

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 ( $3\text{...}7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ ) [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;

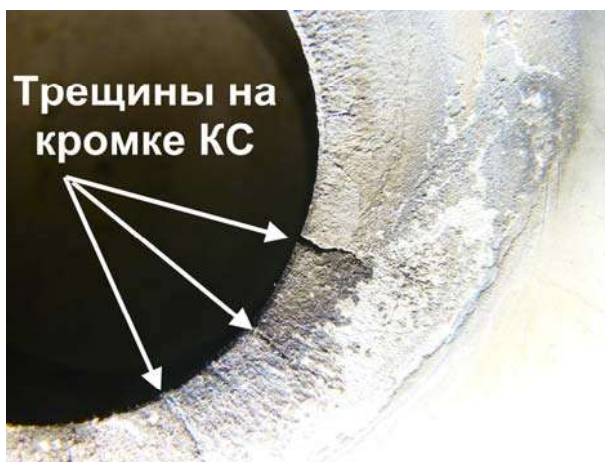


Рис. 4.1. Расположение трещин в кромке КС поршня тракторного дизеля

- низкочастотные колебания температуры поршня, связанные со сменой режимов работы двигателя;
- высокочастотные циклические термические колебания, обусловленные изменением температуры материала в поверхностном слое камеры сгорания в течение каждого рабочего цикла.

Величина напряжений в кромке КС, вызванная температурными градиентами, превосходит напряжения, вызванные силами давления газов в цилиндре. Максимальные значения напряжений от воздействия температуры и силы давления газов отстоят друг от друга на несколько градусов поворота коленчатого вала (5...20 °пкв). Это объясняется протеканием зависимости характеристики тепловыделения  $dX/d\varphi = f(\varphi, \text{°пкв})$ , которая показана на диаграмме, характерной для четырехтактного ДВС (рис. 4.2). Экстремумы зависимостей давления газов  $P_z = f(\varphi, \text{°пкв})$  и температуры  $T = f(\varphi, \text{°пкв})$  также не совпадают. Температура рабочего тела возрастает в процессе сгорания и достигает максимального значения после момента достижения максимального давления.

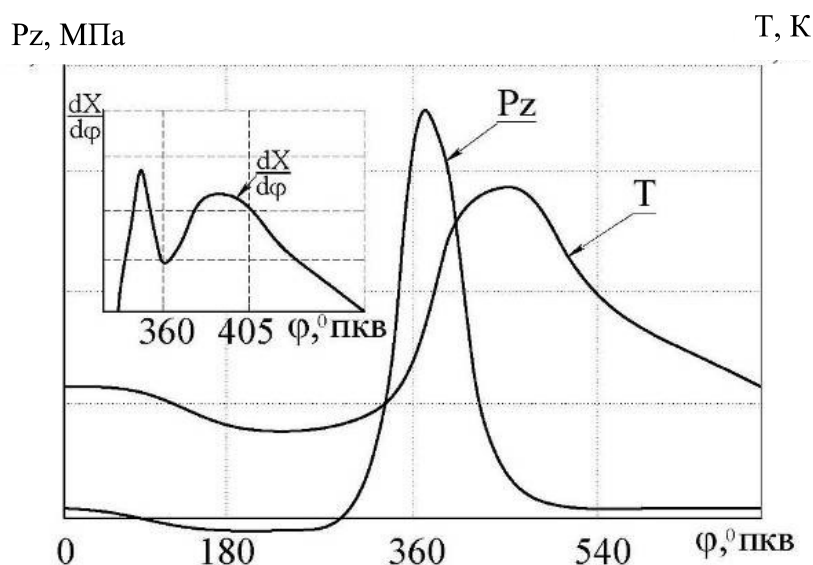


Рис. 4.2. Типичные диаграммы изменения давления сгорания  $P_z$  и температуры  $T$  в цилиндре 4-тактного ДВС

### Практическая часть

В связи с вышесказанным целью данной лабораторной работы является оценка уровня напряжений, возникающих в поршне при нестационарном тепловом нагружении. В качестве модели поршня используем ранее использованную модель (см. лаб. работу № 3).

Начинаем с выбора переходного процесса, который мы хотим проанализировать. Пусть это будет переходный тепловой процесс поршня, соответствующий сбросу нагрузки двигателя. В окно проекта следует добавить новый блок, который будет представлять расчет напряженного состояния поршня при действии тепловой нагрузки.

Для осуществления этого выполняем команду: ЛКМ на пункт *Solution* из переходного процесса (сброс нагрузки) – ПКМ – *transfer Data to New – Static Structural*. После выполнения этой команды главное окно проекта будет выглядеть аналогично рис. 4.3.

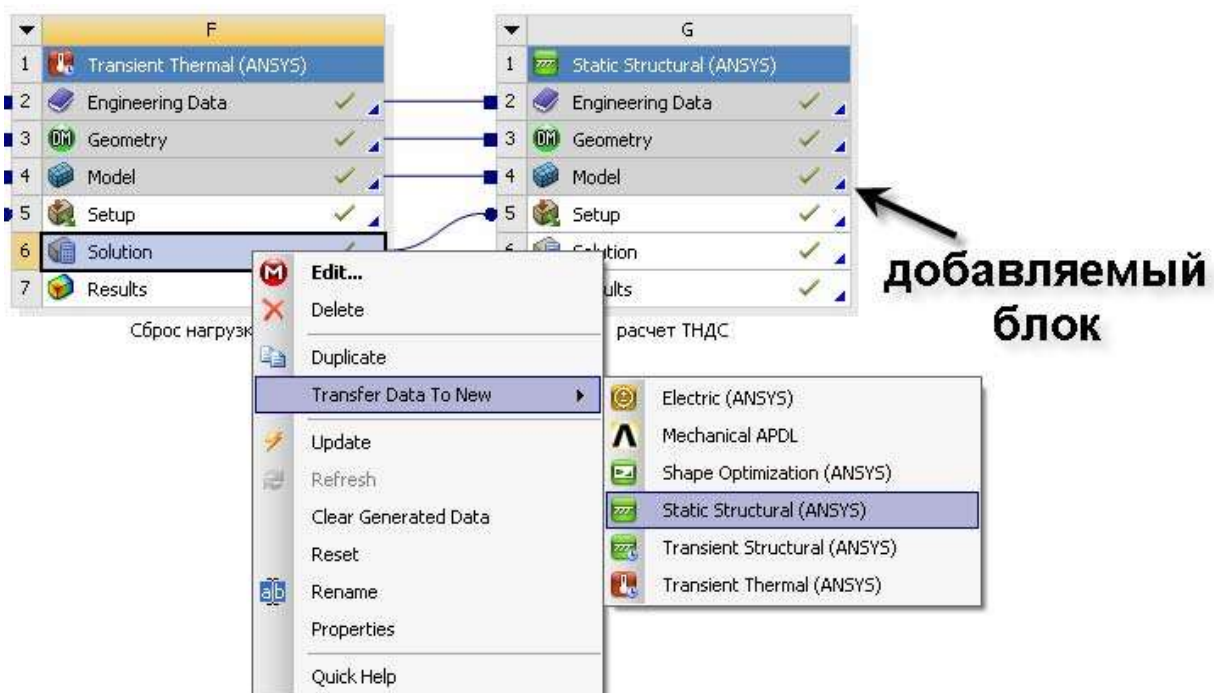


Рис. 4.3 Схема проекта

Выполнив команду *Setup-Edit*, переходим в модуль редактирования исходных данных для расчета. Здесь приведем некоторые результаты, которые должны быть получены в третьей лабораторной работе при самостоятельном ее выполнении. Эти результаты помогут понять связь между этими блоками.

Во-первых, стоит отметить, что предварительный расчет поля температур поршня при переходном процессе был разбит на несколько шагов, а именно на три. Это связано с тем, что охлаждение поршня при переходе с номинального режима работы двигателя на холостой происходит с различной скоростью. Первые 10...15 с поршень остывает достаточно интенсивно (3...7 °C/c). Затем скорость падения температуры изменяется менее су-



После выполнения расчета мы получим 18 расчетных точек, отличающихся тепловым состоянием модели поршня. Для каждого такого состояния нам необходимо рассчитать напряженное состояние. В данном случае нашей целью является получение 18 напряженных состояний поршня, проанализировав которые мы сможем оценить изменение напряжений в поршне при переходном процессе.

Для того чтобы выполнить 18 расчетных шагов анализа, необходимо настроить опции расчета. Для этого выбираем *Analysis Settings* и устанавливаем общее количество расчетных шагов, равное 18. После этого заполним временные интервалы для каждого шага. В результате получим таблицу, приведенную на рис. 4.6.

Для того чтобы связать расчет напряжений с тепловым состоянием, необходимо выполнить следующую команду: *Imported Load – ПКМ – Insert – Body temperature*. Отметим, что папка *Imported Load* появилась, поскольку мы в самом начале создания структурного анализа использовали результаты теплового расчета (см. рис. 4.3).

Добавляем 18 различных начальных температур, которые позволят проанализировать 18 различных напряженных состояний.

После того как были добавлены все 18 расчетных тепловых состояний, необходимо связать их с 18 расчетными шагами структурной задачи.

Организацию такой связи рассмотрим на примере первого шага. В папке *Imported Load* выбираем первую строчку. Эта строчка представляет связь с тепловым состоянием поршня на первой секунде. В столбце *Active*

Step Controls	
Number Of Steps	18,
Current Step Num...	18,
Step End Time	90, s
Auto Time Stepping	Program Controlled

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	1,
2	2	2,
3	3	3,
4	4	4,
5	5	5,
6	6	6,
7	7	7,
8	8	8,
9	9	9,
10	10	10,
11	11	15,
12	12	20,
13	13	25,
14	14	30,
15	15	45,
16	16	60,
17	17	75,
18	18	90,

Рис. 4.6. Настройка опций решаемой задачи

должна быть установлена галочка только напротив первого шага. В противном случае тепловые условия с различных шагов могут наложиться друг на друга, что приведет к неверным результатам расчета.

Imported Body Temperature			
Step	Active	Source Time [s]	Analysis Time [s]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.	1
2	<input type="checkbox"/>	2.	2
3	<input type="checkbox"/>	3.	3
4	<input type="checkbox"/>	4.	4
5	<input type="checkbox"/>	5.	5
6	<input type="checkbox"/>	6.	6
7	<input type="checkbox"/>	7.	7
8	<input type="checkbox"/>	8.	8
9	<input type="checkbox"/>	9.	9
10	<input type="checkbox"/>	10.	10
11	<input type="checkbox"/>	15.	15
12	<input type="checkbox"/>	20.	20
13	<input type="checkbox"/>	25.	25
14	<input type="checkbox"/>	30.	30
15	<input type="checkbox"/>	45.	45
16	<input type="checkbox"/>	60.	60
17	<input type="checkbox"/>	75.	75
18	<input type="checkbox"/>	90.	90

Рис. 4.7. Связь расчетного шага с тепловым состоянием поршня

При импорте нагрузок первого шага необходимо указать ту часть модели, для которой необходимо импортировать результаты. В нашем случае эта вся модель, поэтому в окне *Geometry* указываем весь объем поршня.

Выполнив все указанные операции, получаем таблицу, указанную на рис. 4.7.

Для оставшихся 17 расчетных шагов выполняем аналогичные процедуры.

После заполнения всей таблицы импортированных нагрузок приступаем к настройке результатов. Для вывода расчетных результатов напряженного состояния выполняем команду *Solution – Insert – Stress probe – Von Mises*, одновременно указав интересующие нас точки.

После этого выполняем стандартную команду *Solve*. Расчет задачи начинается с обновления импортируемых нагрузок для каждого расчетного шага (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Обновление импортируемых нагрузок

Выполнив расчет, приступаем к анализу полученных данных.

Укажем ЛКМ в дереве выполнения задачи на значок *Stress probe*. После этого в графическом окне отобразится график изменения напряжений указанного объекта с течением времени, то есть в зависимости от теплового состояния поршня. На рис. 4.9 приведен один из таких графиков для точки соприкосновения бобышки и поршня.

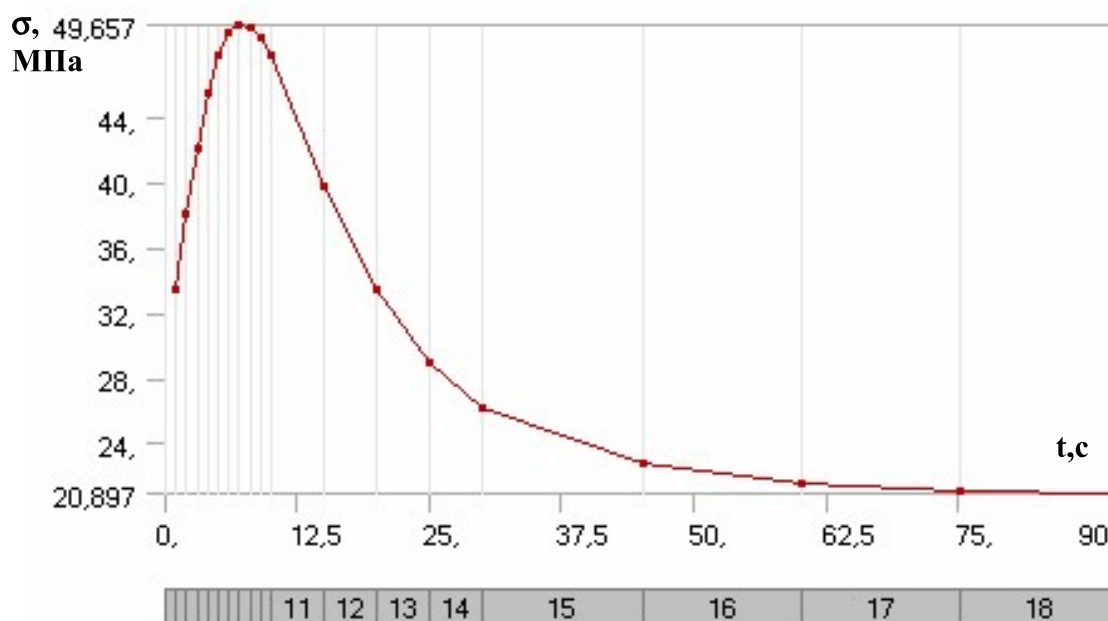


Рис. 4.9. График изменения напряженного состояния указанного объекта

По оси абсцисс указаны значение расчетного шага (темная полоска) и расчетное время, измеряемое в секундах. По оси ординат дано значение эквивалентного напряжения, МПа. Отметим, что напряжение *Von Mises* (эквивалентное) связано с главными напряжениями следующим образом:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

где  $\sigma_e, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – соответственно эквивалентное (*Von Mises*) и главные напряжения.

Результаты, по которым получены графические зависимости, представлены в табулированном виде в окне *Tabular Data* (рис. 4.10, а). Результаты расчета для дальнейшей обработки можно экспортировать в табличные данные формата \*.txt и \*.xls (рис. 4.10, б).

С помощью выполнения всех вышеперечисленных команд можно осуществить расчет напряжений поршня при набросе нагрузки.

Tabular Data		
	Time [s]	Stress Probe 3 (
1	1,	33,492
2	2,	38,05
3	3,	42,154
4	4,	45,445
5	5,	47,763
6	6,	49,126
7	7,	49,657
8	8,	49,517
9	9,	48,873
10	10,	47,872
11	15,	39,692
12	20,	33,362
13	25,	29,004
14	30,	26,111
15	45,	22,79
16	60,	21,54
17	75,	21,072
18	90,	20,897

а)

Tabular Data		
	Time [s]	Stress Probe 3 (Equivalent (von-Mises)) [MPa]
1	1,	33,492
2	2,	38,05
3	3,	42,154
4	4,	45,445
5	5,	47,763
6	6,	49,126
7	7,	49,657
8	8,	49,517
9	9,	48,873
10	10,	47,872
11	15,	39,692
12	20,	33,362
13	25,	29,004
14	30,	26,111
15	45,	22,79
16	60,	21,54
17	75,	21,072
18	90,	20,897

б)

Рис. 4.10. Результаты расчета: а – табулированное значение напряжений; б – экспортирование результатов расчета

### Вопросы для самопроверки и практические задания

1. Покажите, каким образом осуществляется разбивка расчетного времени на шаги. Для чего это необходимо?
2. Объясните связь между главными и эквивалентными напряжениями.
3. Проведите расчет напряжений для поршня при переходных режимах работы двигателя. Выявите различие напряжений в зависимости от применяемого материала. Сделайте выводы. Составьте отчет.
4. Приведите в графическом виде, используя средства *Ansys Workbench*, изменение напряжений концентраторов напряжений.
5. Каким образом устанавливается расчетное время для каждого шага нагружения?
6. Объясните протекание графика изменения напряжений для кромки КС.
7. Какие напряжения принято понимать под обозначением *Von Mises*.