

Таким образом, мы решили задачу о распределении температур в поршне на режиме холостого хода. Аналогично этой задаче решается задача о распределении температуры в поршне на номинальном режиме.

### **Вопросы для самопроверки и практические задания**

1. Что такое граничные условия?
2. Каким образом задаются граничные условия в программной среде *Ansys Workbench*?
3. Граничные условия какого рода задаются при решении задач теплообмена?
4. Последовательность каких команд определяет задание материала в проекте?
5. Какие свойства материала отвечают за корректное решение задачи о распределении температур?
6. С помощью каких команд возможно настроить КЭМ в программной среде *Ansys Workbench*?
7. За что отвечает команда *Mesh – Sizing*?
8. За что отвечает команда *Mesh – Refinement*?
9. Каковы причины при возникновении ошибок при построении конечно-элементной сетки?
10. Какая функция позволяет осуществить равномерное построение сетки на поверхности модели?
11. Оцените влияние конечного элемента на результат расчета поля температур в поршне. Найдите оптимальное решение с точки зрения времени расчета, точности, точности и времени расчета.
12. Получите распределение температур в поршне при реализации режима работы номинальной мощности и холостого хода. Сравните и проанализируйте результаты.
13. Оцените тепловые потоки, температурные градиенты в поршне при симуляции различных тепловых режимов работы.

## **Лабораторная работа № 3**

### **ЗАДАЧА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОРШНЯ**

#### **Теоретическая часть**

При работе на неустановившихся режимах, характерных для эксплуатации большинства современных двигателей, тепловое состояние порш-

ня изменяется во времени, поэтому задача определения поля температур в отдельных точках в текущие моменты времени связана с решением уравнения теплопроводности, которое при постоянных теплофизических характеристиках материала имеет вид:

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t},$$

где  $\nabla$  – оператор Лапласа;  $a = \lambda / (\rho c)$  – температуропроводность материала;  $T$  – температура в точке;  $\rho, c, \lambda$  – соответственно плотность, теплоемкость, теплопроводность материала;  $Q$  – количество теплоты, выделяющейся в единице объема в единицу времени внутренними источниками теплоты (при их наличии);  $t$  – время.

Используя МКЭ, узловые температуры КЭМ модели поршня определим после решения системы дифференциальных уравнений:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [K] \{T\} + \{F\} = 0,$$

где  $[C]$  – матрица теплоемкости КЭМ;  $[K]$  – матрица теплопроводности КЭМ;  $\{F\}$  – вектор тепловой нагрузки КЭМ.

Для решения нестационарной задачи теплопроводности сначала решаем стационарную задачу. Узловые температуры КЭМ в начальный момент времени определяются после решения системы линейных уравнений:

$$[K] \{T\} = \{F\}$$

При решении нестационарной задачи теплопроводности определяется распределение температуры в поршне при изменении ГУ.

Задание нестационарного нагружения на поршень будем осуществлять по следующей схеме:

- проведем стационарный расчет теплового состояния с ГУ, соответствующими режиму работы двигателя на холостом ходу;
- проведем нестационарный расчет поршня, выбрав в качестве начального теплового состояния результаты предыдущего расчета, а в качестве ГУ выберем условия теплообмена, соответствующие режиму работы двигателя на режиме номинальной мощности.

### **Практическая часть**

Для того чтобы установить связь между двумя расчетами, воспользуемся блочной компоновкой проекта. Для добавления нестационарного расчета в проект переходим в блок *B* и выбираем пункт *Solution*. Нажав ПКМ

на *Solution*, используем команду *Transfer Data to New – Transient Thermal (Ansys)*, после чего будет создан блок *C* нестационарного теплового расчета (рис. 3.1).

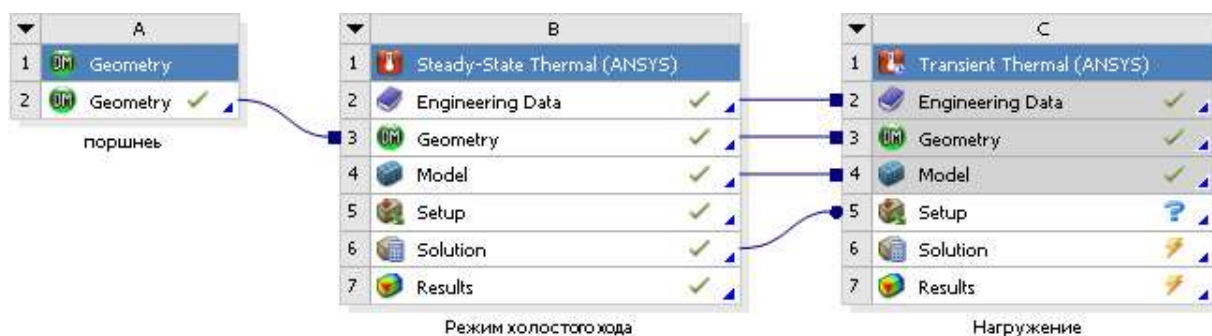


Рис. 3.1. Окно проекта после добавления нестационарного расчета

Отметим, что модель, сетка и материал поршня скопировались из предыдущего расчета, и не требуют корректировки, о чем свидетельствуют зеленые галочки напротив этих пунктов (справа строки).

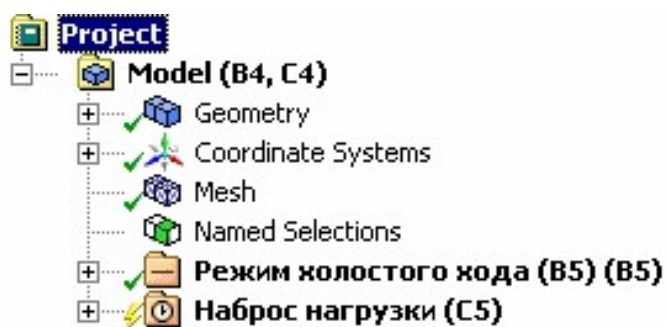


Рис. 3.2. Дерево моделирования нестационарного расчета

Для проведения расчета выбираем в блоке *C* пункт *Setup* и нажимаем ПКМ – *Edit...*. Открывается привычное графическое окно проекта. Теперь это дерево содержит нестационарную задачу теплообмена *Transient Thermal* (рис. 3.2).

Поскольку мы планируем в качестве ГУ, так же как и в предыдущем расчете, использовать коэффициент теплообмена и температуру окружающей среды, то выполним копирование нагрузок из блока *B5*. Для этого выделим все нагрузки в стационарном расчете и нажмем *Copy*. После этой процедуры выделим анализ *C5* (нестационарный расчет) и через ПКМ выберем *Paste*.

Так как скопировались ГУ со значениями холостого хода, необходимо провести изменения и установить новые значения, соответствующие режиму работы двигателя на номинальной мощности.


При нестационарном расчете необходимо задаваться начальной температурой, конечным временем расчета и расчетным шагом (интервалом). На каждом расчетном шаге, то есть на каждом временном интервале, будут получены результаты.

Начальные температуры будут заимствованы из предыдущего расчета. В этом можно убедиться, посмотрев в дереве проекта строку *Initial Temperature Environment* (начальная температура) (рис. 3.3). Строка *Time* указывает временной шаг, из которого будут читаться температуры модели. В данном случае этот параметр стоит по умолчанию.

<b>Definition</b>	
Initial Temperature	Non-Uniform Temperature
Initial Temperature Environment	Режим холостого хода (B5)
Time	1, s

Рис. 3.3. Параметры настройки начальной температуры расчета

Что касается строки *Initial Temperature*, она информирует, что начальная температура модели неравномерна.

Основные настройки решаемой задачи производятся в окне  Analysis Settings (рис. 3.4).

Details of "Analysis Settings"		
<b>Step Controls</b>		
Number Of Steps	1,	← количество шагов
Current Step Number	1,	← текущий шаг
Step End Time	10, s	← конечный шаг
Auto Time Stepping	On	← автоматический выбор шага
Define By	Time	← управление шагом по времени
Initial Time Step	1, s	← начальный шаг
Minimum Time Step	1, s	← минимальный шаг
Maximum Time Step	1,5 s	← максимальный шаг
Time Integration	On	← интегрирование по времени
<b>Solver Controls</b>		
Solver Type	Program Controlled	← настройка решателя
<b>Nonlinear Controls</b> ← настройка контроля сходимости по выбранному параметру		
Heat Convergence	Program Controlled	← Контроль теплового потока
Temperature Convergence	Program Controlled	← Сходимость по температуре
Line Search	Program Controlled	
Nonlinear Formulation	Program Controlled	
<b>Output Controls</b>		
Calculate Thermal Flux	Yes	← подсчет теплового потока
Calculate Results At	All Time Points	← подсчет температур для каждого шага
Cache Results in Memory (Beta)	Never	← настройка хранения результатов
<b>Analysis Data Management</b>		
Solver Files Directory	H:\Project\WLG\Y\__Raschet DVS\Rasc...	← Путь директории с решаемой задачей
Future Analysis	None	
Scratch Solver Files Directory		
Save ANSYS db	No	← установка на сохранения файла *.db
Delete Unneeded Files	Yes	
Nonlinear Solution	No	
Solver Units	Active System	← установка единиц измерения
Solver Unit System	mks	
<b>Visibility</b>		
[A] Convection (Convection Co...	Display	← настройка
[B] Convection (Temperature)	Display	

Рис. 3.4. Параметры настройки анализа

Первый пункт *Step Control* позволяет настраивать количество шагов решения и индивидуальные особенности для каждого расчетного шага.

Второй пункт *Solver Control* управляет опциями решателя. В *Ansys Workbench* используются два решателя: прямой (*Direct Solver*) и итерационный (*Iterative Solver*).

Третий пункт *Nonlinear Control* используется для контроля сходимости при решении задач. По умолчанию установлено значение, контролируемое программно. Для задания собственного критерия необходимо выбрать и изменить режим *Program Controlled* на *On* и установить величину критерия сходимости.

Пункт *Output Control* позволяет расчетчику настроить результаты исследования согласно его требованиям. То есть у пользователя имеется возможность выводить лишь те данные, которые его интересуют. Кроме того, существует дополнительная возможность рассчитывать результаты частично для указанных шагов, что позволяет сэкономить машинное время.

После настройки исходных данных настроим выходные результаты и запустим расчет нестационарного теплообмена. После выполнения расчета дерево построения Outline должно выглядеть подобно рис. 3.5.

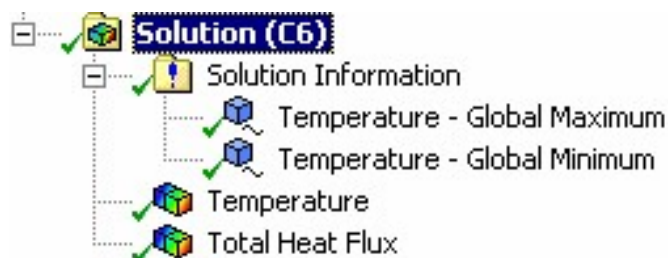


Рис. 3.5. Дерево результатов расчета

В строках *Temperature – Global maximum* и *Temperature – Global minimum* содержатся результаты расчета глобального максимума и минимума температуры поршня. Наведение курсора на одну из этих строчек вызывает графическое окно, ко-

торое содержит график изменения температуры глобального максимума в зависимости от времени нагружения (рис. 3.6). Кроме того, на вкладке дополнительного окна *Tabular Data* находится табулированное значение глобального максимума температуры модели.

Для того чтобы оценить изменение температуры в интересующей нас точке, воспользуемся еще одной дополнительной функцией – Проба. Выполним команду *Solution – Insert – Probe*. В появившемся окне *Details of “Tabular Data”* (рис. 3.7) укажем интересующие нас геометрические объекты и нажмем “*Apply*”.

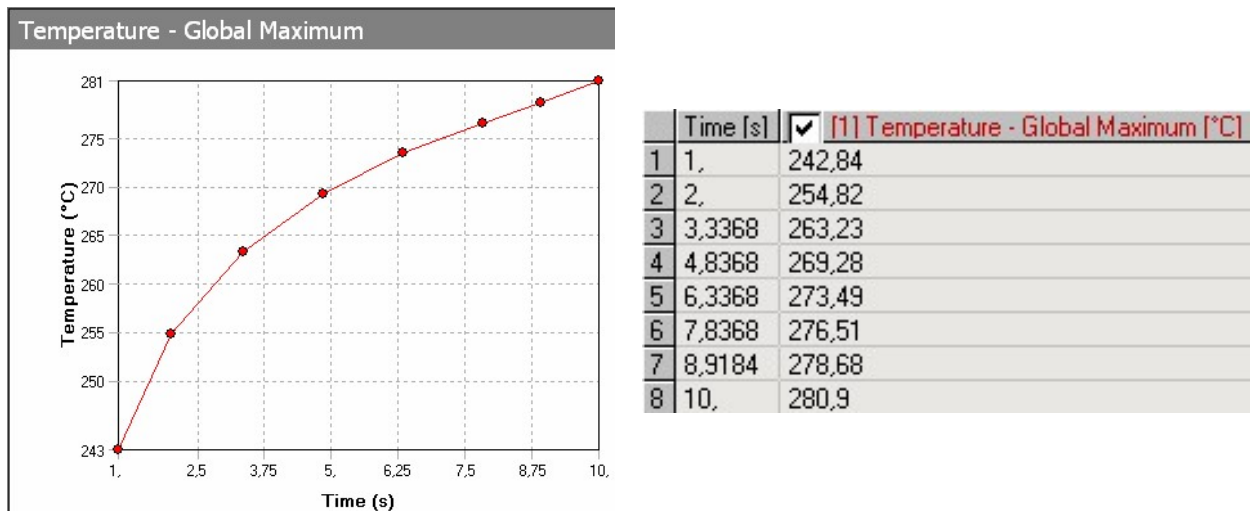
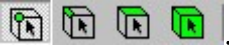


Рис. 3.6. Окно результатов расчета

Definition	
Type	Temperature
Location Method	Geometry Selection
Geometry	1 Vertex
Options	
Display Time	End Time
Spatial Resolution	Use Maximum

Рис. 3.7. Окно настройки пробы

Для отдельного выбора точек, линий, поверхностей или тел используется фильтр выбора геометрии. Панель его выглядит следующим образом .

Для того чтобы программа вычислила результаты изменения температуры в указанных точках, выполняем команду *Temperature Probe – Evaluate all result*.

Аналогично с рис. 3.6 будут получены результаты изменения температуры объекта в зависимости от времени нагружения.

Таким образом, мы решили задачу о нестационарном нагружении поршня. Аналогично решается задача о сбросе нагрузки. Вместо начальных условий используются ГУ номинальной мощности, а при решении нестационарной задачи прикладываются ГУ холостого хода.

Окно проекта, включающего два стационарных и два нестационарных расчета, приведено на рис. 3.8.

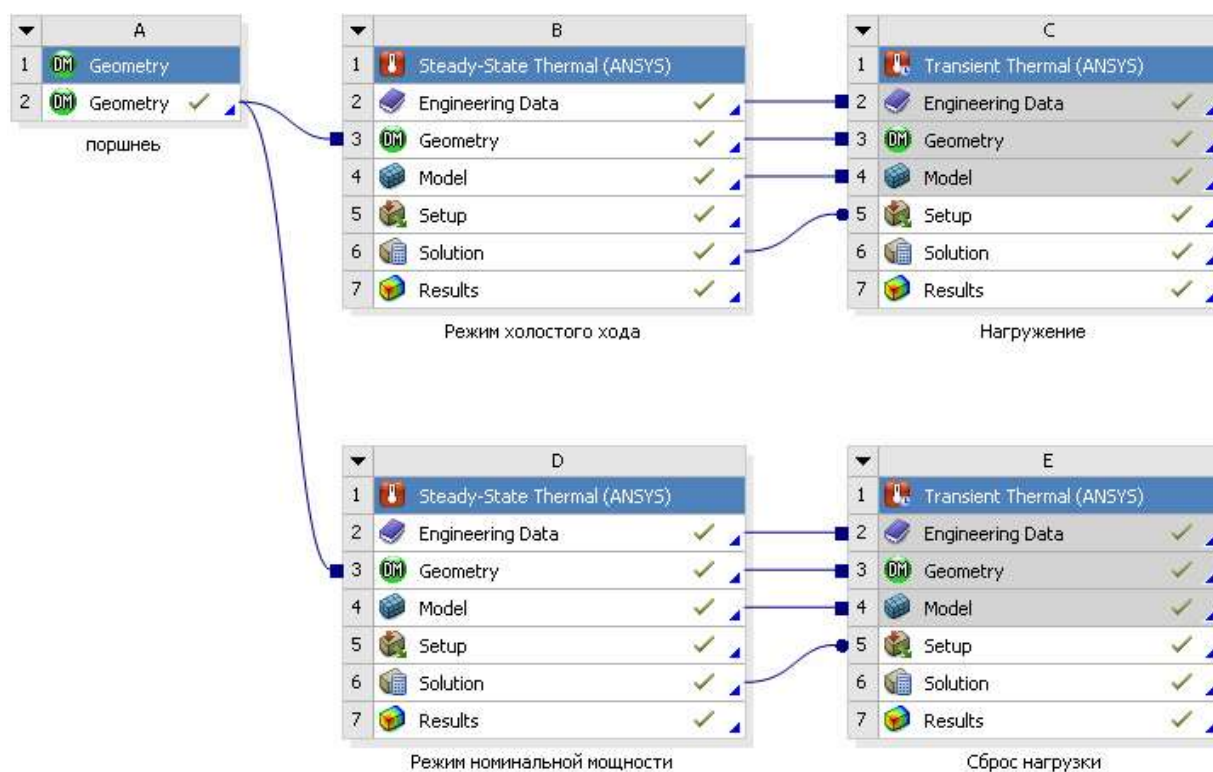


Рис. 3.8. Готовая схема проекта

### Вопросы для самопроверки и практические задания

1. Проведите самостоятельно нестационарный тепловой расчет поршня, выданного преподавателем. Подготовьте отчет по проделанной работе.
2. Оцените и проанализируйте влияние материала на изменение теплового состояния поршня (алюминиевые сплавы, чугун, сталь)?
3. Приведите в графическом виде, используя средства *Ansys Workbench*, изменение температуры в некоторых точках поршня.
4. Каким образом устанавливается расчетное время нагружения?
5. Что такое сходимость задачи?
6. Что такое критерий сходимости задачи?
7. Какие критерии сходимости может использовать пользователь *Ansys Workbench*?
8. Используя модель поршня с галерейным масляным охлаждением, проведите расчет его теплового состояния по схеме, указанной в лабораторной работе. Оцените влияние охлаждения поршня на тепловое состояние.
9. Поэкспериментируйте с расположением масляного канала по критерию оптимального теплового состояния.

10. Попробуйте самостоятельно выполнить все приведенные выше расчеты, а их четыре в одном блоке. Каким образом это можно реализовать?

#### Лабораторная работа № 4

### АНАЛИЗ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

#### Теоретическая часть

ДВС эксплуатируются на неустановившихся режимах работы в широком диапазоне частоты вращения коленчатого вала, при этом угловая скорость и момент на валу двигателя непрерывно изменяются во времени. Переходные процессы, возникающие в цилиндре ДВС во время эксплуатационных режимов работы, в частности тракторных дизелей (трогание трактора с заглаблением плуга, с прицепом, переключение передач), являются наиболее неблагоприятными для деталей ЦПГ.

Непрерывное чередование циклов, в течение каждого из которых изменяются в широких пределах давление и температура газов в цилиндре, скорость перемещения поршня и активная поверхность теплообмена, создает чрезвычайно сложные условия нагружения поршня.

Для тракторных дизелей с КС в поршне характерны наибольшие скорости изменения температуры при набросе и сбросе нагрузки ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), а также наибольшие значения температурных градиентов ( $3\dots 7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ ) [3, 5, 6].

Термические (термоусталостные) разрушения обусловлены воздействием тепловых нагрузок. Такие разрушения могут присутствовать в виде трещин на кромке КС. Наличие даже небольшой трещины на кромке КС может стать причиной разрушения поршня вследствие ее дальнейшего роста.

К основным причинам образования трещин на кромке КС относятся:

- переменные напряжения, вызываемые воздействием переменного давления газов в цилиндре в течение рабочего цикла;

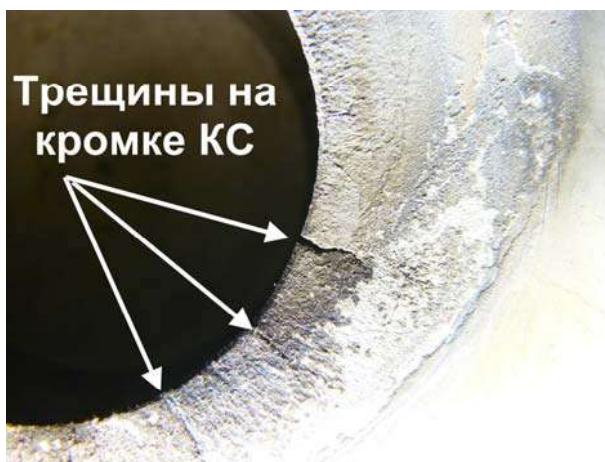


Рис. 4.1. Расположение трещин в кромке КС поршня тракторного дизеля