

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕПЛОБМЕНА

ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide

Перевод:

Югов В. П.

Москва
2001 г.

CADFEM

Содержание

Введение	7
Анализ тепловых явлений	7
Как ANSYS трактует тепловое моделирование	7
Конвекция	8
Теплообмен излучением	8
Специальные эффекты	8
Типы теплового анализа	9
Решение совместных задач	9
О маршрутах GUI и синтаксисе команд	9
Стационарный теплообмен	11
Определение стационарного теплообмена	11
Конечные элементы для решения задач теплообмена	12
Команды, применяемые для решения задач теплообмена	14
Последовательность теплового расчета	14
Создание модели	15
Создание геометрии модели	16
Постановка граничных условий и решение задачи	17
Определение типа решения	17
Постановка граничных условий	17
Постоянная температура (TEMP)	17
Тепловой поток (HEAT)	18
Конвекция (CONV)	18
Плотность теплового потока (HFLUX)	18
Интенсивность объемного тепловыделения (HGEN)	19
Граничные условия, заданные таблично или в виде функций	21
Выбор опций при постановке граничных условий	23
Обычные опции	24

	3
Нелинейные опции	24
Графическое отображение сходимости	26
Управление выводом «на печать»	27
Выбор опций для решения задачи	27
Сохранение модели	29
Решение задачи	29
Просмотр результатов расчета	29
Чтение результатов	30
Просмотр результатов	31
Пример решения стационарной тепловой задачи (командный или пакетный режим работы)	33
Постановка задачи	33
Принятые допущения	34
Команды для построения модели и решения задачи	35
Пример решения стационарной тепловой задачи (метод GUI)	38
Шаг 1. Присвоение имени задаче	38
Шаг 2. Задание системы единиц измерения	38
Шаг 3. Определение типа элемента	38
Шаг 4. Определение свойств материала	39
Шаг 5. Задание параметров для моделирования	41
Шаг 6. Создание геометрической модели	41
Шаг 7. Пересечение цилиндров	42
Шаг 8. Просмотр модели	42
Шаг 9. Удаление лишних объемов	42
Шаг 10. Создание компоненты AREMOTE	42
Шаг 11. Отрисовка линий на площадях	43
Шаг 12. Конкатенация (объединение) областей и линий	43
Шаг 13. Установка плотности сетки вдоль линий	44
Шаг 14. Построение конечно-элементной модели	44
Шаг 15. Отключение нумерации и отображения элементов	45
Шаг 16. Определение типа решения и опций	45
Шаг 17. Задание начальной температуры	45
Шаг 18. Задание конвективных граничных условий	45

Шаг 19. Задание постоянной температуры на компоненте AREMOTE	46
Шаг 20. Задание конвективных граничных условий, зависящих от температуры	46
Шаг 21. Восстановление рабочей плоскости и системы координат	47
Шаг 22. Задание шага нагружения и опций	47
Шаг 23. Решение задачи	48
Шаг 24. Просмотр поля температур	48
Шаг 25. Построение векторного поля плотностей теплового потока	48
Шаг 26. Выход из ANSYSa	49
Решение тепловых задач с помощью табулированных граничных условий	49
Решение задачи командным методом	49
Решение задачи методом GUI	51
Шаг 1. Определение одномерной таблицы	51
Шаг 2. Определение типа элементов и свойств материала	51
Шаг 3. Создание геометрической и конечно-элементной модели	52
Шаг 4. Постановка табулированных граничных условий	53
Шаг 5. Проверка приложенных граничных условий	54
Шаг 6. Выбор опций для решения и решение задачи	54
Шаг 7. Постпроцессорная обработка	55
Шаг 8. Окончание расчета	55
Где найти другие примеры решения тепловых задач	55
Нестационарный теплообмен	58
Определение нестационарного теплообмена	58
Элементы и команды, применяемые для решения нестационарных задач	59
Последовательность решения нестационарных задач	59
Создание модели	60
Постановка граничных условий и получение решения	60
Определение типа решения	60

Постановка начальных условий	61
Задание одинаковой начальной температуры	61
Задание неодинаковых начальных температур	62
Задание опций для шага «нагружения»	63
Способы задания шагов «нагружения»	63
Обычные опции	67
Нелинейные опции	69
Управление выводом «на печать»	74
Сохранение модели	75
Решение задачи	75
Просмотр результатов расчета	77
Как увидеть результаты расчета	77
Просмотр результатов с помощью постпроцессора POST1	78
Просмотр результатов с помощью постпроцессора POST26	78
Просмотр результатов в виде графиков или таблиц	79
Построение изолиний	79
Построение векторных полей	80
Представление результатов в виде таблиц	80
Изменение агрегатного состояния (фазовый переход)	80
Пример нестационарной тепловой задачи	82
Решение задачи методом GUI	84
Решение задачи командным методом	84
Где найти другие примеры нестационарных тепловых задач	86
Теплообмен излучением	88
Что такое теплообмен излучением?	88
Решение задач лучистого (радиационного) теплообмена	88
Определения	89
Использование линейного радиационного элемента LINK31	91
Использование элементов с поверхностным эффектом	91

Использование метода радиационной матрицы (вспомогательный процессор AUX12)	91
Процедура	92
Определение радиационных поверхностей	92
Генерация радиационной матрицы	95
Использование радиационной матрицы для решения задач	98
Рекомендации по использованию «пространственных узлов»	99
Рекомендации для метода «без экранирования»	99
Рекомендации для метода «с экранированием»	99
Общие рекомендации по применению AUX12 метода радиационной матрицы	100
Использование радиационного решателя	102
Процедура	102
Определение радиационных поверхностей	102
Задание опций для метода расчета	103
Задание опций для форм-фактора	105
Расчет или запрос форм-факторов	106
Задание граничных условий	107
Дальнейшие рекомендации для решения стационарных задач	107
Пример решения двумерной задачи лучистого теплообмена с помощью радиационного решателя (командный метод)	109
Команды для построения модели и решения задачи	109

Введение

Анализ тепловых явлений

При решении тепловых задач вычисляются распределения температур (температурные поля) и соответствующие (рассматриваемой задаче) тепловые величины в рассчитываемой системе или ее части. Типичными тепловыми величинами, представляющими интерес при тепловом расчете, являются:

- Температурные поля.
- Количество подведенного или отведенного тепла.
- Градиенты температур.
- Плотности тепловых потоков.

Тепловое моделирование играет важную роль в многочисленных инженерных приложениях, включая двигатели внутреннего сгорания, турбины, теплообменники, насосы и компоненты электронных схем. Во многих случаях тепловой расчет предшествует расчету на прочность, что позволяет определить термические напряжения, т.е. напряжения, обусловленные тепловым расширением или сжатием.

Как ANSYS трактует тепловое моделирование

Только ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Professional и ANSYS /FLOTRAN позволяют решать задачи теплообмена. Основой теплового анализа в ANSYSе является уравнение теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии. (Подробности находятся в ANSYS Theory Reference).

Конечно-элементное решение, получаемое с помощью ANSYSa, определяет температуры в узлах, которые затем используются для получения других тепловых величин.

Программа ANSYS позволяет рассчитывать все три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

Конвекция

Конвекция рассматривается как граничное условие (3-го рода) на примыкающих к границе (модели) твердотельных или оболочечных элементах. Должны быть указаны коэффициент теплоотдачи и температура жидкости, омывающей (граничную) поверхность. ANSYS рассчитывает конвективный тепловой поток через эту поверхность. Если коэффициент теплоотдачи зависит от температуры, эта зависимость должна быть задана таблично.

При использовании конечно-элементных моделей, состоящих из теплопроводных стержней (которые не допускают постановку граничных условий 3-го рода), или в случаях, когда температура жидкости, омывающей границу модели, не известна заранее, в распоряжении ANSYSa имеется элемент конвективной связи LINK34. Кроме того, можно воспользоваться FLOTTRAN CFD элементами для детального моделирования конвекции и получения таких величин, как скорости жидкости, омывающей границу модели, локальные коэффициенты теплоотдачи и тепловые потоки, а также распределения температуры, как в жидкости, так и в твердом теле.

Теплообмен излучением

ANSYS может решать задачи лучистого (радиационного) теплообмена, которые являются нелинейными, следующими 4-мя способами:

- С помощью радиационного элемента LINK31.
- С помощью элементов поверхностного эффекта с радиационной опцией (SURF151 для двумерных моделей или SURF152 для трехмерных моделей).
- С помощью элементов поверхностного эффекта с радиацией посредством генерации в AUX12 радиационной матрицы и использования ее как суперэлемент.
- С помощью радиационных граничных условий в программном модуле FLOTTRAN CFD при решении задач газовой динамики.

Подробная информация об этих методах находится в разделе **Теплообмен излучением**.

Специальные эффекты

Кроме указанных выше трех видов теплообмена могут быть рассчитаны специальные эффекты, такие, как изменение агрегатного состояния (плавление

или затвердевание) или внутреннее тепловыделение (джоулево нагревание, например). Для моделирования зависимой от температуры интенсивности объемного тепловыделения можно использовать элемент [MASS71](#).

Типы теплового анализа

ANSYS поддерживает два типа теплового анализа:

1. При решении стационарных тепловых задач определяются распределение температур (температурное поле) и другие тепловые величины при стационарных граничных условиях. Стационарные граничные условия означают ситуацию, когда их изменением можно пренебречь.

2. При решении нестационарных тепловых задач определяются температурное поле и другие тепловые величины при граничных условиях, которые изменяются в течение рассматриваемого периода времени.

Решение совместных задач

Некоторые типы совместных задач, таких, как тепло-прочностные или магнито-тепловые, например, позволяют рассчитывать тепловые эффекты вместе с другими явлениями. При решении совместных задач можно решать задачи одновременно, используя элементы, имеющие все необходимые степени свободы, или решать задачи последовательно, применяя результаты решения первой задачи в виде вектора нагрузки. Подробная информация о решении совместных задач находится в руководстве [ANSYS Coupled-Field Analysis Guide](#).

О маршрутах GUI и синтаксисе команд

В данном документе Вам будут встречаться ссылки на команды ANSYSa и эквивалентные им маршруты (пути) GUI. В этих ссылках будет использоваться только имя команды, потому что не всегда следует указывать все аргументы команд, а комбинации аргументов команд соответствуют различным функциям. Для полного описания синтаксиса команд ANSYSa следует обратиться к [ANSYS Commands Reference](#).

Пути GUI указаны полностью. Во многих случаях выбор указанного маршрута GUI приводит к желаемому результату. В других случаях выбор пути GUI, представленном в данном документе, приведет Вас к меню или диалоговой панели, в которых находятся дополнительные опции, соответствующие решаемой задаче.

Для всех типов задач, рассматриваемых в этом руководстве, например, выбор материала (из которого состоит модель) происходит с помощью интуитивного интерфейса материала модели. Этот интерфейс использует иерархическую структуру категорий материалов, которая помогает Вам в выборе соответствующего материала для модели. Детальное описание интерфейса материала модели можно найти в Material Model Interface, которое находится в ANSYS Basic Analysis Guide.

Стационарный теплообмен

Определение стационарного теплообмена

ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/FLOTRAN, ANSYS/Professional позволяют решать задачи стационарного теплообмена. Анализ стационарного теплового состояния позволяет решать задачу при стационарных граничных условиях в системе или ее компонентах. Инженер/исследователь часто решает стационарную задачу прежде, чем перейти к решению задачи нестационарной (например, для определения начальных условий). Результаты решения стационарной задачи должны совпадать с решением нестационарной задачи после прекращения нестационарных эффектов.

При решении стационарных тепловых задач могут быть определены температуры, градиенты температур, тепловые потоки и плотности тепловых потоков в объектах, к которым приложены тепловые граничные условия, не изменяющиеся с течением времени. К таким условиям относятся:

- Конвекция.
- Лучистый теплообмен.
- Тепловой поток.
- Плотность теплового потока (тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности теплообмена).
- Интенсивность объемного тепловыделения (тепловой поток, выделяющийся в единице объема).
- Постоянная температура на границах.

Стационарные задачи могут быть линейными (при постоянных теплофизических свойствах материала) или нелинейными, если свойства материала модели зависят от температуры. Теплофизические свойства большинства материалов зависят от температуры, поэтому обычно задача нелинейна. Лучистый теплообмен на поверхности модели также делает задачу нелинейной.

Конечные элементы для решения задач теплообмена

Программы ANSYS и ANSYS/Professional включают около 40 элементов (описанных ниже), которые помогут Вам при решении стационарных задач.

Для детальной информации об элементах следует обратиться в [ANSYS Elements Reference](#).

В списке элементов этого руководства описания элементов располагаются в порядке возрастания их номера, начиная с [LINK1](#). В нижеследующих таблицах имена элементов указаны в крайнем левом столбце. Все элементы можно применять как для стационарных, так и нестационарных задач. Элемент [SOLID70](#) также можно использовать для расчета теплового потока, переносимого массой, движущейся в постоянном поле скоростей.

Таблица 1. Двумерные твердотельные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
PLANE35	2-D	Треугольный, 6 узлов	Температура (в каждом узле)
PLANE55	2-D	Четырехугольный, 4 узла	Температура (в каждом узле)
PLANE75	2-D	Гармонический, 4 узла	Температура (в каждом узле)
PLANE77	2-D	Четырехугольный, 8 узлов	Температура (в каждом узле)
PLANE78	2-D	Гармонический, 8 узлов	Температура (в каждом узле)

Таблица 2. Трехмерные твердотельные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
SOLID70	3-D	Кирпич, 8 узлов	Температура (в каждом узле)
SOLID87	3-D	Тетраэдр, 10 узлов	Температура (в каждом узле)
SOLID90	3-D	Кирпич, 20 узлов	Температура (в каждом узле)

Таблица 3. Радиационные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
LINK31	2,3-D	Линия, 2 узла	Температура (в каждом узле)

Таблица 4. Теплопроводные стержни

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
LINK32	2-D	Линия, 2 узла	Температура (в каждом узле)

<u>LINK33</u>	3-D	Линия, 2 узла	Температура (в каждом узле)
---------------	-----	---------------	-----------------------------

Таблица 5. Конвективные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
<u>LINK34</u>	3-D	Линия, 2 узла	Температура (в каждом узле)

Таблица 6. Оболочечные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
<u>SHELL57</u>	3-D	Четырехугольный, 4 узла	Температура (в каждом узле)

Таблица 7. Элементы для совместных задач

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
<u>PLANE13</u>	2-D	Тепло-прочностной, 4 узла	Температура, перемещение, электрический потенциал, магнитный векторный потенциал
<u>CONTAC48</u>	2-D	Тепло-прочностной, 3 узла	Температура, перемещение
<u>CONTAC49</u>	3-D	Тепло-прочностной, 5 узлов	Температура, перемещение
<u>FLUID116</u>	3-D	Тепло-гидродинамический, 2 или 4 узла	Температура, давление
<u>SOLID5</u>	3-D	Тепло-прочностной и тепло-электрический, 8 узлов	Температура, перемещение, электрический потенциал, магнитный скалярный потенциал
<u>SOLID98</u>	3-D	Тепло-прочностной и тепло-электрический, 10 узлов	Температура, перемещение, электрический потенциал, магнитный векторный потенциал
<u>PLANE67</u>	2-D	Тепло-электрический, 4 узла	Температура, электрический потенциал
<u>LINK68</u>	3-D	Тепло-электрический, 2 узла	Температура, электрический потенциал
<u>SOLID69</u>	3-D	Тепло-электрический, 8 узлов	Температура, электрический потенциал
<u>SHELL157</u>	3-D	Тепло-электрический, 4 узла	Температура, электрический потенциал

Таблица 8. Специальные элементы

ЭЛЕМЕНТ	РАЗМ.	ФОРМА ИЛИ ХАРАКТЕРИСТИКА	СТЕПЕНИ СВОБОДЫ
<u>MASS71</u>	1,2,3-D	Масса, 1 узел	Температура
<u>COMBIN37</u>	1-D	Управляемый элемент, 4 узла	Температура, перемещение, вращение, давление

<u>SURF151</u>	2-D	Элемент с поверхностными эффектами, от 2 до 4 узлов	Температура
<u>SURF152</u>	3-D	Элемент с поверхностными эффектами, от 4 до 9 узлов	Температура
<u>MATRIX50</u>	1	Суперэлемент или матрица радиации. Без фиксированной геометрии	1
<u>INFIN9</u>	2-D	Граница на бесконечности, 2 узла	Температура, магнитный векторный потенциал
<u>INFIN47</u>	3-D	Граница на бесконечности, 4 узла	Температура, магнитный векторный потенциал
<u>COMBIN14</u>	1,2,3-D	Комбинированный элемент, 2 узла	Температура, перемещение, вращение, давление
<u>COMBIN39</u>	1-D	Комбинированный элемент, 4 узла	Температура, перемещение, вращение, давление
<u>COMBIN40</u>	1-D	Комбинированный элемент, 2 узла	Температура, перемещение, вращение, давление

1 – определяется типом элементов, включенных в суперэлемент.

Команды, применяемые для решения задач теплообмена

Примеры решения стационарных задач теплообмена командным методом (в пакетном режиме) или методом GUI показывают, каким образом следует применять оба метода.

Подробное описание команд ANSYSa, расположенных в алфавитном порядке, можно найти в ANSYS Commands Reference.

Последовательность теплового расчета

При проведении теплового расчета необходимо решить следующие три главные задачи:

- Построить модель.
- Приложить граничные условия и получить решение.
- Проанализировать полученные результаты.

В следующих разделах рассказывается о том, что Вы должны сделать для решения этих задач. Во-первых, представлено общее описание шагов, которые необходимо выполнить для решения каждой задачи. Рассматривается пример решения реальной задачи стационарного теплообмена для места со-

единения трубы с резервуаром. Пример проводит Вас по всем этапам расчета методом GUI, а затем этот же расчет выполняется с помощью системы команд ANSYSa.

Создание модели

Для построения модели Вы должны указать имя работы (jobname) и название Вашей задачи. Затем Вы используете препроцессор ANSYSa (PREP7) для задания типов элементов, реальных констант элементов, свойств материалов и геометрии модели. (Эти шаги являются общими для большинства задач). Их подробное описание представлено в ANSYS Modeling and Meshing Guide. При проведении теплового расчета Вы не должны забывать об этом.

- Для указания типа элемента можно использовать:

Команду

ET

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete.

- Для определения постоянных свойств материала (модели) используется:

Команда

MP

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal.

- Если свойства материалов зависят от температуры, прежде всего необходимо задать таблицу температур. Затем задаются свойства материалов, соответствующие указанным в таблице температурам. Таблица температур определяется:

Командами

MPTEMP или MPTGEN, а для задания соответствующих свойств материалов используется команда

MPDATA,

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal.

Использование тех же самых меню GUI или команд позволяет определить коэффициент теплоотдачи (HF) в зависимости от температуры.

Предостережение

Осторожно: если Вы задаете зависящий от температуры коэффициент теплоотдачи (HF) в форме полинома, необходимо задать таблицу температур прежде, чем будут определены материалы, имеющие постоянные свойства.

Создание геометрии модели

Не существует единой процедуры построения геометрии модели. Проблемы, которые при этом должны быть решены, в большой степени зависят от ее размеров и формы. Поэтому в нескольких следующих параграфах представлен общий обзор задач, обычно возникающих при геометрическом построении модели. Детальная информация, относящаяся к геометрическому моделированию и построению (конечно-элементной) сетки, находится в [ANSYS Modeling and Meshing Guide](#).

Первым шагом при геометрическом моделировании является построение твердотельной модели того объекта, который Вы рассчитываете. Для этого можно использовать или предварительно определенные геометрические формы, такие как круги и прямоугольники (называемые в ANSYSе примитивами), или вручную определять узлы и элементы Вашей модели. Двумерные примитивы называются площадями, а трехмерные – объемами.

Размеры модели определяются в глобальной системе координат. По умолчанию глобальная система координат является прямоугольной (декартовой) системой с осями X, Y и Z, однако по Вашему желанию может быть выбрана другая система координат. При моделировании также используется рабочая плоскость – перемещаемая плоскость, применяемая для расположения и ориентации объектов моделирования. Сетка на рабочей плоскости может служить чертежной доской для модели.

Можно связывать вместе или скальпировать (обрезать) объекты моделирования, с которыми Вы работаете, с помощью булевских операций. Например, можно объединить две площади, чтобы создать единую область, которая включает все части исходных областей. Аналогично можно наложить на одну область другую, а затем вычесть вторую область из первой и создать таким образом новую область, являющуюся общей для первой и второй.

После завершения создания твердотельной модели строится сетка, т.е. модель заполняется узлами и элементами. Подробную информацию о построении сетки смотри в [ANSYS Modeling and Meshing Guide](#).

Постановка граничных условий и решение задачи

В данном разделе рассказывается о том, как определить тип решения и его опции, поставить граничные условия, указать, каким образом они прикладываются, и начать решение задачи.

Определение типа решения

На данной стадии решения Вы должны определить его тип:

- В GUI выбирается следующий путь
Main Menu > Solution > New Analysis > Steady-state (static).
- Если Вы решаете новую задачу, можно выполнить команду
ANTYPE,STATIC,NEW.
- Если Вас интересует рестарт, т.е. повторное решение предыдущей задачи (например, с дополнительными граничными условиями), выполняется команда

ANTYPE,STATIC,REST

Рестарт возможен при условии, что от предыдущего решения задачи сохранились файлы Jobname.ESAV и Jobname.DB.

Постановка граничных условий

Граничные условия могут быть приложены или к твердотельной модели (ключевые точки, линии и площади), или к конечно-элементной модели (узлы и элементы). Граничные условия могут быть определены или обычным образом, посредством приложения каждого из них к соответствующим объектам моделирования, или комплексные граничные условия могут быть представлены в виде таблицы граничных условий (смотри Applying Loads Using TABLE Type Array Parameters в ANSYS Basic Analysis Guide). Граничные условия также могут быть заданы в виде функциональных зависимостей (смотри Applying Loads Using Function Boundary Conditions).

В ANSYSе существуют 5 типов граничных условий:

- **Постоянная температура (TEMP)**

Это граничное условие обычно ставится на границах модели, чтобы определить на них постоянную известную температуру.

- **Тепловой поток (HEAT)**

Это граничное условие прикладывается к узлам. Оно используется, главным образом, в моделях, состоящих из линейных элементов (теплопроводящие стержни, конвективные звенья и т.п.), для которых (из-за отсутствия площади) нельзя поставить конвективное граничное условие или указать плотность теплового потока. Положительная величина теплового потока указывает на то, что тепло подводится к элементу. Если и TEMP, и HEAT приложены к узлу, температурное граничное условие является доминирующим.

Замечание: Если тепловой поток прикладывается к узлам твердотельных элементов, необходимо измельчить сетку вокруг узла, к которому прикладывается тепловой поток. Это особенно важно, если элементы, к узлам которых прикладывается тепловой поток, имеют сильно отличающиеся тепловые проводимости. В противном случае в результате расчета Вы можете получить физически нереальный уровень температур. Везде, где это возможно, применяйте другие типы граничных условий: интенсивность объемного тепловыделения или плотность теплового потока. Эти граничные условия более аккуратны, даже на достаточно грубой сетке.

- **Конвекция (CONV)**

Конвекция является поверхностной тепловой «нагрузкой», прикладываемой к внешним поверхностям модели для определения тепловых потерь (или притока тепла) от жидкости, окружающей модель. Эти условия применимы только к моделям, состоящим из твердотельных или оболочечных элементов. В моделях, состоящих из линейных элементов, конвективные граничные условия можно определить с помощью конвективного линейного элемента ([LINK34](#)).

- **Плотность теплового потока (HFLUX)**

Плотность теплового потока также является поверхностной тепловой «нагрузкой». Она применяется, когда количество тепла, проходящее (в единицу времени) через поверхность (тепловой поток, отнесенный к площади) известно или может быть рассчитано с помощью программного модуля FLOTRAN CFD. Положительная величина плотности теплового потока означает, что тепло поступает в элемент. Плотность теплового потока используется только для твер-

дотельных и оболочечных элементов. На поверхности элемента могут задаваться или CONV или HFLUX (но не оба граничных условия). Если на одной и той же поверхности элемента указаны оба граничных условия, ANSYS использует то, которое было задано последним.

▪ **Интенсивность объемного тепловыделения (HGEN)**

Интенсивность объемного тепловыделения рассматривается как «массовая нагрузка» и представляет собой тепло, выделяющееся (или поглощаемое) внутри элемента, например, вследствие химических реакций (экзо- или эндотермических) или протекания электрического тока. Размерность объемного тепловыделения есть количество тепла, отнесенное к единице времени и к единице объема.

В табл. 9 представлены все типы граничных условий.

Таблица 9. Граничные условия для задач теплообмена

Тип граничного условия	Категория	Группы команд	Маршруты GUI
Температура (TEMP)	Ограничение	<u>D</u>	Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature
Тепловой поток (HEAT)	Сосредоточ. нагрузка	<u>F</u>	Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Heat Flow
Конвекция (CONV), плотность теплового потока (HFLUX)	Поверхностные нагрузки	<u>SF</u>	Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Convection Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Heat Flux
Интенсивность объемного тепловыделения (HGEN)	Массовая нагрузка	<u>BF</u>	Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Heat Generat

В табл. 10 перечислены все команды, которые позволяют прикладывать, удалять и выполнять граничные условия, применяемые при решении задач теплообмена, или выдавать их список.

Таблица 10. Команды, связанные с постановкой граничных условий при решении задач теплообмена

Тип граничного условия	Твердотельная или к.-э. модель	Объект моделирования	Приложить	Удалить	Список	Выполнить	Настройки
Температура	Твердотельная	Ключевые точки	<u>DK</u>	<u>DKDELE</u>	<u>DKLIST</u>	<u>DTRAN</u>	--
"	Конечно-элементная	Узлы	<u>D</u>	<u>DDELE</u>	<u>DLIST</u>	<u>DSCALE</u>	<u>DCUM</u> <u>TUNIF</u>
Тепловой поток	Твердотельная	Ключевые точки	<u>FK</u>	<u>FKDELE</u>	<u>FKLIST</u>	<u>FTRAN</u>	--
"	Конечно-элементная	Узлы	<u>F</u>	<u>FDELE</u>	<u>FLIST</u>	<u>FSCALE</u>	<u>FCUM</u>
Конвекция, тепловой поток	Твердотельная	Линии	<u>SFL</u>	<u>SFLDELE</u>	<u>SFLLIST</u>	<u>SFTRAN</u>	<u>SFGRAD</u>
"	Твердотельная	Площади	<u>SFA</u>	<u>SFADELE</u>	<u>SFALIST</u>	<u>SFTRAN</u>	<u>SFGRAD</u>
"	Конечно-элементная	Узлы	<u>SF</u>	<u>SFDELE</u>	<u>SFLIST</u>	<u>SFSCALE</u>	<u>SFGRAD</u> <u>SFCUM</u>
"	Конечно-элементная	Элементы	<u>SFE</u>	<u>SFEDELE</u>	<u>SFE- LIST</u>	<u>SFSCALE</u>	<u>SFBEAM</u> <u>SFCUM</u> <u>SFFUN</u> <u>SFGRAD</u>
Интенсивность объемного тепловыделения	Твердотельная	Ключевые точки	<u>BFK</u>	<u>BFKDELE</u>	<u>BFKLIST</u> <u>I</u>	<u>BFTRAN</u>	--
"	Твердотельная	Линии	<u>BFL</u>	<u>BFLDELE</u>	<u>BFLLIST</u>	<u>BFTRAN</u>	--
"	Твердотельная	Площади	<u>BFA</u>	<u>BFADELE</u>	<u>BFALIST</u>	<u>BFTRAN</u>	--
"	Твердотельная	Объемы	<u>BFV</u>	<u>BFVDELE</u>	<u>BFVLIS</u> <u>I</u>	<u>BFTRAN</u>	--

"	Конечно-элементная	Узлы	<u>BF</u>	<u>BFDELE</u>	<u>BFLIST</u>	<u>BFSCALE</u>	<u>BFCUM</u>
"	Конечно-элементная	Элементы	<u>BFE</u>	<u>BFDELE</u>	<u>BFE- LIST</u>	<u>BFSCALE</u>	<u>BFCUM</u>

Процедура постановки граничных условий, кроме List (Список), о чем будет сказано ниже, посредством GUI выполняется с помощью каскадированных меню (как это указано в табл. 9). Из Solution Menu (Меню Решение) выбирается операция Apply, Delete (приложить, удалить) и т.п. и, наконец, объект, к которому прикладывается граничное условие – keypoint, node (ключевая точка, узел) и т.п.

Например, чтобы приложить температурное граничное условие к ключевой точке с помощью GUI, выбирается следующий путь:

Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > On Keypoints.

Граничные условия, заданные таблично или в виде функций

В дополнение к общим правилам постановки табулированных граничных условий при решении задач теплообмена имеются некоторые специфические детали, о которых пойдет речь в данном разделе. Подробная информация о параметрах таблично задаваемых массивов (или интерактивно, или с помощью команд) представлена в ANSYS APDL Programmer's Guide.

Не существует ограничений на типы элементов.

В табл. 11 приведен список первичных переменных, которые могут быть использованы для каждого типа граничных условий в задачах теплообмена.

Таблица 11. Типы граничных условий и соответствующие им первичные переменные

Тепловые граничные условия	Группа команд	Первичные переменные
Постоянная температура	<u>D</u>	TIME, X, Y, Z
Тепловой поток	<u>F</u>	TIME, X, Y, Z, TEMP

Коэффициент теплоотдачи (Конвекция)	<u>SF</u>	TIME, X, Y, Z, TEMP, VELOCITY
Температура окружающей среды (Конвекция)	<u>SF</u>	TIME, X, Y, Z
Плотность теплового потока	<u>SF</u>	TIME, X, Y, Z, TEMP
Интенсивность объемного тепловыделения	<u>BF</u>	TIME, X, Y, Z, TEMP
Элемент тепломассообмена (FLUID116). Граничные условия		
Расход (жидкости)	<u>SFE</u>	TIME
Давление	<u>D</u>	TIME, X, Y, Z

Пример решения стационарной тепловой задачи с помощью граничных условий, заданных таблично, приведен в *Doing a Thermal Analysis Using Tabular Boundary Conditions*.

Для большей гибкости при задании конвективных граничных условий коэффициент теплоотдачи может быть задан в виде функции (смотри *Applying Loads Using Function Boundary Conditions* в *ANSYS Basic Analysis Guide*). Дополнительные первичные переменные, которые могут быть использованы при функциональном задании (граничных условий), перечислены ниже:

- Tsurf* (TS) (температура на поверхности элемента для SURF151 или SURF152 элементов).
- Плотность (свойство материала DENS).
- Удельная теплоемкость (свойство материала C).
- Теплопроводность (свойство материала kxx).
- Теплопроводность (свойство материала кyy).
- Теплопроводность (свойство материала kzz).
- Вязкость (свойство материала VISC).
- Степень черноты (свойство материала EMS).

Выбор опций при постановке граничных условий

При решении тепловых задач можно задавать обычные опции, нелинейные опции и управлять выводимыми «на печать» данными. Все эти возможности показаны в табл. 12.

Таблица 12. Опции (варианты) при постановке граничных условий

Опции	Команды	Маршруты GUI
Обычные опции		
Время	<u>TIME</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Time/Frequenc > Time- Time Step
Количество шагов по времени	<u>NSUBST</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Time/Frequenc > Time and Substps
Величина шага по времени	<u>DELTIM</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Time/Frequenc > Time- Time Step
Скачкообразное или постепенное приложение граничных условий	<u>KBC</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Time/Frequenc > Time- Time Step
Нелинейные опции		
Максимальное количество равновесных итераций	<u>NEQIT</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Nonlinear > Equilibrium Iter
Автоматический выбор шага по времени	<u>AUTOTS</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Time/Frequenc > Time- Time Step
Критерии сходимости	<u>CNVTOL</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Nonlinear > Convergence Crit
Опции окончания решения	<u>NCNV</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Nonlinear > Criteria to Stop
Line Search Option	<u>LNSRCH</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Nonlinear > Line Search
Предиктор-корректор	<u>PRED</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Nonlinear > Predictor
Управление выводом «на печать»		
Печать	<u>OUTPR</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts-Output Ctrls > Solu Printout

База данных и файл результатов	<u>OUTRES</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Output Ctrl > DB/Results File
Экстраполяция результатов	<u>ERESX</u>	Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Output Ctrl > Integration Pt

Обычные опции

Обычные опции включают в себя следующее:

- Время.

Эта опция указывает время в конце шага «нагрузки» (приложения граничного условия). Хотя время не имеет физического смысла при решении стационарных задач, шаги и подшаги по времени применимы, когда стационарные задачи решаются методом установления.

По умолчанию величина времени равна 1,0 для первого шага «нагрузки» и 1,0 + предыдущее время для последующих шагов.

- Количество подшагов на шаг «нагрузки» или величина шага по времени.

При решении нелинейных задач необходимы многократные подшаги при каждом шаге «нагрузки». По умолчанию в программе задается один подшаг на один шаг «нагрузки».

- Скачкообразное или постепенное (линейное) приложение граничных условий.

Если приложение граничных условий происходит скачкообразно, это граничное условие остается неизменным в течение всего шага «нагрузки».

Если граничные условия прикладываются постепенно (по умолчанию), они изменяются линейно на каждом подшаге шага «нагрузки».

Нелинейные опции

Если задача нелинейна, указываются опции нелинейного шага «нагрузки», которые включают в себя следующее:

- Максимальное количество равновесных итераций.

Эта опция задает максимально допустимое количество равновесных итераций на одном подшаге. По умолчанию эта величина равна 25, что вполне достаточно для большинства нелинейных задач теплообмена.

- Автоматический выбор шага по времени.

Графическое отображение сходимости

Во время решения нелинейной тепловой задачи ANSYS рассчитывает норму сходимости и соответствующий критерий сходимости на каждой равновесной итерации. И в пакетном, и в интерактивном режимах решения программа графического отображения решения (GST – Graphical Solution Tracking) выводит на дисплей рассчитанные норму сходимости и критерий в течение всего процесса решения. По умолчанию GST включена при интерактивном режиме и выключена при работе в пакетном режиме. Для включения или выключения GST можно использовать команду или GUI:

Команда:

/GST

GUI:

Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Output Ctrls > Grph Solu Track.

На рис. 1 показан типичный пример графического отображения сходимости программой GST.

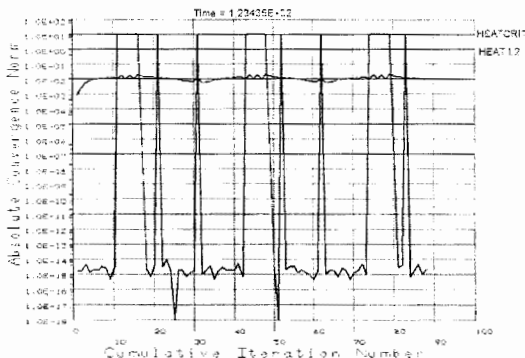


Рис. 1. Отображение нормы сходимости программой GST в процессе решения задачи: Absolute Convergence Norm – абсолютная величина нормы сходимости; Cumulative Iteration Number – номер итерации, Time – время, HEATCRIT – критерий сходимости

Управление выводом «на печать»

Третий класс опций при задании граничных условий дает возможность управлять выводом «на печать»:

- Управление печатью.

Эта опция позволяет включить любые результирующие данные в файл вывода (Jobname.OUT).

- Управление базой данных и файлом результатов.

Эта возможность позволяет определить данные программы ANSYS, записываемые в файл результатов (Jobname.RTH), хранящийся в базе данных.

- Экстраполяция результатов.

Использование этой опции дает возможность скопировать результаты, полученные для точек интегрирования элементов, в узлы, а не экстраполировать их. По умолчанию выбрана эта опция.

Выбор опций для решения задачи

В вашем распоряжении имеются следующие возможности:

- Метод Ньютона-Рафсона (используется только для решения нелинейных задач). При этом необходимо указать, как часто в процессе решения корректируется матрица коэффициентов (уравнений). Вы можете назначить одну из следующих опций:

- Выбирается программой (по умолчанию рекомендуется для тепловых задач).
- Полный метод Ньютона-Рафсона.
- Модифицированный метод Ньютона-Рафсона.
- Используется предварительно рассчитанная матрица коэффициентов.

Замечание: Для нелинейных тепловых задач ANSYS будет всегда использовать алгоритм полного метода Ньютона-Рафсона.

Для того, чтобы назначить эту опцию, или для того, чтобы включить или выключить адаптивную сходимости в методе Ньютона-Рафсона (применяемую только для полного метода Ньютона-Рафсона), используйте следующую команду:

NROPT

или GUI:

Main Menu > Solution > Analysis Options.

- Выбор метода решения (системы алгебраических уравнений). Вы можете выбрать следующее:
 - Прямое решение системы уравнений с разреженной матрицей (по умолчанию для статических и нестационарных задач).
 - Фронтальный метод решения.
 - Метод сопряженных градиентов Якоби (JCG).
 - Метод JCG для оперативной памяти ограниченных размеров.
 - Метод сопряженных градиентов с предобусловленностью посредством неполного разложения Холецкого (ICCG).
 - Метод сопряженных градиентов с предобусловленностью (PCG).
 - Метод PCG для оперативной памяти ограниченных размеров.
 - Многоуровневый метод (AMG), в том числе для многопроцессорных компьютеров.
 - Метод деления модели на подобласти (DDS), в том числе для многопроцессорных компьютеров.
 - Итеративный (автоматический выбор итеративного метода).

Замечание: Методы AMG и DDS являются частью программного обеспечения для многопроцессорных компьютеров и требуют отдельной лицензии. Подробная информация об этих методах находится в *[Improving ANSYS Performance and Parallel Performance for ANSYS](#)* в *[ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide](#)*.

Выбор метода решения происходит следующим образом:

Команда:

EQSLV

или GUI:

Main Menu > Solution > Analysis Options.

Замечание: Метод итеративного (быстрого) решения можно использовать для любых тепловых элементов за исключением суперэлементов (т.е. созданных AUX12 для задач лучистого теплообмена). Этот метод не рекомендуется для задач теплообмена, связанных с изменением агрегатного состояния (в этих случаях применяется или прямой метод решения, или фронтальный метод). При работе AUX12 не создаются файлы Jobname.EMAT и Jobname.EROT.

- Определение смещения температурных шкал. То есть разности между абсолютным нулем температуры и нулем используемой температурной шкалы. Смещение температурных шкал включается в расчет соответствующих элементов (таких, как элементы с радиационными эффектами

или эффектами ползучести). Смещение позволяет использовать температурную шкалу Цельсия (вместо шкалы Кельвина) или шкалу Фаренгейта (вместо шкалы Ренкина), а затем представлять результаты расчета в любой шкале. Для большей информации смотри *Radiation*.

Для указания смещения температурных шкал можно использовать следующее:

Команда:

TOFFST

или GUI:

Main Menu > Solution > Analysis Options.

Сохранение модели

После того, как Вы указали граничные условия для модели и выбрали метод решения, необходимо сохранить копию базы данных для того, чтобы в случае сбоя Вашего компьютера модель не была потеряна. Если понадобится восстановление Вашей модели, необходимо выполнить следующее:

Команда:

RESUME

или GUI:

Utility Menu > File > Resume Jobname.db.

Решение задачи

Для того, чтобы начать решение задачи, поступают следующим образом:

Команда:

SOLVE

или GUI:

Main Menu > Solution > Current LS.

Просмотр результатов расчета

ANSYS записывает результаты решения тепловой задачи в файл результатов тепловой задачи Jobname.RTH. Результаты содержат следующие данные:

Первичные результаты

- Температуры в узлах (TEMP).

Вторичные результаты

- Компоненты вектора плотности теплового потока в узлах и величина вектора плотности теплового потока на элементах (TFX, TFY, TFZ, TFSUM).
- Компоненты вектора градиента температуры в узлах и величина градиента температуры на элементах (TGX, TGY, TGZ, TGSUM).
- Тепловые потоки на элементах.
- Тепловые потоки в узлах, где заданы граничные условия 1-го рода (температуры).
- и т.п.

Эти данные можно просмотреть с помощью главного постпроцессора POST1 (маршрут GUI: Main Menu > General Postproc). Некоторые типичные постпроцессорные операции при решении тепловых задач представлены ниже. Полное описание функций постпроцессора приведено в [ANSYS Basic Analysis Guide](#).

Замечание: При просмотре результатов с помощью главного постпроцессора в базе данных ANSYSa должна находиться та же самая модель, для которой было получено решение. (Если необходимо, используйте операцию resume или команду [RESUME](#) для восстановления модели). Естественно, в базе данных должен находиться файл результатов Jobname.RTH.

Чтение результатов

После того, как Вы вошли в постпроцессор POST1, можно увидеть результаты решения задачи для любого шага и подшага. Для этого необходимо следующее:

Команда:

[SET](#)

или GUI:

Main Menu > General Postproc > -Read Results- By Load Step.

Выбираемый шаг «нагружения» может быть определен его номером или можно потребовать, чтобы был считан первый шаг «нагружения», последний шаг «нагружения», следующий шаг и т.д. Если используется GUI, диалоговая панель предоставляет Вам возможности для указания шага «нагружения», который должен быть считан.

Для нестационарных задач (или стационарных задач, решаемых методом установления) результирующие данные могут быть определены по времени. Если указывается время, для которого результаты решения отсутствуют, ANSYS выполняет линейную интерполяцию для получения результатов решения в указанное время.

Просмотр результатов

После того, как результаты расчета считаны (в память), Вы можете использовать графические окна ANSYSa и таблицы, чтобы просмотреть эти результаты. Для отображения результатов расчета существуют следующие возможности:

Построение изолиний:

Команды:

PLESOL, PLETAB, PLNSOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Element Solu

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Elem Table

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu

На рис. 2 показан пример построения температурного поля в виде изолиний (изотерм).

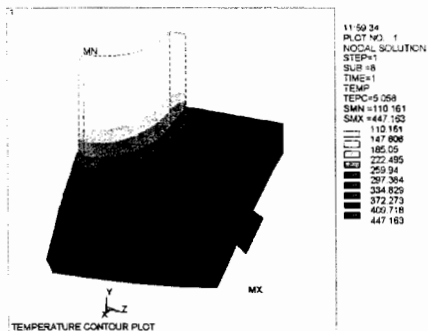


Рис. 2. Пример изображения температурного поля в виде изотерм

Построение векторных полей:

Команда:

PLVECT

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Pre-defined or User defined.

На рис. 3 приведен пример векторного поля, изображенного в графическом окне ANSYSa.

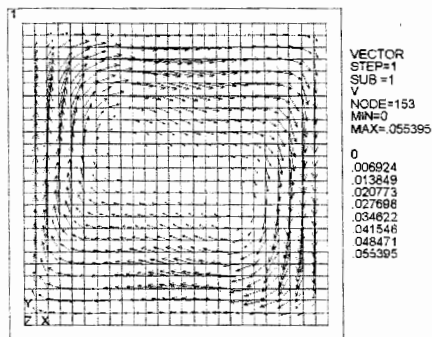


Рис. 3. Пример изображения поля векторной величины

Представление результатов в виде таблиц:

Команды:

PRESOL,

PRNSOL,

PRRSOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution

Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution

Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu

После того, как Вы выбрали один из путей GUI или одну из указанных выше команд, программа ANSYS отображает результаты в виде таблиц в текстовом окне (которое здесь не показано).

Пример решения стационарной тепловой задачи (командный или пакетный режим работы)

В данном разделе рассматривается расчет температурного поля на пересечении труб посредством последовательности команд ANSYSa при пакетном или интерактивном режимах работы. В *Doing a Steady-State Thermal Analysis (GUI Method)* объясняется, как решить эту задачу, выбирая различные опции из меню ANSYSa.

Постановка задачи

Через цилиндрический резервуар в радиальном направлении проходит малая труба, равноудаленная от концов резервуара. Изнутри резервуар омывается жидкостью при температуре 450°F (232°C). Через малую трубу протекает стационарный поток жидкости при температуре 100°F (38°C). Оба потока изолированы друг от друга (тонкой трубкой). Коэффициент теплоотдачи внутри резервуара постоянный и равен 250 Btu/hr-ft²-°F (1420 Вт/(м²·К)). Коэффициент теплоотдачи в малой трубе зависит от температуры металла, и эта зависимость приведена ниже.

Необходимо определить распределение температур в месте соединения трубы с резервуаром.

Замечание: Задача, представленная здесь, является одной из многих возможных тепловых задач. Не все тепловые задачи решаются посредством одних и тех же шагов или выполняют шаги в одной и той же последовательности. Свойства материала или материалов и среда, окружающая эти материалы, определяют последовательность шагов и сами шаги.

Зависимости свойств материалов от температуры представлены в табл. 13.

Таблица 13. Свойства материалов

Температура	70	200	300	400	500	(°F)
Плотность	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285	(lb/in ³)
Теплопроводность	8.35	8.90	9.35	9.80	10.23	(Btu/hr-ft-°F)
Удельная теплоемкость	0.113	0.117	0.119	0.122	0.125	(Btu/lb-°F)

В связи с тем, что при решении задачи используются теплофизические свойства материалов, зависящие от температуры, потребуются подшаги (50 в данном случае). Также будет использован автоматический выбор шага по времени. После расчета модели можно просмотреть поле температур (в виде изотерм) и векторное поле плотностей тепловых потоков.

Команды для построения модели и решения задачи

Следующая последовательность команд предназначена для построения модели и решения задачи. Текст, следующий за восклицательным знаком (!), является комментарием.

```

/PREP7
/TITLE,Steady-state thermal analysis of pipe junction
! Заголовок «Стационарный теплообмен на пересечении труб»
/UNITS,BIN           ! Пользуемся английской системой единиц
/SHOW,              ! Графический драйвер для интерактив. режима
!
ET,1,90              ! 20-узловой трехмерный твердотельный элемент
MP,DENS,1,.285       ! Плотность = .285 lbf/in^3
MPTEMP,,70,200,300,400,500 ! Создание таблицы температур
MPDATA,KXX,1,,8.35/12,8.90/12,9.35/12,9.80/12,10.23/12
! Задание теплопроводности
MPDATA,C,1,,.113,.117,.119,.122,.125
! Задание удельной теплоемкости
MPDATA,HF,2,,426/144,405/144,352/144,275/144,221/144
! Задание коэффициента теплоотдачи
!
! Задание параметров для генерации модели
RI1=1.3              ! Внутренний радиус цилиндрического резервуара
RO1=1.5              ! Наружный радиус
Z1=2                 ! Длина
RI2=.4               ! Внутренний радиус трубы
RO2=.5               ! Наружный радиус трубы
Z2=2                 ! Длина трубы
!
CYLIND,RI1,RO1,,Z1,,90 ! 90 градусный цилиндрический объем резервуара
WPROTA,0,-90         ! Поворот рабочей плоскости относительно оси x
! на -90°
CYLIND,RI2,RO2,,Z2,-90 ! 90 градусный цилиндрический объем трубы
WPFSTY,DEFA         ! Вернуть рабочую плоскость в исходное сост.
BOPT,NUMB,OFF       ! Отключить предупреждающие сообщения
! при булевских операциях
VOVLAP,1,2           ! Пересечение двух цилиндров
/PNUM,VOLU,1         ! Включить нумерацию объемов
/VIEW,,-3,-1,1
/TYPE,,4
/TITLE,Volumes used in building pipe/tank junction
! Заголовок «Объемы, использ. для построения соед. резервуара с трубой»
VPLOT
VDELE,3,4,,1        ! Убрать лишние объемы
!
! Построение конечно-элементной сетки
ASEL,,LOC,Z,Z1      ! Выбрать область на Z конце резервуара
ASEL,A,LOC,Y,0      ! Выбрать область на Y конце резервуара
CM,AREMOTE,AREA     ! Создать компоненту под именем AREMOTE
/PNUM,AREA,1
/PNUM,LINE,1

```

```

/TITLE,Lines showing the portion being modeled
! Заголовок «Линии, показывающие моделируемую область»
APLOT
/NOERASE
LPLOT ! Отрисовка линий и площадей модели
/ERASE
ACCAT,ALL ! Объединение площадей и линий на самых
! удаленных (от места соединения с трубой) концах резервуара
LCCAT,12,7
LCCAT,10,5
LESIZE,20,,,4 ! 4 разбиения по толщине трубы
LESIZE,40,,,6 ! 6 разбиений по длине трубы
LESIZE,6,,,4 ! 4 разбиения по толщине резервуара
ALLSEL ! Восстановить все объекты моделирования
ESIZE,.4 ! Назначить размеры элемента по умолчанию
MSHAPE,0,3D ! Регулярное разбиение на параллелепипеды
MSHKEY,1
SAVE ! Сохранение базы данных перед созданием сетки
VMESH,ALL ! Генерация узлов и элементов в объемах
/PNUM,DEFA
/TITLE,Elements in portion being modeled
! Заголовок «Элементы в моделируемой области»
EPLOT
FINISH
!
/COM, *** Obtain solution *** ! Комментарий «Получение решения»
!
/SOLU
ANTYPE,STATIC ! Стационарная задача
NROPT,AUTO ! Выбираемый программой алгоритм Ньютона-Рафсона
TUNIF,450 ! Постоянная начальная температура во всех узлах
CSYS,1
NSEL,S,LOC,X,RI1 ! Узлы на внутренней поверхности резервуара
SF,ALL,CONV,250/144,450 ! Конвективное граничное условие во всех узлах
CMSEL,,AREMOTE ! Выбрать компоненту AREMOTE
NSLA,,1 ! Узлы, принадлежащие AREMOTE
D,ALL,TEMP,450 ! Постоянная температура на этих узлах
WPROTA,0,-90 ! Поворот рабочей плоскости относительно оси x
! на -90°
CSWPLA,11,1 ! Определить локальную цилиндрическую систему
! координат на рабочей плоскости
NSEL,S,LOC,X,RI2 ! Узлы на внутренней поверхности трубы
SF,ALL,CONV,-2,100 ! Зависящее от температуры конвективное
! граничное условие на этих узлах
ALLSEL
/PBC,TEMP,,1 ! Включить символ температурн. граничных условий
/PSF,CONV,,2 ! Включить символ конвективных граничных условий
/TITLE,Boundary conditions ! Заголовок «Граничные условия»
NPLOT
WPSTYL,DEFA
CSYS,0
AUTOTS,ON ! Автоматический выбор шага по времени
NSUBST,50 ! Количество подшагов
KBC,0 ! Линейное изменение граничных условий
! (по умолчанию)
OUTPR,NSOL,LAST ! Команда вывода результатов расчета
! на последнем шаге
SOLVE
FINISH
!
/COM, *** Review results *** ! Комментарий «Просмотр результатов»
!
/POST1
/EDGE,,1 ! Отрисовка контуров модели

```

```
/PLOPTS,INFO,ON           ! Включение шкалы температур
/PLOPTS,LEG1,OFF         ! Выключение заголовка шкалы температур
/WINDOW,1,SQUARE         ! Переопределить размер окна
/TITLE,Temperature contours at pipe/tank junction
! Заголовок «Температурное поле в месте соединения трубы с резервуаром»
PLNSOL,TEMP              ! Построение изотерм
CSYS,11
NSEL,,LOC,X,RO2          ! Узлы и элементы на внешнем радиусе трубы
ESLN
NSLE
/SHOW,,,1                ! Подготовка к построению векторов
/TITLE,Thermal flux vectors at pipe/tank junction
! Заголовок «Векторы плотности теплового потока в месте соединения трубы
! с резервуаром»
PLVECT,TF                ! Построение векторного поля плотностей тепловых
                          ! потоков
FINISH
/EXIT,ALL
```

Пример решения стационарной тепловой задачи (метод GUI)

В этом разделе рассказывается о том, как решить ту же самую задачу методом GUI. Вместо использования команд Вы будете выбирать различные варианты в меню GUI.

Шаг 1. Присвоение имени задаче.

После того, как Вы вошли в программу ANSYS, решение начинается с присвоения задаче имени. Это делается следующим образом:

1. Utility Menu > File > Change Title.

Результатом этого маршрута GUI является открывшаяся диалоговая панель **Change Title**.

2. В окне диалоговой панели набирается текст «**Steady-state thermal analysis of pipe junction**».
3. Нажимается кнопка ОК.

Шаг 2. Задание системы единиц измерения.

При решении задач необходимо указывать систему единиц измерения. Для рассматриваемого примера (соединение труб) используется английская система единиц измерения (основанная на дюймах). Чтобы указать это, в окне ввода ANSYSa печатается команда

/UNITS,BIN

Затем нажимается клавиша ENTER.

Шаг 3. Определение типа элемента.

При решении данной задачи используются тепловые твердотельные элементы. Чтобы определить их, поступают следующим образом:

1. Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete.

Открывается диалоговая панель **Element Types**.

2. Нажимается кнопка Add и открывается диалоговая панель **Library of Element Types**.
3. В левом списке просмотрите и выберите (выделите) "Thermal Solid". В правом списке выберите "Brick20node 90".
4. Нажмите на кнопку ОК.
5. Нажмите на кнопку Close, чтобы закрыть диалоговую панель **Element Types**.

Шаг 4. Определение свойств материала.

Для определения свойств материала выполняются следующие шаги:

1. Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models.
Открывается диалоговая панель **Define Material Model Behavior**.
2. В окне **Material Models Available** дважды щелкните левой кнопкой мыши, установив курсор на опцию Thermal, а затем на опцию Density. Открывается диалоговая панель **Density for Material Number 1**.
3. Введите **.285** для DENS (плотность) и нажмите на ОК. Material Model Number 1 возникает в **Material Models Defined** окне слева.
4. В окне **Material Models Available** дважды щелкните левой кнопкой мыши, установив курсор на опцию Conductivity, Isotropic. Открывается диалоговая панель **Conductivity for Material Number 1**.
5. Нажмите кнопку Add Temperature 4 раза. Будут добавлены 4 столбца.
6. В окна, соответствующие температурам от T1 до T5, введите следующие значения температур: **70, 200, 300, 400 и 500**. Выделите строку температур, протягивая курсор по окнам, заполненным значениями температур. Затем скопируйте эти температуры, нажимая клавиши Ctrl-C.
7. В окна KXX (теплопроводность) введите следующие величины, соответствующие каждой из температур. Затем нажмите на кнопку ОК. Для того, чтобы применяемые единицы измерения были согласованы друг с другом, каждая из вводимых величин KXX должна быть разделена на 12. Эти величины можно ввести в виде дроби и ANSYS сам выполнит вычисления:
 - 8.35/12**
 - 8.90/12**
 - 9.35/12**
 - 9.80/12**
 - 10.23/12**
8. В окне **Material Models Available** дважды щелкните левой кнопкой мыши, установив курсор на опцию Specific Heat. Открывается диалоговая панель **Specific Heat for Material Number 1**.
9. Нажмите кнопку Add Temperature 4 раза. Будут добавлены 4 столбца.
10. Установите курсор в окне T1 и вставьте строку температур командой Ctrl-V.

11. В окна С (удельная теплоемкость) введите следующие величины теплоемкости, соответствующие ранее введенным температурам:
- .113
 - .117
 - .119
 - .122
 - .125
- Затем нажмите на кнопку ОК.
12. В диалоговой панели **Define Material Model Behavior** выберите маршрут
Material > New Model
и введите **2** – новый идентификационный номер материала. Нажмите на ОК. Material Model Number 2 возникает в окне **Material Models Defined** слева.
13. В окне **Material Models Available** дважды щелкните левой кнопкой мыши, установив курсор на Convection или Film Coef. (коэффициент теплоотдачи). Возникает соответствующая диалоговая панель.
14. Нажмите на кнопку Add Temperature 4 раза. Будут добавлены 4 столбца.
15. Установите курсор в окне T1 и вставьте 5 значений температур, нажав на клавиши Ctrl-V.
16. В окна HF (коэффициент теплоотдачи) введите следующие величины, соответствующие определенным ранее температурам. Для согласования единиц измерения каждая из величин HF должна быть разделена на 144. Как и в шаге 7, эти данные можно ввести в виде дроби, а ANSYS выполнит деление:
- 426/144
 - 405/144
 - 352/144
 - 275/144
 - 221/144
17. Нажмите на кнопку Graph для того, чтобы увидеть зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры (в графическом окне ANSYSa). Затем нажмите на ОК.
18. В диалоговой панели **Define Material Model Behavior** выберите маршрут
Material > Exit
и закройте диалоговую панель **Define Material Model Behavior**.

19. Нажмите на кнопку SAVE_DB (Сохранить базу данных) на линейке инструментов ANSYSa.

Шаг 5. Задание параметров для моделирования.

1. Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters.
Открывается окно **Scalar Parameters**.
2. В строке Selection окна введите величины, указанные ниже. (Не вводите текст в скобках). Нажимайте клавишу ENTER после ввода каждой величины. Если Вы ошиблись, просто перепечатайте строку, в которой сделана ошибка.
RI1=1.3 (Внутренний радиус цилиндрического резервуара)
RO1=1.5 (Наружный радиус резервуара)
Z1=2 (Длина резервуара)
RI2=.4 (Внутренний радиус трубы)
RO2=.5 (Наружный радиус трубы)
Z2=2 (Длина трубы)
3. Нажмите на кнопку Close, чтобы закрыть окно.

Шаг 6. Создание геометрической модели.

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Volumes- Cylinder > By Dimensions.
Открывается диалоговая панель **Create Cylinder by Dimensions**.
2. В этой панели задайте "Outer radius" (внешний радиус) равным **RO1**, "Optional inner radius" (внутренний радиус) равным **RI1**, "Z coordinates" (Z-координаты) **0** и **Z1** соответственно, и "Ending angle" (конечный угол) равным **90**. Начальный угол равен **0**.
3. Нажмите на кнопку OK.
4. Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments.
Возникает диалоговая панель **Offset WP**.
5. В строке "XY, YZ, ZX Angles" задается **0, -90**.
6. Затем OK.
7. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Volumes- Cylinder > By Dimensions.
Возникает диалоговая панель **Create Cylinder by Dimensions**.
8. Задается "Outer radius" равным **RO2**, "Optional inner radius" равным **RI2**, "Z coordinates" **0** и **Z2** соответственно. Задается "Starting angle" (начальный угол) равным **-90** и "Ending Angle" равным **0**.

9. Нажимается кнопка ОК.

10. Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Global Cartesian.

Шаг 7. Пересечение цилиндров.

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Overlap > Volumes.

Открывается меню **Overlap Volumes**.

2. Нажимается кнопка Pick All.

Шаг 8. Просмотр модели.

Прежде, чем Вы продолжите решение задачи, есть смысл посмотреть на то, что Вы сотворили, т.е. на Вашу модель. Чтобы сделать это, проделайте следующие шаги:

1. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering.

Откроеется диалоговая панель **Plot Numbering Controls**.

2. Активируйте опцию Volume numbers, т.е. установите курсор в белом квадратном окошечке напротив Volume numbers и щелкните левой кнопкой мыши. Слово **off** сменится на **on**. Затем нажимается ОК.

3. Utility Menu > PlotCtrls > View Settings > Viewing Direction.

Возникает диалоговая панель **Viewing Direction**.

4. Установите "Coords of view point" (координаты точки зрения) равными (-3,-1,1), затем нажмите на кнопку ОК.

5. Посмотрите на результаты Вашего моделирования.

6. Нажмите на кнопку SAVE_DB на линейке инструментов ANSYSa.

Шаг 9. Удаление лишних объемов.

На этом шаге удаляются пересекающиеся с трубой области резервуара и нижняя часть трубы.

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Delete > Volume and Below.

Открывается меню **Delete Volume and Below**.

2. В окне ввода ANSYSa пишется 3,4 и нажимается клавиша ENTER. Затем ОК в меню **Delete Volume and Below**.

Шаг 10. Создание компоненты AREMOTE.

При выполнении этого шага Вы выбираете самые удаленные в направлении координат Y и Z области резервуара и сохраняете их в виде компоненты, называемой AREMOTE. Чтобы сделать это, выполните следующее:

1. Utility Menu > Select > Entities.

В правой части экрана возникает диалоговая панель **Select Entities**.

2. В верхнем выпадающем меню выберите Areas. Во втором выпадающем меню выберите By Location. Нажмите на кнопку Z Coordinates.
3. Установите в поле "Min,Max" Z1.
4. Нажмите на кнопку Apply.
5. Нажмите на кнопки Y Coordinates и Also Select.
6. Установите в поле "Min,Max" 0.
7. Нажмите на ОК.
8. Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component.
Открывается диалоговая панель **Create Component**.
9. В окошко панели "Component name" введите **AREMOTE**, а в меню "Component is made of" выберите Areas.
10. Нажмите на кнопку ОК.

Шаг 11. Отрисовка линий на площадях.

Делаем следующее:

1. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering.
Возникает диалоговая панель **Plot Numbering Controls**.
2. На этой панели активируются опции Area и Line и нажимается кнопка ОК.
3. Utility Menu > Plot > Areas.
4. Utility Menu > PlotCtrls > Erase Options.
5. Деактивируйте опцию "Erase between Plots" (должна исчезнуть галочка около нее).
6. Utility Menu > Plot > Lines.
7. Utility Menu > PlotCtrls > Erase Options.
8. Активируйте опцию "Erase between Plots" (около этой опции должна возникнуть галочка).

Шаг 12. Конкатенация (объединение) областей и линий.

На этом шаге происходит объединение площадей и линий в самых удаленных областях резервуара перед построением конечно-элементной сетки.

Чтобы проделать это, выполните следующее:

1. Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Volumes- Mapped > -Concatenate- Areas.
Открывается меню **Concatenate Areas**.
2. Нажмите на кнопку Pick All.
3. Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Volumes- Mapped > -Concatenate- Lines.

Открывается меню **Concatenate Lines**.

4. Установите курсор последовательно на линиях **12** и **7** и щелкните левой кнопкой мыши (или в окне ввода ANSYSa наберите **12,7** и нажмите на клавишу ENTER).
5. Нажмите на кнопку **Apply**.
6. Выберите линии **10** и **5** (или введите их номера через окно ввода ANSYSa).
7. Затем **OK**.

Шаг 13. Установка плотности сетки вдоль линий.

1. **Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > Picked Lines.**
Возникает меню **Element Size on Picked Lines**.
2. Выберите (или введите) линии **6** и **20**.
3. После нажатия на кнопку **OK** открывается диалоговая панель **Element Sizes on Picked Lines**.
4. Введите в поле "No. of element divisions" число **4**.
5. Нажмите на кнопку **OK**.
6. **Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > Picked Lines.**
Возникает меню **Element Size on Picked Lines**.
7. Выберите (или введите) линию **40**.
8. После нажатия на кнопку **OK** открывается диалоговая панель **Element Sizes on Picked Lines**.
9. Введите в поле "No. of element divisions" число **6**.
10. Нажмите на кнопку **OK**.

Шаг 14. Построение конечно-элементной модели.

Следующая последовательность шагов определяет размеры элементов и строит конечно-элементную сетку.

1. **Utility Menu > Select > Everything.**
2. **Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -Global- Size.**
Открывается диалоговая панель **Global Element Sizes**.
3. Введите в поле "Element edge length" число **4** и нажмите на **OK**.
4. **Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesher Opts.**
Возникает диалоговая панель **Mesher Options**.
5. Активируйте в опции **Mesher Type** кнопку **Mapped** и нажмите на **OK**.
Открывается диалоговая панель **Set Element Shape**.

6. В окошке 2D shape key в выпадающем меню следует выбрать Quad и нажать на кнопку OK.
7. Нажмите SAVE_DB на линейке инструментов ANSYSa.
8. Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Volumes- Mapped > 4 to 6 sided. Возникает меню **Mesh Volumes**. Нажмите на кнопку Pick All и в графическом окне ANSYSa будет построена конечно-элементная модель. Если возникнет предупреждающее сообщение о форме элементов, прочитайте его и нажмите на кнопку Close.

Шаг 15. Отключение нумерации и отображения элементов.

1. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering.
Открывается диалоговая панель **Plot Numbering Controls**.
2. Отключаются нумерации Line, Area и Volume.
3. Нажимается кнопка OK.

Шаг 16. Определение типа решения и опций.

При выполнении данного шага решения Вы говорите ANSYSy, что собираетесь решать задачу выбираемым программой методом Ньютона-Рафсона.

1. Main Menu > Solution > -Analysis Type- New Analysis.
Возникает диалоговая панель **New Analysis**.
2. Нажмите OK, чтобы выбрать тип задачи по умолчанию (стационарная).
3. Main Menu > Solution > Analysis Options.
4. Открывается диалоговая панель **Static or Steady-State Analysis**.
5. В открывшейся диалоговой панели нажмите на кнопку OK, чтобы задать (выбираемый программой) метод решения по умолчанию: метод Ньютона-Рафсона.

Шаг 17. Задание начальной температуры.

При решении тепловых задач необходимо задавать начальную температуру.

1. Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > Uniform Temp. Возникает диалоговая панель **Uniform Temperature**.
2. Введите **450** для "Uniform temperature" на этой панели и нажмите на кнопку OK.

Шаг 18. Задание конвективных граничных условий.

На этом шаге задаются конвективные граничные условия для узлов на внутренней поверхности резервуара.

- Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical.
- Utility Menu > Select > Entities.
Возникает диалоговая панель **Select Entities**.
- На этой панели выберите Nodes, By Location и нажмите на кнопки X Coordinates и From Full.
- Введите в поле "Min,Max" **RI1** и нажмите на кнопку ОК.
- Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Convection > On Nodes.
Открывается меню **Apply CONV on Nodes**.
- Нажмите кнопку Pick All.
Возникает диалоговая панель **CONV on Nodes**.
- На этой панели в области "Film coefficient" введите **250/144**.
- Определите "Bulk temperature" равной **450**.
- Нажмите кнопку ОК.

Шаг 19. Задание постоянной температуры на компоненте AREMOTE.

- Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Select Comp/Assembly.
Открывается диалоговая панель **Select Component or Assembly**.
- Нажмите на ОК, чтобы выбрать компоненту AREMOTE.
- Utility Menu > Select > Entities.
Возникает диалоговая панель **Select Entities**.
- Выберите Nodes и Attached To, и нажмите на кнопку Areas,All. Затем ОК.
- Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > On Nodes.
Открывается меню **Apply TEMP on Nodes**.
- Нажимается кнопка Pick All.
Открывается диалоговая панель **Apply TEMP on nodes**.
- В окошко "Load TEMP value" введите **450**.
- Нажмите на кнопку ОК.
- Нажмите на кнопку SAVE_DB на линейке инструментов ANSYSa.

Шаг 20. Задание конвективных граничных условий, зависящих от температуры.

На этом шаге на внутренней поверхности трубы задаются конвективные граничные условия, зависящие от температуры.

- Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments.
Возникает диалоговая панель **Offset WP**.
- Введите в окошке "XY,YZ,ZX Angles" **0,-90** и нажмите на ОК.

3. Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At WP Origin.
Открывается диалоговая панель **Create Local CS at WP Origin**.
4. В окошке "Type of coordinate system" выбирается "Cylindrical 1" и нажимается кнопка ОК.
5. Utility Menu > Select > Entities.
Возникает диалоговая панель **Select Entities**.
6. На этой панели выберите Nodes, By Location и нажмите на кнопку X Coordinates.
7. Задайте "Min,Max" равным R12.
8. Нажмите на ОК.
9. Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Convection > On Nodes.
Открывается меню **Apply CONV on Nodes**.
10. Нажмите Pick All и откроется соответствующая диалоговая панель.
11. В окошко "Film coefficient" введите -2.
12. Задайте "Bulk temperature" равной 100.
13. Нажмите на ОК.
14. Utility Menu > Select > Everything.
15. Utility Menu > PlotCtrls > Symbols.
Открывается диалоговая панель **Symbols**.
16. В окошке "Show pres and convect as" панели выберите Arrows и нажмите на кнопку ОК.
17. Utility Menu > Plot > Nodes.

В графическом окне ANSYSa будут изображены узлы модели.

Шаг 21. Восстановление рабочей плоскости и системы координат.

Для приведения в исходное состояние рабочей плоскости и прямоугольной системы координат (по умолчанию):

1. Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian.
2. Utility Menu > WorkPlane > Align WP With > Global Cartesian.

Шаг 22. Задание шага нагружения и опций.

Для рассматриваемой задачи необходимы 50 подшагов с автоматическим выбором шага по времени.

1. Main Menu > Solution > -Load Step Options- Time/Frequenc > Time and Substps.
Возникает диалоговая панель **Time and Substep Options**.

2. Задайте "Number of substeps" равным **50**.
3. Включите "Automatic time stepping" (установите курсор на кнопке **ON** и щелкните левой кнопкой мыши).
4. Нажмите на ОК.

Шаг 23. Решение задачи.

1. Main Menu > Solution > -Solve- Current LS.
Программа ANSYS отображает суммарную информацию о решаемой задаче в окне **/STATUS command**.
2. Просмотрите эту информацию.
3. Закройте окно с помощью опции Close меню File окна **/STATUS command**.
4. Нажмите на кнопку ОК в диалоговой панели **Solve Current Load Step**.
5. Скажите Yes в окне верификационных сообщений (желтого цвета).
6. После того, как решение будет получено, в окне (желтого цвета) появится сообщение Solution is done! Нажмите на кнопку Close в этом окне.

Шаг 24. Просмотр поля температур.

1. Utility Menu > PlotCtrls > Style > Edge Options.
Открывается диалоговая панель **Edge Options**.
2. Установите в поле "Element outlines" "Edge only" (для удаления конечно-элементной сетки с граничных поверхностей модели) и прорисовки изотерм. Нажмите на кнопку ОК.
3. Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot- Nodal Solu.
Возникает диалоговая панель **Contour Nodal Solution Data**.
4. Для "Item to be contoured" выберите "DOF solution" из левого списка панели, затем выберите "Temperature TEMP" из правого списка.
5. Нажмите на кнопку ОК. В графическом окне будут прорисованы изотермы результирующего поля температур.

Шаг 25. Построение векторного поля плотностей теплового потока.

На этом шаге Вы построите векторы плотностей теплового потока в месте пересечения трубы с резервуаром.

1. Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys.
Возникает диалоговая панель **Change Active CS to Specified CS**.
2. В окошко "Coordinate system number" введите **11**.
3. Нажмите на ОК.
4. Utility Menu > Select > Entities.
Открывается диалоговая панель **Select Entities**.

5. На этой панели выберите Nodes и By Location, и нажмите кнопку X Coordinates.
6. Установите в поле "Min,Max" RO2.
7. Нажмите на Apply.
8. Выберите Elements и Attached To, и нажмите на кнопку Nodes.
9. Нажмите на Apply.
10. Выберите Nodes и Attached To, и, наконец, ОК.
11. Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Vector Plot- Predefined.
Возникает диалоговая панель **Vector Plot of Predefined Vectors**.
12. Для "Vector item to be plotted" выберите "Flux & gradient" в левом списке панели и "Thermal flux TF" в правом списке.
13. Нажмите на ОК. В графическом окне будут изображены векторы плотностей теплового потока.

Шаг 26. Выход из ANSYSa.

Для выхода из программы ANSYS нажмите на кнопку QUIT на линейке инструментов. В открывшейся диалоговой панели **Exit from ANSYS** Вам предоставляется несколько возможностей этого выхода. После выбора одной из них нажмите кнопку ОК.

Решение тепловых задач с помощью табулированных граничных условий

В этом разделе показано, как решать простые тепловые задачи, используя одномерные таблицы для постановки граничных условий. Представлены два метода решения: с помощью команд ANSYSa и методом GUI.

Решение задачи командным методом

Текст, следующий за восклицательным знаком (!), является комментарием.

```

/batch,list
/show
/title, Demonstration of position-varying film coefficient using Tabular
BC's.
! Заголовок «Демонстрация зависящего от пространственной координаты
! коэффициента теплоотдачи посредством табулированных граничных условий»
/com
/com *
/com * -----
/com * Table Support of boundary conditions ! Таблица граничных условий
/com *

```

```

/com * Boundary Condition Type Primary Variables Independent Parameters !
! Тип граничного условия Первичные переменные Независимые параметры
/com * -----
/com * Convection: Film Coefficient X ! Конвекция: коэффициент теплоотдачи
/com *
/com * Problem description ! Постановка задачи
/com *
/com * A static Heat Transfer problem. A 2 x 1 rectangular plate is
/com * subjected to temperature constraint at one of its end, while the
/com * remaining perimeter of the plate is subjected to a convection
/com * boundary condition. The film coefficient is a function of X-position
/com * and is described by a parametric table 'cnvtab'.
! Стационарный теплообмен в прямоугольной пластине размером 2 x 1,
! находящейся при постоянной температуре на одном ее конце.
! Остальной периметр пластины находится при конвективных граничных
! условиях. Коэффициент теплоотдачи является функцией координаты X,
! как это показано в параметрической таблице cnvtab
/com **
*dim,cnvtab,table,5,,,x ! Определение таблицы
cnvtab(1,0) = 0.0,0.50,1.0,1.50,2.0 ! Variable name, Var1 = 'X'
! Имя переменной, Var1 = 'X'

cnvtab(1,1) = 20.0,30.0,50.0,80.0,120.0
/prep7
esize,0.5
et,1,55
rect,0,2,0,1
amesh,1
MP,KXX,,1.0
MP,DENS,,10.0
MP,C,,100.0
lsel,s,loc,x,0
dl,all,,temp,100
alls
lsel,u,loc,x,0
nlll,s,1
sf,all,conv,%cnvtab%,20
alls
/psf,conv,hcoef,2 ! Показать конвективные граничные условия
/pnum,tavn,on ! Пказать имя таблицы
nplot
fini
/solu
antype,static
kbc,1
nsubst,1
time,60
tunif,50
outres,all,all
solve
finish
/post1
set,last
sflist,all ! Численные значения конвективных граничных условий
/pnum,tavn,off ! Отключить имя таблицы
/psf,conv,hcoef,2 ! Показать конвективные граничные условия
/pnum,sval,1 ! Показать численные значения конвективных
! граничных условий при t=60 сек.

eplot
plns,temp
fini

```


Решение задачи методом GUI

Приведенная выше задача решалась интерактивно посредством GUI.

Шаг 1. Определение одномерной таблицы.

- Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit.
Открывается диалоговая панель **Array Parameters**. Нажмите кнопку Add...
- Открывается новая диалоговая панель **Add New Array Parameter**. Введите **cnvtab** в окошке "Parameter name".
- Выберите "Table" для Parameter type (типа параметра).
- Введите **5,1,1**, как размерности I,J,K.
- Введите **X**, как имя строки.
- Нажмите на кнопку ОК.
- Убедитесь, что в диалоговой панели **Array Parameters** подсвечено **cnvtab**, и нажмите на кнопку Edit... На экране возникает табличный редактор **Table Array:CNVTAB=f(X)**. (Смотри *TABLE Type Array Parameters* в *ANSYS APDL Programmers Guide*, где подробно рассказано о создании табличных массивов).
- На панели табличного редактора возникают два столбца. Первый столбец является столбцом 0, а второй – столбцом 1. Столбец 0 состоит из 6 окошек (полей). Ничего не делайте с первым (верхним) окошком. В пяти других окошках напечатайте 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 и 2.0. Это строка индексированных величин.
- Столбец 1 также содержит 6 окошек. Ничего не надо вводить в верхнее окошко, потому что эта таблица является одномерной. В другие 5 окошек введите 20, 30, 50, 80 и 120.
- File > Apply/Quit.
- Закройте диалоговую панель **Array Parameters** (кнопка Close).

Шаг 2. Определение типа элементов и свойств материала.

- Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete.
Открывается диалоговая панель **Element Types**. Нажмите на кнопку Add...
- Возникает диалоговая панель **Library of Element Types**, в левом списке которой выбирается Thermal Solid и Quad 4node 55 в правом списке.
- Нажмите на кнопку ОК.

4. Закройте диалоговую панель **Element Types**.
5. Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models.
Открывается диалоговая панель **Define Material Model Behavior**.
6. В окне панели **Material Models Available** установите курсор на Thermal, щелкните левой кнопкой мыши, затем установите курсор на опцию Density и дважды щелкните левой кнопкой мыши. Открывается диалоговая панель **Density for Material Number 1**.
7. Введите **10.0** для DENS (плотности). Нажмите на кнопку ОК. Material Model Number 1, Density возникает в левом окне Material Models Defined.
8. В окне панели **Material Models Available** дважды щелкните на следующих опциях: Conductivity, Isotropic. Возникает диалоговая панель **Conductivity for Material Number 1**.
9. Введите **1.0** для KXX (теплопроводность). Нажмите на ОК. Material Model Number 1, Conductivity возникает в левом окне Material Models Defined.
10. В окне **Material Models Available** дважды щелкните на Specific Heat. Открывается диалоговая панель **Specific Heat for Material Number 1**.
11. Введите **100.0** для C (удельная теплоемкость). Нажмите на ОК. В левом окне Material Models Defined возникает сообщение Material Model Number 1, Specific Heat.
12. Маршрут Material > Exit закрывает диалоговую панель **Define Material Model Behavior**.

Шаг 3. Создание геометрической и конечно-элементной модели.

1. Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions.
Открывается диалоговая панель **Create Rectangle by Dimensions**.
2. Введите **0, 2** для X1, X2 координат.
3. Введите **0, 1** для Y1, Y2 координат.
4. Нажмите на кнопку ОК, и на экране возникнет прямоугольная область.
5. Main Menu > Preprocessor > MeshTool.
6. В открывшейся диалоговой панели **MeshTool** в секции Size Controls нажмите на кнопку Set около Global. Возникает диалоговая панель **Global Element Sizes**.
7. В окошко "Element edge length" введите **0.5** и нажмите на кнопку ОК.

8. В области Mesh диалоговой панели MeshTool, в выпадающем меню выберите Areas, нажмите на кнопку Mapped и убедитесь, что выбрано 3/4 sided.
9. Нажмите на кнопку MESH. Откроется меню **Mesh Areas**.
10. В этом меню нажмите на кнопку Pick All и в графическом окне на геометрической модели будет прорисована конечно-элементная сетка.
11. Закройте диалоговую панель MeshTool (кнопка Close).
12. Нажмите на кнопку SAVE_DB на линейке инструментов ANSYSa.

Шаг 4. Постановка табулированных граничных условий.

1. Utility Menu > Plot > Lines.
2. Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > On Lines.
Возникает диалоговое меню **Apply TEMP on Lines**.
3. В графическом окне выберите вертикальную линию при $x = 0$ (левая граница модели), для чего подведите к этой линии курсор и щелкните левой кнопкой мыши (должен измениться цвет линии). Нажмите на ОК.
Открывается диалоговая панель **Apply TEMP on Lines**.
4. Введите **100** для Load TEMP value и нажмите на кнопку ОК.
5. Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Convection > On Lines.
Открывается меню **Apply CONV on Lines**.
6. В графическом окне выберите все линии кроме вертикальной линии при $x = 0$.
7. Нажмите на ОК. Открывается диалоговая панель **Apply CONV on Lines**.
8. В выпадающем списке для "Apply Film Coef on lines," выберите "Existing table."
9. Удалите все из окошка VALI Film coefficient.
10. Введите **20** в окошко "VAL2I Bulk temperature" (температура окружающей среды). Нажмите на ОК.
11. Снова возникает диалоговая панель **Apply CONV on Lines**. Убедитесь, что в "Existing table" указано CNVTAB. Нажмите на ОК. В графическом окне ANSYS обозначает стрелочками все линии, кроме вертикальной линии при $x = 0$.
12. Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > Uniform Temp. Открывается диалоговая панель **Uniform Temperature**.
13. Введите **50** (начальная температура). Нажмите на кнопку ОК.

Шаг 5. Проверка приложенных граничных условий.

- Utility Menu > PlotCtrls > Symbols.
Возникает диалоговая панель **Symbols**.
- Выберите "Convect FilmCoef" в выпадающем списке "Surface Load Symbols".
- Выберите "Arrows" в выпадающем списке "Show pres and convect as".
- Нажмите на кнопку ОК.
- Utility Menu > PlotCtrls > Numbering.
Открывается диалоговая панель **Plot Numbering Controls**.
- Активируйте опцию Table Names. Нажмите на кнопку ОК. Имя таблицы CNVTAB возникает над стрелками на правой стороне графического окна.
- Нажмите на кнопку SAVE_DB на линейке инструментов ANSYSa.

Шаг 6. Выбор опций для решения и решение задачи.

- Main Menu > Solution > -Analysis Type- New Analysis.
Открывается диалоговая панель **New Analysis**.
- Проверьте, что выбрано "Steady-State" (стационарная задача) и нажмите на кнопку ОК.
- Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps. Возникает диалоговая панель **Time and Substep Options**.
- Введите **60**, как "Time at end of load step" (время в конце шага «нагружения»).
- Введите **1**, как "Number of substeps" (количество подшагов).
- Нажмите на кнопку Stepped. Нажмите на ОК.
- Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Output Ctrl > DB/Results File.
Открывается диалоговая панель **Controls for Database and Results File Writing**. Убедитесь, что в "Item to be controlled" указано "All items".
- Выберите "Every substep" для "File write frequency". Нажмите на ОК.
- Main Menu > Solution > -Solve- Current LS.
Просмотрите /STAT Command окно. Если все в порядке, закройте его (в меню File окна есть опция Close).
- В диалоговой панели **Solve Current Load Step** нажмите на кнопку ОК, чтобы начать решение. Когда задача будет решена, нажмите на кнопку Close в информационном окне, в котором на желтом фоне написано "Solution is done!".

Шаг 7. Постпроцессорная обработка.

1. Main Menu > General Postproc > -Read Results- Last Set.
2. Utility Menu > List > Loads > Surface Loads > On All Nodes.
Открывается окно **SFLIST Command**. Просмотрите результаты и закройте окно.
3. Utility Menu > PlotCtrls > Numbering.
Открывается диалоговая панель **Plot Numbering Controls**.
4. На этой панели деактивируйте Table Names (должно быть **off**).
5. Активируйте Numeric contour values и нажмите на ОК.
6. Utility Menu > PlotCtrls > Symbols.
Возникает диалоговая панель **Symbols**.
7. В выпадающем списке "Surface Load Symbols" выберите "Convect Film-Coeff".
8. В выпадающем списке "Show pres and convect as" выберите "Arrows". Нажмите на кнопку ОК.
9. Utility Menu > Plot > Elements. Просмотрите номера над стрелками на модели.
10. Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot- Nodal Solu.
Открывается диалоговая панель **Contour Nodal Solution Data**.
11. Проверьте, что DOF Solution выбрано в левом списке и Temperature в правом. Нажмите на ОК. Просмотрите результаты расчета температурного поля.

Шаг 8. Окончание расчета.

1. Наконец, Вы закончили решение задачи. Нажмите QUIT на линейке инструментов ANSYSa, выберите опцию сохранения и нажмите на ОК.

Где найти другие примеры решения тепловых задач

В некоторых ANSYS-публикациях, в частности, в [ANSYS Verification Manual](#) и Heat Transfer Training Manual, описываются дополнительные примеры стационарных тепловых задач.

Посещение семинара по теплообмену может быть полезным, если Ваша работа связана с расчетом температурных полей элементов конструкций двигателей внутреннего сгорания, сосудов под давлением, теплообменников, топок и т.п. Большая информация об этом семинаре может быть получена у местных

дистрибьютеров ANSYSa или по телефону ANSYS Training Registrar (724) 514-2882 (служба ANSYSa, регистрирующая желающих повысить квалификацию).

ANSYS Verification Manual состоит из тестовых задач, демонстрирующих возможности ANSYSa. В этих тестовых задачах представлены решения реальных тепловых задач, но ANSYS Verification Manual не содержит примеры пошагового решения с подробными инструкциями по вводу исходных данных и выводу результатов расчета. Тем не менее, каждая задача понятна с точки зрения конечно-элементной модели, а исходные данные сопровождаются соответствующими комментариями.

Здесь представлен список тестовых тепловых задач (стационарных, нестационарных и т.п.), которые включены в ANSYS Verification Manual:

VM3 – Термические напряжения в поддерживающих стержнях

VM23 – Тепло-прочностной контакт двух тел

VM27 – Тепловое расширение, закрывающее щель

VM32 – Термические напряжения в длинном цилиндре

VM58 – Температура на оси теплогенерирующей проволоки

VM64 – Термические напряжения после закрытия щели

VM92 – Температура теплоизолированной стенки

VM93 – Зависимая от температуры теплопроводность

VM94 – Теплогенерирующая пластина

VM95 – Теплоотдача от охлаждаемого стержня

VM96 – Распределение температуры в коротком цилиндре

VM97 – Распределение температуры вдоль прямого ребра

VM98 – Распределение температуры вдоль суживающегося ребра

VM99 – Распределение температуры в трапецевидном ребре

VM100 – Теплопроводность через секцию трубы

VM101 – Распределение температуры в коротком цилиндре

VM102 – Цилиндр с зависящей от температуры теплопроводностью

VM103 – Тонкая пластина с центральным источником тепла

VM104 – Изменение агрегатного состояния (жидкость – твердое тело)

VM105 – Теплогенерирующая полая спираль с зависящей от температуры теплопроводностью

VM106 – Лучистый теплообмен тела в окружающую среду

VM107 – Температура термпары, подвергающейся конвективному и лучистому теплообмену

VM108 – Температурный градиент в цилиндре

VM109 – Температурное поле охлаждаемой проволоки

VM110 – Нестационарное температурное поле охлаждаемой бесконечн. стенки

VM111 – Охлаждение сферического тела

VM112 – Охлаждение сферического тела

VM113 – Нестационарное температурное поле в длинном ортотропном стержне прямоугольного поперечного сечения

VM114 – Распределение температуры при линейном изменении температуры на поверхности

VM115 – Распределение температуры в теплогенерирующей бесконечн. плите

VM116 – Теплопроводная плита при внезапном охлаждении

VM118 – Температура на оси теплогенерирующей проволоки

VM119 – Температура на оси проволоки, по которой течет электрический ток

VM121 – Ламинарный поток в трубе с постоянной плотностью теплового потока на стенке

VM122 – Падение давления в турбулентном потоке жидкости

VM123 – Ламинарный поток в системе трубопроводов

VM124 – Истечение воды из резервуара

VM125 – Лучистый теплообмен между концентрическими цилиндрами

VM126 – Теплоотдача к движущейся жидкости

VM147 – Лучистый теплообмен между серыми поверхностями усечен. конуса

VM159 – Температура нагревателя с регулятором

VM160 – Цилиндр при гармонической температурной нагрузке

VM161 – Тепловые потери трубы с тепловой изоляцией

VM162 – Охлаждение круглого ребра прямоугольного сечения

VM164 – Сушка толстой деревянной пластины

VM192 – Охлаждение параллелепипеда посредством лучистого теплообмена

VM193 – Двумерная стационарная тепловая задача при граничных условиях 1, 2 и 3-го рода

Нестационарный теплообмен

Определение нестационарного теплообмена

ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Professional и ANSYS/FLOT-RAN позволяют решать задачи нестационарного теплообмена. При решении задач нестационарного теплообмена определяются температуры и другие тепловые величины, которые изменяются с течением времени. Обычно инженеры используют температуры, которые являются результатом решения нестационарных тепловых задач, при расчете термических напряжений. Задачи нестационарного теплообмена встречаются во многих инженерных приложениях, таких, как сопла, детали двигателей, насосов, сосудов под давлением и т.п.

При решении задач нестационарного теплообмена выполняются, в основном, такие же процедуры, как при решении стационарных задач. Главное различие состоит в том, что большинство граничных условий в нестационарных задачах являются функцией времени. При определении зависимых от времени граничных условий Вы можете использовать или функциональную зависимость, или представить эту зависимость в виде кривой, или разделить эту кривую на шаги «нагружения».

Если Вы задаете граничные условия в виде функций, подробное описание метода находится в *Applying Loads Using Function Boundary Conditions* в *ANSYS Basic Analysis Guide*.

Если Вы используете отдельные шаги «нагружения», каждый «угол» на кривой, представляющей зависимость «нагрузки» от времени, может быть одним шагом «нагружения», как это показано на рис. 5.

Для каждого шага «нагружения» необходимо указать и величину граничного условия, и величину времени вместе с другими опциями, такими, как способ приложения граничного условия (скачкообразное или постепенное), автоматический выбор шага решения и т.п.

Каждый шаг «нагружения» записывается в файл (шагов «нагружения»), откуда информация о шагах «нагружения» последовательно считывается в процес-

се решения. Для лучшего понимания того, как работает этот метод, смотри пример о затвердевании отливки, рассмотренный в этом разделе.

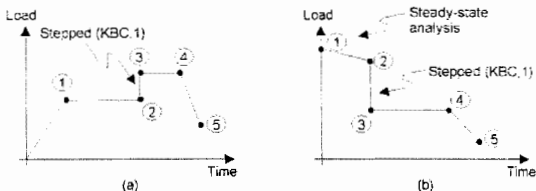


Рис. 5. Пример зависимости «нагрузки» (граничного условия) от времени: Load – «нагрузка» (например, температура), Time – время, Stepped – скачкообразное, Steady-state analysis – стационарное решение, KBC, 1 – команда, задающая скачкообразное изменение «нагрузки»

Элементы и команды, применяемые для решения нестационарных задач

При решении нестационарных тепловых задач применяются такие же элементы, как и при решении стационарных задач. Краткое описание этих элементов можно увидеть в *Steady-State Thermal Analysis*.

В *ANSYS Commands Reference* находится подробное описание команд ANSYSa, расположенных в алфавитном порядке.

Последовательность решения нестационарных задач

При расчете нестационарного теплообмена необходимо решить следующие три главные задачи:

- Построить модель.
- Приложить граничные условия и получить решение.
- Проанализировать полученные результаты.

В следующих разделах объясняется каждая из этих задач. Вследствие того, что не все нестационарные задачи при их решении требуют выполнения одних и тех же действий, будет представлено общее описание указанных задач и подроб-

но рассмотрен пример решения нестационарной задачи. Решение одной и той же задачи будет выполнено с помощью команд ANSYSa и методом GUI.

Создание модели

Построение модели Вы начинаете с указания имени работы (jobname) и названия задачи (title). Если Вы решаете задачу интерактивно и пользуетесь GUI, необходимо выбрать программный модуль (Thermal), который Вы собираетесь применять. Затем с помощью препроцессора PREP7 можно приступить к выполнению следующих шагов:

1. Определение типа элементов.
2. Если необходимо, определение реальных констант элемента.
3. Определение свойств материала.
4. Геометрическое построение модели.
5. Создание конечно-элементной модели.

Эти шаги являются общими для всех задач. В ANSYS Modeling and Meshing Guide представлены все подробности, связанные с выполнением этих шагов.

Постановка граничных условий и получение решения

При решении нестационарных задач первыми шагами при постановке нестационарных граничных условий являются определение типа решения и определение начальных условий.

Определение типа решения

Для определения типа решения следует сделать следующее:

- С помощью ANSYS GUI:
Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient.
- В системе команд ANSYSa новая нестационарная задача определяется командой:

ANTYPE,TRANSIENT,NEW.

Если Вы хотите повторить решение предыдущей задачи (рестарт), например, приложив дополнительные граничные условия, выполните команду

ANTYPE,TRANSIENT,REST.

Ваш рестарт возможен только в том случае, когда от предыдущего решения сохранились файлы Jobname.ESAV и Jobname.DB.

Постановка начальных условий

Для постановки начальных условий можно воспользоваться результатами решения стационарной задачи или просто указать постоянную начальную температуру во всех узлах.

Задание одинаковой начальной температуры

Если известно, что в начале решения модель находилась при температуре окружающей среды, задайте эту температуру во всех узлах. Чтобы сделать это можно воспользоваться:

Командой:

TUNIF

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Settings > Uniform Temp.

Величина, которую Вы указываете в диалоговой панели Uniform Temp или в команде TUNIF, становится температурой отнесения (reference temperature), которая по умолчанию равна 0. Температура отнесения задается следующим образом:

Командой:

TREF

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Settings > Reference Temp.

Замечание: Задание одинаковой начальной температуры не то же самое, что задание температурного граничного условия.

Граничные условия 1-го рода (температуры) задаются:

Командой:

D

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Loads- Apply > -Thermal- Temperature > On Nodes.

Одинаковая начальная температура является температурой, которая используется только в начале решения задачи, а температурное граничное условие означает, что заданная температура поддерживается до тех пор, пока действует

это граничное условие. Для удаления температур можно воспользоваться двумя путями:

Команда:

DDELE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Delete > -Thermal- Temperature > On Nodes.

Задание неодинаковых начальных температур

При решении нестационарных тепловых задач (но не при решении стационарных задач) можно задать одну или несколько неодинаковых начальных температур в узле или группе узлов. Для выполнения этого служат:

Команда:

IC

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Initial Condit'n > Define.

Также Вы можете задать неодинаковую начальную температуру на одном или более узлов и в то же время на всех других узлах поддерживать одинаковую начальную температуру. Для этого просто задают одинаковую начальную температуру на всех узлах, а затем неодинаковую начальную температуру на выбранных узлах.

Для вывода списка узлов, в которых задана неодинаковая начальная температура, можно применить:

Команду:

ICLIST

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Initial Condit'n > List Picked.

Если начальное распределение температур неравномерно и неизвестно, необходимо решить стационарную задачу, чтобы установить начальные условия.

Для выполнения этого нужны следующие шаги:

1. Задать соответствующие граничные условия (такие, как температуры, конвективные условия и т.п.).
2. Записать эти граничные условия в файл шага «нагружения», например, с помощью:

Команды:

LSWRITE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Write LS File.

Для второго шага «нагружения» запоминаются результаты предыдущего шага и удаляются те граничные условия, которые не будут поддерживаться в процессе решения нестационарной задачи (начиная со второго шага). Для большей информации следует обратиться к описаниям команд D, DDELE, SF, LSWRITE, TIME и TIMINT в ANSYS Commands Reference.

Задание опций для шага «нагружения»

При решении нестационарных тепловых задач можно задавать обычные опции, нелинейные опции и управлять выводимыми «на печать» данными.

Способы задания шагов «нагружения»

Решением нестационарной задачи можно управлять или заданием многочисленных шагов «нагружения» (для скачкообразных или линейно изменяющихся граничных условий), или используя единственный шаг «нагружения» и табулированные граничные условия (для произвольно изменяющихся во времени условий) с соответствующими им временами (хранящимися в виде массивов). Однако табличный метод можно применять только для тепловых и тепло-электрических элементов, тепловых элементов с поверхностным эффектом, жидкостных элементов и некоторых комбинаций указанных типов элементов.

При использовании метода шагов нагружения следуют следующей процедуре:

1. Задается время в конце шага «нагружения» посредством:

Команды:

TIME

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time-Time Step.

2. Указывается, являются ли граничные условия скачкообразными или изменяющимися по линейному закону. Это делается следующим образом:

Командой:

KVC

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step.

3. Задаются граничные условия в конце шага «нагружения». (Это требует разнообразных команд или маршрутов GUI, как об этом сказано в табл. 9 и 10 раздела «Стационарный теплообмен»).
4. Запишите информацию о шаге «нагружения», используя один из следующих методов:

Команда:

LSWRITE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Write LS File.

5. Повторите шаги с 1 по 4 для следующего шага «нагружения», затем для следующего и т.д., пока Вы не закончите запись всех шагов «нагружения» в файл.

Если Вам понадобится удалить какое-либо граничное условие (кроме температуры), задайте его равным нулю в течение очень малого временного интервала вместо его удаления.

Использование табличных параметров происходит следующим образом:

1. Определите Вашу зависимость граничного условия от времени с помощью параметров типа TABLE, записываемых в массив (TABLE type array parameters), как об этом сказано в *Applying Loads Using TABLE Type Array Parameters* в *ANSYS Basic Analysis Guide*.
2. Задайте автоматический выбор шага по времени (командой AUTOTS,ON). Задайте или величину шага по времени (командой DELTIM), или количество подшагов (командой NSUBST).
3. Выберите опцию восстановления шага по времени. Вы можете не восстанавливать шаг по времени в течение решения, восстанавливать шаг по времени посредством уже определенного массива временных шагов (ключевых времен) или восстанавливать временные шаги на основе нового массива ключевых времен:

Команда:

TSRES

или GUI:

Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step

Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps.

Если при работе в интерактивном режиме Вы выбираете опцию восстановления шага на основе нового массива ключевых времен, программа попросит заполнить массив ключевых времен размерности (nx1). Если Вы работаете в командном режиме, необходимо определить этот массив прежде, чем выполнять команду TSRES, которая восстанавливает шаг по времени до начальных величин, определенных командами DELTIM или NSUBST.

При использовании массива времен ($FREQ = \%array\%$ в команде OUTRES) вместе с массивом времен, в которые восстанавливается шаг по времени (команда TSRES), Вы должны быть уверены, что любое время из массива $FREQ$ превышает ближайшее значение времени из массива времен, соответствующих команде TSRES на величину начального шага по времени, указанного командами DELTIM, DTIME или NSUBST, NSBSTP. (В значках % задается имя массива.) Например, если в массиве $FREQ$ находятся величины 1.5, 2, 10, 14.1 и 15, а в массиве TSRES величины 1, 2, 10, 14 и 16 (означающие, что в эти моменты времени должны восстанавливаться шаги по времени) и Вы задали в начальный момент времени шаг по времени $DTIME = 0.2$, программа остановится. В этом примере требуемая массивом $FREQ$ величина 14.1 не существует, потому что TSRES величины указывают, что шаг по времени будет восстановлен в момент 14 и для величины шага по времени равного 0.2; первой имеющейся для массива $FREQ$ величиной времени должна быть 14.2.

Замечание: Команда TSRES используется только при AUTOTS,ON. Если используется постоянный шаг по времени, т.е. (AUTOTS,OFF), команда TSRES игнорируется.

Команда:

*DIM

или GUI:

Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit.

Когда Вы создаете массив ключевых времен, их значения должны располагаться в порядке возрастания и не превышать время в конце шага «нагрузки», определяемого командой TIME

При решении задачи шаг по времени будет восстанавливаться в ключевые моменты времени, хранящиеся в массиве. Восстановление величины шага по времени основано на величине начального шага по времени, определяемого ко-

мандой DELTIM,DTIME или количеством подшагов, задаваемым командой NSUBST,NSBSTP.

4. Укажите, когда нужная Вам информация должна быть записана в файл результатов, используя массив параметров размерности (px1), точно так же, как это делалось с массивом ключевых времен. Можно использовать тот же самый массив ключевых времен, который применялся для восстановления шага по времени, или другой массив. Если работа происходит в интерактивном режиме, можно создать массив в это время или использовать существующий массив. Если применяется командный режим, необходимо определить этот массив до выполнения команды OUTRES:

Команда:

OUTRES

или GUI:

Main Menu > Solution > -Load Step Opts- Ouput Ctrl> DB/Results File.

Замечание: Команду TSRES и задание шагов «нагружения» можно использовать только для тепловых и тепло-электрических элементов, тепловых элементов с поверхностным эффектом, жидкостных элементов FLUID116 и некоторых комбинаций указанных типов элементов:

- LINK31
- LINK32
- LINK33
- PLANE35
- MATRIX50
- PLANE55
- SHELL57
- PLANE67 (только для тепловой степени свободы)
- LINK68 (только для тепловой степени свободы)
- SOLID69 (только для тепловой степени свободы)
- SOLID70
- MASS71
- PLANE75
- PLANE77
- SOLID87
- SOLID90

- FLUID116
- SURF151
- SURF152
- SHELL157 (только для тепловой степени свободы)
- TARGE169
- TARGE170
- CONTA171
- CONTA172
- CONTA173
- CONTA174

Обычные опции

Обычные опции включают следующее:

- Управление решением

Эта опция позволяет организовать управление решением задачи. При использовании этой опции обычно указывается количество подшагов (команда NSUBST), величина шага по времени (команда DELTIM) и время в конце шага «нагружения» (команда TIME). Для остальных команд, управляющих решением, по умолчанию, выбираются оптимальные для данной решаемой задачи параметры. Подробности представлены в описании команды SOLCONTROL в ANSYS Commands Reference. Для выбора этой опции служат:

Команда:

SOLCONTROL

или GUI:

Main Menu > Solution > Solution Ctrl.

- Временная опция

Эта опция задает время в конце шага «нагружения».

По умолчанию для первого шага «нагружения» эта величина времени равна 1.0. Для последующих шагов по умолчанию она равна 1.0 плюс время, заданное для предыдущего шага «нагружения».

Для задания времени используйте один из следующих способов:

Команда:

TIME

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step.

- Количество подшагов на шаг «нагружения» или величина шага по времени. При решении нелинейных задач внутри каждого шага «нагружения» нужны многочисленные подшаги. По умолчанию программа использует один подшаг на шаг «нагружения».

В областях с большими градиентами температуры (например, поверхности охлаждающихся тел) в процессе решения нестационарных задач существует соотношение между наибольшим размером элемента в направлении теплового потока и наименьшей величиной шага по времени, применение которого дает хорошие результаты. Использование большего количества элементов при одном и том же шаге по времени обычно приводит к лучшим результатам, чем использование большего количества подшагов для той же самой конечно-элементной сетки. При автоматическом выборе шага по времени и применении квадратичных элементов (со срединными узлами) ANSYS рекомендует контролировать максимальную величину шага по времени при задании шага «нагружения» и определять минимальную величину шага (или максимальный размер элемента), исходя из следующего соотношения

$$ITS = \Delta^2 / 4 \cdot a.$$

Величина Δ является длиной элемента (вдоль направления теплового потока) в расчетной области, где предполагается наибольший тепловой поток. a есть температуропроводность, т.е. $a = k / (c\rho)$. Здесь k – теплопроводность, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность.

Если величина шага по времени будет больше ($ITS = \Delta^2 / 4 \cdot a$), даже при использовании квадратичных элементов, при решении возникнут нежелательные осцилляции и значения температур могут стать физически нереальными. Применение элементов без срединных узлов (не квадратичных) также приводит к нежелательным осцилляциям, так что выбор шага по времени, исходя из приведенного выше соотношения (условия устойчивости) является надежным.

Предупреждение: Избегайте применения чрезвычайно малых шагов по времени, особенно, при определении начальных условий. В программе

ANSYS очень малые шаги могут приводить к вычислительным погрешностям. Например, при масштабе времени равном 1 шаг по времени меньший, чем $1.E-10$ приводит к вычислительным погрешностям.

Задание величины шага по времени:

Команды:

NSUBST или DELTIM

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Freq and Substps or Time Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step.

Если применяются скачкообразные граничные условия, значение этого граничного условия остается постоянным в течение всего шага «нагружения». Если граничное условие изменяется постепенно (по умолчанию), это граничное условие изменяется по линейному закону на каждом подшаге (шаге по времени) шага «нагружения».

Для задания скачкообразного или постепенного приложения граничных условий применяются:

Команда:

KBC

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Freq and Substps.

Нелинейные опции

При решении нелинейных тепловых задач ANSYS предполагает три возможности.

Полная опция (по умолчанию) соответствует алгоритму полного метода Ньютона-Рафсона.

Квази-опция соответствует выборочному переопределению (пересчету) матрицы теплопроводности во время решения нелинейных тепловых задач. Мат-

рица пересчитывается, если нелинейные свойства материалов (теплофизические свойства) изменяются на значительную величину (контролируемую пользователем). Эта опция не выполняет равновесных итераций между шагами «нагрузки». Теплофизические свойства определяются по температурам в начале каждого шага «нагрузки».

Линейная опция рассчитывает только одну матрицу теплопроводности на первом временном шаге шага «нагрузки». Эту опцию можно использовать для получения быстрого первого приближения.

Эти опции могут быть выбраны командой TNOPT. Квази- и линейная опции выполняют прямую сборку матрицы теплопроводности и только методы ICCG и JCG позволяют решить задачу при указанных опциях. Вы можете выбрать любой из этих решателей (методов) с помощью команды EQSLV.

Для квази-опции Вы также должны указать допуск на изменение свойств материала, используемый для пересчета матрицы (теплопроводности). Допуск по умолчанию равен 0.05, что соответствует 5% изменению свойств материала. При использовании квази-опции создается таблица зависящих от температуры свойств материала с температурами равномерно расположенными между минимальным и максимальным значениями. При использовании этой опции необходимо также указать количество этих температур (по умолчанию оно равно 64), и минимальную и максимальную температуры (по умолчанию минимальная и максимальная температуры определяются командой MPTEMP). Все параметры, присутствующие нелинейным опциям, о которых говорилось выше, задаются командой

TNOPT

или GUI:

Main Menu > Solution > Analysis Options.

Задание опций для нелинейного шага нагружения имеет смысл только в том случае, когда нелинейности имеют место. Нелинейные опции включают также следующее:

- Количество равновесных итераций

Эта опция указывает максимально допустимое количество равновесных итераций в течение одного подшага. По умолчанию команда SOLCONTROL, ON назначает это число равным от 15 до 26 итераций в зависимости от физики решаемой задачи.

Количество равновесных итераций можно задать:

Командой:

NEQIT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Equilibrium Iter.

- Автоматический выбор шага по времени

В нестационарных задачах эта опция также называется оптимизация шага по времени. Автоматический выбор шага по времени позволяет ANSYS определять величину шага «нагрузки» (граничного условия) между подшагами. Эта опция увеличивает или уменьшает величину шага по времени в процессе решения в зависимости от отклика модели. В нестационарных тепловых задачах проверяемый отклик является собственным значением теплового отклика. При выполнении команды TNOPT,Quasi изменение величины шага по времени основано на свойствах, изменяющихся в процессе решения. Если собственный отклик мал, используется больший шаг по времени и наоборот. Другими параметрами, учитываемыми при определении следующего шага по времени, являются количество равновесных итераций на предыдущем шаге и изменения в статусе нелинейных элементов.

Для большинства задач Вы должны использовать автоматический выбор шага по времени и задать верхнее и нижнее ограничения для этого шага. Эти ограничения устанавливаются командами NSUBST или DELTIM, или маршрутами GUI, показанными ниже, и помогают управлять вариациями шага по времени:

GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step.

Задание автоматического выбора шага по времени:

Команда:

AUTOTS

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time- Time Step.

Для изменения величин по умолчанию, используемых при автоматическом выборе шага по времени, применяются:

Команда:

TINTP

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc >
Time Integration.

- Интегрирование по времени

Эта опция определяет, следует ли учитывать при решении задачи такие нестационарные эффекты, как теплоемкость.

Обратите внимание: Программа ANSYS предполагает учет нестационарных эффектов при решении нестационарных задач (они не учитываются только при постановке начальных условий). Если учет нестационарных эффектов отключен, ANSYS дает стационарное решение. Учет (или неучет) нестационарных эффектов задается следующим образом:

Команда

TIMINT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc >
Time Integration.

- Параметр интегрирования по времени

Этот параметр устанавливает метод (схему) интегрирования по времени и критерии для автоматического выбора шага по времени. Подробности находятся в ANSYS Theory Reference.

Для минимизации неточностей в решении параметр интегрирования по времени (*THETA*) следует задать равным 1.0.

Для задания параметра интегрирования по времени служат:

Команда:

TINTP

GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc >
Time Integration.

- Допуски, определяющие сходимость

Программа ANSYS считает, что нелинейное решение сошлось всякий раз, когда удовлетворяется заданный критерий сходимости. Проверка сходимости может быть основана на температурах, тепловых потоках или на том и другом. Для параметра, по которому будет проверяться сходимость, необходимо задать типичную величину (*VALUE*) командой CNVTOLE и допуск

(TOLER). Критерий сходимости определяется произведением VALUE x TOLER. Например, если Вы задали 500, как типичную величину температуры, и допуск равный 0.001, критерий сходимости по температуре будет равен 0,5 градуса. ANSYS сравнивает изменения в узловых температурах между двумя последовательными равновесными итерациями ($\Delta T = T_i - T_{i-1}$) с критерием сходимости. Для приведенного выше примера решение сошло, если разность температур для каждого узла от одной (равновесной) итерации к другой становится меньше 0,5 градуса.

Для тепловых потоков ANSYS сравнивает тепловой баланс с критерием сходимости. Тепловой баланс представляет собой разницу между тепловыми потоками, определяемыми граничными условиями, и внутренними (рассчитанными) тепловыми потоками.

Для задания критериев сходимости применяются:

Команда:

CNVTOL

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Convergence Crit.

В процессе решения нелинейных тепловых задач ANSYS рассчитывает нормы сходимости и соответствующие критерии сходимости для каждой равновесной итерации. Программа графического отображения решения (GST), которую можно использовать и в командном, и в интерактивном режимах, отображает рассчитанные нормы сходимости и критерии в течение всего процесса решения. По умолчанию GST включена при интерактивном режиме работы и выключена для командного режима. Для включения или выключения GST используйте следующее:

Команда:

/GST

или GUI:

Main Menu > Solution > -Load Step Opts- OutputCtrls > Grph Solu Track.

- Окончание расчета для несходящихся решений

Если программа ANSYS не может получить решение, которое сошло в течение заданного количества равновесных итераций, решение или останавливается, или программа переходит к следующему шагу «нагружения» в зависимости от заданного критерия остановки.

Для остановки несходящегося решения используйте следующее:

Команду:

NCNV

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Criteria to Stop.

- «Поиск линии»

Опция «поиск линии» применяется при использовании метода Ньютона-Рафсона и улучшает решение. Для задания этой опции служат:

Команда:

LNSRCH

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Line Search.

- Опция предиктор-корректор

Эта опция активирует метод предиктор-корректор на первой равновесной итерации каждого подшага.

Эта опция задается следующим образом:

Командой:

PRED

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Predictor.

Управление выводом «на печать»

Этот класс опций позволяет Вам управлять выводом (результатов расчета).

Этими опциями являются:

- Управление печатью

Эта опция позволяет включить любые результаты расчета в файл вывода (Jobname.OUT). Для управления выводом «на печать» служат:

Команда:

OUTPR

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Output Ctrls > Solu Printout.

- Управление базой данных и файлом результатов

Эта опция определяет данные, записываемые в файл результатов (Jobname.RTH). Управление базой данных и файлом результатов происходит следующим образом:

Команда:

OUTRES

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > OutputCtrls > DB/Results File.

- Экстраполяция результатов

Эта возможность позволяет Вам скопировать результаты, полученные для точек интегрирования элементов, в узлы, а не экстраполировать их. По умолчанию выбрана эта опция. Для экстраполяции результатов используйте следующее:

Команду:

ERESX

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > OutputCtrls > Integration Pt.

Сохранение модели

После того, как выбраны опции для шага «нагружения» и решения, создайте резервную копию Вашей базы данных. Для этого выберите один из указанных ниже методов:

Команда:

SAVE

или GUI:

Utility Menu > File > Save As или Utility Menu > File > Save Jobname.db.

Резервная копия базы данных сохранит Вашу модель при сбое Вашего компьютера. Для восстановления модели служат:

Команда:

RESUME

или GUI:

Utility Menu > File > Resume Jobname.db или Utility Menu > File > Resume from.

Решение задачи

Чтобы начать решение задачи, нужно выполнить следующее:

Команда:

LSSOLVE

или GUI:

Main Menu > Solution > From LS Files.

Вы можете решать задачу, используя многократные шаги «нагрузки» и массив параметров, или используя метод многократного решения (отдельное решение для каждого шага «нагрузки»). Информация об этих методах находится в [ANSYS Basic Analysis Guide](#).

Для завершения решения и выхода из процессора SOLUTION выберите следующее:

Команду:

FINISH

или GUI:

Main Menu > Finish.

Просмотр результатов расчета

ANSYS записывает результаты расчета нестационарной тепловой задачи в файл Jobname.RTH. Эти результаты состоят из следующих данных (которые являются функциями времени):

- Первичные данные:
 - Температуры в узлах (TEMP).
- Вторичные данные:
 - Компоненты вектора плотности теплового потока в узлах и величина вектора плотности теплового потока на элементах (TFX, TFY, TFZ, TFSUM).
 - Компоненты вектора градиента температуры в узлах и величина градиента температуры на элементах (TGX, TGY, TGZ, TGSUM).
 - Тепловые потоки на элементах.
 - Тепловые потоки в узлах, где заданы граничные условия 1-го рода (температуры).
 - ...etc.

Как увидеть результаты расчета

Вы можете увидеть эти результаты следующим образом:

- С помощью главного постпроцессора POST1. (Main Menu > General Postproc). POST1 дает возможность просмотреть результаты на одном шаге для всей модели или ее части.
- С помощью постпроцессора истории «нагружения» POST26. (Main Menu > TimeHist Postproc). POST26 позволяет просмотреть результаты в указанных точках модели в зависимости от времени. Другие возможности POST26 включают графическое представление результирующих данных в зависимости от времени (или частоты), арифметические и алгебраические вычисления.
- В следующих нескольких параграфах представлены некоторые типичные постпроцессорные операции для нестационарных тепловых задач. Полное описание постпроцессорных функций смотри в [ANSYS Basic Analysis Guide](#).

Замечание: Для просмотра результатов в любом постпроцессоре база данных ANSYSa должна содержать ту же самую модель, для которой было получено решение (если необходимо, восстановите модель). Естественно, должен присутствовать файл результатов Jobname.RTH.

Просмотр результатов с помощью постпроцессора POST1

После входа в POST1, считайте результаты в желаемый момент времени, для этого используйте следующее:

Команду:

SET

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Read Results > By Time/Freq.

Если Вы указываете время, для которого отсутствуют результаты расчета, программа ANSYS выполнит линейную интерполяцию для того, чтобы получить результаты в указанное время. ANSYS использует результаты последнего шага, если заданное время превышает время нестационарного процесса.

Вы также можете считывать результаты расчета, задавая номер шага «нагрузки» или подшага. Для этого нужно использовать следующий маршрут GUI:

Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step.

Предостережение: Для нелинейных задач линейная интерполяция результатов расчета может привести к некоторой потере точности. Поэтому постарайтесь указать время, для которого имеется решение.

Просмотр результатов с помощью постпроцессора POST26

Постпроцессор истории «нагрузки» POST26 работает с результатами расчета, зависящими от времени, и представленными в табличной форме. Всем переменным ANSYS присваивает номер, причем номер 1 зарезервирован за временем.

Если Вы собираетесь просматривать результаты решения с помощью POST26, начните с определения переменных.

- Определение переменных для первичных данных:

Команда:

NSOL

или GUI:

Main Menu > TimeHist Postproc > Define Variables.

- Определение переменных для вторичных данных:

Команда:

ESOL

или GUI:

Main Menu > TimeHist Postproc > Define Variables.

- Определение переменных для тепловых потоков в узлах, где заданы температуры:

Команда:

RFORCE

или GUI:

Main Menu > TimeHist Postproc > Define Variables.

Как только переменные определены, они могут быть преобразованы в графическую форму с помощью команды PLVAR или маршрута GUI (Main Menu > TimeHist Postproc > Graph Variables). Эта же команда или маршрут GUI дают листинг переменных.

Для получения списка экстремальных значений переменных выполните следующее:

Команду:

EXTREM

или GUI:

Main Menu > TimeHist Postproc > List Extremes.

Просмотр результатов расчета с помощью постпроцессора POST26 позволяет определить критические точки в модели и критические моменты времени для дальнейшей постпроцессорной обработки с помощью POST1. POST26 предоставляет много других возможностей, включая выполнение арифметических операций с переменными, преобразование переменных в массив параметров и преобразование массива параметров в переменные. Подробная информация находится в ANSYS Basic Analysis Guide.

Просмотр результатов в виде графиков или таблиц

Прежде, чем считать результаты расчета, можно использовать ANSYS для просмотра этих данных в виде графиков или таблиц. Для отображения Ваших результатов используйте команды или маршруты GUI, приведенные ниже.

Примеры представления температурных полей в виде изолиний, а также векторных полей смотри в Steady-State Thermal Analysis этого руководства или в различных частях ANSYS Basic Analysis Guide.

Построение изолиний:

Команда:

PLESOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Element Solu.

Команда:

PLETAB

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Elem Table.

Команда:

PLNSOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu.

Построение векторных полей:

Команда:

PLVECT

или GUI:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Pre-defined or User-defined.

Представление результатов в виде таблиц:

Команда:

PRESOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution.

Команда:

PRNSOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution.

Команда:

PRRSOL

или GUI:

Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu.

Изменение агрегатного состояния (фазовый переход)

Одной из важных особенностей ANSYSa, связанных с нестационарным теплообменом, является возможность решения задач при изменении агрегатного состояния: процессы плавления или затвердевания. Процессы изменения агрегатного состояния (изменения фазы) необходимо учитывать в следующих случаях:

- При отливке металлов для определения таких характеристик, как распределения температур в отливке в процессе изменения агрегатного состоя-

ния, время, в течение которого происходит изменение агрегатного состояния, тепловая эффективность опоки и т.п.

- Производство сплавов, где изменение фазы происходит вследствие изменения химического, а не физического состава.
- Термообработка.

Изменение агрегатного состояния является нелинейной нестационарной тепловой задачей. Единственное различие между линейной и нелинейной задачами заключается в том, что:

- Необходимо учитывать теплоту фазового перехода, т.е. энергию, которую система запасает или освобождает в процессе изменения фазы (или агрегатного состояния). Для учета теплоты фазового перехода определим энтальпию материала как функцию температуры (см. рис. 6).

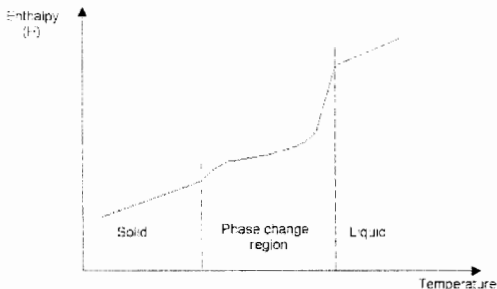


Рис. 6. Зависимость энтальпии материала, изменяющего агрегатное состояние от температуры: Enthalpy – энтальпия, Temperature – температура, Solid – твердое, Liquid – жидкое, Phase change region – область изменения агрегатного состояния

Энтальпия, размерность которой в системе СИ равна Дж/м³, является интегралом от произведения плотности на удельную теплоемкость по температуре:

$$H = \int \rho c(T) dT.$$

- При решении нелинейных задач необходимо задавать достаточно малый шаг по времени. Также необходим автоматический выбор шага по времени и программа сможет выбирать соответствующие шаги по времени до, в процессе и после изменения агрегатного состояния.

- Применяйте тепловые элементы низкого порядка, такие, как PLANE55 или SOLID70. Если необходимо использовать элементы высокого порядка, выберите опцию диагональной матрицы теплоемкости, используя соответствующий элемент KEYOPT. (По умолчанию это выполняется для большинства элементов низкого порядка).
- Параметр интегрирования по времени *THETA* следует положить равным 1, при этом используется Эйлерава конечно-разностная схема. (По умолчанию *THETA* = 0.5.)
- При решении задач, связанных с изменением агрегатного (фазового) состояния, может оказаться полезной опция «поиск линии». Для этого служат:

Команда:

LNSRCH

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Nonlinear > Line Search.

Пример нестационарной тепловой задачи

Пример, рассматриваемый в этом разделе, является нестационарным процессом затвердевания отливки.

Замечание: Решение задачи методом GUI находится в ANSYS Tutorials.

В этом примере рассчитываются распределения температуры в стальной отливке (рис. 7) и опоке в течение трехчасового процесса затвердевания. Заливка расплава производится в L-образную песчаную (земляную) опоку с толщиной стенок 4 дюйма. Теплообмен теплопроводностью происходит между стальной отливкой и песчаной опокой, а конвективный теплообмен происходит между песчаной опокой и окружающей средой (воздухом).

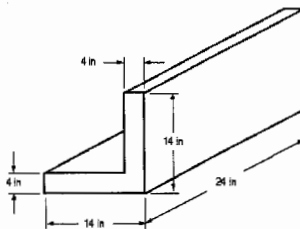


Рис. 7. Стальная отливка

Задача решается в двумерной постановке и рассматривается поперечное сечение (единичной толщины). Симметрия позволяет уменьшить размеры расчетной области (модели). Нижняя часть сечения, показанная на рис. 8, является расчетной областью (моделью).

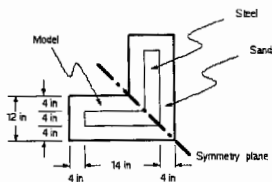


Рис. 8. Сечение стальной отливки и песчаной опоки: Model – модель, Steel – сталь, Sand – песок, Symmetry line – линия симметрии, in – дюймы

В табл.14 представлены теплофизические свойства песка и стали, из которых состоит исследуемая модель, а также начальные и граничные условия, применявшиеся при решении задачи.

Таблица 14. Теплофизические свойства материалов, начальные и граничные условия

Свойства	Обычно применяемые в США единицы измерения
Теплофизические свойства песка	
Теплопроводность (KXX)	0.025 Btu/(hr-in-F)
Плотность (DENS)	0.054 lb/in ³
Удельная теплоемкость (C)	0.28 Btu/(lb-F)
Теплофизические свойства стали:	
Теплопроводность (KXX):	
при 0 F	1.44 Btu/(hr-in-F)
при 2643 F	1.54
при 2750 F	1.22
при 2875 F	1.22

Энтальпия (ENTH):	
при 0 F	0.0 Btu/in ³
при 2643 F	128.1
при 2750 F	163.8
при 2875 F	174.2
Начальные условия:	
Температура стали	2875 F
Температура песка	80 F
Конвективные граничные условия (гр. усл. 3-го рода)	
Коэффициент теплоотдачи	0.014 Btu/(hr-in ² -F)
Температура окружающей среды	80 F

Теплофизические свойства песка являются постоянными, а теплопроводность и энтальпия стали зависят от температуры.

При решении этой задачи используется автоматический выбор шага по времени, обеспечивающий сходимость при нелинейности, обусловленной изменением агрегатного состояния. При переходе от расплавленного состояния стали к твердому использовался наименьший шаг по времени.

Решение задачи методом GUI

Решение приведенной выше задачи о затвердевании отливки методом GUI включено в [ANSYS Tutorials](#).

Решение задачи командным методом

Следующая последовательность команд ANSYSa позволяет построить модель и решить задачу о затвердевании отливки. Комментарии (текст, следующий за восклицательным знаком) объясняют соответствующую команду.

```

/TITLE,CASTING SOLIDIFICATION !Присвоение имени задаче
/PREP7
K,1,0,0,0
K,2,22,0,0
K,3,10,12,0
K,4,0,12,0
/TRIAD,OFF !Отключ. триады, символизирующей сист. коорд.
/REPLOT
!
A,1,2,3,4 !Соед. ключевых точек, определ. зону расплава
SAVE
RECTNG,4,22,4,8 !Создание прямоугольного примитива

```

```

FINISH
!
/POST26                !Постпроцессор истории «нагружения»
EPLOT                  !Отображение (прорисовка) элементов
cntr_pt=node(16,6,0)  !Определение переменных для постпроцессорной
                        !обработки
NSOL,2,cntr_pt,TEMP,,center  !Указываются данные, которые должны быть
                        !сохранены
FLVAR,2                !График зависимости температуры от времени
FINISH
/EOF

```

Где найти другие примеры нестационарных тепловых задач

В некоторых публикациях ANSYSa, в частности, [ANSYS Verification Manual](#) и [Heat Transfer Training Manual](#), представлены дополнительные примеры нестационарных тепловых задач.

Посещение семинара по теплообмену может быть полезным для Вас, если Ваша работа связана с расчетом температурных полей элементов конструкций двигателей внутреннего сгорания, сосудов под давлением, теплообменников, топков и т.п. Большая информация об этом семинаре может быть получена у местных дистрибьютеров ANSYSa или по телефону ANSYS Training Registrar (724) 514-2882 (служба ANSYSa, регистрирующая желающих повысить квалификацию).

[ANSYS Verification Manual](#) состоит из тестовых задач, демонстрирующих возможности ANSYSa. В этих тестовых задачах представлены решения реальных тепловых задач, но [ANSYS Verification Manual](#) не содержит примеры пошагового решения с подробными инструкциями по вводу исходных данных и выводу результатов расчета. Однако большинство пользователей ANSYSa, имеющих даже небольшой опыт решения задач конечно-элементным методом, способны заполнить пропущенные детали, просматривая каждую тестовую задачу и вводимые данные, сопровождаемые соответствующими комментариями.

[ANSYS Verification Manual](#) содержит разнообразные тестовые нестационарные тепловые задачи, названия которых представлены ниже:

[VM28](#) – Нестационарный теплообмен в полубесконечной пластине

[VM94](#) – Теплогенерирующая пластина

[VM104](#) – Изменение агрегатного состояния (жидкость – твердое тело)

[VM109](#) – Температурное поле охлаждаемой проволоки

[VM110](#) – Нестационарное температурное поле охлаждаемой бесконечн. стенки

[VM111](#) – Охлаждение сферического тела

VM112 – Охлаждение сферического тела

VM113 – Нестационарное температурное поле в длинном ортотропном стержне прямоугольного поперечного сечения

VM114 – Распределение температуры при линейном изменении температуры на поверхности

VM115 – Распределение температуры в теплогенерирующей бесконечной плите

VM116 – Теплопроводная плита при внезапном охлаждении

VM159 – Температура нагревателя с регулятором

VM192 – Охлаждение параллелепипеда посредством лучистого теплообмена

Теплообмен излучением

Что такое теплообмен излучением?

Теплообмен излучением есть перенос энергии в виде электромагнитных волн. Волны распространяются со скоростью света и для переноса энергии не нужна промежуточная среда. Тепловое излучение занимает небольшой диапазон в спектре электромагнитных волн. Вследствие того, что лучистый тепловой поток пропорционален четвертой степени абсолютной температуры, задачи теплообмена излучением в высшей степени нелинейны.

Решение задач лучистого (радиационного) теплообмена

Программа ANSYS располагает четырьмя методами решения задач лучистого теплообмена, каждый из которых предназначен для различных ситуаций.

- Вы можете использовать радиационный линейный элемент LINK31 для простых задач, типа лучистый теплообмен между двумя точками или несколькими парами точек.
- Можно использовать элементы с поверхностными эффектами SURF151 и SURF152 для расчета лучистого теплообмена между поверхностью и точкой.
- Вы можете применить метод радиационной матрицы (вспомогательный процессор AUX12) для решения более общих задач лучистого теплообмена, включающих две и более поверхностей. (Только ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical и ANSYS/Professional имеют генератор радиационной матрицы.)
- Также Вы можете использовать радиационный решатель (Radiosity Solver) для задач лучистого теплообмена в трех- или двумерной постановке, включающих две и более поверхностей. Этот метод поддерживается трех- или двумерными элементами, имеющими температурную степень свободы.

(Только ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical и ANSYS/Professional имеют радиационный решатель).

Эти четыре метода решения можно применять для решения как стационарных, так и нестационарных задач лучистого теплообмена. Лучистый теплообмен является нелинейным явлением, и для решения задачи нужны итерации.

Определения

При решении задач лучистого теплообмена применяются следующие термины.

- *Полость.* Открытая или закрытая полости являются системой поверхностей, облучающих друг друга. ANSYS позволяет решать задачи со многими полостями, т.е. с поверхностями, облучающими друг друга. ANSYS использует понятие «полость» для расчета коэффициентов облученности (угловых коэффициентов) для поверхностей, принадлежащих полости. Каждая открытая полость может иметь свою собственную пространственную температуру или «пространственный узел», который представляет окружающую среду.
- *Радиационные поверхности.* Открытые или закрытые полости могут состоять из многих поверхностей, облучающих друг друга. Каждая радиационная поверхность имеет степень черноты и направление излучения. Степень черноты поверхности может зависеть от температуры.
- *Угловые коэффициенты.* При расчете лучистого теплообмена между двумя произвольными поверхностями учитывается та часть лучистого теплового потока, уходящего с поверхности i , которая попадает на поверхность j . Эта величина известна как угловой коэффициент или коэффициент облученности. В ANSYSе угловые коэффициенты рассчитываются методом проекций для дву- и трехмерных задач или полукубическим методом для трехмерных задач.
- *Степень черноты.* Степень черноты является радиационным свойством поверхности и определяется как отношение теплового потока, излучаемого поверхностью, к тепловому потоку, излучаемому абсолютно черным телом при той же температуре. В ANSYSе лучистый теплообмен может происходить только между серыми диффузионными поверхностями. Слово «серый» означает, что степень черноты и коэффициент поглощения (поглощательная способность) поверхности не зависят от длины волны (при которой

происходит излучение), но могут зависеть от температуры. Слово «диффузионный» означает, что степень черноты и коэффициент поглощения не зависят от направления (в котором происходит излучение). Для серых диффузионных поверхностей степень черноты = коэффициенту поглощения (при той же температуре), степень черноты + коэффициент отражения (отражательная способность) = 1. Абсолютно черное тело имеет степень черноты равную 1.

- *Постоянная Стефана-Больцмана.* Эта константа является коэффициентом пропорциональности между плотностью лучистого теплового потока и четвертой степенью абсолютной температуры модели.
- *Смещение температурных шкал.* Единицы, в которых измеряются температуры, играют важную роль при расчете лучистого теплообмена. В этих расчетах температура должна быть определена по абсолютной шкале температур. Если температура модели задана в градусах Фаренгейта или по стоградусной шкале (шкале Цельсия), необходимо указать смещение температурных шкал, т.е. разность между нулевыми температурами этих шкал. Для шкалы Фаренгейта это смещение равно 460, а для шкалы Цельсия 273 (точнее 273,15).
- *Пространственная температура.* При расчете лучистого теплообмена в открытых полостях (для теплового баланса с окружающей средой) ANSYS требует определения пространственной температуры. Каждая полость может иметь свою собственную пространственную температуру.
- *Пространственный узел.* При решении задач лучистого теплообмена, связанных с открытыми полостями, если окружающей средой является другое тело в модели, Вы можете использовать температуру «пространственного узла» для представления температуры окружающей среды.
- *Радиационный решатель.* Этот метод позволяет рассчитывать теплообмен между излучающими телами, учитывая тепловые потоки, излучаемые каждой поверхностью, если известны температуры этих поверхностей. Эти поверхностные тепловые потоки являются граничными условиями для конечно-элементной модели. После расчета новых температур поверхностей на новом шаге по времени или следующем итерационном цикле определяются новые лучистые тепловые потоки на поверхностях (новые граничные условия) и решение повторяется. Поверхностные температуры, используемые при решении, должны быть постоянными на поверхностях.

Использование линейного радиационного элемента LINK31

LINK31 является двух-узловым линейным элементом, предназначенным для расчета теплового потока, обусловленного лучистым теплообменом между двумя точками. Элемент требует задания в форме реальных констант:

- Эффективной площади радиационной поверхности.
- Форм-фактора.
- Степени черноты.
- Константы Стефана-Больцмана.

LINK31 применяется для расчета простых случаев лучистого теплообмена, когда известны или могут быть легко рассчитаны форм-факторы.

Использование элементов с поверхностным эффектом

Удобным способом моделирования лучистого теплообмена между поверхностью и точкой является применение элементов с поверхностным эффектом, нанесенных на поверхность, которая излучает или воспринимает тепловое излучение. ANSYS располагает такими элементами: SURF151 для двумерных моделей и SURF152 для трехмерных. Опция KEYOPT(9) активирует лучистый теплообмен для этих элементов. Форм-фактор может быть задан как реальная константа (по умолчанию он равен 1) с помощью опции KEYOPT(9)=1, или его можно рассчитать (используя KEYOPT(9)=2 или 3), зная ориентацию элемента и расположение дополнительного узла.

Использование метода радиационной матрицы (вспомогательный процессор AUX12)

Только ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical и ANSYS/Professional располагают этим методом. Метод применяется для решения общих задач лучистого теплообмена между двумя или несколькими поверхностями, которые излучают или воспринимают излучение. Метод основан на генерации матрицы форм-факторов для радиационных поверхностей, которая (матрица) используется как суперэлемент при решении задачи. Вы можете включить в расчет экранирован-

ные или частично экранированные поверхности, а также «пространственный узел», к которому отводится лучистый тепловой поток.

Процедура

Метод радиационной матрицы (AUX12) состоит из трех шагов:

1. Определение радиационных поверхностей.
2. Генерация радиационной матрицы.
3. Использование радиационной матрицы для решения задачи.

Определение радиационных поверхностей

Для определения радиационных поверхностей на них наносится сетка из элементов LINK32 для двумерных моделей и элементов SHELL57 для трехмерных моделей. Для этого необходимо выполнить следующее:

1. С помощью препроцессора PREP7 строится геометрическая модель. Радиационные поверхности не подчиняются условиям симметрии, поэтому модели, имеющие радиационные поверхности, нельзя строить с учетом геометрической симметрии, и они должны быть полными. Радиационные поверхности обычно являются поверхностями трехмерной модели и границами двумерной модели, как это показано на рис. 9.

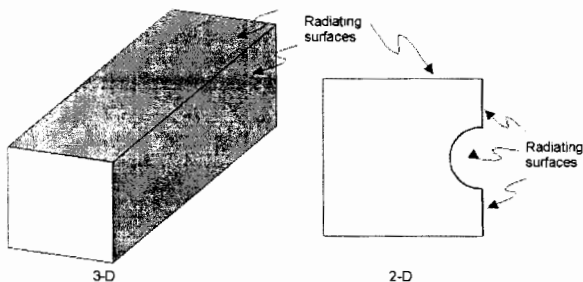


Рис. 9. Радиационные поверхности для трехмерных и двумерных моделей: Radiating surfaces – радиационные поверхности, 3D – трехмерная модель, 2D – двумерная модель

2. На радиационные поверхности наносится сетка из элементов SHELL57 для трехмерных моделей и элементов LINK32 для двумерных моделей, как это показано на рис. 10. Наилучшим образом это можно сделать, создав сначала подмно-

жество поверхностных узлов, а затем строить поверхностные элементы одним из следующих способов:

Команда:

ESURF

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Create > Elements > Surf Effect > Extra Node,

Main Menu > Preprocessor > Create > Elements > Surf Effect > No extra Node.

Прежде всего убедитесь, что в качестве поверхностных элементов активированы соответствующие элементы. Кроме того, если поверхности имеют различные степени черноты, присвойте материалам, из которых составлены поверхности, различные номера прежде, чем создавать элементы.

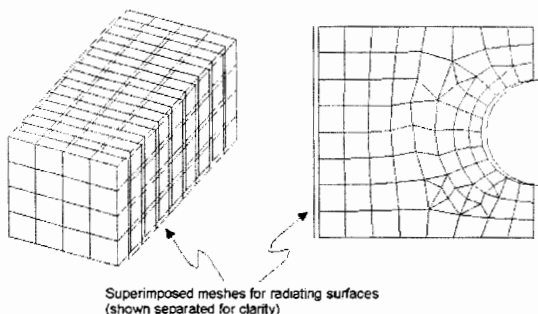


Рис. 10. Элементы, нанесенные на радиационные поверхности (для наглядности показаны отдельно)

Предостережение: Конечно-элементная сетка из поверхностных элементов SHELL57 или LINK32 на радиационных поверхностях должна быть согласована (узел к узлу) с сеткой модели, состоящей из твердотельных элементов. Если такого согласования не будет, результаты расчета будут некорректными.

Ориентация нанесенных элементов имеет важное значение. При генерации радиационной матрицы предполагается, что направление «взгляда» (то есть направление излучения) совпадает с осью $+Z_e$ для элементов SHELL57 и осью $+Y_e$ для элементов LINK32 (где индекс e означает направление внешней нормали в координатной системе элемента). Поэтому сетка из нанесенных элементов долж-

на быть построена таким образом, чтобы излучение происходило от (или к) соответствующей поверхности. Порядок, в котором определены узлы элемента, контролирует ориентацию элемента, как это показано на рис. 11.

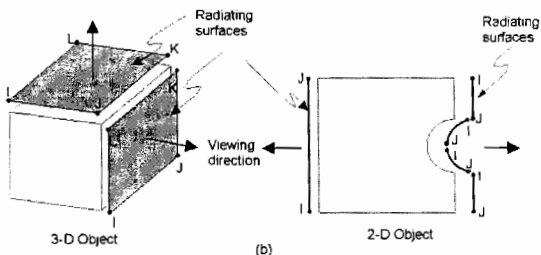


Рис. 11. Ориентация нанесенных (на радиационные поверхности) элементов: Radiating surfaces – радиационные поверхности, Viewing direction – направление взгляда. 3-D Object – трехмерный объект, 2-D Object – двумерный объект

3. Определяется «пространственный узел», который просто является узлом, поглощающим лучистый тепловой поток, не пришедший на другие поверхности модели. Расположение этого узла не является важным. Открытая система обычно требует задания «пространственного узла», но для закрытых систем задавать «пространственный узел» не нужно.

Генерация радиационной матрицы

Для расчета радиационной матрицы необходимы следующие исходные данные:

- Узлы и элементы, которые образуют радиационную поверхность.
- Размерность модели (дву- или трехмерная).
- Степень черноты и константа Стефана-Больцмана.
- Метод, применяемый для расчета форм-факторов (для экранированных или неэкранированных поверхностей).
- «Пространственный узел», если это необходимо.

Для генерации матрицы выполните следующие шаги:

1. Войдите в процессор AUX12 одним из следующих способов:

Команда:

AUX12

или GUI:

Main Menu > Radiation.

2. Выберите узлы и элементы, которые образуют радиационные поверхности. Это легко сделать, выбрав элементы по типу, и затем выбрав принадлежащие им узлы. Для выполнения этого используйте маршрут GUI:

Utility Menu > Select > Entities.

или команды:

ESEL,S,TYPE

и NSLE.

Если Вы определили «пространственный узел», не забудьте выбрать и его.

3. Укажите, является ли Ваша модель дву- или трехмерной, с помощью:

Команды:

GEOM

или GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Other Settings.

Генератор радиационной матрицы AUX12 использует различные алгоритмы при расчете форм-факторов для дву- и трехмерных моделей. По умолчанию модель предполагается трехмерной. Двумерная модель может быть или плоской ($NDIV = 0$), или осесимметричной ($NDIV > 0$). По умолчанию модель плоская. Осесимметричные модели преобразуются в трехмерные и $NDIV$ представляет количество осесимметричных секций. Например, зада-

ние $NDIV$ равным 10 означает задание 10 секций, каждая из которых имеет в сечении, нормальном к оси, центральный угол, равный 36 градусов.

4. Определите степень черноты одним из способов, указанных ниже. По умолчанию степень черноты равна 1.

Команда:

EMIS

или GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Emissivities.

5. Задайте константу Стефана-Больцмана, используя любой из методов, указанных ниже. По умолчанию константа Стефана-Больцмана равна $0.119E-10 \text{ Btu/hr-in}^2\text{-R}^4$. (в системе СИ константа имеет величину $5.67E-8 \text{ Вт/м}^2\text{-К}^4$).

Команда:

STEF

или GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Other Settings.

6. Укажите, как рассчитывать форм-факторы, с помощью:

Команды:

VTYPE

или GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Write Matrix.

Вы можете выбирать между двумя методами, а именно, учитывающим экранирование поверхностей (далее будет называться «с экранированием»), и метод, при использовании которого не нужно учитывать экранирование радиационных поверхностей (далее будет называться «без экранирования»).

- Метод «без экранирования» рассчитывает форм-факторы от каждого элемента к каждому другому элементу независимо от существования блокирующих (лучистый тепловой поток) элементов.
- Метод «с экранированием» (по умолчанию) сначала определяет, какие элементы являются видимыми для всех других элементов (элемент-«цель» является видимым для излучающего элемента, если их нормали указывают друг на друга и отсутствуют блокирующие элементы). Форм-факторы затем рассчитываются следующим образом:
 - Каждый излучающий элемент помещается в единичную полу-сферу (полуокруг для двумерных задач).

- Все элементы-«цели» или воспринимающие излучение элементы проектируются на полусферу или полукруг.
- Для расчета форм-фактора predetermined количество лучей проектируется с излучающего элемента на полусферу или полукруг. Форм-фактор является отношением количества лучей, пересекающих проекции, к общему количеству лучей, выходящих из излучающего элемента. Вообще говоря, точность определения форм-фактора увеличивается по мере увеличения количества лучей. Вы можете увеличить количество лучей с помощью переменной NZONE в команде VTYPE или маршрута GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Write Matrix.

В открывшейся диалоговой панели **Write Radiation Matrix to File** задается количество радиальных зон.

7. Если необходимо, определите «пространственный узел»:

Команда:

SPACE

или GUI:

Main Menu > Radiation Matrix > Other Settings.

8. Используйте или команду WRITE, или опцию меню Write Matrix для того, чтобы записать радиационную матрицу в файл Jobname.SUB. Если Вы хотите записать более чем одну радиационную матрицу, используйте отдельные имена файлов для каждой матрицы. Для распечатки Ваших матриц выполните команду MPRINT,1 (прежде, чем будет выполнена команда WRITE).

9. Для активизации всех узлов и элементов воспользуйтесь следующим:

Командой:

ALLSEL

или GUI:

Utility Menu > Select > Everything.

Теперь Вы располагаете радиационной матрицей, записанной в виде суперэлемента в файл.

Использование радиационной матрицы для решения задач

После записи радиационной матрицы снова войдите в препроцессор (PREP7) и считайте матрицу как суперэлемент. Для этого сделайте следующие шаги:

1. Вход в препроцессор:

Команда:

/PREP7

или GUI:

Main Menu > Preprocessor.

Задайте MATRIX50 (суперэлемент) как один из типов элементов.

2. Переключите указатель типа элемента на суперэлемент, для чего служит:

Команда:

TYPE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > Elements > Elem Attributes.

3. Считайте в суперэлемент матрицу, используя следующие методы:

Команду:

SE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > Elements > -Superelements- From .SUB File.

4. Удалите нанесенную на поверхность сетку из элементов SHELL57 или LINK32, применяя следующее:

Команду:

EDELE

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Delete > Elements.

(Для решения задачи эти элементы не нужны.)

5. Выйдите из препроцессора и войдите в SOLUTION-процессор.

6. Задайте известные граничные условия на «пространственном узле» следующим образом:

Командой:

D, F

или GUI:

Main Menu > Solution > -Loads- Apply... (и т.д.).

Типичным граничным условием является температура (температура окружающей среды), но граничным условием может быть и тепловой поток. Величина граничного условия должна отражать действительные условия в окружающей среде.

7. Продолжайте решение задачи, как об этом было сказано в других частях данного руководства.

Рекомендации по использованию «пространственных узлов»

Несмотря на то, что моделирование лучистого теплообмена не всегда требует задания «пространственных узлов», решение об их использовании или отказ от использования влияют на точность результатов решения задачи. При построении Вашей модели не забывайте о следующих рекомендациях относительно использования «пространственных узлов».

Рекомендации для метода «без экранирования»

Метод «без экранирования» обычно позволяет достаточно точно рассчитывать форм-фактор для любых систем и не требует уделять особое внимание «пространственным узлам». Обычно «пространственный узел» не задают для закрытой системы, но для открытой системы его необходимо задавать. Только одна ситуация требует особого внимания: когда моделируется открытая система, в которой находится излучающее серое тело (степень черноты меньше 1). В этом случае «пространственный узел» гарантирует точные результаты.

Рекомендации для метода «с экранированием»

Для метода «с экранированием» точность расчета форм-фактора в процессоре AUX12 влияет на точность расчета лучистого теплового потока, подводимого к «пространственному узлу». Из-за того, что все неточности расчета аккумулируются (собираются) на «пространственном узле», относительная ошибка в форм-факторе для «пространственного узла» может возрасти в закрытых или почти закрытых системах.

Применение метода «с экранированием» может потребовать увеличения количества лучей, используемых для расчета форм-фактора, и измельчения сетки

для того, чтобы расчет форм-факторов был более точным. Если это невозможно, воспользуйтесь следующими советами при задании «пространственного узла»:

- Для закрытых систем, в которых радиационные поверхности образуют полость и не излучают в окружающую среду, не применяйте «пространственный узел».
- Если постановка задачи делает приемлемым моделирование лучистого теплообмена только между излучающими поверхностями без излучения в окружающую среду, не задавайте «пространственный узел». Это приближение справедливо только для абсолютно черных тел (ϵ которых степень черноты = 1).
- Для почти закрытых систем, если необходимо учитывать излучение в окружающую среду, конечно-элементная сетка, примыкающая к открытой части системы должна иметь ограничение по температуре и ее узлы должны находиться при температуре окружающей среды. Форм-фактор для окружающей среды в этом случае будет рассчитываться более точно.
- Для открытых систем, когда тепловые потери в окружающую среду значительны, Вы можете использовать «пространственный узел» (с заданными граничными условиями) для учета радиационных потерь с приемлемой точностью, используя не слишком мелкую сетку и не слишком большое количество лучей.

Общие рекомендации по применению AUX12 метода радиационной матрицы

Ниже представлены некоторые общие рекомендации по использованию метода радиационной матрицы для решения задач лучистого теплообмена.

- Метод «без экранирования» должен быть использован, если и только если все радиационные поверхности видят друг друга полностью. Если метод «без экранирования» применяется для случаев, когда существует блокирующий эффект, при расчете возникнут значительные неточности и, следовательно, результаты решения могут быть физически неаккуратны, или решение не будет найдено (решение не сойдется).
- Метод «с экранированием» требует значительно большего компьютерного времени, чем метод «без экранирования». Поэтому используйте его только при наличии блокирующих (затеняющих) поверхностей или если поверхности не могут быть сгруппированы.

- В некоторых случаях можно сгруппировать радиационные поверхности таким образом, что каждая группа будет полностью изолирована от других групп с точки зрения лучистого теплообмена. В этих случаях можно существенно сэкономить компьютерное время, создавая отдельные радиационные матрицы для каждой группы и используя метод «без экранирования». (Естественно, внутри группы не должно быть экранирующих радиационных поверхностей.) Прежде, чем записывать радиационную матрицу, соответствующая группа поверхностей должна быть выбрана.
- Для метода «с экранированием» увеличение количества лучей обычно приводит к более точному форм-фактору.
- Для обоих методов более подробная конечно-элементная сетка на радиационных поверхностях приводит к более точному расчету форм-факторов. Однако, при использовании метода «с экранированием» в особенности важно иметь густую сетку для того, чтобы получить такой же уровень точности (при расчете форм-факторов), как и в методе «без экранирования». Хотя увеличение количества используемых лучей (управляемое аргументом *NZONE* в команде VTYPE) увеличивает точность при расчете на грубой сетке, увеличение *NZONE* даже до его максимального значения, не всегда приводит к достаточно точному расчету.
- Для осесимметричных моделей около 20 осесимметричных секторов обеспечивают приемлемую точность расчета форм-факторов. Элементы должны иметь приемлемое соотношение между сторонами, когда они применяются для трехмерных моделей.
- Элементы LINK32, которые используются в качестве нанесенных на радиационную поверхность в плоских двумерных или осесимметричных моделях, сами по себе не поддерживают осесимметричную опцию в осесимметричных моделях. Поэтому позаботьтесь об их удалении перед началом решения задачи.

Теоретически сумма угловых коэффициентов (форм-факторов) данной радиационной поверхности с остальными радиационными поверхностями для закрытых систем должна быть равна 1. Это распечатывается как ***** FORM FACTORS ***** TOTAL= *Value* для каждой радиационной поверхности, если для этого используется команда MPRINT,1. Для открытых систем суммирование всегда дает величину меньшую 1. Одним из способов проверки корректности расчета угловых коэффициентов является использование команды MPRINT,1. Если сумма

форм-факторов для какой-либо радиационной поверхности превышает 1, следует искать ошибку. Это может случиться, если (по невнимательности) метод «без экранирования» применяется для расчета угловых коэффициентов между радиационными поверхностями, затеняющими друг друга.

Использование радиационного решателя

Предлагаемый ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical и ANSYS/Professional (только) метод позволяет решать общие задачи лучистого теплообмена, включающие две или более поверхностей, излучающих и воспринимающих тепловое излучение. Метод поддерживается трехмерными или двумерными элементами, имеющими температурную степень свободы.

Процедура

При использовании радиационного решателя выполняются 5 шагов:

1. Определяются радиационные поверхности.
2. Определяются опции для метода расчета.
3. Определяются опции для форм-фактора.
4. Рассчитываются или запрашиваются форм-факторы.
5. Определяются граничные условия.

Определение радиационных поверхностей

Радиационные поверхности определяются посредством решения следующих задач:

1. В препроцессоре (PREP7) строится тепловая модель. Радиационные поверхности не обладают свойством симметрии, поэтому при построении модели с радиационными поверхностями нельзя воспользоваться преимуществами геометрической симметрии и модель должна быть полной. Для радиационного решателя радиационные поверхности являются поверхностями в трехмерных моделях и сторонами в двумерных (моделях). Радиационный решатель позволяет рассчитывать вплоть до 10 полостей с поверхностями, излучающими друг на друга.
2. Отметьте радиационные поверхности с одной и той же степенью черноты и номером полости, используя команды SE, SFA, SFE или SFL. Для всех

поверхностей или линий (граней), излучающих друг на друга, задайте один и тот же номер полости.

Зависимая от температуры степень черноты задается командами SF, SFA, SFE или SFL с параметром *VALUE* = -N. Степени черноты EMIS находятся в таблице свойств для материала N [MP].

3. Убедитесь, что для отмеченных радиационных поверхностей правильно указаны степени черноты, номера полостей и направления излучения. Это делается следующим образом:

Командой:

/PSF

или GUI:

Utility Menu > PlotCtrls > Symbols.

При постановке граничных условий на радиационных поверхностях с элементами SHELL57 или SHELL157 необходимо указать номер поверхности и отметить ее ориентацию (определить внешнюю или внутреннюю нормаль). Для этого можно воспользоваться командами SF, SFA или SFE. Команды SF и SFA задают граничные условия только на поверхности 1 оболочечного элемента. Для задания граничного условия на поверхности 2 или на обеих поверхностях оболочечных элементов применяется команда SFE. Информация об ориентации и нумерации поверхностей элементов SHELL57 и SHELL157 находится в ANSYS Elements Reference.

Задание опций для метода расчета

При решении задач лучистого теплообмена также необходима константа Стефана-Больцмана в соответствующей системе единиц измерения.

Для задания этой константы служит:

Команда:

STEF

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Solution Option,

Main Menu > Radiation > Solution Option,

Main Menu > Solution > Solution Option.

Если в Вашей модели используются градусы Фаренгейта или Цельсия, необходимо задать смещение температурных шкал. Для этого применяется:

Команда:

TOFFST

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Solution Option,

Main Menu > Radiation > Solution Option,

Main Menu > Solution > Solution Option.

Затем выбирается радиационный решатель: прямой или итеративный (по умолчанию). Также Вы можете задать коэффициент релаксации и допуск на плотность теплового потока, обеспечивающий сходимость. Это делается следующим образом:

Командой:

RADOPT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Solution Option,

Main Menu > Radiation > Solution Option,

Main Menu > Solution > Solution Option.

Если решается задача для открытой полости, необходимо задать температуру окружающей среды или узел окружающей среды («пространственный узел») для каждой полости. Задайте температуру окружающей среды в случае лучистого теплообмена с окружающей средой:

Команда:

SPCTEMP

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Solution Option,

Main Menu > Radiation > Solution Option,

Main Menu > Solution > Solution Option.

С помощью команды SPCTEMP задается пространственная температура для каждой полости. Используя эту команду можно также вывести список или удалить все заданные пространственные температуры. Для задания «пространственного узла» применяются:

Команда:

SPCNOD

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Solution Option,

Main Menu > Radiation > Solution Option,

Main Menu > Solution > Solution Option.

Если в модели окружающей средой является другое тело, «пространственный узел» для учета излучения на это тело должен быть задан для каждой полости командой SPCNOD. Радиационный решатель задает для указанных узлов температуры равными температурам окружающей среды. С помощью команды SPCNOD вы также можете вывести список или удалить все заданные «пространственные узлы».

Задание опций для форм-фактора

При расчете новых форм-факторов (угловых коэффициентов излучения) в трехмерных или двумерных моделях можно задавать различные опции посредством:

Команды:

HEMIOPT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > View Factor Option,

Main Menu > Radiation > View Factor Option,

Main Menu > Solution > View Factor Option.

Команда HEMIOPT позволяет задать разрешение при расчете форм-фактора для трехмерной модели полукубическим методом. По умолчанию разрешение равно 10. Увеличение величины разрешения увеличивает точность расчета форм-фактора:

Команда:

V2DOPT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > View Factor Option,

Main Menu > Radiation > View Factor Option,

Main Menu > Solution > View Factor Option.

Команда V2DOPT позволяет назначить опции при расчете форм-фактора для двумерной модели. Тип геометрии, который может быть выбран, является двумерным плоским или осесимметричным (по умолчанию плоский). Также можно определить количество секторов, на которое делится осесимметричная модель (по умолчанию 20). С помощью этой команды выбирается метод расчета форм-фактора, т.е. «с экранированием» или «без экранирования» (по умолчанию «с экранированием»), а также количество зон для расчета форм-фактора (по умолчанию 200).

Вы можете задать или расчет новых форм-факторов, или использование существующих. Для этого служит:

Команда:

VFOPT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > View Factor Option,

Main Menu > Radiation > View Factor Option,

Main Menu > Solution > View Factor Option.

Команда VFOPT, *Opt* позволяет рассчитать новые форм-факторы и записать их в файл (*Opt* = NEW). Если форм-факторы уже существуют в базе данных, эта команда позволяет деактивировать расчет нового форм-фактора (*Opt* = OFF). OFF является опцией по умолчанию до тех пор, пока не встретится с новой опцией при выполнении второй и следующих команд SOLVE в /SOLU. После первой команды SOLVE ANSYS использует форм-параметры, существующие в базе данных до тех пор, пока они не переписываются командой VFOPT.

Расчет или запрос форм-факторов

Затем Вы рассчитываете форм-факторы. Можно также запросить форм-фактор из базы данных и рассчитать средний форм-фактор. Расчет и хранение форм-факторов производится следующим образом:

Командой:

VFCALC

или GUI:

Main Menu > Radiation > Compute.

Список рассчитанных форм-факторов для выбранных излучающих или воспринимающих излучение элементов по запросу из базы данных (форм-факторов) и расчет средних форм-факторов:

Команда:

VFQUERY

GUI:

Main Menu > Radiation > Query.

С помощью команды *GET,Par,RAD,,VFAVG можно восстановить рассчитанный средний форм-фактор.

Задание граничных условий

Наконец, Вы должны задать начальную температуру, если расчет начинается с одной и той же постоянной температуры. Затем задаются или количество шагов по времени, или величина шага по времени, а также определяются линейно изменяющиеся граничные условия.

Задание постоянной температуры на всех узлах происходит следующим образом:

Командой:

TUNIF

или GUI:

Main Menu > Solution > Settings > Uniform Temp.

Для задания количества шагов по времени или величины шага по времени служат:

Команды:

NSUBST или DELTIM,

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Freq and Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time and Substps,

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequenc > Time-Time Step.

Из-за того, что лучистый теплообмен является в высшей степени нелинейным явлением, граничные условия должны изменяться линейно (на каждом шаге по времени). Для задания этой опции применяются:

Команда:

KBC

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Opts- Time/Frequency > Time-Time Step.

Дальнейшие рекомендации для решения стационарных задач

1. Определите постоянную плотность и удельную теплоемкость с помощью команды MP. Можно использовать типичные произвольные величины плотности и теплоемкости. Точные значения этих величин не являются важными, так как задача стационарная (но решается методом установления).

2. Закажите нестационарное решение, с помощью:

Команды:

ANTYPE

или GUI:

Main Menu > Solution > New Analysis.

3. Запустите на счет квазистатическую задачу и дождитесь установления стационарного состояния:

Команда:

QSOPT

или GUI:

Main Menu > Preprocessor > Loads > -Load Step Options- Time/Frequency > Quasi-Static.

Команда QSOPT доступна только в том случае, когда первый ключ (*Key1*) команды SOLCONTROL находится в состоянии ON или равен 1. Команда OPNCONTROL позволяет задать допуск для критерия сходимости по температуре.

В зависимости от теплофизических свойств материала модели (то есть плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности) изменения температуры могут оказаться малыми в самом начале расчета. При выполнении команды QSOPT и заданном по умолчанию конечном времени ($TIME = 1$) Вы можете получить решение прежде, чем будет достигнуто стационарное состояние. Для получения реального стационарного состояния придерживайтесь следующей стратегии:

- Уменьшите допуск на стационарную температуру, задаваемый командой OPNCONTROL. Вы должны знать, что при этом для достижения реального стационарного состояния может потребоваться длительное время.
- Увеличьте конечное время (TIME) и величину шага по времени (DELTIM) для того, чтобы значительные изменения температуры приходились на более позднее время.

Пример решения двумерной задачи лучистого теплообмена с помощью радиационного решателя (командный метод)

В этом примере рассматриваются два круглых кольца (показанных на рис. 12), расположенных с эксцентриситетом и облучающих друг друга. Внешняя поверхность внутреннего кольца имеет степень черноты 0,9, а его внутренняя поверхность поддерживается при температуре 1500°F. Внутренняя поверхность внешнего кольца имеет степень черноты 0,7, а его наружная поверхность имеет температуру 100°F. Температура в пространстве внутри малого кольца равна 70°F.

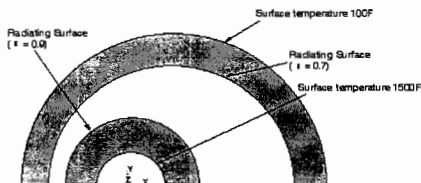


Рис. 12. Лучистый теплообмен между круглыми кольцами: Radiating Surface – радиационная поверхность, Surface temperature – температура поверхности, ε – степень черноты

Команды для построения модели и решения задачи

Следующая последовательность команд ANSYSa строит конечно-элементную модель и решает задачу. Текст, следующий за восклицательным знаком (!), является комментарием.

```

/TITLE,RADIATION BETWEEN CIRCULAR ANNULUS
! Пример решения двумерной задачи лучистого теплообмена
! с помощью радиационного решателя
/PREP7
CYL4,0,0,.5,0,.25,180      ! Круглое кольцо 1
CYL4,0.2,0,1,0,.75,180    ! Круглое кольцо 2
ET,1,PLANE55              ! Двумерный тепловой элемент
LSEL,S,LINE,,1
SFL,ALL,RDSF,.9, 1,      ! Радиационное граничное условие
                           ! на внутреннем кольце

LSEL,S,LINE,,7
SFL,ALL,RDSF,.7, 1,      ! Радиационное граничное условие
                           ! на внешнем кольце

LSEL,S,LINE,,3
DL,ALL, ,TEMP,1500,1      ! Температура на внутреннем кольце
LSEL,S,LINE,,5
DL,ALL, ,TEMP,100,1      ! Температура на внешнем кольце

```

```
ALLSEL
STEP,0.119E-10
TOFFST,460
RADOPT,0.5,0.01,0,
SPCTEMP,1,70
V2DOPT,0.0,0.0,
ESIZE,0.05,
AMESH,ALL
MP,KXX,1,.1
FINISH
/SOLU
TIME,1
DELTIM,.5,.1,1
NEQIT,1000
SOLVE
FINISH
/POST1
ASEL,S,AREA,,1
NSLA,S,1
PRNSOL,TEMP
FINISH
```

```
! Константа Стефана-Больцмана
! Сдвиг температурных шкал
! Опции радиационного решателя
! Температура внутри полости 1
! Опции для двумерного форм-фактора
```

```
! Теплопроводность
```