нам необходимо знать, какие переменные оказывают влияние на целевой параметр, который мы хотим минимизировать. В данной задаче наша цель минимизировать объем балки.

### ***Переменные проекта (DVs)***

Независимые (варьируемые) переменные. В данной задаче это ширина сечения балки ( $W$ ) и высота сечения балки ( $H$ ).

### ***Переменные состояния (SVs)***

Зависимые переменные, которые изменяются как результат изменения DVs. Эти переменные нужны для задания функциональных ограничений. В данной задаче имеется одна такая переменная. Это максимальное напряжение в балке ( $S_{MAX}$ ). Без функциональных ограничений оптимизация будет продолжаться, пока ширина и высота не достигнут значения ноль. Это приведет к минимизации объема, но не приведет к нужным результатам.

### ***Целевая функция (OV)***

Целевой параметр (значение целевой функции, критерий). Это переменная, которая должна быть минимизирована. В данной задаче мы будем минимизировать объем балки ( $Volume$ ).

Теперь, когда мы решили, какие переменные будут использоваться для оптимизации, нам необходимо определить диапазон их изменения и погрешность сходимости для каждой из них.

Для ширины ( $W$ ) и высоты ( $H$ ) выберем диапазон изменения от 0.010 до 0.050 м для каждой. Назначим для них маленькую погрешность сходимости 0.00001 м, потому что даже незначительное их изменение приводит к значительному изменению объема.

Для максимального напряжения ( $S_{MAX}$ ) выбираем допустимые значения в интервале от 195 МПа до 200 МПа с погрешностью сходимости 0.01 МПа.

Поскольку объем ( $VOLUME$ ) это целевой параметр, то для него не требуется указание диапазона допустимых значений. Назначаем погрешность сходимости  $0.0000002 \text{ м}^3$ . Такое значение было выбрано потому, что составляет 0.05% от начального  $0.0004 \text{ м}^3$ .

## **4.4.1 Задание переменных проекта (ширина и высота сечения балки)**

Выберите Main Menu > Design Opt > Design Variables... > Add...  
Заполните появившееся окно, как показано на рис. 19.

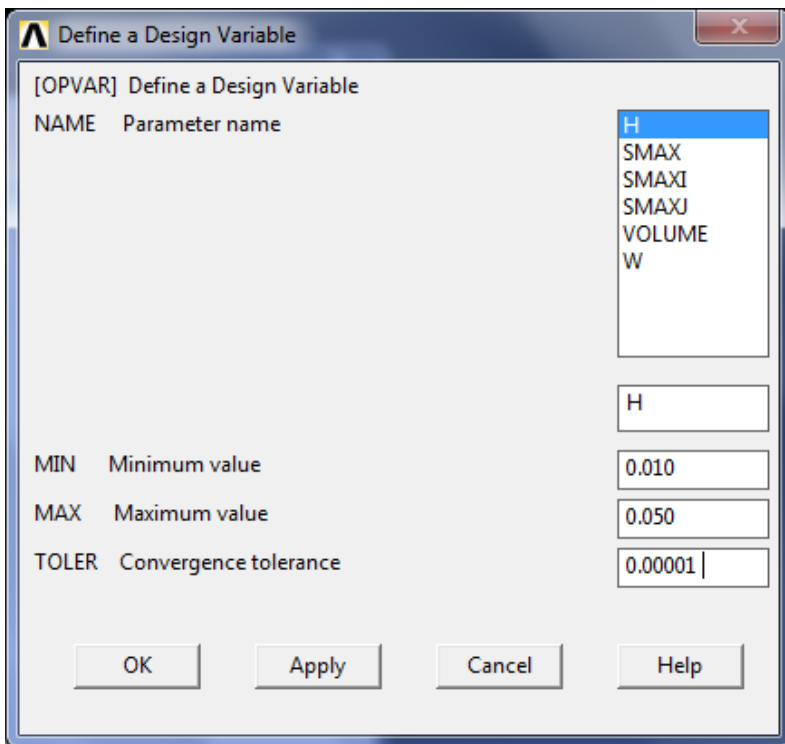


Рис. 19. Задание переменных проекта Design Variables

Повторите действия, описанные выше, для задания диапазона допустимых значений ширины ( $W$ ) сечения балки.

#### 4.4.2 Задание переменных состояния

Выберите Main Menu > Design Opt > State Variables... > Add...

Заполните появившееся окно, как показано на рис. 20.

Выберите 'SMAX' в секции 'Parameter Name'.

Lower Limit (MIN = 195e6)

Upper Limit (MAX = 200e6)

Feasibility Tolerance (TOLER = 0.001e6)



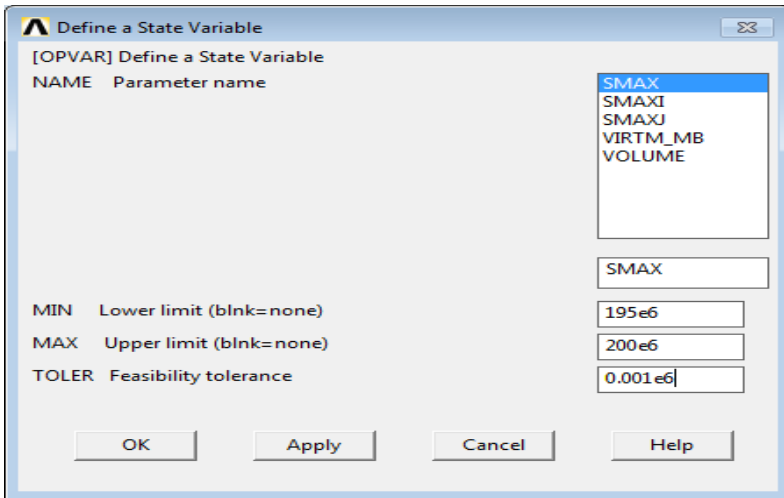


Рис. 20. Задание переменных состояния State Variables

#### 4.4.3 Задание целевой функции

Выберите Main Menu > Design Opt > Objective...

Выберите 'VOLUME' в секции 'Parameter Name'.

Convergence Tolerance (TOLER =0.0000002).

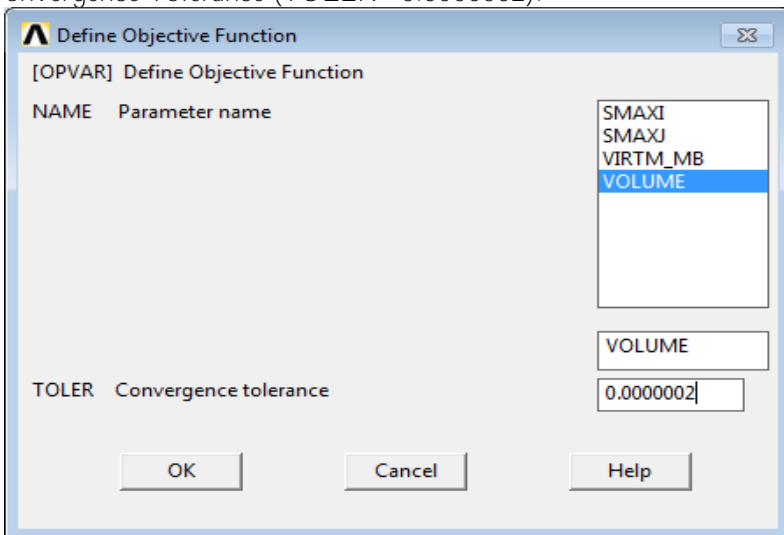


Рис. 21. Задание целевой функции Objective

## 4.5 Задание метода оптимизации

Существует несколько различных методов, которые можно использовать в ANSYS для выполнения оптимизации. Чтобы быть уверенным в том, что вы нашли решение не в локальном минимуме, рекомендуется использовать различные методы. В нашей задаче будем использовать метод первого порядка (пункт 4.5.2), однако также будет рассмотрено использование метода аппроксимации (пункт 4.5.1).

### 4.5.1 Метод аппроксимации

Выберите Main Menu > Design Opt > Method / Tool...

В окне ‘Specify Optimization Method’ выберите ‘Sub-Problem’

Нажмите ‘OK’

Введите: Maximum iterations (NITR = 30), Max infeasible sets (NINFS = 10)

Нажмите ‘OK’.

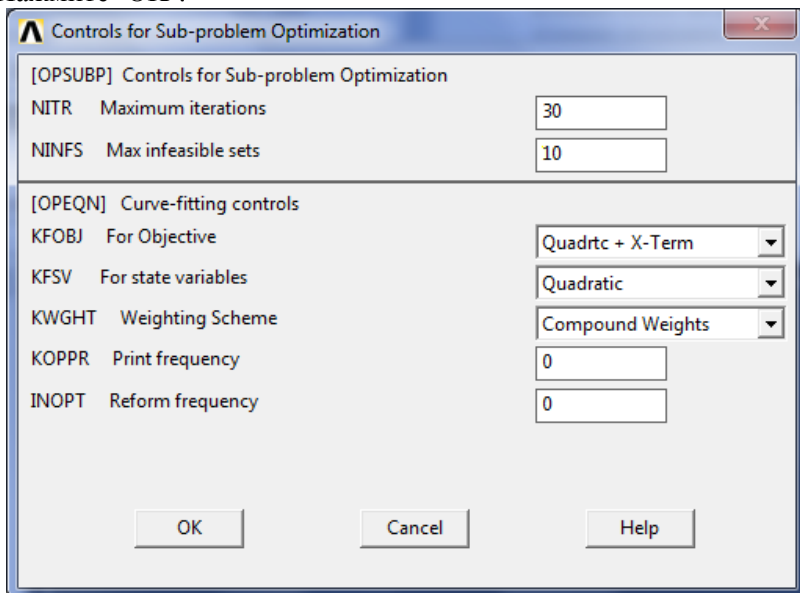


Рис. 22. Метод аппроксимации

При использовании метода аппроксимации программа на каждой итерации производит аппроксимацию целевой функции и переменных состояния (методом наименьших квадратов) квадратичными функциями переменных проекта. Для аппроксимации используются значения целевой функции и переменных состояния на предыдущих итерациях (то есть для предыдущих наборов параметров).

Следует отметить, что в документации к ANSYS не описаны некоторые детали алгоритма построения данных аппроксимаций (вычисление весовых коэффициентов для различных наборов параметров). Кроме того, существуют ограничения на количество одновременно учитываемых при аппроксимации наборов параметров.

После построения аппроксимаций программа преобразует оптимизационную задачу с ограничениями в задачу без ограничений, находит экстремум аппроксимации целевой функции и назначает на следующей итерации значения переменных проекта, соответствующие этому экстремуму. Эта процедура повторяется и на следующих итерациях.

Пользователь может выбирать тип аппроксимирующей функции ([OPEQN] Curve-fitting control). Можно использовать линейную функцию (Linear), квадратичную функцию без перекрестных членов (Quadratic) и квадратичную функцию с перекрестными членами (Quadratic + X-Term).

Для начала итераций по методу аппроксимации необходимо наличие определенного количества наборов параметров (для построения аппроксимирующей функции). В случае их отсутствия программа создаст их сама, случайным образом варьируя переменные проекта внутри их границ.

Так как это случайные наборы параметров, то сходимость может быть медленной. Иногда можно ускорить сходимость, создав несколько возможных наборов параметров. Это может быть сделано путем создания нескольких случайных наборов параметров и исключения всех невозможных наборов параметров. Кроме того, можно создать начальные наборы параметров путем выполнения нескольких одиночных циклов анализа, указывая новые значения переменных проекта перед каждым циклом.

В конце каждого цикла анализа производится проверка сходимости и условий прерывания оптимизации. Задача считается сошедшейся, если текущий, предыдущий и наилучший проекты (наборы

параметров) являются возможными и выполнено одно из следующих условий:

- Разность значений целевой функции между лучшим возможным проектом и текущим проектом меньше погрешности сходимости целевой функции (TOLER Convergence tolerance);
- Разность значений целевой функции между двумя последними проектами меньше погрешности сходимости целевой функции (TOLER Convergence tolerance);
- Разности значений всех переменных проекта между лучшим возможным проектом и текущим проектом меньше их погрешностей сходимости (TOLER);
- Разности значений всех переменных проекта между двумя последними проектами меньше их погрешностей сходимости (TOLER).

Пользователь может указать погрешности сходимости целевой функции и переменных проекта.

Иногда процедура оптимизации может быть прервана до достижения сходимости. Это происходит в случае выполнения одного из приведенных ниже условий:

- Выполнено указанное количество итераций (NITR Maximum iterations);
- Количество последовательных невозможных проектов достигло указанного предела (NINFS Max infeasible sets).

Сходимость не всегда означает нахождение глобального минимума. Она означает только то, что был выполнен один из указанных выше критериев. Поэтому именно пользователь должен определить, был ли проект достаточно оптимизирован. Если это не так, то можно выполнить дополнительные итерации.

#### 4.5.2 Метод первого порядка

Выберите Main Menu > Design Opt > Method / Tool...

В окне 'Specify Optimization Method' выберите 'First-Order'

Нажмите 'OK'

Введите: Maximum iterations (NITR = 30), Percent step size (SIZE = 100), Percent forward diff. (DELTA = 0.2)

Нажмите 'OK'.

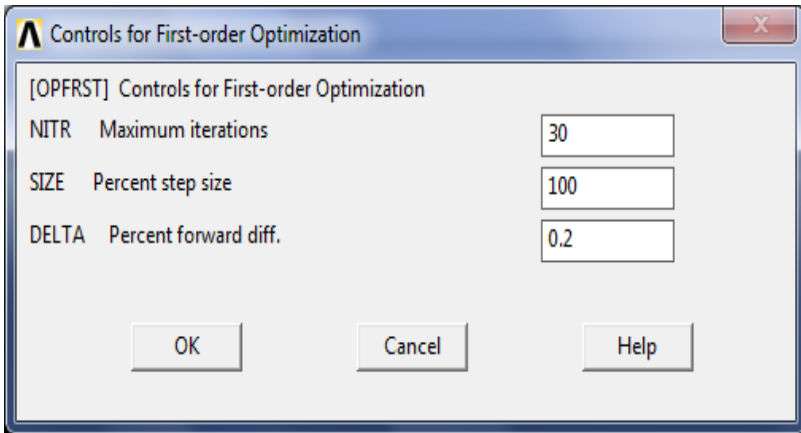


Рис. 23. Задание параметров для метода первого порядка

Метод первого порядка использует информацию о производных зависимых переменных относительно переменных проекта. Этот метод очень точен и хорошо решает задачи с большими диапазонами изменения зависимых переменных, однако требует больших вычислительных ресурсов.

При использовании метода первого порядка программа преобразует оптимизационную задачу с ограничениями в задачу без ограничений, а затем на каждой итерации вычисляет градиент целевой функции по переменным проекта. Для вычисления каждой частной производной программа присваивает небольшое приращение соответствующей переменной проекта, оставляя значения других переменных проекта прежними, и производит расчет конструкции с данным набором параметров.

После вычисления всех частных производных, определяется направление поиска экстремума на данной итерации. Следует отметить, что, в общем случае, поиск осуществляется не в направлении градиента, для определения направления поиска используется более сложная зависимость. Затем осуществляется линейный поиск экстремума целевой функции по данному направлению.

Пользователь может указать приращения переменных проекта (DELTA Percent forward diff), используемые для вычисления градиента, а также предельное значение шага линейного поиска (SIZE Percent step size).

Таким образом, каждая итерация разделяется на набор субитераций, который включает поиск направления и вычисление градиента. В связи с этим одна оптимизационная итерация для метода первого порядка включает в себя несколько циклов анализа.

Найденный таким образом экстремум используется в качестве исходной точки для следующей итерации и так далее.

Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет достигнута сходимость или условия прерывания процесса оптимизации. Задача считается сошедшейся, если текущий, предыдущий и наилучший проекты (наборы параметров) таковы, что выполняется одно из следующих условий:

- Разность значений целевой функции между лучшим проектом и текущим проектом меньше погрешности сходимости целевой функции (TOLER Convergence tolerance).
- Разность значений целевой функции между предыдущим проектом и текущим проектом меньше погрешности сходимости целевой функции (TOLER Convergence tolerance).

Процедура оптимизации может быть прервана до достижения сходимости. Это происходит в случае, если выполнено максимальное количество итераций (NITR Maximum iterations), указанное пользователем.

По сравнению с методом аппроксимации, метод первого порядка является более точным. Однако высокая точность метода первого порядка не всегда гарантирует получение наилучшего решения. Для метода первого порядка возможна сходимость при невозможном наборе параметров проекта. В этом случае, скорее всего, был обнаружен локальный минимум, или не существует возможных наборов параметров проекта.

Если это случилось, может быть полезным проведение оптимизации методом аппроксимации, так как это более надежное средство для исследования всей области варьирования параметров проекта. Кроме того, будет полезным получить случайные наборы параметров проекта, чтобы обнаружить область их возможных значений (если она существует), а затем перезапустить метод первого порядка, используя возможный набор параметров проекта в качестве начальной точки.

## 4.6 Запуск оптимизации

Выберите Main Menu > Design Opt > Run...

В окне 'Begin Execution of Run' убедитесь в правильности настроек для оптимизации.

Нажмите 'OK'.

Решение может занять некоторое время.

## 4.7 Просмотр финального значения параметров

Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...

Вы можете увидеть, что ширина  $W=0.0143$  м, высота  $H=0.02580$  м, максимальное напряжение 199.99 МПа при объеме  $0.000401$  м<sup>3</sup>.

## 4.8 Просмотр изменения значений переменных в процессе оптимизации

Выберите Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs / Tables...

Заполните окно, как показано на рис. 24, для отображения графика изменений значений переменных  $W$  и  $H$  при каждой итерации

Для 'X-variable parameter' выберите 'Set number'.

Для 'Y-variable parameter' выберите 'H' и 'W'.

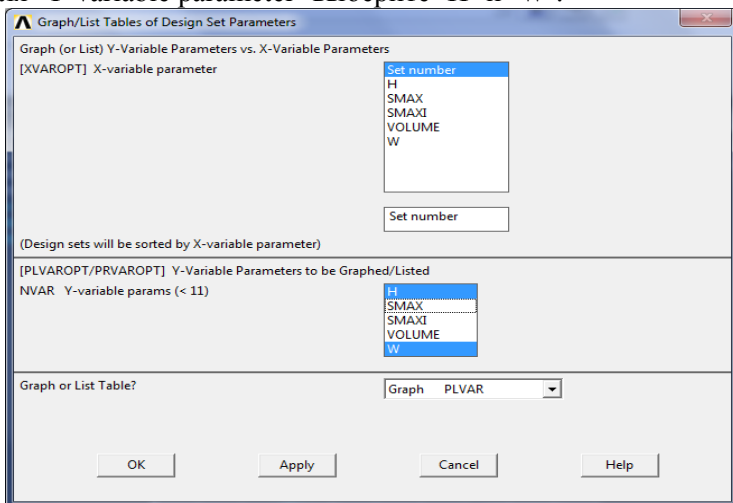


Рис. 24. Задание параметров для просмотра графиков изменения значений переменных в процессе оптимизации

Для задания подписей по осям координат

Выберите Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes...

Введите 'Number of Iterations' для секции 'X-axis label'.

Введите 'Width and Height (m)' для секции 'Y-axis label'.

Нажмите 'OK'

В результате на экране появится график, показанный на рис. 25.

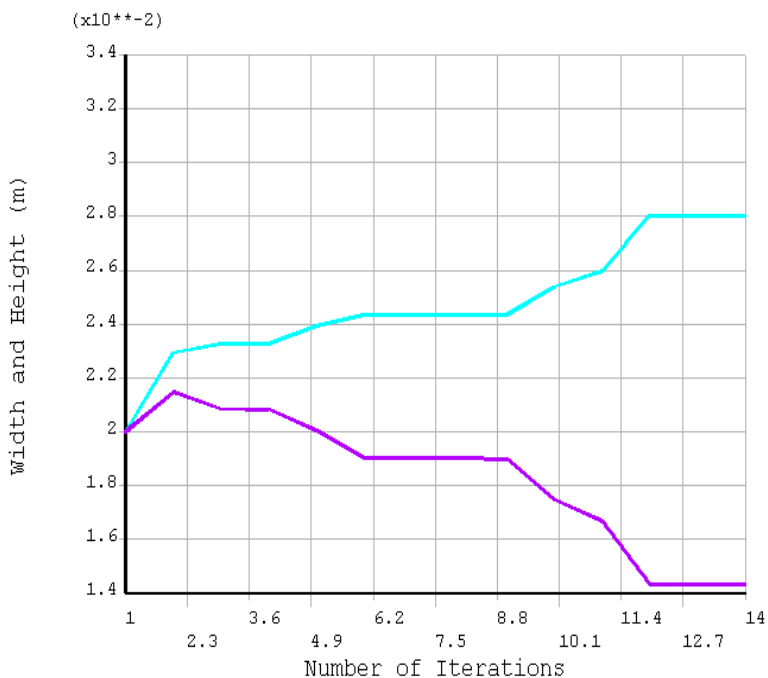


Рис. 25. Графики изменения значений переменных 'H' и 'W' в процессе оптимизации в зависимости от номера итерации

Для печати или сохранения в файл графической области просмотра выберите: Utility Menu > PlotCtrls > Hard Copy...

Для просмотра проектов, полученных в ходе оптимизации, в виде списка выберите:

Main Menu > Design Opt > Design Sets > List



		SET 1	SET 2	SET 3	SET 4
		(INFEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
SMAX	(SV)	> 0.28125E+09	0.19898E+09	0.19948E+09	0.19959E+09
H	(DV)	0.20000E-01	0.22946E-01	0.23267E-01	0.23263E-01
H	(DV)	0.20000E-01	0.21476E-01	0.20836E-01	0.20832E-01
VOLUME	(OBJ)	0.40000E-03	0.49279E-03	0.48479E-03	0.48460E-03
		SET 5	SET 6	SET 7	SET 8
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
SMAX	(SV)	0.19599E+09	0.19943E+09	0.19962E+09	0.19973E+09
H	(DV)	0.23930E-01	0.24348E-01	0.24341E-01	0.24338E-01
H	(DV)	0.20048E-01	0.19031E-01	0.19025E-01	0.19018E-01
VOLUME	(OBJ)	0.47975E-03	0.46337E-03	0.46308E-03	0.46286E-03
		SET 9	SET 10	SET 11	SET 12
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
SMAX	(SV)	0.19981E+09	0.19988E+09	0.19991E+09	0.19974E+09
H	(DV)	0.24351E-01	0.25393E-01	0.25971E-01	0.28033E-01
H	(DV)	0.18991E-01	0.17458E-01	0.16687E-01	0.14334E-01
VOLUME	(OBJ)	0.46245E-03	0.44331E-03	0.43338E-03	0.40183E-03
		SET 13	*SET 14*		
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)		
SMAX	(SV)	0.19987E+09	0.19994E+09		
H	(DV)	0.28032E-01	0.28032E-01		
H	(DV)	0.14326E-01	0.14321E-01		
VOLUME	(OBJ)	0.40159E-03	0.40145E-03		

Рис. 226. Варианты проектов, полученных в ходе оптимизации

Символом ‘\*’ отмечен оптимальный вариант проекта.

**Вывод.**

Оптимальным оказался вариант, в котором ширина сечения балки равна  $W=0.0143$  м, высота ширина сечения балки равна  $H=0.02580$  м, максимальное напряжение в материале балки составило 199.99 МПа при объеме  $0.000401$  м<sup>3</sup>.

## Задание по вариантам

1. В лабораторной работе «Создание 3D конечно-элементной модели в среде ANSYS» [5] Вами были подготовлены командные файлы для расчета напряженно-деформированного состояния деталей, варианты которых представлены на рис. 27.

Внесите изменения в текст командного файла своего варианта так, чтобы модель стала параметрической.

При этом задача оптимизации такова:

- целью является минимум массы детали (целевая функция);
- варьируемые параметры (переменные проекта) – два геометрических размера, выбранные Вами самостоятельно. Ограничения для них выберите сами;
- максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу в конструкции (переменная состояния) не должно превышать половины от предела текучести материала.

2. Получите оптимальный вариант проекта по изложенной выше методике.

3. Сформулируйте выводы по лабораторной работе.

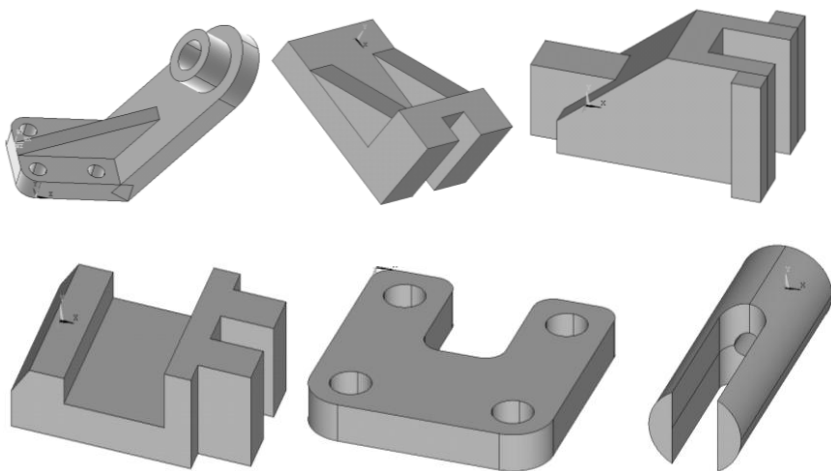


Рис. 27. Варианты деталей

## ЛИТЕРАТУРА

1. Построение конечно-элементной модели на основе языка APDL : учебно-методическое пособие / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – 51 с.
2. Создание конечно-элементной модели для расчета контейнера в процессе прессования порошковой заготовки : лабораторный практикум / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008. – 89 с.
3. Напрасников, В. В. Конечно-элементное моделирование в ANSYS в режиме удаленного доступа к суперкомпьютеру «СКИФ» : учебно-методическое пособие / В. В. Напрасников, А. В. Бородуля, В. А. Кочуров. – Минск : БНТУ, 2008. – 65 с.
4. Моделирование колебаний рамной конструкции на основе метода конечных элементов : учебно-методическое пособие / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – 43 с.
5. Создание 3D конечно-элементной модели в среде ANSYS : учебно-методическое пособие / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – 37 с.
6. Расчет температурных полей на основе конечно-элементного моделирования : методические указания / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2011. – 20 с.
7. Наседкин, А. В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS. Программы решения статических задач сопротивления материалов с вариантами индивидуальных заданий / В. В. Наседкин. – Ростов н/Д : УПЛ РГУ, 1998. – 44 с.
8. Коннохов, А. В. Основы анализа конструкций в ANSYS / А. В. Коннохов. – Казань, 2001. – 102 с.
9. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров: справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
10. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
11. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 25 с.
12. Первозванский, А. А. Поиск / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1970. – 264 с.

13. ANSYS. Basic Analysis Procedures Guide. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.
14. ANSYS. Commands Reference. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.
15. ANSYS. Elements Reference. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.
16. ANSYS. Theory Reference. Rel. 5.3. Ed. P. Kothnke / ANSYS Inc. Houston, 1994.
17. ANSYS. Verification Manual. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.
18. **Интернет ресурс** : <http://sergeykin.hotbox.ru>
19. **Интернет ресурс** : <http://www.cadfem.ru/>
20. **Интернет ресурс** : <http://www.cae.ru/>
21. **Интернет ресурс** : <http://www.sapr2k.ru/>

Учебное издание

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ  
НА ОСНОВЕ ANSYS**

Методические указания к выполнению лабораторных, курсовых  
и дипломных работ для студентов специальностей  
1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации»,  
1-40 01 01 «Программное обеспечение информационных технологий»,  
1-40 01 02 «Информационные системы и технологии»

С о с т а в и т е л и :

**НАПРАСНИКОВ** Владимир Владимирович  
**НАПРАСНИКОВА** Юлиана Владимировна  
**БОРОДУЛЯ** Алексей Валентинович и др.

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 27.08.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,21. Уч.-изд. л. 1,73. Тираж 100. Заказ 255.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический  
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.