

Лабораторная работа №2
РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В
ОБОЛОЧЕЧНОЙ И СПЛОШНОЙ ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Индивидуальные задания – тела в форме букв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

1. Задача теплопроводности (температурный анализ)
2. Статический температурный анализ
3. Пространственная задача
4. Оболочечные и твердотельные конечные элементы.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим стационарную задачу теплопроводности для трехмерной *оболочечной* фигуры, полученной из плоской твердотельной модели путем вращения плоской области вокруг оси или путем параллельного переноса (выдавливания) плоской области вдоль некоторой траектории.

Условие задачи. Дана двумерная область в виде латинской буквы «R». Геометрия области, отнесенной к декартовой системе координат Oxy , показана на рис. 1. Размеры буквы определяются следующими параметрами: $HL=1.4$ м (высота); $WL=0.8$ м (ширина); $WWL=0.2$ м (ширина стенок); $HAL=0.7$ м (дополнительный размер по высоте). Геометрия оболочечной конструкции толщиной 1 см создается из плоской области в форме буквы «R» путем вращения на 45° вокруг вертикальной оси, отстоящей влево от буквы на расстояние WWL . Примем, что материалом области является сталь с коэффициентом теплопроводности $k=K_{xx}=46.7$ (Вт/(м град)).

В задаче требуется определить поле температур и вектор потока тепла в оболочечной конструкции в форме буквы «R» при подаче на нижние грани заданных значений температуры и при задании на верхней грани условия конвективного теплообмена.

Именно, предположим, что на левой нижней грани температура θ_h равна 90°C ; а на правой нижней грани температура θ_h равна 180°C . На верхней грани имеем условие конвективного теплообмена: $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = -h_f(\theta_{ext} - \theta)$, где \mathbf{n} – внешняя единичная нормаль к границе; $\mathbf{q} = -k\nabla\theta_h$ – вектор потока тепла; $h_f = 60$ (м^{-1}) – коэффициент теплообмена; $\theta_{ext} = 0^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды. Все остальные границы будем считать теплоизолированными, т.е. такими, на которых нормальная компонента вектора потока тепла равна нулю: $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$.

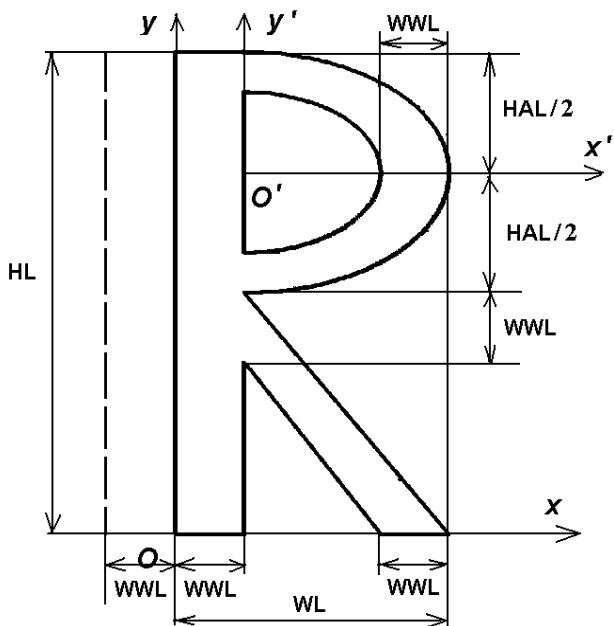


Рис. 1. А) Схема области

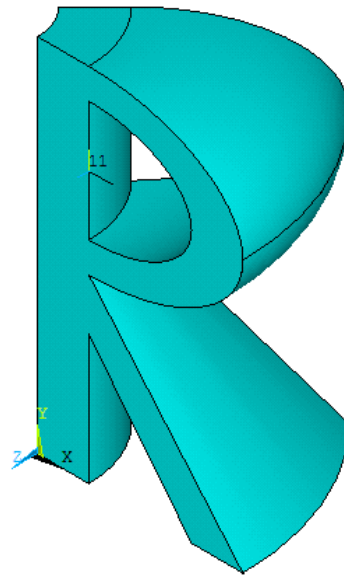


Рис. 1. Б) Трехмерная конструкция, полученная с помощью вращения

Решение задачи можно подразделить на следующие основные этапы:

- выбор типа конечного элемента (трехмерный четырехузловой оболочечный конечный элемент SHELL57 или SHELL131);
- для SHELL 57: определение ссылочного номера для геометрических констант (Real const) и задание толщины оболочечного элемента как элемента набора геометрических констант;
- для SHELL 131: задание специальных опций и задание толщины оболочечного элемента;
- создание плоской твердотельной модели;
- создание объема путем вращения двумерной области вдоль предварительно определенной оси (или путем движения двумерной области вдоль предварительно созданной линии);
- удаление объема без удаления поверхностей, линий и точек (т.е. при этом остается поверхностный каркас);
- разбиение оболочечной конструкции на четырехугольные четырехузловые температурные оболочечные элементы; задание набора реальных констант для элемента
- определение граничных условий: температуры внизу оболочки и конвективного теплообмена на верхней поверхности оболочки;
- проведение расчета задачи;
- вывод результатов вычислений для поля температуры.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS

Для расчета стационарного распространения тепла в оболочечной конструкции в форме буквы «R» предлагается программа Th3LS_rot.inp.

Рассмотрим блок команд, создающий трехмерную фигуру из двумерной. Здесь сначала создаются две опорных точки, определяющие линию вращения, затем объем создается командой VROTAT с помощью вращения ранее созданной двумерной области вокруг оси вращения на заданный угол. После этого объем удаляется, а образующие его области остаются.

```
! Определение точек оси, отстоящей от плоской области слева на WWL
K,1001,-WWL,0
K,1002,-WWL,HL
! Создать объем вращением области 3 вокруг оси с точками 1001 и 1002
на 45 градусов
VROTAT,3,,,,,1001,1002,45
VDEL,ALL ! Удалить только объем без поверхностей, линий и точек
```

Рассмотрим блок команд, задающий параметры триангуляции, тип конечного элемента и его размер:

```
! Параметры для триангуляции
DMESH=WWL/4

ET,1,SHELL57 ! Тип конечного элемента с номером 1 - четырехузловой оболочечный SHELL57
R,1,0.1 ! Набор констант для конечного элемента типа 1 (SHELL57) - толщина, равная здесь 0.01

! Установка размера конечного элемента
esize,dmesh
```

Здесь задается четырехугольный четырехузловой оболочечный элемент SHELL57 с одной степенью свободы в каждом узле - температурой. Толщина элемента задается в наборе реальных констант данного элемента.

Данный элемент эквивалентен элементу SHELL131 (четырёхузловому температурному оболочечному элементу со слоями) с опцией keyopt(3)=2. Элемент SHELL131 с такой опцией также имеет одну степень свободы в каждом узле (температуру), но не имеет набора реальных констант. Толщина элемента задается с помощью команды SECDATA:

```
et,1,shell131
KEYOPT,1,3,2 ! для конечного элемента типа 1 (SHELL131) keopt(3)=2
sectype,,shell
secdata,0.01 ! толщина для конечного элемента типа 1 (SHELL131)
```

Заметим, что в версиях ANSYS выше 11.0 элемент SHELL57 является устаревшим, поэтому предпочтительно использовать SHELL131.

Полученные в результате создания объемной фигуры внешние области разбиваются заданными плоскими оболочными элементами с помощью команды AMESH.

AMESH,ALL ! Разбить все области на конечные элементы

Рассмотрим блок команд, задающий граничные условия.

```
! Определение новой системы координат -
! цилиндрической с осью Z'', совпадающей с осью поворота
LOCAL,12,1,-WWL,0,0,, -90
CSYS,12
NSEL,S,LOC,Z,0 ! Выбор всех узлов с координатой Z''=0
NSEL,R,LOC,X,WWL,2*WWL
D,ALL,TEMP,T_INP1 ! Задать для всех выбранных узлов TEMP=T_INP1
NSEL,S,LOC,Z,0 ! Выбор всех узлов с координатой Z''=0
NSEL,R,LOC,X,WWL+WWL,WWL
D,ALL,TEMP,T_INP2 ! Задать для всех выбранных узлов TEMP=T_INP2
NSEL,S,LOC,Z,HL,HL ! Выбор всех узлов с координатой Z''=HL
NSEL,R,LOC,X,WWL,2*WWL
SF,ALL,CONV,H_F,T_EXT ! Конвективный теплообмен в выбранных узлах
NSEL,ALL ! Вернуться к выбору всех узлов модели
CSYS,0
```

Дадим комментарии к командам задания краевых условий. Анализ показывает, что в командном режиме получить доступ к нужным узлам лучше всего в цилиндрической системе координат $Ox''y''z''$, осью z'' которой является ось вращения исходной фигуры. Поэтому в команде **LOCAL** потребовалось сдвинуть начало координат новой системы на WWL влево по оси X , и повернуть систему координат относительно оси X на 90° в направлении вращения от оси Z к оси Y . (Согласно справочной информации ANSYS это обеспечивается заданием угла вращения $THYZ = -90^\circ$ в соответствующем операнде команды **LOCAL**.) После перехода к цилиндрической системе координат под заявленным номером 12 по команде **CSYS,12** команды выбора **NSEL** работает так, что ось X является осью R новой системы координат. Нужно также иметь в виду, что новая ось Z в системе координат 12 соответствует бывшей оси Y плоской фигуры, сдвинутой влево на WWL .

Температура в выбранных узлах задаются с помощью команды **D**. Конвективный теплообмен в выбранных узлах задается с помощью команды **SF**. Применение данных команд для трехмерного случая аналогично их применению в двумерном случае.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Конечно-элементная модель трехмерной оболочечной фигуры, полученной из плоской твердотельной модели путем вращения плоской области вокруг оси показана на рис. 2. Здесь разными цветами показана ориентация граней оболочечных элементов (Пункт меню: Plot->Elements, для показа граничных условий PlCtrls->Symbols->tick All applied BC, условия конвективного теплообмена: Surface Load Symbols->Convective FilmCoef):



ELEMENTS
TEMP
CONV-HCOE
60

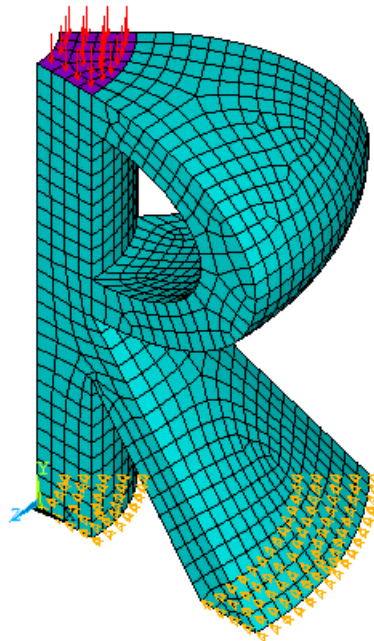


Рис. 2 Конечно-элементная модель с граничными условиями

Результат вычисления поля температуры представлен на рис. 3. Рис. 4 и 5 демонстрируют распределение модуля вектора потока тепла и направление вектора потока тепла. Для отображения одинаковой шкалы в окне Vector Plot указать Vector location for results: Elem nodes.

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =13.9752
SMX =180

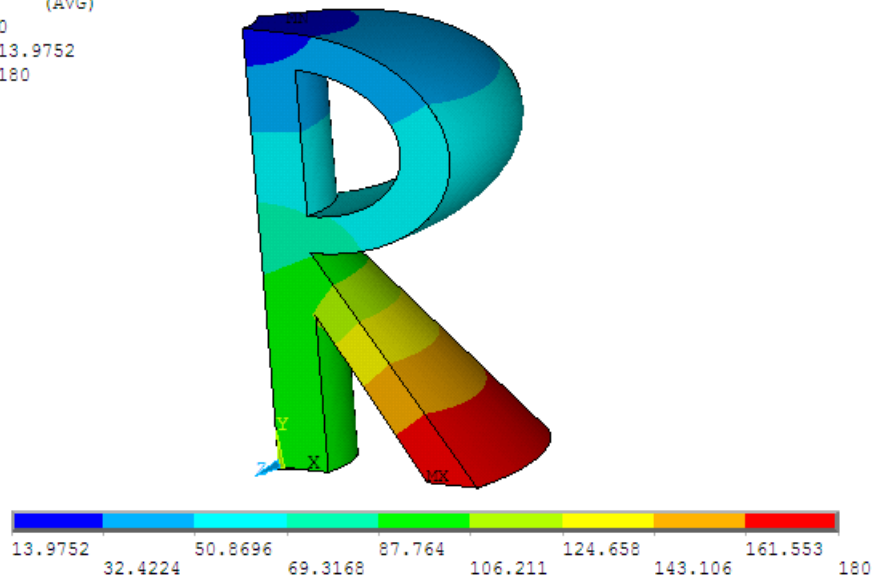


Рис. 3 Распределение температуры в оболочечной трехмерной конструкции

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TFSUM (AVG)
RSYS=0
SMN =.408E-12
SMX =9790.73

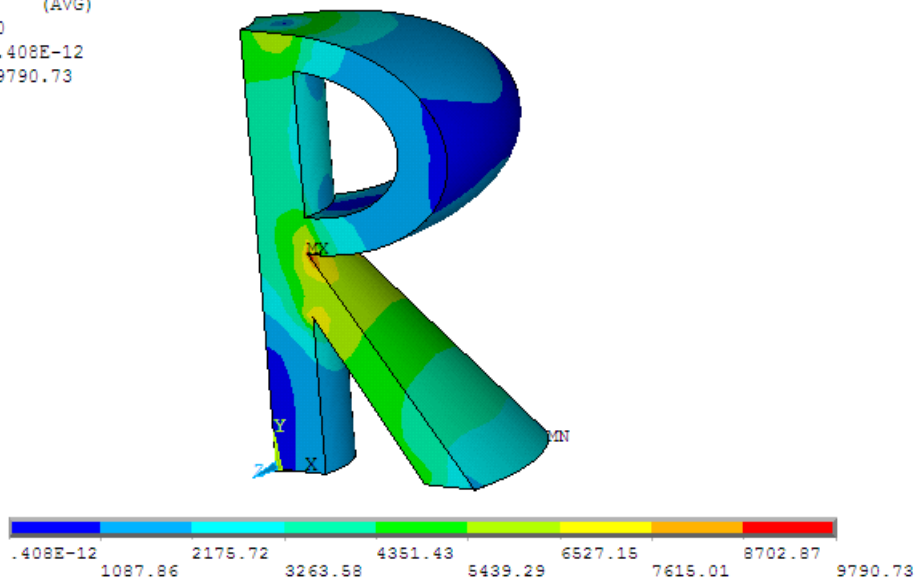


Рис. 4 Распределение модуля вектора потока тепла в оболочечной трехмерной конструкции

VECTOR
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TF

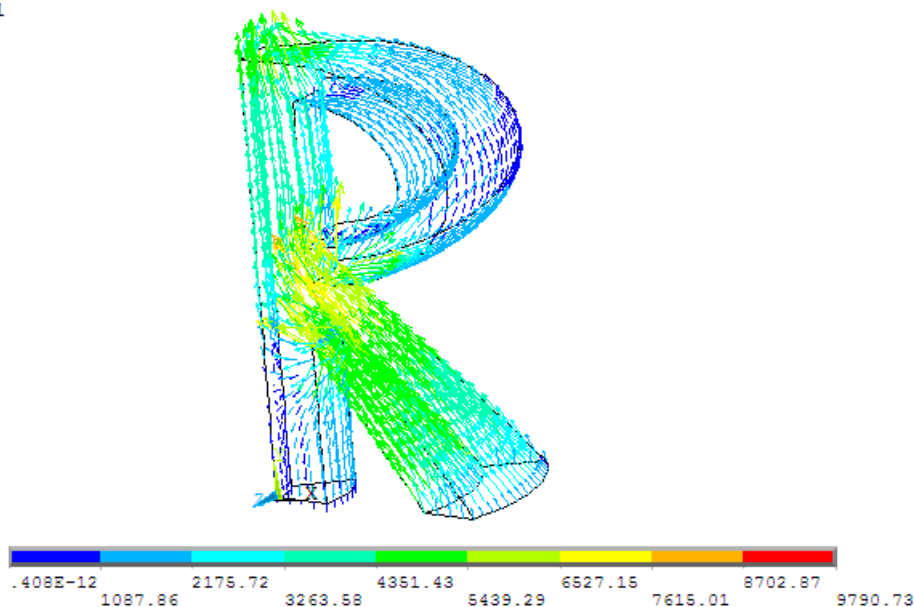


Рис. 5 Распределение вектора потока тепла в оболочечной трехмерной конструкции

ПРИЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ОБЛАСТИ И ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Рассмотрим блок команд, который иллюстрирует вариант построения трехмерной оболочечной фигуры параллельным переносом плоской области в форме буквы «R» вдоль оси z на $4*WWL$ м.

```
! Определение точек и линий, определяющих траекторию переноса  
K,1001,0,0  
K,1002,0,0,4*WWL
```

! Новый стартовый номер для удобства нумерации дополнительной линии

```
NUMSTR,LINE,1001  
L,1001,1002 ! линия с номером 1001
```

```
! Создать объем параллельным переносом области 3 вдоль линий  
VDRAG,3,,,,,1001  
VDEL,ALL ! Удалить только объем без поверхностей, линий и точек
```

Здесь для создания объемной фигуры путем параллельного переноса двумерной области вдоль выбранной линии используется команда **VDRAG**.

Конечно-элементная модель трехмерной оболочечной фигуры, полученной из плоской твердотельной модели путем параллельного переноса плоской области вдоль заданной прямой показана рис. 6.

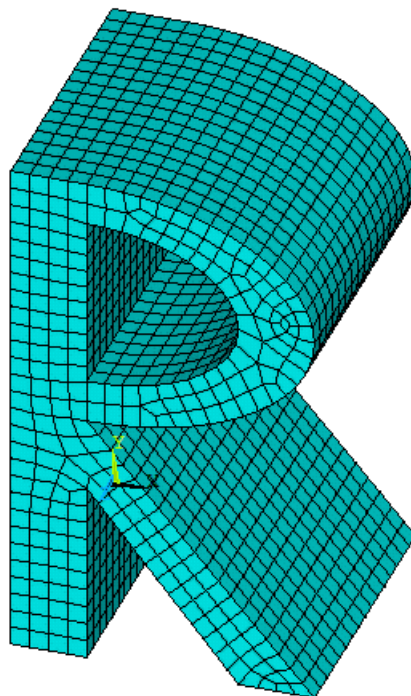


Рис. 6 Конечно-элементная сетка оболочечной конструкции, полученной методом параллельного переноса

Рассмотрим блок команд, осуществляющий построение трехмерной конечно-элементной сетки для сплошной трехмерной фигуры в форме буквы «R», полученной с помощью параллельного переноса.

```
! Создать объем параллельным переносом области 3 вдоль линий  
VDRAG,3,,,,,1001
```

```
et,1,SOLID70 ! Задать КЭ типа 1: основной элемент  
ET,2,MESH200,6 ! Задать КЭ типа 2: вспомогательный КЭ - только для геометрии сетки  
TYPE,2 ! Выбрать тип КЭ для разбиения плоской области (вспомогательный КЭ)  
!Выбрать исходную двумерную область  
ASEL,S,LOC,Z,0  
!Разбить эту область вспомогательным элементом  
AMESH,ALL  
TYPE,1 ! Выбрать тип КЭ для разбиения объемов (основной КЭ)  
! Протянуть разбиение плоской области вдоль объема  
VSWEEP,ALL  
Ase1,all  
!VSWEEP,ALL,<номер исходной области>,<номер конечной области>
```


Здесь после протягивания области вдоль линии объемы не удаляются. Полученные объемы разбиваются твердотельными температурными восьмиузловыми элементами **SOLID70**. Данный элемент имеет форму гексаэдра. Форма трехмерной фигуры позволяет построить разбиение гексаэдрами с помощью протягивания вспомогательной двумерной конечно-элементной сетки вдоль объема (получение гексаэдров из четырехугольников). Для этого используется вспомогательный геометрический конечный элемент, который не имеет степеней свободы, а служит только для задания геометрии сетки. Следует указать форму этого элемента: четырехузловой четырехугольник с помощью опции `keyopt(1)=6`. С помощью **MESH200** разбивается исходная плоская область. Для создания трехмерного конечно-элементного разбиения в результате протягивания полученной двумерной сетки вдоль объема используется команда **VSWEEP**. Аналогичным образом можно создать трехмерное разбиение гексаэдрами и для трехмерной фигуры, полученной в результате вращения плоской области вокруг заданной оси.

Рассмотрим другой вариант задания граничных условий, где вместо выбора узлов по координате используется выбор поверхностей по их номеру. Доступ к нужным узлам и элементам для задания граничных условий осуществляется с помощью команд **NSLA** и **ESLA**, которые позволяют получить, соответственно, узлы и элементы, принадлежащие выбранным поверхностям. Еще одно отличие данного блока команд от предыдущего варианта: использование команды **SFE**, которая задает поверхностные воздействия на гранях оболочечных элементов, в отличие команды **SF**, задающей поверхностные воздействия на узлах. Обратите внимание, что команду **SFE** нужно использовать дважды для задания двух характеристик конвективного теплообмена: коэффициента теплообмена `H_F` и температуры внешней среды `T_EXT`. Также в этой команде нужно указывать номер грани оболочечного элемента, соответствующей внешней поверхности фигуры.

```

/SOLU
ANTYPE,STAT          ! Решение стационарной задачи

ASEL,S,AREA,,1      ! выбор поверхности с номером 1
NSLA,S,1             ! Выбор узлов, принадлежащих выбранным областям, включая
их края
D,ALL,TEMP,T_INP1   ! Задать для всех выбранных узлов TEMP=T_INP1
ASEL,S,AREA,,5
NSLA,S,1
D,ALL,TEMP,T_INP2   ! Задать для всех выбранных узлов TEMP=T_INP2
NSEL,ALL
ASEL,S,AREA,,9
ESLA,S              ! Выбор элементов, принадлежащих выбранным поверхностям
! Конвективный теплообмен в выбранных элементах (две команды)
SFE,ALL,2,CONV,1,H_F ! 2 - номер грани оболочечного элемента,
нужно выбрать внешнюю поверхность
SFE,ALL,2,CONV,2,T_EXT
! Вернуться к выбору всех параметров модели
ALLSEL

```

SOLVE
FINISH

! Решить СЛАУ МКЭ

Для задания граничных условий на выбранных областях можно использовать, соответственно, команды **DA** и **SFA**.

На рис. 7 показано распределение температуры в трехмерной сплошной конструкции, полученной методом параллельного переноса двумерной области вдоль прямой, из которого видно, что данная задача при больших длинах линии переноса будет моделировать соответствующую плоскую задачу (рис. 8, взят из лаб. работы 1).

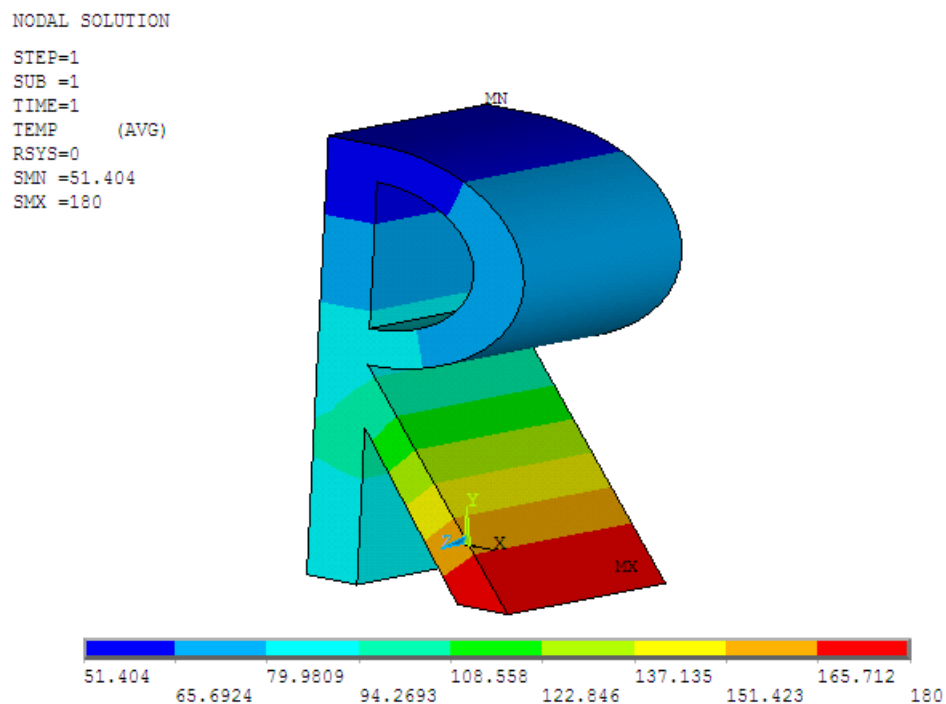


Рис. 7 Распределение температуры в сплошной трехмерной конструкции, полученной методом параллельного переноса

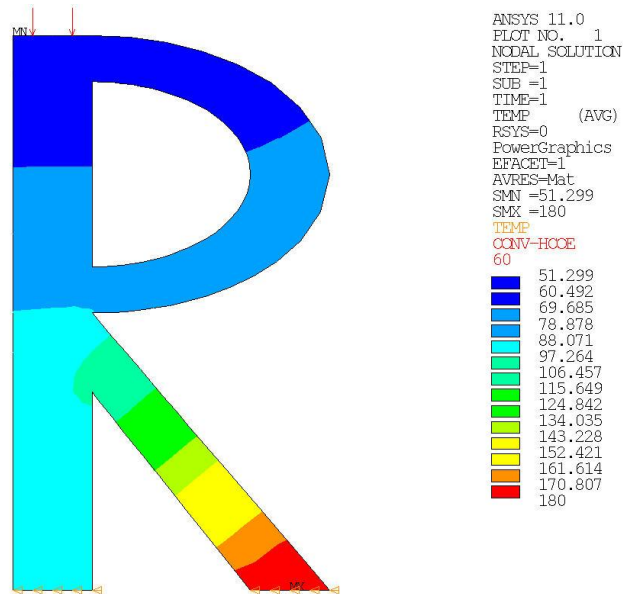


Рис. 8 Распределение температуры в двумерной конструкции

Индивидуальные задания – тела в форме букв.

Решите задачу теплопроводности. Рассчитайте поле температур в трехмерной конструкции в форме буквы при подаче на нижние грани заданных значений температуры и при задании на верхней грани условия конвективного теплообмена. Рассмотрите два случая: оболочечная трехмерная конструкция и сплошная трехмерная конструкция. Используйте командный режим программы ANSYS для создания твердотельной и конечно-элементной модели, задания граничных условий и решения задачи. Используйте интерактивный режим ANSYS для просмотра результатов.

- 1) Трехмерную конструкцию следует создать из плоской области из таблицы 1 путем вращения, параллельного переноса или экструзии (параметры придумайте самостоятельно и приведите в описании постановки задачи). Используйте аналогичные стратегии, что и в рассмотренных примерах. Геометрические размеры для операций вращения или переноса нужно придумать самостоятельно в диапазонах значений, аналогичных рассмотренным выше примерам. Геометрические размеры исходной двумерной области взять из лабораторной работы 1. Толщина оболочки должна быть соразмерной основным геометрическим размерам.
- 2) Для создания оболочечной конструкции и построения конечно-элементной сетки используйте оболочечный температурный четырехугольный элемент (**SHELL 57** или **SHELL131**)
- 3) Для создания сплошной трехмерной конструкции не удаляйте объемы. Полученные объемы разбейте твердотельными температурными восьмиузловыми элементами **SOLID70**. Для этого следует использовать вспомогательный геометрический конечный элемент **MESH200** с опцией `keyopt(1)=6` (форма – четырехузловой четырехугольник) для разбиения исходной плоской области и команду **VSWEEP** для создания трехмерного

конечно-элементного разбиения в результате протягивания полученной двумерной сетки вдоль объема.

- 4) Материальные параметры возьмите теми же, что и для рассмотренного примера. Значения величин для граничных условий придумайте самостоятельно аналогично рассмотренному примеру.
- 5) В качестве результатов приведите картины конечно-элементной сетки с граничными условиями, картины распределения температуры, вектора потока тепла, модуля вектора потока тепла, соответственно, при расчете оболочечной конструкции и при расчете сплошной конструкции. Сравните результаты.
- 6) Оформите отчет по лабораторной работе.

Таблица 1

Здесь R – вращение (команда VROTAT); D – параллельный перенос (команда VDRAG); E – экструзия или перенос с изменением масштаба (команда VEXT).

Вид области – плоская криволинейная геометрия в виде буквы с дугами эллипсов и окружностей (из лабораторной работы 1).

Группа 1

№ задания	Вид области	Способ получения 3D-конструкции	ФИО студента
1.		R	Барчук Виктор
2.		D	Ведяшкин Александр Александрович
3.		E	Залюбовская Екатерина Александровна
4.		R	Иванченко Владислав Дмитриевич
5.		D	Ким Алексей Вадимович
6.		E	Красникова Татьяна Анатольевна
7.		R	Лукьянова Анна Алексеевна
8.		D	Оськина Кристина Александровна
9.		E	Сердюк Дмитрий Сергеевич
10.		R	Сосновских Алина Ильшатовна
11.		D	Стрюкова Анастасия Семеновна
12.		E	Чехова Анастасия Сергеевна
13.		R	Шляхецкая Анастасия Олеговна

Группа 2

№ задания	Вид области	Способ получения 3D-конструкции	ФИО студента
14.		D	Ветохин Вячеслав Геннадьевич
15.		E	Зантман Анастасия Александровна
16.		R	Коломенская Екатерина Романовна
17.		D	Макрынская Алина Андреевна
18.		E	Масленская Екатерина Геннадиевна

19.		R	Никоноров Андрей Андреевич
20.		D	Ольховатова Юлия Геннадьевна
21.		E	Побежимова Александра Анатольевна
22.		F	Прищенко Надежда Михайловна
23.		D	Ремнева Анна Вячеславовна
24.		E	Романченко Татьяна Александровна
25.		R	Селькова Юлия Николаевна
26.		D	Тюрева Анжелика Дмитриевна