

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 FLOTRAN 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 FLOTRAN 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)	Сосредоточенная 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>	--