

Лабораторная работа

СТАЦИОНАРНОЕ ТЕПЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ПОРШНЯ

Теоретическая часть

Задача определения поля температур связана с решением уравнения теплопроводности, которое при постоянных теплофизических характеристиках материала имеет вид

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - Q = 0,$$

где K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты теплопроводности материала поршня в соответствующих направлениях, Вт/(м·К); Q – количество теплоты, выделяющейся в единице объема внутренними источниками теплоты (при их наличии).

Уравнение при использовании МКЭ преобразуется к системе линейных уравнений. Узловые температуры конечноэлементной модели поршня определим после решения этой системы уравнений

$$[K]\{T\} + \{F\} = 0,$$

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

Для решения задачи о тепловом состоянии поршня необходимо задать граничные условия теплообмена на его поверхности. В качестве основных ГУ, описывающих тепловое взаимодействие поверхностей поршня и окружающей среды, используются следующие:

условие I рода – распределение температуры на поверхности F

$$T = T_{\Pi}(x, y, z),$$

где $T_{\Pi}(x, y, z)$ – заданная на поверхности поршня функция температуры, полученная с помощью обработки индикаторной диаграммы или результатов термометрирования поршня;

условие II рода – плотность теплового потока q_0 через поверхность F или часть ее

$$q_0 = -\lambda \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n},$$

где n – внешняя нормаль к поверхности тела в точке с координатами x, y, z ;

условие III рода – температура окружающей среды T_∞ и закон теплообмена α между средой и поверхностью поршня F

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} = \alpha(T - T_\infty),$$

где α – коэффициент теплоотдачи с окружающей средой на поверхности поршня, Вт/(м²·К); T, T_∞ – температура в определенной точке поршня и температура окружающей среды над этой точкой, К; λ – коэффициент теплопроводности материала поршня, Вт/(м·К).

Для расчета теплового состояния поршня принято задавать ГУ I и III рода.

Для определения численного значения коэффициента теплоотдачи α на поверхности камеры сгорания поршня в качестве исходного уравнения могут использоваться критериальные уравнения Г. Вошни

$$\alpha_{\text{Вошни}} = 127,9 D^{-0,2} T_\infty^{-0,53} p^{0,8} \left[C_m C_1 + C_2 \frac{V_h T_a}{p_a V_a} (p - p_0) \right], \quad (2.1)$$

если выражение

$$2C_1 C_m \left(\frac{V_c}{V_\varphi} \right)^2 C_3 \geq C_2 \frac{V_h T_a}{p_a V_a} (p - p_0),$$

то

$$\alpha_{\text{Вошни}} = 127,9 D^{-0,2} T_\infty^{-0,53} p^{0,8} \left[C_m C_1 \left(1 + 2 \left(\frac{V_c}{V_\varphi} \right)^2 C_3 \right) \right]^{0,8}.$$

Здесь в уравнении $C_1 = 6,18 + 0,417 C_u / C_m$ – для процессов газообмена; $C_1 = 2,28 + 0,308 C_u / C_m$ – для процессов сжатия – сгорания – расширения; $C_2 = 0,00324$ – для дизелей с непосредственным впрыскиванием, м/(с·К); $C_3 = 1 - 1,2 \exp(-0,65 \alpha_B)$.

Кроме того, при определении коэффициентов теплоотдачи рекомендуется использовать также зависимость Г. Хохенберга

$$\alpha_{\text{Хохенберг}} = C_1 V_\varphi^{-0,06} T_\infty^{-0,4} p^{0,8} (C_m + C_2)^{0,8}, \quad (2.2)$$

где $C_1 = 130$ и $C_2 = 1,4$.

В формулах (2.1) и (2.2) T_a – температура рабочего тела в начале такта сжатия, К; D – диаметр цилиндра, м; p, p_0, p_a – текущее давление в цилиндре, окружающей среды и начала сжатия, бар; C_m – средняя скорость поршня, м/с; V_a, V_c, V_φ, V_h – объем цилиндра в начале такта сжатия, сгорания, а также текущий и рабочий объем цилиндра, м³; α_B – коэффициент избытка воздуха; C_u / C_m – отношение тангенциальной скорости вращающегося заряда к средней скорости поршня.

Поскольку формулы Вошни и Хохенберга не позволяют получить удовлетворительные результаты, то хорошее совпадение значений α с экспериментальными данными вероятно при использовании среднеарифметического их значения

$$\alpha = (\alpha_{\text{Вошни}} + \alpha_{\text{Хохенберг}}) / 2.$$

В некоторых случаях можно воспользоваться следующей зависимостью для определения коэффициента теплоотдачи со стороны КС (формула Эйхельберга)

$$\alpha = (6,1 + 0,65 P_e) \sqrt{T_a} \sqrt[3]{C_m},$$

где T_a – температура начала сжатия, К; C_m – средняя скорость поршня, м/с; P_e – среднее эффективное давление, кг/см² (1 МПа = 10 кг/см²).

Мы рассмотрели несколько способов численного определения коэффициентов теплоотдачи на поверхности поршня. С остальными методами расчета можно ознакомиться в специализированной литературе.

Практическая часть

Решение задачи о тепловом стационарном нагружении поршня выполним в несколько этапов.

Импорт или создание трехмерной модели в любой доступной среде трехмерного моделирования (*SolidWorks*, *Компас*, *DesignModeler* и т.п.).

Создание конечно-элементной модели (КЭМ) поршня.

Задание граничных условий теплообмена.

Решение стационарной задачи теплопроводности.

Анализ температурного состояния поршня.

1. Создание трехмерной модели (или импортирование)

На панели *Toolbox* выбираем категорию *Component System* и запускаем подпрограмму *Geometry* для создания или импорта детали. После выполнения данной команды в окне *Project Schematic* будет создан блок А.

2. Создание конечно-элементной модели поршня

Для создания КЭМ модели поршня используем модуль симуляции *Ansys Mechanical*. Для запуска этого модуля мы должны к уже существующему блоку А, содержащему геометрию поршня, добавить блок, содержащий расчет теплового состояния.

Для этого в окне *Toolbox* выберем с помощью ЛКМ иконку теплового анализа  *Steady-State Thermal (ANSYS)* и перенесем ее в свободное место в окне (рис. 2.1). Перед нами появится блок В, представляющий собой тепловой расчет поршня и разделенный на элементы (рис. 2.2). Вкратце опишем каждый элемент более детально:

Engineering Data – библиотека, содержащая модели материалов.

Geometry – геометрия расчетной модели.

Model – этот элемент содержит конечно-элементную сетку геометрической модели.

Setup – блок, содержащий настройки кинематических и силовых ГУ, а также настройки решателя.

Solution и *Results* – решение и просмотр результатов решения.

Для того чтобы осуществить связь между блоками, необходимо с нажатой ЛКМ перетащить геометрию модели из блока А в блок В. После этого окно схемы проекта будет аналогично рис. 2.2.

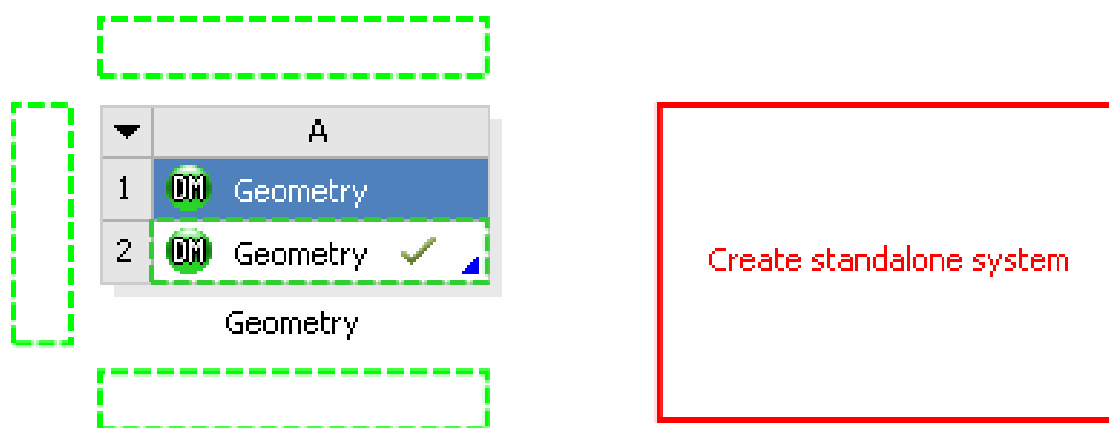


Рис. 2.1. Схема проекта при создании нового блока

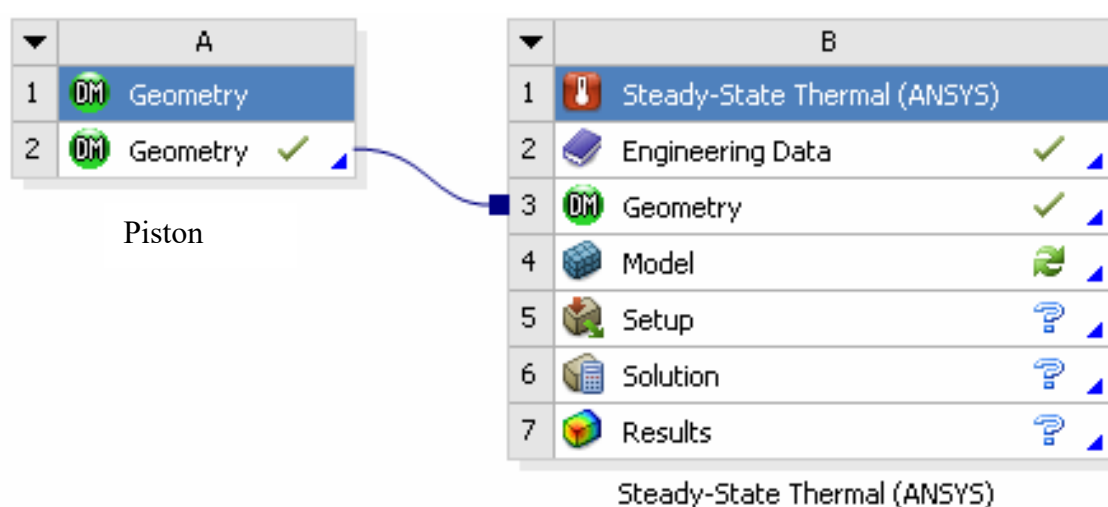


Рис. 2.2. Вид схемы проекта теплового анализа поршня

После этого приступаем к созданию конечно-элементной сетки, для чего нажимаем ПКМ на 4-м пункте блока В (см. рис. 2.2). В появившемся контекстном меню выбираем функцию редактирования  **Edit...** для запуска модуля *Mechanical*.

Сетка конечных элементов является базисом для построения системы линейных уравнений. Конечно-элементную сетку можно получить двумя способами: автоматически и вручную.

При автоматической генерации сетки пользователю остается только визуальная оценка качества сгенерированной сетки. Если она его устраивает, то можно переходить к расчетному этапу. Если сетка с точки зрения пользователя является неудовлетворительной, то необходимо настроить параметры построения сетки.

При построении КЭМ поршня необходимо соблюдать ряд простых правил, которые помогут получить качественный и адекватный результат.

К таким правилам, прежде всего, стоит отнести:

- для получения качественной картины изменения физической величины размер конечного элемента должен быть на порядок меньше как минимум характерного геометрического размера модели (например, если размер конечных элементов радиуса скругления бобышки составляет 5 мм, то размер конечного элемента должен быть не более 0,5 мм);
- для уменьшения затрат машинного времени необходимо стремиться к снижению количества КЭ, одновременно с этим учитывая возможные последствия такого упрощения;
- для уменьшения количества КЭ возможно исключать из геометрической модели мелкие объекты (радиусы, фаски, насечки и т.д.) при условии, что при этом не будут искажены результаты расчета.

Одновременно с созданием КЭМ поршня рассмотрим основные настройки сеточного генератора (рис. 2.3).

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	0,247340 mm
Statistics	
Nodes	13097
Elements	7519
Mesh Metric	None

Тип сетки
 Коэффициент уплотнения сетки
 Использовать зависимость размеров
 Качество сетки (грубая, средняя,
 Размер конечного элемента
 Начальный размер элемента
 Сглаживание
 Преобразование сетки
 Настройка криволинейных КЭ
 Количество узлов
 Количество элементов

Рис. 2.3. Основные настройки сеточного генератора

Создадим сетку с настройками по умолчанию. Для этого необходимо на главной панели нажать иконку , в которой необходимо выбрать . После выполнения команды в графическом окне мы сможем наблюдать созданную КЭМ поршня (рис. 2.4, а).

Теперь проведем ряд изменений в параметрах сеточного генератора для более тонкой настройки конечно-элементной сетки:

1. Установим значение *Element Size* = 1,25 мм. Этот параметр управляет размером КЭ на всех поверхностях, ребрах и объемах модели поршня. В информационном окне *Statistica* отметим, что количество КЭ изменилось на порядок в большую сторону (рис. 2.4, б).

2. Изменим еще один параметр, который позволит изменить сетку. Этот параметр *Relevance*. Установим значение уплотнения сетки *Relevance* = 100 (рис. 2.4, в).

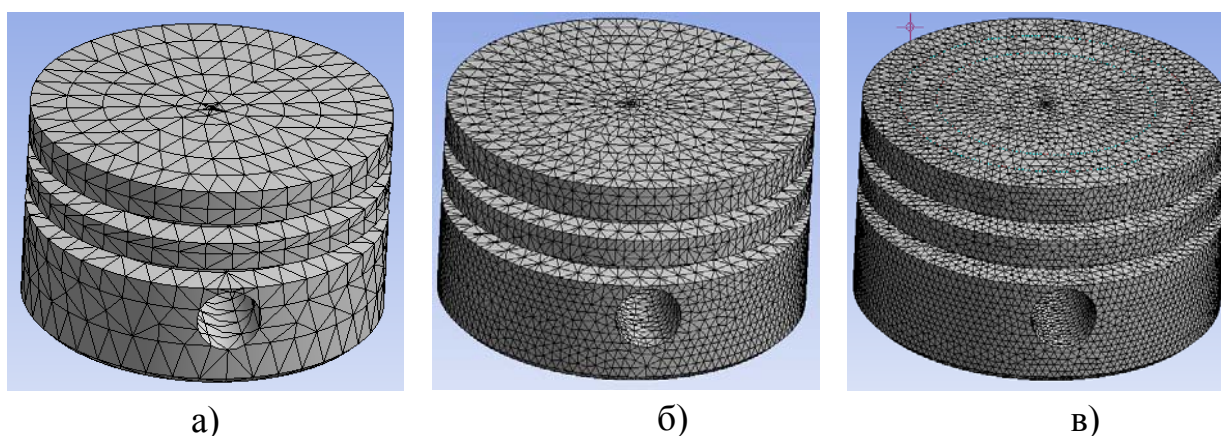


Рис. 2.4. КЭМ поршня

Рассмотрим еще одну панель - **Mesh Control**. К возможностям команды *Mesh Control* относится настройка геометрической формы элементов, управление размерами элементов, в том числе и локально (рис. 2.5).

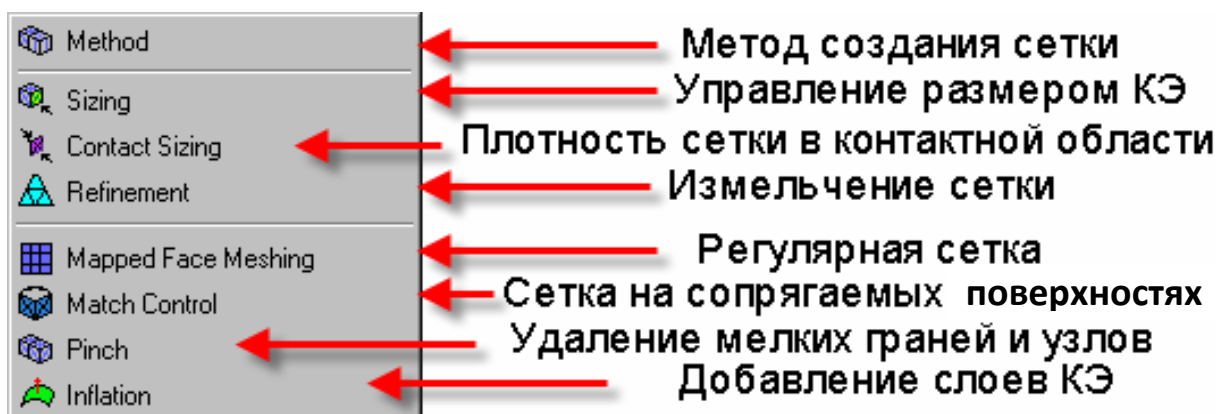
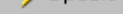
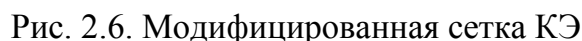


Рис. 2.5. Основные настройки сеточного генератора

В нашем случае воспользуемся командами *Sizing* и *Refinement*. Первая команда (*Sizing*) позволяет точно управлять размером КЭ в любом мес-

Итак, выберем команду *Sizing* и укажем размер элемента *Element Size* = 0,5 мм для поверхностей на днище поршня, расположенных ближе всего к центру. Выполним команду  Update. Получим сетку КЭ, представленную на рис. 2,6, а. Теперь же попробуем уже созданную сетку лишь немного изменить. Для этого воспользуемся командой *Mesh – Insert - Refinement*. В качестве целевой геометрии выберем первую межкольевую перемычку в поршне, а также установим *Refinement* = 2 (рис. 2.6, б).



Создав КЭМ поршня, переходим к заданию ГУ на поверхности поршня: коэффициентов теплообмена и температуры окружающей среды.

- выполняем команду *Steady-State Thermal – Insert – Convection*;
- выбираем поверхность, к которой будем применять данное ГУ;
- вводим в поле значений *Film Coefficient* численное значение коэффициента теплоотдачи, а в поле *Ambient temperature* – численное значение температуры окружающей среды;

- Для задания ГУ достаточно удобно сводить все граничные условия в таблицу, в которой будут проставлены номера расчетных зон и соответствующие этим зонам численные значения расчетных параметров. Кроме того, таблица может содержать сведения о нескольких режимах нагружения.

Пример ГУ теплообмена поршня тракторного дизеля с камерой сгорания приведен в таблице и на рис. 2.7. Эта таблица и рисунок содержат данные для двух расчетных режимов.

Граничные условия теплообмена

Номер поверхности	Режим XX	
	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$T_{\infty}, \text{К}$
9-10	700	653
11-13	600	653
14-15	650	473
18	900	473
19	0,01	473
20	18000	473
21-22	400	463
23	600	463
24	0,01	463
25	16000	463
26-27	400	453
28	0,01	453
29	14000	443
30	400	433
31	500	433
34	500	393
37-38	600	388
39-44	200	353
Номер поверхности	Режим номинальной мощности	
	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
9-10	650	923
11-13	650	923
14-15	650	523
18	900	523
19	0,01	503
20	18000	473
21-22	400	463
23	600	453
24	0,01	453
25	16000	453
26-27	400	453
28	0,01	453
29	14000	453
30	400	443
31	500	443
34	600	423
37-38	600	423
39-44	250	363

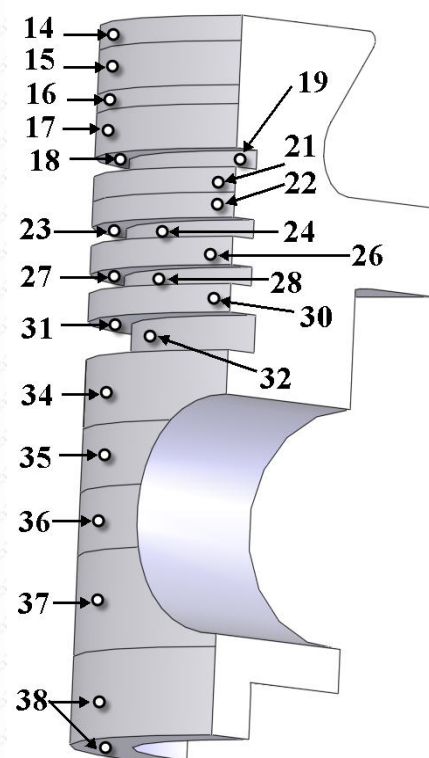
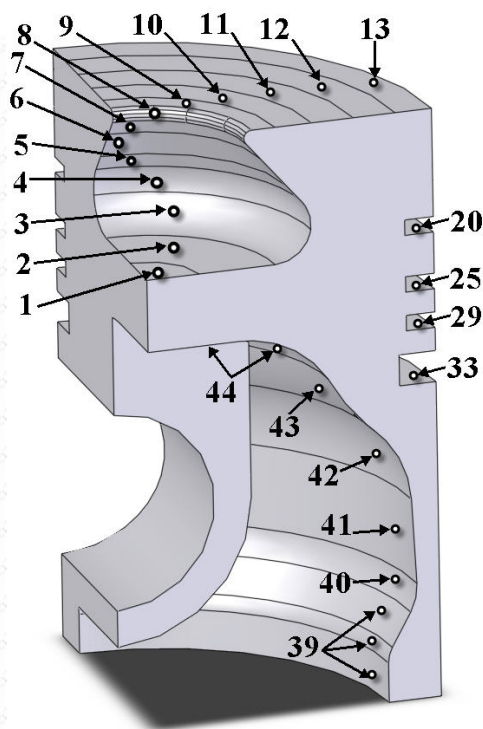


Рис. 2.7. Схема разбиения поверхности поршня на зоны конвективной теплоотдачи

После задания граничных условий теплообмена для всех поверхностей поршня графическое окно должно выглядеть аналогично рис. 2.8.

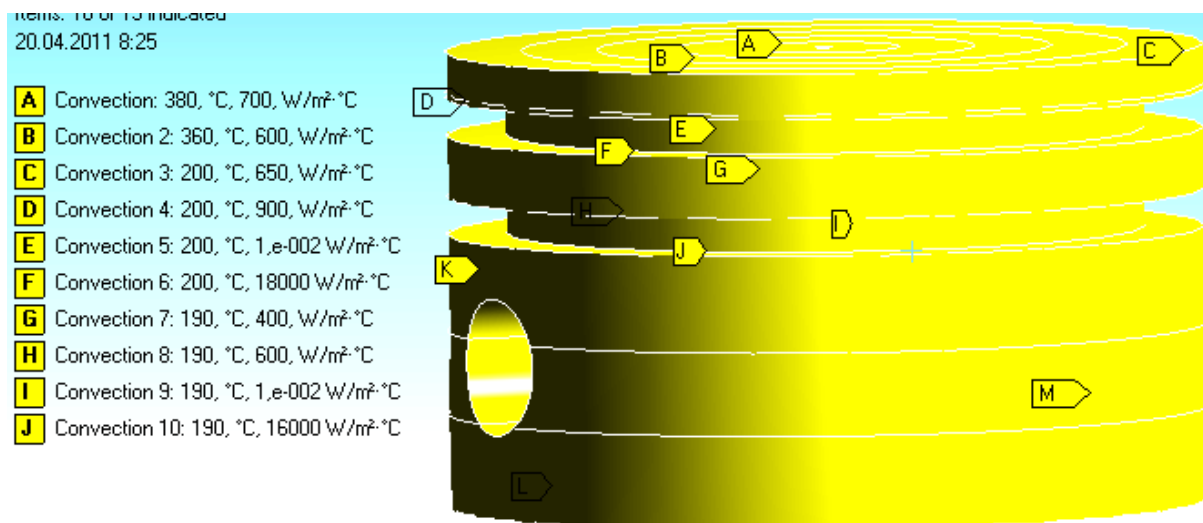


Рис. 2.8. Модель поршня с обозначением приложенных нагрузок

4. Решение стационарной задачи теплопроводности

Перед тем как запустить выполнение программы убедимся в правильности выбора материала. Посмотреть текущий материал модели можно, если в окне *Outline* выбрать с помощью ЛКМ геометрию модели **Model (B4)** → **Geometry** → **Solid**, и в окне *Details of "Solid"* выбрать *Material – Assignment*.

В данном случае по умолчанию установлен материал *Structural Steel* (конструкционная сталь). Попробуем установить материал, более подходящий к материалу поршня, например алюминиевый сплав.

Для назначения материала поршню необходимо перейти в п 2. блока В (см. рис. 2.2), называющийся *Engineering Data*, не закрывая текущее окно.

В открывшемся окне выберем вкладку с названием *Engineering Data Sources*. В этом окне представлены все материалы, которые доступны пользователю. Материалы по физико-механическим свойствам разбиты на группы. Сейчас нас в первую очередь интересует группа **General Materials** (основные материалы). Для того чтобы посмотреть, какие материалы входят в библиотеку **General Materials**, необходимо выполнить команду *View – Outline*, после чего откроется окно *Outline of General Materials*. Именно в этом окне нам сейчас надо отметить новый материал, который мы хотим использовать. Отметим через ПКМ материал *Aluminum Alloy* (алюминиевый сплав) и выберем, нажав ЛКМ, **Add to B2: Engineering Data**. Эта процедура позволит выбрать алюминиевый сплав в дальнейшем при решении задачи.

Для выхода из библиотеки материалов нажимаем ЛКМ на вкладку Project. Здесь же обновляем данные: ЛКМ Update Project.

Для изменения материала поршня переключаемся в окно  Setup, которое должно быть открыто, и открываем окно, где ранее мы смотрели материал модели поршня. Нажав ЛКМ в категории *Material* и выбрав пункт *Assignment*, устанавливаем материал, который мы добавили в библиотеку.

Строчка *Assignment* должна выглядеть следующим образом:

Assignment	Aluminum Alloy
------------	----------------

Таким образом, мы присвоили поршню новый материал – алюминиевый сплав (*Aluminum Alloy*).

Перед запуском решающей программы построим графики результатов, которые нас будут интересовать при анализе теплового состояния поршня. В первую очередь нас будет интересовать эпюра распределения температуры или, другими словами, распределение температуры в поршне.

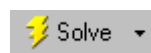
Для автоматического получения эпюры распределения температуры после выполнения решения надо выполнить следующие команды: *Solution* (нажав ПКМ) – *Insert* – *Thermal* – *Temperature*. После выполнения этой команды в дереве *Outline* в разделе *Solution* появится иконка, представляющая распределение температуры. Значок молнии рядом с этой иконкой свидетельствует о том, что данные необходимо обновить или запустить задачу на решение.



Рис. 2.9. Результат добавления новых эпюр в модель

Аналогично предыдущей команде добавим также эпюры теплового потока (*Solution* – *Insert* – *Thermal* – *Total Heat Flux*) и эпюру погрешности (*Solution* – *Insert* – *Thermal* – *Thermal Error*). Окно *Outline* должно выглядеть аналогично рис. 2.9.

Для запуска решателя необходимо выполнить команду

 Solve, которая располагается на главной панели. Информация о текущих действиях программы в процессе решения отображается при выборе ЛКМ-иконки *Solution Information* на закладке *Worksheet*.

5. Анализ полученных результатов

После выполнения решения рядом с иконками результатов появятся значки  (зеленые галочки), которые свидетельствуют о том, что решение выполнено полностью и результаты получены. Теперь можно ознакомиться с результатами решения.

Отообразим поле температур поршня на режиме холостого хода. Для этого с помощью ЛКМ выбираем в дереве объект  Temperature (температура). Графическое окно после этой команды должно выглядеть подобно рис. 2.10.

В левом верхнем углу графического окна отображаются сведения об отображаемой величине, единица измерения и текущая дата. Если эта информация не отображается, то следует выполнить команду *View-Legend*. Кроме того, в этом же графическом окне отображается шкала температур, с помощью которой достаточно просто оценить величину температуры в той или иной точке модели.

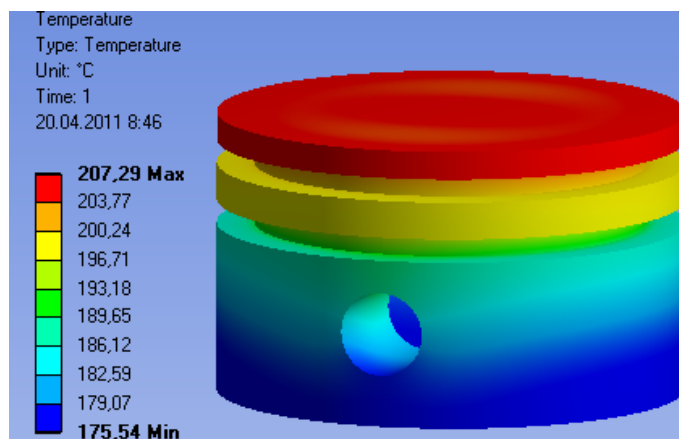


Рис. 2.10. Результат расчета поля температур

Рассмотрим более подробно панель настройки отображения результатов (рис. 2.11):

1 – функции, позволяющие масштабировать выводимые в графическое окно результаты исследования;

2 – набор функций, позволяющий отображать результаты исследования непрерывно, в виде изоповерхностей и в виде настраиваемой поверхности;

3 – набор команд, дающий возможность настроить читаемость (видимость) результатов (плавное изменение, дискретное, изолинии и сплошную заливку);

4 – набор команд, позволяющий настроить вид модели (с каркасом, без него, с наложенной сеткой, с добавлением недеформированной модели).

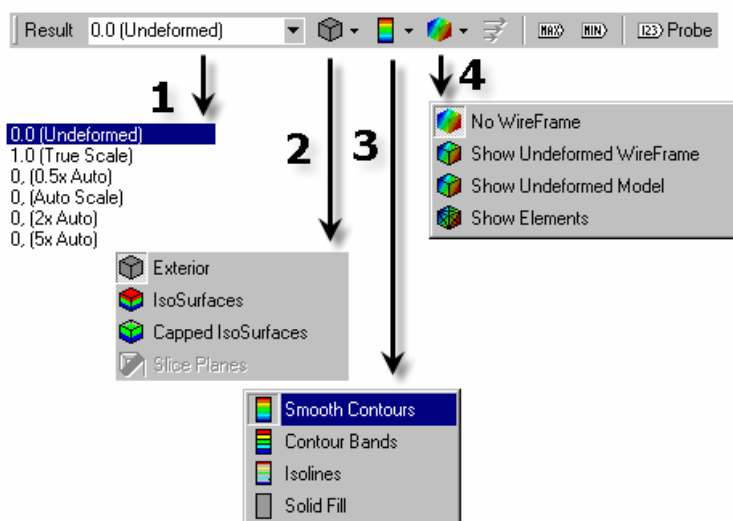


Рис. 2.11. Панель настройки отображаемых результатов

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.