

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Практическое пособие

для студентов специальностей
1-31 04 03 «Физическая электроника»,
1–39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»,
1-31 04 08 «Компьютерная физика»

Составители:

Ю. В. НИКИТЮК, А. А. СЕРЕДА, С. В. ШАЛУПАЕВ

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 004.9(076)
ББК 32.973-02я73
В24

Рецензенты:

доктор физико-математических наук Г. С. Митюрин,
кандидат технических наук Д. В. Левчук

Рекомендовано к изданию
научно-методическим советом учреждения образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Введение в технологии компьютерного моделирования :
В24 практическое пособие / сост.: Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda,
С. В. Шалупаев ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 42 с.
ISBN 978-985-577-572-1

В практическом пособии рассмотрены примеры реализации в программном средстве анализа ANSYS 2019R1 Academic некоторых задач распространения тепла в материалах, а также задач в рамках теории упругости материалов.

Издание может быть использовано при выполнении лабораторных работ, при самостоятельном изучении. Оно позволит получить навыки работы в ANSYS.

Практическое пособие адресовано студентам специальностей 1-31 04 03 «Физическая электроника», 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности», 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)» и 1-31 04 08 «Компьютерная физика».

УДК 004.9(076)
ББК 32.973–02 я73

ISBN 978-985-577-572-1 © Никитюк Ю. В., Серeda А. А.,
Шалупаев С. В. составление, 2019
© Учреждение образования
«Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2019

Оглавление

Предисловие.....	4
Задача 1 «Стационарный анализ процесса нагревания пластины в трехмерной постановке задачи».....	5
Задача 2 «Нестационарный анализ затвердевания слитка в трехмерной постановке».....	10
Задача 3 «Термо-прочностной расчет полого толстостенного цилиндра в трехмерной постановке».....	18
Задача 4 «Нестационарная тепловая задача с табличным заданием граничных условий в трехмерной постановке».....	25
Задача 5 «Стационарная тепловая задача расчета температурного поля на пересечении труб».....	30
Литература.....	41

Предисловие

В течение долгого времени основными методиками в анализе и оценках всех природных явлений оставались наблюдения и экспериментальные исследования. Развитие математической физики и вычислительной математики привело к созданию математического моделирования – нового инструмента исследования природы. С появлением ЭВМ математическое моделирование стало интенсивно проникать во все сферы научно-исследовательской и инженерной практики.

Применение технологий компьютерного моделирования является в настоящее время необходимым условием создания конкурентоспособных изделий. В рамках изучения дисциплины «Введение в технологии компьютерного моделирования» для студентов специальностей «Физическая электроника», «Электронные системы безопасности», «Физика (по направлениям)» и «Компьютерная физика» студенты осваивают приемы компьютерного моделирования физических процессов с использованием современных программных средств. Изучение данной дисциплины студентами обеспечивает возможность приобретения практических навыков расчета различных технологических процессов и устройств, которые, безусловно, потребуются в их дальнейшей профессиональной деятельности.

В настоящее время **ANSYS** – одно из самых мощных программных средств анализа для широкого круга инженерных дисциплин, которое позволяет проводить расчетные исследования не только в таких отдельных областях знания, как прочность, распространение тепла, механика жидкостей и газов или электромагнетизм, но и решать связанные задачи. Приобретение навыков работы с данным программным продуктом осуществляется посредством выполнения студентами лабораторных работ [1–5]. Практическое пособие содержит примеры реализации задач упругости и теплопереноса в инженерном продукте **ANSYS**. Пособие может быть использовано при выполнении лабораторных работ, а также позволяет получить навыки работы в **ANSYS** при самостоятельном изучении.

Задача 1 «Стационарный анализ процесса нагревания пластины в трехмерной постановке задачи»

1.1 Постановка задачи и принятые допущения

Данный пример позволяет ознакомиться с интерфейсом программы **ANSYS 2019R1 Academic**, научиться рассчитывать стационарные температурные поля, формируемые в кубе с заданными фиксированными значениями температур на гранях модели.

Решается стационарная задача. Прямоугольный параллелепипед с соотношением сторон 1:1:1 имеет постоянную температуру на двух разных гранях. Необходимо получить стационарное распределение температур в кубе. Зависимость свойств материала от температуры и теплообмен с окружающей средой не учитывается. Результат решения задачи представлен на рисунке 1.

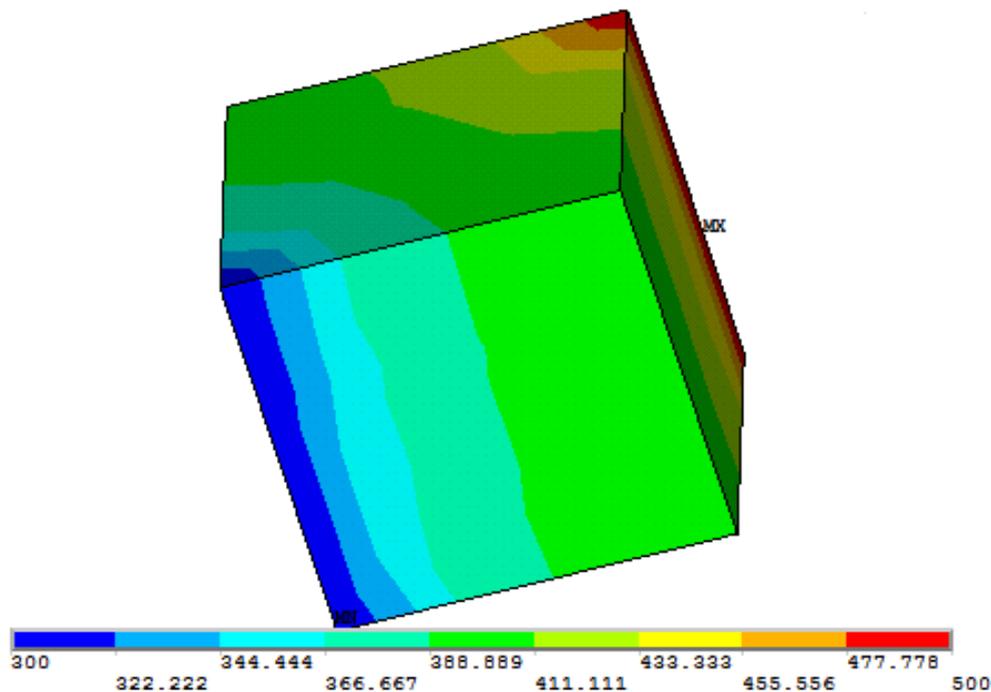


Рисунок 1 – Итоговое распределение температур в кубе

1.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса программы

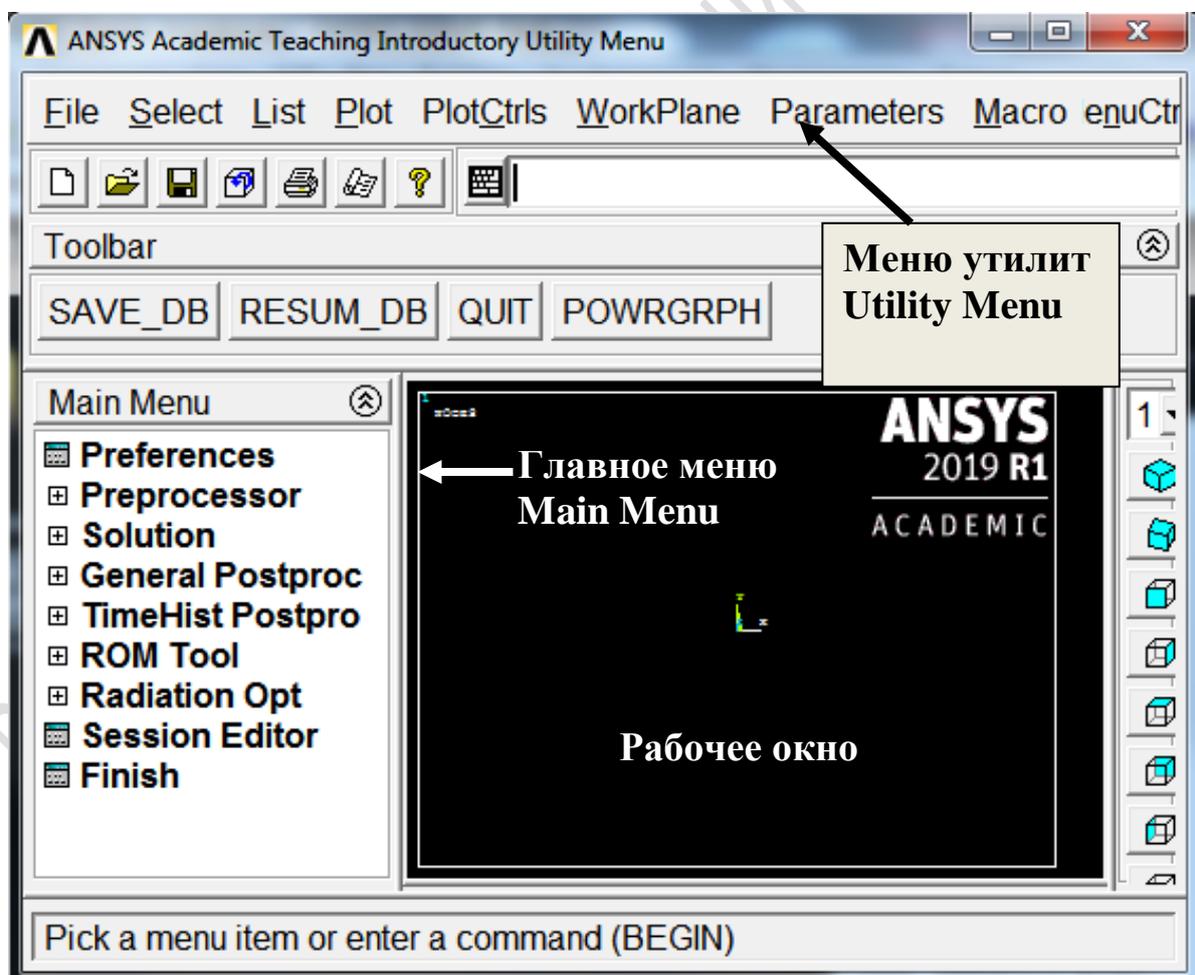
1. Первое, с чего начинается решение задачи, – это запуск программы. Для этого сначала необходимо запустить средство запуска продукта.

Выбрать **Пуск**, затем **Все программы** (в зависимости от версии операционной системы этот пункт может отличаться), далее открыть папку **ANSYS 2019R1** и кликнуть на **Mechanical APDL Product Launcher 2019R1**. В дальнейшем, с целью упрощения восприятия материала, аналогичная последовательность действий, необходимая для выполнения какого-либо из пунктов задачи, будет представлена в следующем виде:

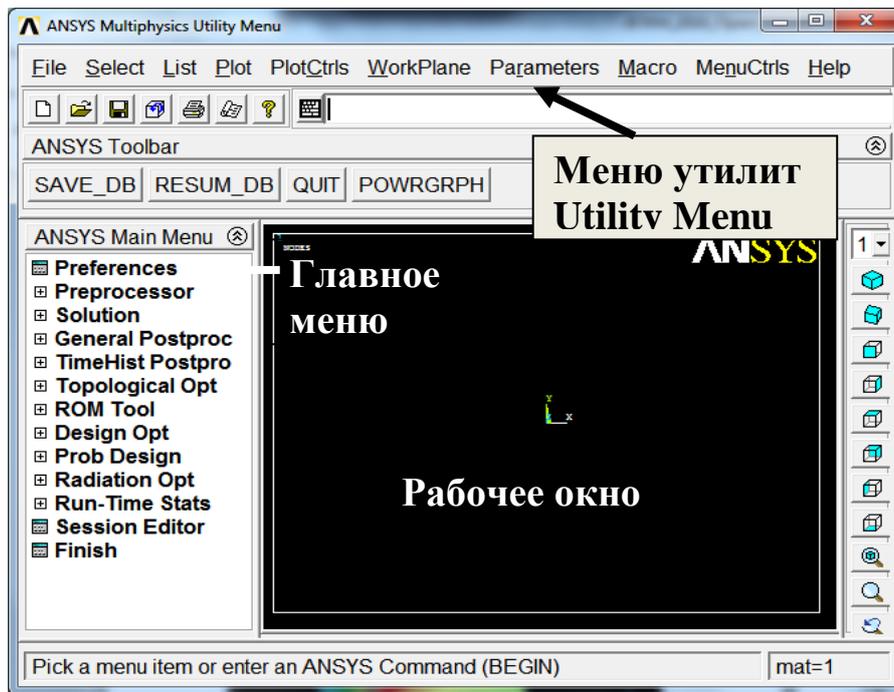
Пуск→**Все программы**→**Ansys 2019R1**→**Mechanical APDL Product Launcher**.

В открывшемся окне во вкладке **File Management** необходимо задать рабочую папку и текущее имя файлов. В строке **Working Directory** указать путь к папке, в которой будут сохраняться все данные и базы при выполнении расчетов. В строке **Job name** ввести имя файлов по умолчанию для файлов, создаваемых программой при расчетах, и запустить программу кнопкой **Run**.

На рисунке 2, а приведен пример типового окна **ANSYS 2019R1**, а на рисунке 2, б аналогичное окно для более ранней версии **ANSYS 12.1**.



а)



б)

Рисунок 2 – Типовое окно ANSYS

Меню утилит (**Utility Menu**) содержит набор часто используемых процедур, которые отображены в нем для доступа в любой момент работы программы. Главное меню (**Main Menu**) содержит основные функции и этапы выполнения программы, группирующиеся в располагаемые сбоку всплывающие (динамические) меню, вид которых зависит от продвижения по программе. [6–8]

2. Рабочую папку и текущее имя файлов можно поменять на любом этапе решения задачи. Для изменения текущего имени файлов необходимо выбрать **Utility Menu**→**File**→**Change Jobname**, ввести новое имя файла и нажать **OK**. Для смены рабочей папки выполнить последовательность **Utility Menu**→**File**→**Change Directory**, указать новую папку и нажать **OK**.

3. В **ANSYS** реализована возможность отображения в рабочем окне буквенно-цифровой информации на всех этапах решения задачи, которую используют обычно в качестве заголовка задачи. Для этого необходимо выполнить последовательность **Utility Menu**→**File**→**Change Title**, ввести имя заголовка, который будет отображаться на главном экране, и нажать **OK**.

4. По умолчанию **ANSYS** устанавливает фон черного цвета. Для смены цвета фона на белый необходимо выполнить инверсию цвета: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Style**→**Colors**→**Reverse Video**.

5. Задача, которую мы рассматриваем, – распространение тепла. Для того чтобы в **Главном меню** отображались пункты только для данного

типа задачи, требуется включить фильтры: **Main Menu**→**Preferences**→ выбрать **Thermal**→**ОК**.

6. Определяем тип элементов для нанесения конечно-элементной сетки и решения задачи переноса тепла. Используем восьмиузловой элемент **SOLID70**: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**→ **Add**. Выбрать в списке **Thermal Mass**→**Solid**→**Brick 8 node 70**→нажать **ОК**→заккрыть окно **Close**.

7. Выбираем единицы измерения температуры – Кельвин: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Temperature Units**→выбрать **Kelvin or Rankin**→нажать **ОК**.

8. Задаем свойства материала. Для решения задачи распространения тепла достаточно определить плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность материала: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Density** (плотность)→ввести любое значение в строке **DENS**→нажать **ОК**. Далее выбрать **Specific Heat** (удельная теплоемкость)→ввести любое значение в строке **C**→нажать **ОК**. Затем **Conductivity** (теплопроводность)→**Isotropic**→ввести любое значение в строке **KXX**→нажать **ОК**→**Close**.

9. Следующим этапом решения является построение твердотельной модели. Для примера возьмем куб со стороной 1 метр: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions**. В открывшемся окне **Create Block By Dimensions** ввести $X1=0$, $X2=1$, $Y1=0$, $Y2=1$, $Z1=0$, $Z2=1$ →нажать **ОК**.

10. Наносим конечно-элементную сетку. В данной задаче мы не предлагаем программе нанести сетку по заранее определенному шаблону, а предоставляем свободный выбор: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→ **Mesh**→**Volumes**→**Free**→левой кнопкой мыши выделить модель→нажать **ОК**.

11. После препроцессорной подготовки переходим к этапу приложения нагрузок и получения решения. Два произвольных ребра куба поддерживаем при постоянной температуре: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**On Lines**→щелкнуть по любому ребру куба→нажать **Apply**. В открывшемся окне **Apply TEMP on Lines** в строке **Load TEMP value** вписать значение температуры для первого ребра. В строке **DOF's to be constrained** выбрать **Temp**→нажать **Apply**. Щелкнуть по любой линии→нажать **Apply**. В открывшемся окне **Apply TEMP on Lines** в строке **Value Load Temp** вписать значение температуры для второго ребра. В строке **DOF's to be constrained** выбрать **Temp**→нажать **ОК**.

12. В данной задаче требуется получить стационарное распределение температур. Это необходимо учесть при выборе типа анализа. Выбранный вид анализа указывает программе, какие разрешающие уравнения следует использовать для решения данной задачи. Зададим тип анализа – стационарный (steady-state): **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis**→выбрать **Steady-State**→нажать **OK**.

13. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **OK**. Ждем завершения (Появится надпись **Solution is done!**).

14. Последний этап решения задачи – постпроцессорная обработка результатов. Отображаем графически результаты решения в виде пространственного распределения полей температур: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal solu.** В окне **Contour Nodal Solution Data** выбрать **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Nodal Temperature**→нажать **OK**. На экране должно появиться распределение температур с цветовой легендой.

15. Буквенно-цифровую и графическую информацию, выводимую на **Рабочее Окно**, можно настроить под собственные требования: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Window Controls**→**Window Options**. Далее в окне **Window Options** выбрать необходимые пункты:

- изменение типа отображения легенды температур – в строке **Display of Legend** выбрать **Legend ON**→нажать **Apply**;

- отключение отображения заголовка легенды – в строке **Legend header** снять галочку→нажать **Apply**;

- отключение отображения некоторых числовых параметров модели над легендой – в строке **View portion of legend** снять галочку→нажать **Apply**;

- отключение отображения рамки рабочего окна – в строке **Window frame** снять галочку→нажать **Apply**;

- отключение отображения заголовка на экране – в строке **Title** снять галочку→нажать **Apply**;

- изменение отображения логотипа ANSYS – в строке **ANSYS logo display** выбрать **Text in legend**→нажать **Apply**;

- отключение отображения даты и времени – в строке **DATE/TIME display** выбрать **No Date or Time**→нажать **Apply**;

- отключение отображения системы координат на экране – в строке **Location of triad** выбрать **Not shown**→нажать **OK**.

16. Результаты расчетов могут быть сохранены в виде файла базы данных с расширением **.db**, который в последующих сеансах работы можно загрузить и получить расчетные данные в графическом или табличном

виде: **Utility Menu**→**File**→**Save As**→выбрать папку, в которую сохраняется база, и указать имя файла латинскими буквами→нажать **ОК**.

17. Рабочее окно **ANSYS** может быть сохранено в виде файла изображения с расширением **.bmp** используя средства **Меню Утилит: Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Capture Image**. В появившемся окне выбрать **File**→**Save as**→выбрать папку и указать имя файла→**Сохранить**.

Задача 2 «Нестационарный анализ затвердевания слитка в трехмерной постановке»

2.1 Постановка задачи и принятые допущения

Данный пример позволяет ознакомиться с методами решения трехмерных нестационарных тепловых задач с учетом температурной зависимости свойств материала при наличии коэффициента теплоотдачи.

Слиток, поперечное сечение которого показано на рисунке 3, длиной 50 см, после отливки в песчаную форму толщиной 4 см остывает вместе с ней на воздухе.

Решается задача нестационарной теплопроводности с условиями третьего рода на границе песок – воздух. Процесс охлаждения отслеживается на протяжении 10 минут. В задаче учитывается зависимость тепловых свойств стали от температуры материала, а также наличие теплоотдачи с поверхности песка. В силу симметрии поперечного сечения рассматривается только половина области.

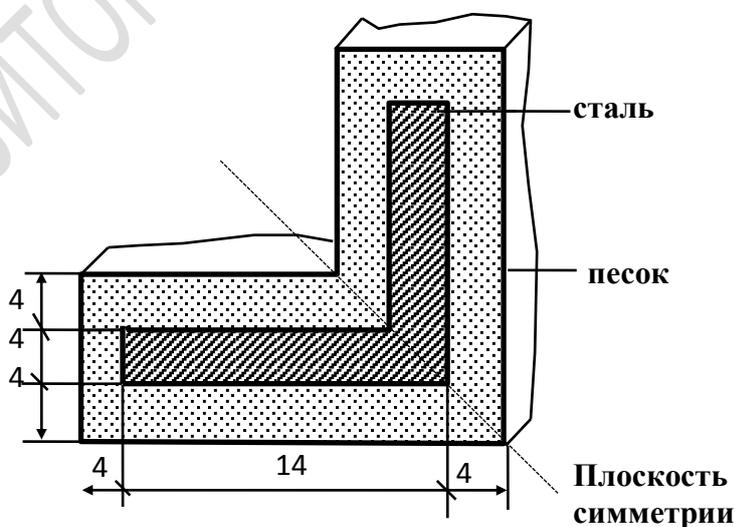


Рисунок 3 – Поперечное сечение модели

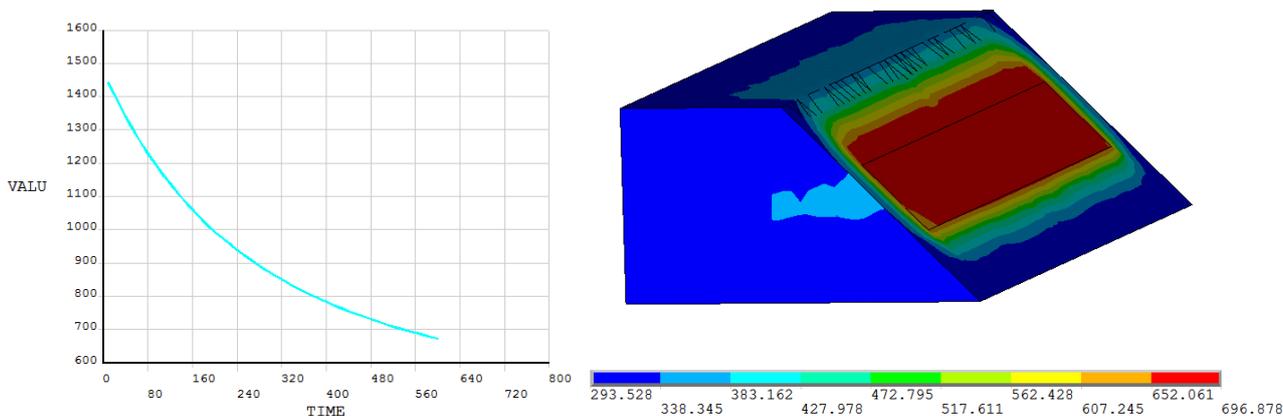


Рисунок 4 – Результат решения задачи в графическом виде

2.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса программы

1. Загружаем средство запуска продукта: **Пуск**→**Все программы**→**ANSYS 2019R1**→**Mechanical APDL Product Launcher 2019R1**. В открывшемся окне во вкладке **File Management** задать рабочую папку и текущее имя файлов. В строке **Working Directory** указать путь к папке, в которой будут сохраняться все данные и базы при выполнении расчетов. В строке **Job name** ввести имя файлов по умолчанию для файлов, создаваемых программой при расчетах, и запустить программу кнопкой **Run**.

2. Задаем заголовок задачи: **Utility Menu**→**File**→**Change Title**. Ввести имя заголовка, который будет отображаться на главном экране (например **Slitok 3D**), и нажать **OK**.

3. Задача, которую мы рассматриваем – распространение тепла. Для того чтобы в **Главном меню** были доступны только пункты, относящиеся к данному типу расчета следует включить фильтры **Main Menu**→**Preferences**→выбрать **Thermal**→**OK**.

4. Выбираем тип элементов для нанесения конечно-элементной сетки и решения задачи переноса тепла. Используем восьмиузловой шестисторонний элемент **SOLID70**: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→ **Add/Edit/Delete**→**Add**. Выбрать в списке **Thermal Mass**→**Solid**→**Brick 8 node 70**→нажать **OK**→закрывать окно **Close**.

5. Задаем свойства материалов. Для песка теплопроводность – 0,35 Вт/(м*К); плотность – 1600 кг/м³; удельная теплоемкость – 850 Дж/(кг*К).

Main Menu→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Density**

(плотность)→ввести значение **1600** в поле **DENS**→нажать **ОК**. Далее выбрать **Specific Heat** (удельная теплоемкость)→ввести значение **850** в поле **C**→нажать **ОК**. Затем **Conductivity** (теплопроводность)→ **Isotropic**→ввести значение 0,35 в поле **KXX**→нажать **ОК**→**Close**.

6. Если в задачах используется составная модель из разных материалов, то свойства каждого из них необходимо задать как отдельную модель материала с уникальным номером. При первом вводе свойств **ANSYS** по умолчанию создает модель материала под номером 1. Чтобы задать свойства стали, необходимо создать модель материала с новым номером и определить для нее свойства.

Main Menu→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Define Material Models Behavior** выбрать **Material**→**New Model**→ввести номер материала **2** в поле **Define Material ID**→нажать **ОК**.

7. Теплопроводность и удельная теплоемкость материала слитка (стали) зависят от температуры и задаются в виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость теплопроводности и удельной теплоемкости стали от температуры

Температура, К	273	780	1300	1480
Теплопроводность	15	18	31	34
Удельная теплоемкость	450	550	620	640

Для этого в **ANSYS** необходимо выполнить следующие действия:

Main Menu→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Defined** выбрать **Material Model Number 2**. Далее в окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Conductivity** (теплопроводность)→ **Isotropic**. В окне **Conductivity for Material Number 2** нажать **Add Temperature** трижды. Заполнить таблицу 2.2. Нажать **ОК**.

Таблица 2.2 – Таблица зависимости в **ANSYS** теплопроводности от температуры

Temperatures	T1	T1	T3	T4
	273	780	1300	1480
KXX	15	18	31	34

Не закрывая окно **Define Material Model Behavior**, выбрать **Thermal**→**Specific Heat** (удельная теплоемкость). В окне **Specific Heat for Material Number 2** нажать **Add Temperature** трижды. Заполнить таблицу 2.3. Нажать **ОК**.

Таблица 2.3 – Таблица зависимости в ANSYS удельной теплоемкости от температуры

Temperature	T1	T1	T3	T4
	273	780	1300	1480
C	450	550	620	640

8. Заданные таблично свойства материала можно изобразить в виде графика. Для этого выбрать **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Defined** выбрать **Material Model Number 2**. Далее в окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Conductivity** (теплопроводность)→**Isotropic**. В окне **Conductivity for Material Number 2** нажать **Graph**.

Аналогичным образом построить график для удельной теплоемкости.

9. Следующим этапом решения задачи является построение твердотельной модели. Рассмотрим один из возможных вариантов построения сложной составной модели. Для построения контура песчаной формы нужно построить вершины прямоугольной трапеции, являющейся одним из торцов формы. **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS**. В строке **Keypoint number** ввести номер точки **1**, а в строке **Location in active CS** ввести координаты точки **X, Y, Z**, соответственно **0, 0, 0**. Нажать **Apply**. Аналогичным образом ввести еще три точки (таблица 2.4). После ввода координат последней точки нажать **OK**.

Таблица 2.4 – Координаты вершин прямоугольной трапеции.

Номер точки	X, м	Y, м	Z, м
2	0,22	0	0
3	0,1	0,12	0
4	0	0,12	0

10. Для удобства процедуры дальнейшего построения модели выполним несколько настроек:

- включить отображение на экране номеров точек, поверхностей и объемов: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**. Поставить галочки в полях **Keypoint numbers**, **Area numbers**, **Volume numbers**. Нажать **OK**;

- переместить символ начала координат в левый верхний угол графического окна, чтобы он не накладывался на модель. **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Window Controls**→**Window Options**. В строке **Location of triad** выбрать **At top left** и нажать **OK**.

11. Создаем поверхность торца песчаной формы по точкам: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Areas**→**Arbitrary**→**Through**

KPs. Отметить последовательно указателем мыши точки с первой по четвертую. Нажать **ОК**.

12. Построенную поверхность выдавливаем в направлении оси Z на 0,58 м (длина слитка 0,5 м + толщина стенок песка 0,04 м с каждой стороны): **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Extrude**→**Areas**→**By XYZ Offset**→щелкнуть левой кнопкой мыши по поверхности **A1**→нажать **ОК**. В строке **Offsets for extrusion** ввести в поле **DZ** значение **0.58**→нажать **ОК**.

13. Сохраняем промежуточный файл базы данных : **Utility Menu**→**File**→**Save as**→выбрать папку, в которую сохраняется база, и указать имя файла латинскими буквами→нажать **ОК**.

14. Модель слитка изначально создаем в виде прямоугольного параллелепипеда: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions**. В окне **Create Block by Dimensions** ввести координаты крайних точек по осям X, Y, Z (таблица 5). Нажать **ОК**.

Таблица 2.5 – Таблица с координатами крайних точек параллелепипеда в ANSYS

X-coordinate	0.04	0.22
Y-coordinate	0.04	0.08
Z-coordinate	0.04	0.54

15. Выступающую за плоскость симметрии часть необходимо удалить. Для этого выполнить процедуру «Перекрытие» областей (overlap). Данная процедура разделяет существующие области на части по местам их пересечения: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**Overlap**→**Volumes**. Нажать **Pick All**.

Удалить лишнюю область: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Delete**→**Volume and Below**. Отметить мышью объем **V4** и нажать **ОК**.

16. Наносим конечно-элементную сетку. В данной задаче будем разделять конструкцию на элементы с заданным размером стороны элемента. Для этого необходимо определить в ANSYS размер стороны элемента по умолчанию вдоль граней составных частей модели: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**Manual Size**→**Global**→**Size**. Отметить в строке **Size** значение размера элемента по умолчанию 0.015, нажать **ОК**.

Разбиваем на элементы область, занятую песком: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Free**→отметить внешнюю часть модели (песок) **V5**→нажать **ОК**.

При нанесении конечно-элементной сетки **ANSYS** по умолчанию присвоит элементам разбиваемой области свойства материала № 1 (в данной задаче это песок).

17. Для того чтобы внутренней области были присвоены свойства материала № 2 (сталь), необходимо указать программе, что все дальнейшие действия по нанесению сетки будут выполнены для материала № 2: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh Attributes**→**Default Attribs**. В открывшемся окне в строке **Material Number** выбрать материал № 2 и нажать **OK**.

Отобразить на экране объемные области. **Utility Menu**→**Plot**→**Volumes**. Нанести конечно-элементную сетку на область, занятую сталью: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Free**→отметить внутреннюю часть модели (сталь) **V3**→нажать **OK**.

18. Несмотря на то, что модель в данной задаче состоит из материалов с различными свойствами, графически в **ANSYS** конечно-элементная сетка по умолчанию отображается одним цветом. Для комфортной работы можно отобразить области с различными теплофизическими свойствами разными цветами: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**→в строке **Elem/Attrib numbering** выбрать **Material numbers**, а в строке **Numbering shown with** выбрать **Colors only**→нажать **OK**.

19. Сохраняем промежуточный файл базы данных: **Utility Menu**→**File**→**Save as**→выбрать папку в которую сохраняется база и указать имя файла латинскими буквами→нажать **OK**.

20. Переходим к следующему этапу решения задачи – этапу приложения нагрузок и получения решения. В данной задаче необходимо получить решение о распределении температур при остывании слитка в динамике (нестационарный анализ). Следует задать тип анализа – переходной (Transient): **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis**→выбрать **Transient**→нажать **OK**→выбрать **Full** →нажать **OK**.

21. Определяем начальную температуру слитка. Начальная температура слитка задается в узлах, принадлежащих слитку, для чего они предварительно выделяются командой **Select**.

Необходимо выбрать элементы, принадлежащие стали (материалу № 2): **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В первой строке выбрать **Elements**, во второй – **By Attributes**. Убедиться, что отмечено поле **Material num**, в строке **Min,Max,Inc** ввести номер материала, т. е. цифру **2**→нажать **Apply**. Выбрать узлы, которые принадлежат только что выбранным элементам. В первой строке выбрать **Nodes**, во второй – **Attached to**. Убедиться, что отмечено поле **Elements**→нажать **OK**. Отобразить выбранные узлы на экране: **Utility Menu**→**Plot**→**Nodes**. Выбранным узлам задать начальную температуру стали в кельвинах: **Main Menu**→**Solution**→

Define Loads→**Apply**→**Initial Condit'n**→**Define**. В появившемся окне нажать **Pick All** (во всех активных выделенных узлах), В строке **DOF to be specified** выбрать **Temp** в строке **Initial value of DOF** ввести **1480**→нажать **OK**.

22. Задаем начальную температуру песчаной формы. Сначала следует выбрать узлы, принадлежащие песку (материалу № 1), при помощи операции инвертирования: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В первой строке выбрать **Nodes**→нажать кнопку **Invert**→нажать **Cancel**. Обновить рабочее окно для отображения инвертированных узлов: **Utility Menu**→**Plot**→**Replot**.

К выбранным узлам задать начальную температуру песка в кельвинах: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Initial Condit'n**→**Define**. В появившемся окне нажать **Pick All** (во всех активных выделенных узлах). В строке **DOF to be specified** выбрать **Temp** в строке **Initial value of DOF** ввести **293** и нажать **OK**.

23. Задаем условия теплообмена на границах песок – воздух. Для этого необходимо активировать все узлы модели **Utility Menu**→**Select**→**Everything**. Отображаем на экране объемные области **Utility Menu**→**Plot**→**Volumes**. Далее **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Convection**→**On Areas**. В окне **Apply CONV on Areas** в строке ввести номера областей: **1,2,3,5,6** (все наружные поверхности модели, за исключением поверхностей принадлежащих плоскости симметрии)→нажать **OK**. В строке **Film coefficient** ввести **0.4** (коэффициент теплоотдачи Вт/(м²*К)), в строке **Bulk temperature** ввести **293** (температура воздуха в кельвинах)→нажать **OK**.

24. Поскольку задача нестационарная, то необходимо задать временные параметры решения.

Вызвать окно настроек временных параметров: **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Time/Frequency**→**Time-Time Step**. В открывшемся окне **Time and time step options** выполнить следующие действия:

- в строке **Time at end of load step** ввести **600** (время наблюдения процесса остывания в секундах);

- в строке **Time step size** ввести **10** (величина рекомендуемого шага решения задачи);

- в строке **Stepped or ramped b.c.** выбрать **Stepped** (граничные условия постоянны во времени);

- в строке **Automatic time stepping** выбрать **ON** (устанавливается автоматический переменный временной шаг решения);

- в строке **Minimum step size** ввести **5** (минимальный временной шаг решения задачи);

– в строке **Maximum step size** ввести **15** (максимальный временной шаг решения задачи);

– нажать **ОК**.

25. Чтобы программа сохраняла результаты для каждого шага решения и в дальнейшем результаты решения каждого шага можно было отобразить в виде графика или таблицы, необходимо выполнить: **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Output Ctrl**s→**DB/Results File**. В поле **File write frequency** выбрать **Every substep**→нажать **ОК**.

26. Сохраняем промежуточный файл базы данных: **Utility Menu**→**File**→**Save as**→выбрать папку, в которую сохраняется база, и указать имя файла латинскими буквами→нажать **ОК**.

27. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **ОК**. Ждать завершения (появится надпись **Solution is done!**).

28. Последний этап решения задачи – постпроцессорная обработка результатов. Отобразим графически зависимость температуры от времени в заданном узле.

Включить нумерацию узлов на экране: **Utility Menu**→**PlotCtrl**s→**Numbering**. В строке **Node numbers** отметить **ON**, в строке **Numbering shown with** выбрать **Colors&Numbers**→нажать **ОК**. Отобразить элементы на рабочем окне: **Utility Menu**→**Plot**→**Elements**.

Как видно, когда конечно-элементная сетка достаточно плотная, то определить номер требуемого узла визуальным способом очень сложно. Поэтому применим другой способ.

Выделить узел с координатами центра ($x = 0,16$ м, $y = 0,06$ м, $z = 0,29$ м), примерно соответствующий центру плоскости симметрии. Для этого присвоить переменной **cnt_pt** номер узла с этими координатами: **Utility Menu**→**Parameters**→**Scalar Parameters**. В строке **Selection** набрать **cnt_pt=node(0.16,0.06,0.29)**→нажать **Accept**→нажать **Close**.

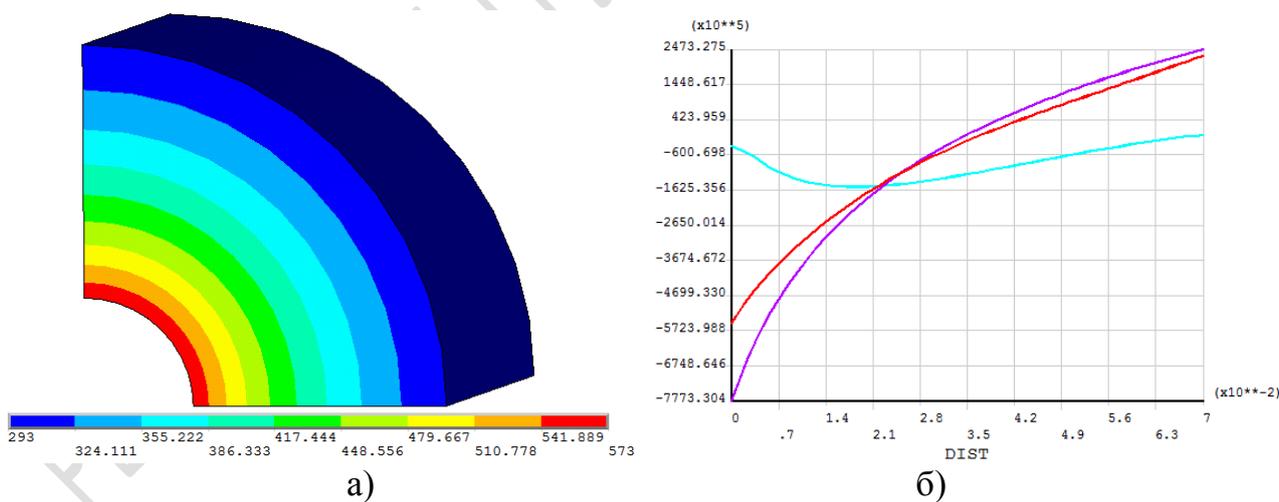
29. Отобразим график зависимости температуры в этом узле от времени: **Main Menu**→**TimeHist Postpro**→**Define Variables**→в открывшемся окне нажать **Add**→выбрать **Nodal DOF result**→нажать **ОК** (добавить новую переменную). В окне **Define Nodal Data** в пустой строке ввести **cnt_pt**→нажать **ОК**. Проверить, что в поле **Node number** стоит номер узла→нажать **ОК**→затем **Close**. Далее **Main Menu**→**TimeHist Postpro**→**Graph Variables**→ввести параметр **2** в строку **1st variable to graph**→Нажать **ОК**.

Задача 3 «Термо-прочностной расчет полого толстостенного цилиндра в трехмерной постановке»

3.1 Постановка задачи и принятые допущения

Данный пример позволяет ознакомиться с методом решения трехмерных стационарных задач расчета термоупругих напряжений, возникающих в результате неравномерного нагрева образца. На первом этапе выполняется расчет температурных полей, затем полученные узловые значения температур переносятся на новую модель, при этом используются инструменты интерполяции нагрузки, и выполняется расчет термоупругих напряжений в квазистатической постановке задачи [9, 10].

В качестве модели выбран цилиндр длиной 0,2 м с внутренним и внешним радиусами 0,03 и 0,1 м соответственно. Внешняя поверхность цилиндра поддерживается при температуре 20 °С, внутренняя поверхность – при температуре 300 °С. Вследствие симметрии моделируется только одна четверть цилиндра. При решении задачи используются восьмиузловой тепловой элемент SOLID 70 и прочностной элемент SOLID 185. Пример предназначен для изучения методики решения задач подобного типа.



а) распределение полей температур в цилиндре;

б) график зависимости компонент напряжений в цилиндре вдоль заданного пути.

Рисунок 5 – Результат решения задачи в графическом виде

3.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса программы

1. Загружаем средство запуска продукта: **Пуск**→**Все программы**→**ANSYS 2019R1**→**Mechanical APDL Product Launcher 2019R1**. В открывшемся окне во вкладке **File Management** выбрать рабочую папку и текущее имя файлов. В строке **Working Directory** указать путь к папке, в которой будут сохраняться все данные и базы при выполнении расчетов. В строке **Job name** ввести имя файлов по умолчанию **therm** для файлов, создаваемых программой при расчетах, и запустить программу кнопкой **Run**.

2. Создаем геометрическую модель.

Цилиндр – симметричная фигура относительно оси. В таких случаях для расчета можно использовать не полноразмерную модель, а только ее часть, указав условия симметрии на границах рассечения модели. Поэтому в данной задаче в качестве геометрической модели используем четверть цилиндра: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Cylinder**→**Partial Cylinder**. В окне **Partial Cylinder** в строке **Depth** ввести длину цилиндра **0.2**, в строках **Rad-1** и **Rad-2** значения внутреннего и внешнего диаметров цилиндра **0.03** и **0.1** соответственно, в строках **Theta-1** и **Theta-2** – начальное и конечное значение угловой координаты сектора – **0** и **90** соответственно. Нажать **OK**.

3. Сохраняем базу данных для последующего использования в прочностной задаче.

Применяемые размеры конечно-элементной сетки в тепловой и прочностной задачах разные, однако геометрические размеры моделей одинаковые. Поэтому на данном этапе решения задачи можно сохранить отдельно геометрическую модель в виде файла базы данных (например **struct.db**) и импортировать ее на этапе построения прочностной модели. Чтобы сохранить базу данных следует выполнить следующие действия: **Utility Menu**→**File**→**Save as**→в строке **Save Database to** ввести имя **struct.db**→нажать **OK**.

4. Задаем заголовок задачи: **Utility Menu**→**File**→**Change Title**. Ввести имя заголовка, который будет отображаться на главном экране (например, **Thermal problem in concentric cylinder**), и нажать **OK**.

5. Выбираем тип твердотельного элемента, применяемого в тепловом расчете. Используем восьмиузловой шестисторонний элемент SOLID70. **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**→**Add**. Выбрать в списке **Thermal Mass**→**Solid**→**Brick 8 node 70**→нажать **OK**→ закрыть окно **Close**.

6. Задаем свойства материала, необходимого для проведения стационарного теплового расчета: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В качестве материала используем сталь. В окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Conductivity** (теплопроводность)→**Isotropic**→ввести значение **40** в поле **KXX**→нажать **OK**→**Close**.

7. Следующим этапом решения задачи является нанесение конечно-элементной сетки. В данном примере разберем вариант с предварительным разбиением контура модели на заданное количество элементов.

Для удобства следует представить модель в виде линий контура: **Utility Menu**→**Plot**→**Lines**. Отобразить на экране номера линий контура: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**→в окне **Plot Numbering Controls** поставить галочку напротив **LINE Line numbers**→нажать **OK**.

8. Устанавливаем параметры сеточного разбиения. В данном примере предлагается задать количество делений на линиях: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**ManualSize**→**Lines**→**Picked Lines**. Выделить линии **L2,L4,L5,L7** (дуги окружностей) либо ввести в строку ввода номера линий **2,4,5,7**→нажать **OK**.

В появившемся окне **Element Sizes on Picked Lines** ввести в строке **NDIV No. of element divisions** количество элементов для разбиения линий **10** и нажать **Apply**. Повторить операцию для линий **L1,L3,L6,L8** (количество элементов для разбиения линий **14**) и для линий **L9,L10,L11,L12** (количество элементов для разбиения линий **15**). Нажать **OK**.

9. Выполняем распланированное сеточное разбиение созданной модели: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Mapped**→**4 to 6 sided**→выделить курсором модель→нажать **OK**.

10. Задаем граничные условия для задачи переноса тепла – температуру на внешней и внутренней поверхности цилиндра: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**On Areas**→курсором выделить внутреннюю поверхность цилиндра→нажать **OK**. В появившемся окне **Apply TEMP on Areas** в графе **Lab2 DOFs to be constrained** выбрать **TEMP**, в графе **VALUE Load TEMP value** ввести значение температуры **300+273**→нажать **Apply**. Выделить внешнюю поверхность→нажать **OK**. Аналогичным образом задать температуру внешней поверхности цилиндра **20+273**→нажать **OK**.

11. Две плоские поверхности цилиндра, ограниченные линиями контура **L3,L11,L6,L9** и **L1,L10,L8,L12**, располагаются внутри реальной модели и не обмениваются теплом с окружающей средой. Поэтому необходимо указать, что на этих поверхностях не происходит теплообмен (условие адиабатичности).

Сначала требуется выбрать узлы, принадлежащие этим поверхностям: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В окне **Select Entities** в первой строке вы-

брать **Nodes**, во второй строке выбрать **By Location**, в появившемся меню выделить **X coordinates**, а в графе **Min,Max** ввести **0**. Поставить точку напротив **From Full** (выбор из всех имеющихся) и нажать **Apply**.

Выделить **Y coordinates** и в графе **Min,Max** ввести **0**→поставить точку напротив **Also Select** (дополнительно к выбранным)→нажать **OK**.

12. Задаем условие адиабатичности на выбранных поверхностях: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Heat Flow**→**On Nodes**→**Pick All**→в окне **Apply Heat on Nodes** в графе **VALUE Load HEAT value** ввести **0**→нажать **OK**.

13. Активируем все элементы модели перед запуском на решение: **Utility Menu**→**Select**→**Everything**.

14. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **OK**. Ждать завершения (Появится надпись **Solution is done!**).

15. Сохраняем полученные данные в виде файла базы данных с именем по умолчанию: **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db**

Если на первом этапе решения задачи было дано имя по умолчанию **therm**, то файл будет сохранен под именем **therm.db**.

16. Отображаем результаты решения в виде пространственного распределения полей температур: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu**. В окне **Contour Nodal Solution Data** выбрать **Nodal solution**→**DOF Solution**→**Nodal Temperature**→нажать **OK**. На экране должно появиться распределение температур с цветовой легендой.

17. Далее приступаем к решению прочностной задачи. Необходимо обнулить текущую задачу и запустить новую: **Utility Menu**→**File**→**Clear & Start New**→выбрать **Do not read file**→нажать **OK**.

18. Задаем новое имя файла по умолчанию **struct**: **Utility Menu**→**File**→**Change Jobname**→ввести новое имя файла **struct** и нажать **OK**.

19. Восстанавливаем сохранённую базу данных, содержащую заготовку модели: **Utility Menu**→**File**→**Resume from...**→в окне **Resume Database** выбрать из списка файлов в вашей папке файл **struct.db**→нажать **OK**.

20. Задаем новый заголовок задачи: **Utility Menu**→**File**→**Change Title**→ввести имя заголовка, который будет отображаться на главном экране (например **Structural problem in concentric cylinder**)→нажать **OK**.

21. Выбираем тип твердотельного элемента, используемого в прочностном расчете. Используем восьмиузловой шестисторонний элемент **SOLID185**: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**→**Add**. Выбрать в списке **Structural Mass**→**Solid**→**Brick 8 node 185**→нажать **OK**→закрыть окно **Close**.

22. Задаем свойства стали для проведения прочностного анализа: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать **Structural**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic**→ввести значение модуля Юнга **2e11** (т. е. $2 \cdot 10^{11}$ Па) в поле **EX**→ввести значение коэффициента Пуассона **0.3** в поле **PRXY**→нажать **OK**.

В окне **Material Models Available** выбрать **Structural**→**Thermal Expansion**→**Secant Coefficient**→**Isotropic**→ввести значение коэффициента температурного расширения **1.22e-5** (т. е. $1,22 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) в поле **ALPX**→ввести значение начальной температуры материала **0** в поле **Reference temperature**→нажать **OK**→закрыть окно.

23. Нанесем конечно-элементную сетку. Для этого следует повторить пункты 7–9 данного примера для следующих параметров разбиения линий:

- линии **L2,L4,L5,L7** – количество элементов для разбиения **20**;
- линии **L1,L3,L6,L8** – количество элементов для разбиения **28**;
- линии **L9,L10,L11,L12** – количество элементов для разбиения **30**.

24. Следующим этапом является интерполяция температур на новую модель из решения задачи переноса тепла. Сначала необходимо записать координаты всех узлов прочностной модели: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**Write Node File**→в окне **Write Nodes to File** в строке **Name of file** ввести **struct_1.node**→нажать **OK**. В итоге будет создан файл **struct_1.node** с координатами всех узлов.

25. Сохраняем базы данных прочностной задачи с именем файла по умолчанию (в данном примере **struct.db**): **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db**.

26. Считываем базу данных задачи переноса тепла: **Utility Menu**→**File**→**Resume from...**→в окне **Resume Database** выбрать из списка файлов в вашей папке файл **therm.db**→нажать **OK**.

27. Выполняем операцию идентификации данных для восстановления из файла результатов: **Main Menu**→**General Postproc**→**Data & File Opts...**→в окне **Data to be read** следует выбрать **All items**→в качестве файла-источника результатов в поле **Results file to be read** укажите **therm.rth**→нажать **OK**.

28. Интерполируем нагрузку: **Main Menu**→**General Postproc**→**Submodeling**→**Interp Body Forc**→в окне **File containing nodes** ввести название созданного ранее файла узлов **struct_1.node** или выбрать его, используя кнопку **Browse**→нажать **OK**.

После выполнения этого шага в рабочей директории появится файл **struct.bfin**, содержащий интерполированную нагрузку.

29. Задаем температуры в узлах прочностной модели из результатов решения задачи переноса тепла.

Необходимо перейти в раздел **Solution**. Для этого необходимо выполнить следующие действия **Main Menu**→**Solution**. Эта операция необходима, так как содержащиеся в считываемом впоследствии файле **struct.bfin** команды на языке программирования APDL выполняются только при активном разделе **Solution**.

Загрузить базу с сохраненной моделью для прочностной задачи: **Utility Menu**→**File**→**Resume from...**→в окне **Resume Database** выбрать из списка файлов в вашей папке файл **struct.db**→нажать **OK**.

Считать данные из файла интерполированной нагрузки на узлы модели из файла **struct.db**: **Utility Menu**→**File**→**Read Input from...**→в окне **Read File** в разделе **Read input from** выбрать файл **struct.bfin**→нажать **OK**.

В результате будет проведена интерполяция узловых значений температуры, полученных в тепловом анализе на сетку модели прочностной задачи.

30. Две плоские поверхности цилиндра, ограниченные линиями контура **L3,L11,L6,L9** и **L1,L10,L8,L12**, располагаются внутри реальной модели. Программе необходимо указать, что плоские прямоугольные поверхности не являются границами модели, а находятся внутри нее.

Для удобства работы с моделью следует представить модель в виде каркаса (линий контура): **Utility Menu**→**Plot**→**Lines**. На торцевых границах задать условие симметрии: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**Symmetry B.C.**→**On Areas**→ выделить курсором плоские прямоугольные поверхности, ограниченные линиями контура **L3,L11,L6,L9** и **L1,L10,L8,L12**, и нажать **OK**.

31. Перед запуском на решение необходимо установить параметры решателя: **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Sol'n Controls**→в разделе **Basic** в строке **Analysis Options** выбрать **Large Displacement Static**→нажать **OK**. В разделе **Sol'n Options** в блоке **Equation Solver** выбрать тип решателя **Pre-Condition CG** (Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) Solver) и переместить ползунок в крайнее левое положение.

При выборе стандартного решателя во время запуска задачи на решение могут возникнуть ошибки. Также можно использовать другие типы решателей. Например, хорошие результаты получены при использовании **Jacobi Conjugate Gradient (JCG) Solver**. При решении тепловых задач его можно выбрать такой последовательностью действий: **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options**→в строке **EQSLV Equation solver** выбрать **Jacobi Conj Gradnt**→нажать **OK**. При решении задач термоупругости этот пункт в окне **Main Menu** недоступен. Тем не менее можно, используя язык программирования APDL, ввести в командной строке следующую команду **EQSLV,JCG**.

32. Активируем все элементы модели перед запуском на решение: **Utility Menu**→**Select**→**Everything**.

33. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **OK**. Ждать завершения (появится надпись **Solution is done!**).

34. Считываем результаты решения последнего шага решения: **Main Menu**→**General Postproc**→**Read Results**→**Last Set**.

В более ранних версиях ANSYS результаты решения могут быть доступны для отображения сразу после окончания вычислений.

35. Сохраняем полученные данные в виде файла базы данных с именем по умолчанию: **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db**.

36. Результаты расчета термоупругих напряжений представим в виде графика величин напряжений вдоль заданного пути.

Для этого следует перейти в цилиндрическую систему координат для просмотра результатов: **Main Menu**→**General Postproc**→**Options for Outp**→для просмотра результатов в цилиндрической системе координат в окне **Options for Output** в строке **Results coord system**, выбрать **Global cylindrical**→нажать **OK**.

Далее необходимо визуализировать узлы, принадлежащие сечению посередине модели: **Utility Menu**→**Plot**→**Nodes**. После этого активировать необходимые узлы модели: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**→в окне **Select Entities** в первой строке выбрать **Nodes**→во второй строке выбрать **By Location**→в появившемся меню выделить **Z coordinates**, а в графе **Min,Max** ввести диапазон значений **0.095,0.1**→поставить точку напротив **From Full** (выбор из всех имеющихся) →нажать **OK**.

37. Определим траекторию, вдоль которой будем строить график зависимости напряжений: **Main Menu**→**General Postproc**→**Path Operations**→**Define Path**→**By Nodes**.

Курсором последовательно выделить несколько узлов, лежащих на любой радиальной линии, начиная с узла, лежащего на внутренней окружности, и заканчивая узлом, лежащим на внешней окружности→нажать **OK**→в появившемся окне **By Nodes** в строке **Define Path Name** ввести имя заданного пути **radial**→нажать **OK**→закрыть окно с информацией о выбранном пути.

38. Выберем интересующие компоненты напряжений для построения графика в цилиндрической системе координат: **Main Menu**→**General Postproc**→**Path Operations**→**Map onto Path**→в окне **Map Result Items onto Path** в разделе **Item to be mapped** выбрать **Stress**→**X-Direction SX**→нажать **Apply**→**Y-Direction SY**→нажать **Apply**→**Z-Direction SZ**→нажать **OK**.

SX – радиальная компонента;

SZ – компонента вдоль оси Z;

SY – тангенциальная компонента.

39. Выводим графики на экран: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Plot Path Item**→**On Graph**→в окне **Plot of Path Items on Graph** в разделе **Path items to be graphed** выделить интересующие величины **SX, SY, SZ**→нажать **OK**.

Задача 4 «Нестационарная тепловая задача с табличным заданием граничных условий в трехмерной постановке»

4.1 Постановка задачи и принятые допущения

Данный пример позволяет ознакомиться с методом решения трехмерных нестационарных тепловых задач с конвективным теплообменом на границах раздела материала, учитывая температурную зависимость коэффициента теплоотдачи.

Прямоугольный параллелепипед с соотношением сторон 2:1:2 имеет постоянную температуру на одной стороне, в то время как на других осуществляется конвективный теплообмен. При этом коэффициент конвективной теплоотдачи (film coefficient) является функцией температуры, и эта параметрическая зависимость задается таблично (имя таблицы – *cnvtab*).

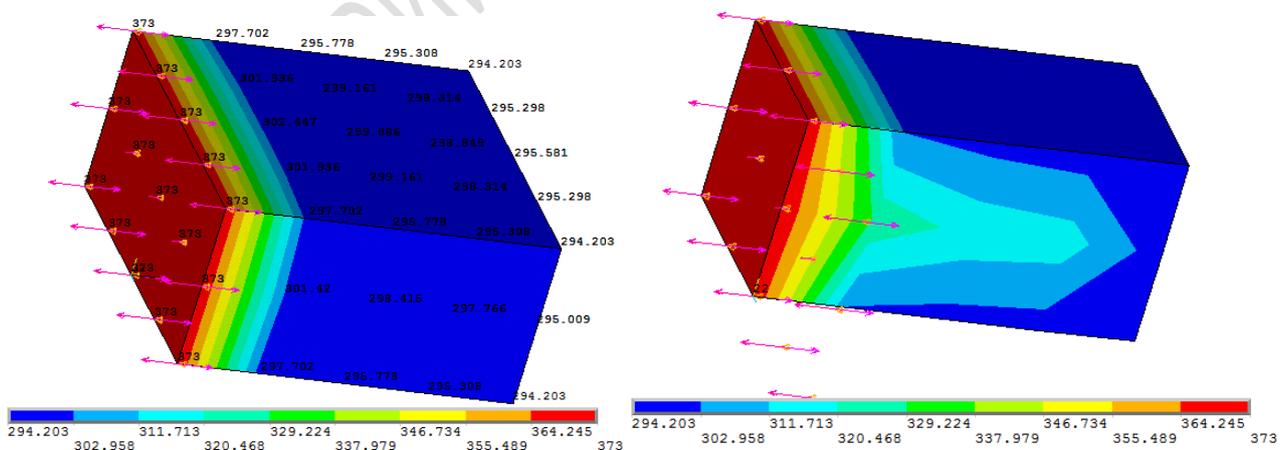


Рисунок 6 – Распределение температур в пластине в результате решения задачи

4.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса программы

1. Загружаем средство запуска продукта: **Пуск**→**Все программы**→**ANSYS 2019 R1**→**Mechanical APDL Product Launcher 2019 R1**. В открывшемся окне во вкладке **File Management** задать рабочую папку и текущее имя файлов. В строке **Working Directory** указать путь к папке, в которой будут сохраняться все данные и базы при выполнении расчетов. В строке **Job name** ввести имя файлов по умолчанию (например **Tab**) для файлов, создаваемых программой при расчетах, и запустить программу кнопкой **Run**.

2. В ANSYS существует несколько способов определения зависимости свойств материала и граничных условий от температуры. Один из них был рассмотрен в задаче 2. Рассмотрим еще один способ. Для этого в данном примере создадим произвольную таблицу, в которую внесем значения коэффициента теплоотдачи с поверхности материала при различных температурах, и подключим ее на этапе определения нагрузок и граничных условий.

Выполнить следующую последовательность: **Utility Menu**→**Parameters**→**Array Parameters**→**Define/Edit**→в открывшемся окне **Array Parameters** нажимаем **Add**→в окне **Add New Array Parameter** в строке **Parameter name** ввести имя таблицы **cnvtab**→в строке **Parameter type** указать тип данных **Table**→в строке **No. Of rows,cols,planes** ввести количество строк, столбцов, листов равным 3,1,1 соответственно→в строке **Row Variable** ввести **TEMP** (в этом случае к таблице будет добавлен еще один столбец, в котором внесенные значения будут иметь размерность температуры)→нажать **OK**.

Заполнить таблицу данными. В оставшемся на экране окне **Array Parameters** нажать на кнопку **Edit** или, если окно закрыли, то выполнить следующие действия: **Utility Menu**→**Parameters**→**Array Parameters**→**Define/Edit**→**Edit**. Ввести в первой колонке вместо высвеченных цифр следующие значения: **20+273**, **50+273** и **100+273** (для этого нажать на серые кнопки с цифрами). Ввести значения коэффициента теплоотдачи **10**, **20**, **30** в белые поля ввода второй колонки в строках 1, 2, 3 соответственно. Заметим, что не надо ничего вводить в поле над второй колонкой, так как это двумерная таблица. Выбрать **File**→**Apply\Quit**→в окне **Array Parameters** нажать **Close**.

3. Выбираем тип твердотельного элемента, используемого в тепловом расчете. В данном примере будем использовать восьмиузловой шестисторонний элемент SOLID70: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element**

Type→**Add/Edit/Delete**→**Add**. Выбрать в списке **Thermal Mass**→**Solid**→**Brick 8 node 70**→нажать **OK**→заккрыть окно **Close**.

4. Задаем свойства материала: плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность материала. Для этого следует выполнить следующую последовательность: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать→**Thermal**→**Density** (плотность)→ввести значение **10** в строке **DENS**→нажать **OK**. Далее выбрать **Specific Heat** (удельная теплоемкость)→ввести значение **100** в строке **C**→нажать **OK**. Затем **Conductivity** (теплопроводность)→**Isotropic**→ввести значение **1** в строке **KXX**→нажать **OK**→**Close**.

5. Создаем геометрическую модель параллелепипеда по координатам сторон: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions**→в окне **Create Block by Dimensions** ввести значения координат границ параллелепипеда (таблица 4.1). Нажать **OK**.

Таблица 4.1 – Таблица с координатами крайних точек параллелепипеда в ANSYS

X1,X2 X-coordinates	0	2
Y1,Y2 Y-coordinates	0	1
Z1,Z2 Z-coordinates	0	2

6. Наносим конечно-элементную сетку. В данной задаче рассмотрим вариант разбиения модели при помощи утилиты **MeshTool**.

Сначала необходимо задать размер элемента по умолчанию при разбиении: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**SmartSize**→**Adv Opts**→в окне **Advanced SmartSize Settings** в строке **Global element size** ввести значение **0.25**→нажать **OK**.

Затем вызвать утилиту **MeshTool**: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**MeshTool**. В открывшемся окне **MeshTool** в разделе **Mesh** выбрать **Volumes**, задать тип разбиения **Shape: Hex** и **Mapped**→нажать **MESH**. В появившемся меню выбора **Mesh Volumes**, нажать **Pick All** (выбрать все).

7. Переходим к этапу приложения нагрузок.

Чтобы задать постоянную температуру на одной из сторон модели требуется выполнить следующую последовательность: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**On Areas**→выбрать в графическом окне вертикальную поверхность с координатами $X=0$ →нажать **OK**→в окне **Apply TEMP on Areas** в строку **Load TEMP value** ввести значение **100+273**, а в строке **DOFs to be constrained** выбрать **TEMP**→нажать **OK**.

Значения коэффициента теплоотдачи для учета теплообмена с окружающей средой на оставшихся сторонах модели необходимо взять из таблицы **cnvtab**: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Convection**→**On Areas**→выделить мышью пять оставшихся границ модели, которые обмениваются теплом с окружающей средой→нажать **OK**→в окне **Apply CONV on areas** в строке **Apply Film Coef on areas** выбрать **Existing table**→в строку **VAL2I Bulk temperature** ввести значение постоянной температуры окружающей среды **20+273** и удалить все в поле **VALI Film coefficient**→нажать **OK**. Далее появится окно **Apply CONV on areas**, где требуется выбрать таблицу **CNVTAB** для «**Existing table**». После этого нажать **OK**.

Задать начальную температуру материала: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**Uniform Temp**→в появившемся окне в строке **Uniform temperature** ввести значение **50+273**→нажать **OK**.

8. При подготовке задачи к решению удобно, чтобы приложенные нагрузки и заданные граничные условия отображались графически на экране.

Для этого можно выполнить следующие действия:

– отобразить на рабочем поле ограничивающие модель поверхности: **Utility Menu**→**Plot**→**Areas**;

– отобразить конвективный теплообмен в виде стрелок: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Symbols**→в окне **Symbols** в строке **Surface Load Symbols** выбрать **Convect FilmCoef**, а в строке **Show pres and convect as** выбрать **Arrows** (т. е. отобразить в виде стрелок)→нажать **OK**;

– отобразить имя таблицы, из которой взяты значения коэффициента теплоотдачи над стрелочками в графическом окне: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**→в окне **Plot Numbering Controls** в строке **Table Names** поставить галочку **on**→нажать **OK**.

9. В данной задаче необходимо получить решение о распределении температур в динамике (нестационарный анализ). Зададим тип анализа – переходной (Transient): **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis**→выбрать **Transient**→нажать **OK**→выбрать **Full**→нажать **OK**.

10. Задаем временные параметры решения для нестационарной задачи: **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Time/Frequency**→**Time-Time Step**. В открывшемся окне **Time and Time Step Options** выполнить следующие действия:

– в строке **Time at end of load step** ввести **60** (время наблюдения процесса в секундах);

– в строке **Time step size** ввести **1** (величина рекомендуемого шага решения задачи);

– в строке **Stepped or ramped b.c.** выбрать вариант **Stepped** (граничные условия постоянны во времени);

– нажать **ОК**.

11. Чтобы в дальнейшем можно было графически или в виде таблиц вывести результаты решения для любого момента времени, программа должна сохранять результаты после завершения каждого шага решения. Для этого необходимо выполнить: **Main Menu**→**Solution**→**Load step opts**→**Output Ctrl**s→**DB/Results File**. В поле **File write frequency** выбрать **Every substep** и нажать **ОК**.

12. Активируем все элементы модели перед запуском на решение: **Utility Menu**→**Select**→**Everything**.

13. Сохраняем промежуточный файл базы данных: **Utility Menu**→**File**→**Save as**→выбрать папку, в которую сохраняется база, и указать имя файла латинскими буквами→нажать **ОК**.

14. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **ОК**. Ждать завершения расчета до появления надписи «**Solution is done!**».

15. Отобразим результаты расчетов на экране.

Поскольку при решении программа сохраняла результаты каждого шага, то для отображения распределения температур необходимо предварительно загрузить результаты нужного шага. По умолчанию после окончания расчетов загружены результаты для последнего шага решения.

Main Menu→**General Postproc**→**Read Results**→**By Time/Freq**→в окне **Read Results by Time of Frequency** в строке **Value of time of freq** ввести значение **50** (т. е. загрузить результаты решения для пятидесятой секунды)→нажать **ОК**.

16. Отобразим результаты решения в виде пространственного распределения полей температур: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal solu.** В окне **Contour Nodal Solution Data** выбрать **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Nodal Temperature**→нажать **ОК**.

На экране должно появиться распределение температур с цветовой легендой.

17. Отображаем числовые значения температур и нагрузок на модели в графическом окне. Для этого требуется выполнить следующие действия: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**→в окне **Plot Numbering Controls** в строке **Table Names** отметить **Off**, а в строке **Numeric contour values** отметить **On**→нажать **ОК**.

18. Покажем конвективный теплообмен на модели в виде стрелок с указанием числовых значений коэффициента теплоотдачи для данного шага решения: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Symbols**→в окне **Symbols** в строке **Surface Load Symbols** выбрать **Convect FilmCoef**, а в строке **Show**

pres and convect as выбрать **Arrows** (т. е. отобразить в виде стрелок)→нажать **ОК**.

В более ранних версиях **ANSYS** распределение температур и коэффициента теплоотдачи отображается одновременно на модели. В **ANSYS 2016 R1 Academic** для отображения распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности модели необходимо отобразить элементы **Utility Menu→Plot→Elements**, а затем повторить действия, описанные в данном пункте выше.

19. Чтобы отобразить распределение температурных полей внутри модели, необходимо установить локальную систему координат в заданную точку и ориентировать ось **Z** по направлению, в котором необходимо скрыть часть модели.

Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc +→щелкнуть левой кнопкой мыши в любом месте→нажать **ОК**. В окне **Create Local CS at Specified Location** в строке **Ref number of new coord sys** ввести номер локальной системы координат **22**→в строке **Origin of coord system** ввести координаты **X, Y, Z** начала локальной системы координат относительно глобальной системы **0,0,1**→нажать **ОК**.

Далее требуется выполнить привязку рабочей плоскости к локальной системе координат: **Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Active Coord Sys**.

Затем остается скрыть часть модели в направлении оси **Z** от начала локальной системы координат: **Utility Menu→PlotCtrls→Style→Hidden Line Options**→в окне **Hidden-Line Options** в строке **Type of Plot** выбрать **Capped Hidden**→в строке **Cutting plane is** выбрать **Working plane**→нажать **ОК**.

Задача 5 «Стационарная тепловая задача расчета температурного поля на пересечении труб»

5.1 Постановка задачи и принятые допущения

Данный пример позволяет ознакомиться с методами построения сложной геометрической модели, нанесения на нее конечно-элементной сетки, а также решения стационарных задач переноса тепла с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры (рисунок 7).

Через цилиндрический резервуар в радиальном направлении проходит малая труба, равноудаленная от концов резервуара. Изнутри резервуар

омывается жидкостью при температуре 232 °С. Через малую трубу протекает стационарный поток жидкости при температуре 38 °С. Оба потока изолированы друг от друга (тонкой трубой).

Коэффициент теплоотдачи внутри резервуара постоянный и равен 1420 Вт/(м²·К). Коэффициент теплоотдачи в малой трубе зависит от температуры металла, и эта зависимость, а также зависимость тепловых свойств материала трубы и резервуара приведены ниже в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Свойства материалов

Температура	294	366	422	478	533	К
Плотность	7 889	7 889	7 889	7 889	7 889	кг/м ³
Теплопроводность	14,45	15,4	16,18	16,96	17,71	Дж/(с·м·°С)
Удельная теплоемкость	0,473	0,490	0,498	0,511	0,523	Дж/(кг·°С)
Коэффициент теплоотдачи	2 419	2 300	1 999	1 562	1 255	Вт/(м ² ·К)

В связи с тем, что при решении задачи используются теплофизические свойства материалов, зависящие от температуры, потребуются подшаги и выбор шага по времени.

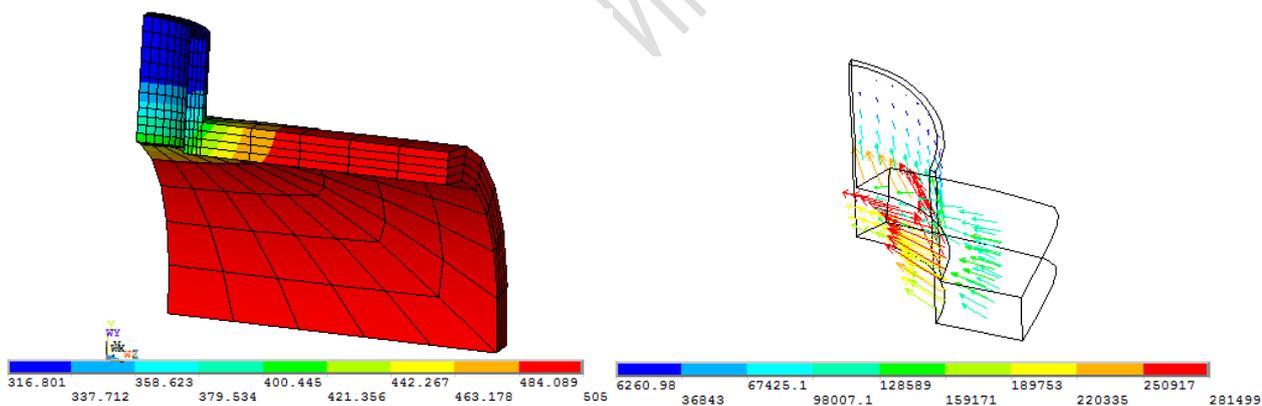


Рисунок 7 – Поле температур и векторное поле плотностей тепловых потоков на пересечении двух труб

5.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса программы

1. Загружаем средство запуска продукта: **пуск**→**все программы**→**ANSYS 2019 R1**→**Mechanical APDL Product Launcher 2019 R1**. В открывшемся окне во вкладке **File Management** задать рабочую папку и текущее имя файлов. В строке **Working Directory** указать путь к папке,

в которой будут сохраняться все данные и базы при выполнении расчетов. В строке **Job name** ввести имя файлов по умолчанию (например **Pipe**) для файлов, создаваемых программой при расчетах, и запустить программу кнопкой **Run**.

2. Задаем заголовок задачи: **Utility Menu**→**File**→**Change Title**. Ввести имя заголовка, который будет отображаться на главном экране (например **Steady-state thermal analysis of pipe junction**), и нажать **OK**.

3. Определяем тип элемента для нанесения конечно-элементной сетки: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**→**Add**. В открывшемся окне выбрать в списке **Thermal Mass**→**Solid**→**Brick 20 node 90**→нажать **OK**→закреть окно **Close**.

4. Задаем свойства материалов трубы и резервуара.

Плотность материала задаем не зависящую от температуры: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Density** (плотность)→ввести значение **7889** в поле **DENS**→нажать **OK**.

Коэффициент теплопроводности и удельную теплоемкость задать с зависимостью от температуры: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Material Models Available** выбрать **Thermal**→**Conductivity** (теплопроводность)→ **Isotropic**. В окне **Conductivity for Material Number 1** нажать **Add temperature** 4 раза. Заполнить таблицу 5.2 и нажать **OK**.

Таблица 5.2 – Таблица зависимости в **ANSYS** теплопроводности от температуры

Temperature	T1	T1	T3	T4	T5
	294	366	422	478	533
KXX	14.45	15.4	16.18	16.96	17.71

Не закрывая окна **Define Material Model Behavior** выбрать **Thermal**→ **Specific Heat** (удельная теплоемкость). В окне **Specific Heat for Material Number 1** нажать **Add temperature** 4 раза. Заполнить таблицу 5.3 и нажать **OK**.

Таблица 5.3 – Таблица зависимости в **ANSYS** удельной теплоемкости от температуры

Temperature	T1	T1	T3	T4	T5
	294	366	422	478	533
C	0.473	0.490	0.498	0.511	0.523

5. Зависимость коэффициента теплоотдачи малой трубы зададим как свойство материала 2.

Сперва необходимо создать материал 2: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**. В окне **Define Material Model Behavior** выбрать **Material**→**New Model**→ввести номер материала 2→нажать **OK**.

Далее, не закрывая окна **Define Material Model Behavior**, выбрать **Thermal**→**Convection or Film Coef**. В окне **Convection or Film Coefficient for Material Number 2** нажать **Add temperature** 4 раза. Заполнить таблицу 5.4 и нажать **OK**.

Таблица 5.4 – Таблица зависимости в **ANSYS** коэффициента теплоотдачи от температуры

Temperature	T1	T1	T3	T4	T5
	294	366	422	478	533
HF	2 419	2 300	1 999	1 562	1 255

Закрывать окно со свойствами материала.

6. При построении геометрической модели для указания размеров можно использовать определенные заранее скалярные параметры: **Utility Menu**→**Parameters**→**Scalar Parameters**. В окне **Scalar Parameters** ввести параметры в строку **Selection**. После ввода каждой величины нажимать «**Accept**»:

- **RI1=0.03302** (внутренний радиус цилиндрического резервуара);
- **RO1=0.0381** (наружный радиус цилиндрического резервуара);
- **Z1=0.0508** (длина цилиндрического резервуара);
- **RI2=0.01016** (внутренний радиус трубы);
- **RO2=0.0127** (наружный радиус трубы);
- **Z2=0.0508** (длина трубы).

В конце нажать **Close**.

7. Создаем цилиндрический резервуар.

В случае радиального пересечения труб можно выделить несколько плоскостей симметрии проходящих вдоль их осей. Пользуясь этим, в задачах переноса тепла для анализа можно использовать не полноразмерную модель, а ее часть, вырезанную плоскостями симметрии.

Чтобы создать четверть цилиндра, нужно выполнить такую последовательность действий: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Cylinder**→**By Dimensions**. В окне **Create Cylinder by Dimensions** ввести в строках следующие скалярные параметры:

- в строке **Outer radius** (внешний радиус) – **RO1**;
- в строке **Optional inner radius** (внутренний радиус) – **RI1**;

- в строке **Z-coordinates** (Z-координаты начала, определяющие положение и длину резервуара) – **0** и **Z1** соответственно;
- в строке **Starting angle (degrees)** (начальный угол сектора цилиндра) – **0**;
- в строке **Ending angle (degrees)** (конечный угол сектора цилиндра) – **90**.

Нажать **ОК**.

8. Аналогичным образом можно создать модель малой трубы, развернув предварительно ось Z рабочей плоскости, которая одновременно является осью создаваемого цилиндра, в нужном направлении.

Развернуть ось Z: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Offset WP by Increments**→в окне **Offset WP** в строке **XY, YZ, ZX Angles** задать значения **0,-90** (поворот рабочей плоскости относительно оси X на -90°)→нажать **ОК**.

Затем создать четверть цилиндра: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Cylinder**→**By Dimensions**. В окне **Create Cylinder by Dimensions** ввести в строках следующие скалярные параметры для малой трубы:

- в строке **Outer radius** (внешний радиус) – **RO2**;
- в строке **Optional inner radius** (внутренний радиус) – **RI2**;
- в строке **Z-coordinates** (Z-координаты начала определяющие положение и длину трубы) – **0** и **Z2** соответственно;
- в строке **Starting angle (degrees)** (начальный угол сектора цилиндра) – **-90**;
- в строке **Ending angle (degrees)** (конечный угол сектора цилиндра) – **0**.

Нажать **ОК**. Вернуть рабочую плоскость в исходное состояние: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Align WP with**→**Global Cartesian**.

9. В построенной модели созданы два сектора цилиндра, и в местах их пересечения существует одновременно два объема. Для объединения этих объемов и для возможности удаления лишних частей объемов воспользуемся процедурой **Overlap**, которая разделит и объединит элементы модели по местам их пересечения: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**Overlap**→**Volumes**→в открывшемся меню **Overlap Volumes** нажать кнопку **Pick All**. В итоге из двух пересекающихся объемов будет образовано пять непересекающихся.

10. Для удобства работы с моделью в дальнейшем включаем отображение номеров объемов и линий на экране: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**→в окне **Plot Numbering Controls** активировать опции **Volume numbers On** и **Line numbers On**→нажать **ОК**.

11. В ANSYS существует несколько способов масштабирования и поворота модели. Масштаб можно изменить, зажав на клавиатуре Ctrl и вращая колесико мыши. Вращать модель можно, зажав одновременно на клавиатуре Ctrl и правую кнопку мыши, перемещая мышь по экрану. Переместить модель по экрану можно аналогичным образом, но зажав левую кнопку мыши. Как альтернативный вариант, для масштабирования и поворота модели, можно использовать панель инструментов справа от рабочего окна.

В данной задаче воспользуемся иным способом. Для этого зададим координату точки, из которой будем наблюдать модель: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**View Settings**→**Viewing Direction**. В открывшейся диалоговой панели **Viewing Direction** установить в строке **Coords of view point** координаты точки зрения равными **-0.07,-0.02,0.025**. В строке **Coord axis orientation** выбрать направление оси Y вверх **Y-axis up** и нажать **OK**.

12. Удаляем лишние внутренние части объемов. Во-первых, внутри малой трубы не должно быть элемента цилиндрического резервуара. Во-вторых, поскольку рассматривается распределение температурных полей на пересечении трубы и резервуара, то можно удалить и часть трубы, находящейся в резервуаре.

Для этого выполнить следующую последовательность действий: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Delete**→**Volume and Below**. Выделить мышью объемы №3 и №4 либо, в открывшемся меню **Delete Volume and Below**, в окне ввода написать **3,4** и нажать **OK**.

13. При многократном обращении к группе элементов модели в процессе решения задачи, можно группу элементов сохранить в виде компоненты с уникальным именем и загружать их при необходимости. Создадим компоненту AREMOTE, содержащую самые удаленные от места пересечения области резервуара.

Для этого сначала требуется активировать элементы модели: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В открывшейся диалоговой панели **Select Entities** выполнить следующие действия:

- в первой строке выбрать **Areas**. Во второй выбрать **By Location**. Выбрать **Z Coordinates** и в поле **Min,Max** вписать значение **Z1**. Нажать **Apply**;

- выбрать **Y Coordinates** и **Also Select**. Установить в поле **Min,Max** значение **0** и нажать **OK**.

Далее создать компоненту **Utility Menu**→**Select**→**Comp/Assembly**→**Create Component**. В открывшемся окне **Create Component** в строке **Component name** ввести название компоненты **AREMOTE**, а в строке **Component is made of** выбрать **Areas**. Нажать **OK**.

14. При нанесении конечно-элементной сетки шестисторонними элементами необходимо, чтобы разбиваемый объем также был ограничен максимум шестью поверхностями, контур каждой из которых ограничен максимум 4 линиями. Поэтому при работе с моделями сложной геометрии необходимо проводить процедуру объединения поверхностей и линий.

Сначала объединяем поверхности: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Mapped**→**Concatenate**→**Areas**. В открывшемся окне **Concatenate Areas** нажать кнопку **Pick All** для объединения предварительно выбранных поверхностей на самых удаленных от места соединения с трубой концах резервуара.

Аналогичным образом объединяем линии:

– отобразить модель в виде каркаса **Utility Menu**→**Plot**→**Lines**;

– объединить линии **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Mapped**→**Concatenate**→**Lines**. Выделить мышью линии № 12 и № 7 либо, в открывшемся окне **Concatenate Lines**, в окне ввода набрать 12,7 и нажать **Apply**. Далее выбрать линии № 10 и № 5 или ввести их номера в окне ввода. Нажать **OK**.

15. Следующим этапом решения задачи является нанесение конечно-элементной сетки с предварительным разбиением части контура модели на заданное количество элементов.

Для этого сначала требуется активировать все элементы модели: **Utility Menu**→**Select**→**Everything**. Затем установить плотность сетки вдоль заданных линий: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**Manual Size**→**Lines**→**Picked Lines**. Выбрать мышью линии № 6 и № 20 или, в открывшемся окне **Element Size on Picked Lines**, набрать 6,20 в окне ввода. Нажать **OK**. В открывшемся окне **Element Size on Picked Lines** в поле **No. of element divisions** ввести количество элементов 4 и нажать **OK**.

Аналогичным образом произвести разбиение линии № 40 на 6 элементов.

16. Задаем размер элемента по умолчанию при разбиении и наносим конечно-элементную сетку: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Size Cntrls**→**Manual Size**→**Global**→**Size**. В открывшемся окне **Global Element Sizes** в строке **Element edge length** ввести число 0.01016 и нажать **OK**.

Далее **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesher Opts**. В открывшемся окне **Mesher Options** активировать в разделе **Mesher Type** параметр **Mapped** и нажать **OK**. В открывшемся окне **Set Element Shape** в строке **2D Shape key** в выпадающем меню выбрать **Quad** и нажать **OK**.

Произвести нанесение конечно-элементной сетки: **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**Mesh**→**Volumes**→**Mapped**→**4 to 6 sided**→в открывшемся окне **Mesh Volumes** нажать **Pick All**.

17. Отключаем нумерацию линий и объемов на экране: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**. В окне **Plot Numbering Controls** деактивировать опции **Volume numbers Off** и **Line numbers Off**. Нажать **OK**.

18. Следующим этапом является задание нагрузок на модель и граничных условий.

Определим тип задачи – стационарный Steady-State: **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**New Analysis**→выбрать **Steady-State**→Нажать **OK**.

19. Задаем значение начальной температуры модели: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**Uniform Temp**→в появившемся окне в строке **Uniform temperature** ввести значение **232+273**→нажать **OK**.

20. Теплообмен стенок резервуара с протекающей в ней жидкостью задаем в виде конвективных граничных условий для узлов на внутренней поверхности резервуара.

Сначала нужно изменить систему координат на цилиндрическую: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Change Active CS to**→**Global Cylindrical**. Затем выбрать узлы, принадлежащие внутренней поверхности резервуара: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В открывшемся окне **Select Entities** в первой строке выбрать **Nodes**, во второй **By Location**, ниже выбрать **X Coordinates** и **From Full**. Ввести в поле **Min,Max** скалярный параметр радиуса внутренней поверхности резервуара **R11** и нажать **OK**. Далее задать коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности резервуара: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Convection**→**On Nodes**. В открывшемся окне **Apply CONV on Nodes** нажать **Pick All**. В окне **Apply CONV on Nodes** в строке **Film coefficient** ввести значение коэффициента теплоотдачи **1420**, а в строке **Bulk Temperature** определить температуру содержимого резервуара равной **232+273**. Нажать **OK**.

21. Задаем постоянную температуру на компоненте **AREMOTE**: **Utility Menu**→**Select**→**Comp/Assembly**→**Select Comp/Assembly**→в окне **Select Component or Assembly** убедиться, что выбрано **by component name**, и нажать **OK**, в следующем окне выбрать компоненту **AREMOTE** и нажать **OK**.

Активировать узлы, принадлежащие компоненте: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В окне **Select Entities** выбрать **Nodes** в первой строке и **Attached To** во второй. Ниже выбрать **Areas, all** и убедиться, что активно **From Full**. Нажать **OK**.

Задать температуру в узлах: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Temperature**→**On Nodes**. В открывшемся окне **Apply TEMP on Nodes** нажать **Pick All**, а в следующем окне в строку **Load**

TEMP value ввести **232+273**, установить **TEMP** в поле **DOFs to be constrained**. Нажать **OK**.

22. Теплообмен стенок малой трубы с протекающей в ней жидкостью учитываем в виде конвективных граничных условий для узлов на внутренней поверхности трубы.

Сперва требуется повернуть рабочую плоскость на 90 градусов вокруг оси X: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Offset WP by Increments**→в окне **Offset WP** в строке **XY, YZ, ZX Angles** задать значения **0,-90** (поворот рабочей плоскости относительно оси X на -90°)→нажать **OK**.

Затем создать локальную систему координат по расположению текущей рабочей плоскости: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Local Coordinate Systems**→**Create Local CS**→**At WP Origin**. В окне **Create Local CS at WP Origin** в строке **Ref number of new coord sys** ввести номер локальной системы координат **11**, в строке **Type of coordinate system** выбрать **Cylindrical 1** и нажать кнопку **OK**.

Активировать узлы, принадлежащие внутренней поверхности малой трубы: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В окне **Select Entities** выбрать **Nodes** в первой строке и **By Location** во второй. Ниже выбрать **X Coordinates** и в поле **Min,Max** ввести значения радиуса внутренней поверхности малой трубы как скалярный параметр **RI2**. Нажать **OK**.

Задаем коэффициент теплоотдачи: **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Thermal**→**Convection**→**On Nodes**. В открывшемся окне **Apply CONV on Nodes** нажать **Pick All**. В окне **Apply CONV on nodes** в строке **Film coefficient** ввести значение коэффициента теплоотдачи **-2** (значения будут взяты из таблицы свойств материала 2), а в строке **Bulk Temperature** определить температуру содержимого резервуара равной **38+273**. Нажать **OK**.

23. Активируем все элементы модели: **Utility Menu**→**Select**→**Everything**.

24. Отообразим конвективный теплообмен в виде стрелок: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Symbols**→в окне **Symbols** в строке **Surface Load Symbols** выбрать **Convect FilmCoef**, а в строке **Show pres and convect as** выбрать **Arrows** (т. е. отобразить в виде стрелок)→нажать **OK**.

25. Восстановим рабочую плоскость и систему координат в исходный вид.

Сначала **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Change Active CS to**→**Global Cartesian**; затем **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Align WP with**→**Global Cartesian**.

26. Тип выбранного анализа в данной задаче – стационарный, однако свойства материала зависят от температуры. Поэтому для учета этой зависимости при решении необходимо задать количество подшагов решения

задачи с автоматическим выбором шага по времени нагружения: **Main Menu**→**Solution**→**Load Step Opts**→**Time/Frequency**→**Time and Substeps**. В открывшемся окне **Time and Substep Options** задать в строке **Number of substeps** число подшагов равным **50**. Включить **Automatic time stepping**, отметив позицию **ON**. Нажать **OK**.

27. Сохраняем промежуточный файл базы данных: **Utility Menu**→**File**→**Save as**→выбрать папку, в которую сохраняется база, и указать имя файла латинскими буквами→нажать **OK**.

28. Запускаем задачу на решение: **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**CurrentLS**→нажать **OK**. Ждать завершения расчета до появления надписи «**Solution is done!**».

29. Отобразим результаты решения в виде пространственного распределения полей температур.

Для удобства отображения можно включить конечно-элементную сетку на модели: **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Style**→**Edge Options**. В окне **Edge Options** установить в строке **Element outlines for non-contour/contour plots** параметр **Edge only/ALL** и нажать **OK**.

Далее отобразить поле температур на модели: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solu**. В окне **Contour Nodal Solution Data** выбрать **Nodal Solution**→**DOF Solution**→**Nodal Temperature**→нажать **OK**.

30. Построим векторное поле плотностей теплового потока в месте пересечения трубы с резервуаром.

Сперва требуется активировать созданную ранее цилиндрическую локальную систему координат под номером 11: **Utility Menu**→**WorkPlane**→**Change Active CS to**→**Specified Coord Sys**. В окне **Change Active CS to Specified CS** в строке **Coordinate system number** ввести **11**. Нажать **OK**.

Далее необходимо выделить элементы в области пересечения трубы и резервуара: **Utility Menu**→**Select**→**Entities**. В окне **Select Entities** выбрать **Nodes** в первой строке и **By Location** во второй. Ниже выбрать **X Coordinates** и в поле **Min,Max** ввести значения радиуса внешней поверхности малой трубы как скалярный параметр **RO2**. Нажать **Apply**. Выбрать в первой строке **Elements** и **Attached to** во второй. Ниже выбрать **Nodes** и нажать **Apply**. Выбрать в первой строке **Nodes** и **Attached to** во второй. Выбрать **Elements** и нажать **OK**.

Затем следует считать результаты последнего шага решения: **Main Menu**→**General Postproc**→**Read Results**→**Last Set**. В более ранних версиях ANSYS результаты решения могут быть доступны для отображения сразу после окончания вычислений.

После этого отобразить векторное поле плотностей теплового потока в месте пересечения трубы с резервуаром: **Main Menu**→**General Postproc**→**Plot Results**→**Vector Plot**→**Predefined**. В окне **Vector Plot of Predefined Vectors**, в разделе **Vector item to be plotted**, выбрать **Flux & gradient** в левом списке панели и **Thermal flux TF** в правом списке. Нажать **OK**.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Литература

1. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак-тов, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 1: Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели // Электронная библиотека БГУ. – Минск, 2013. – 130 с. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43440>. – Дата доступа : 22.03.2019.

2. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак-тов, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 2: Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твердотельной модели. Примеры создания твердотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач // Электронная библиотека БГУ . – Минск, 2013. – 145 с. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43443>. – Дата доступа : 22.03.2019.

3. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак-тов, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 3: Определение физических констант материалов и конечноэлементное разбиение твердотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями // Электронная библиотека БГУ. – Минск, 2013. – 193 с. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43444>. – Дата доступа : 22.03.2019.

4. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак-тов, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 4: Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и GeneralPostproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов // Электронная библиотека БГУ. – Минск, 2013. – 118 с. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43445>. – Дата доступа : 22.03.2019.

5. Кравчук, А. С. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс]: курс лекций для студ. мех.-мат. фак-тов, обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 5: Примеры решения связанных задач механики твердого тела // Электронная библиотека БГУ. –

Минск, 2013. – 105 с. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/43446>. – Дата доступа : 22.03.2019.

6. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Либроком, 2015. – 270 с.

7. Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов. – М. : ДМК-Пресс, 2016. – 248 с.

8. Басов, К. А. ANSYS. Справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК-Пресс, 2018. – 640 с.

9. Шабров, Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.

10. Коваленко, Л. Д. Основы термоупругости / Л. Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 307 с.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОДНЬСЬКАГО

Производственно-практическое издание

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Практическое пособие

Составители:

**Никитюк Юрий Валерьевич,
Середа Андрей Александрович,
Шалупаев Сергей Викентьевич**

Редактор В. И. Шкредова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 10.10.2019. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,8.
Тираж 20 экз. Заказ 644.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246019, Гомель

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ