

Первое представление

LS-DYNA – многоцелевой конечно-элементный комплекс, предназначенный для анализа высоконелинейных и быстротекущих процессов в задачах механики твердого и жидкого тела (<http://lsdyna.ru/>).

Создание конечно-элементной модели схоже с постройкой кирпичной стены, но требует гораздо меньше физической силы. Конечные элементы модели, как кирпичи в стене, связываются между собой узлами (цемент). Стену можно рассматривать как составную часть дома, у которого фундаментом являются знания, необходимые для задания начальных и граничных условий. На рис. 1 представлена конечно-элементная модель (ассоциация с кирпичной стеной присутствует). Справа изображен увеличенный фрагмент модели с подсвеченным элементом H799 (на рисунке он отображен четырехугольником, хотя на самом деле – это восьмиугольник). Он изображен снизу справа, определяется он восемью узлами (1255, 1256, 1259, 1258, 1318, 1319, 1322, 1321). Соответственно вся модель состоит из элементов (восьмиугольников), которые в свою очередь определяются восемью узлами.

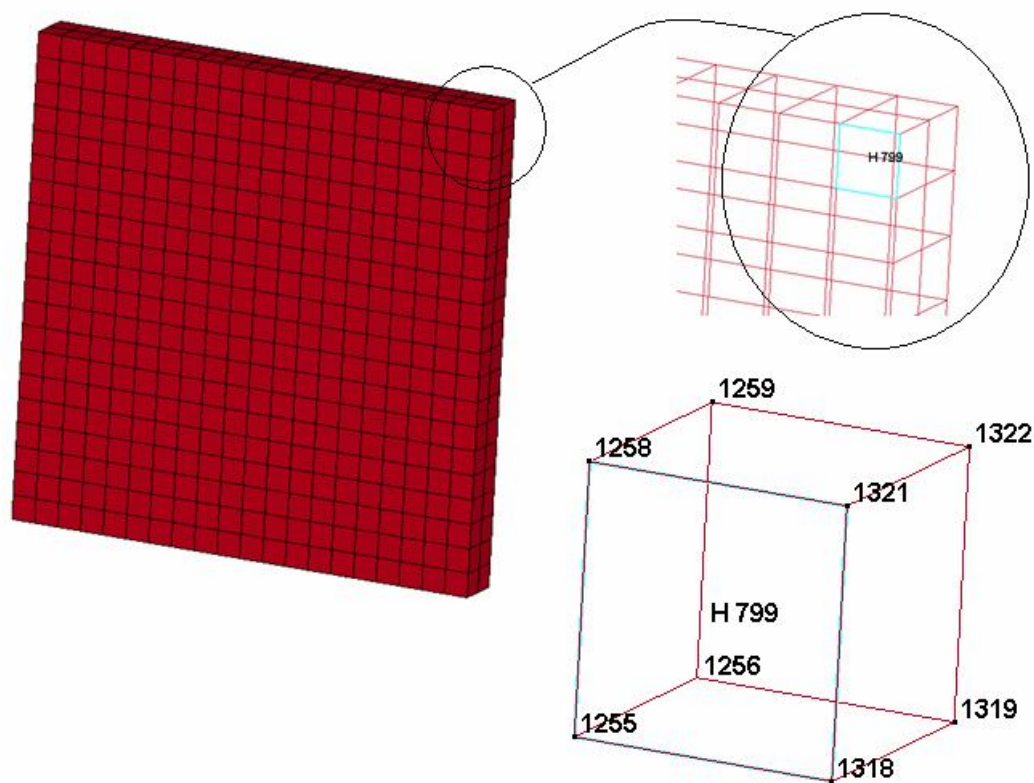


Рис. 1 – Конечно-элементная модель

Итак, создание модели начинается с задания узлов, из которых в последующем формируются элементы.

Пара слов о k-файле

Рассмотрим пример создания k-файла (keyword file) для одного элемента. Создать его можно как в специальном редакторе, так и в простом блокноте, будет он иметь следующий вид (рис. 2).

```
*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
    799      1      1255    1256    1259    1258    1318    1319    1322    1321
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
    1255      0.000      45.00000000      45.00000000
    1256      5.00000000      45.00000000      45.00000000
    1258      0.000      50.00000000      45.00000000
    1259      5.00000000      50.00000000      45.00000000
    1318      0.000      45.00000000      50.00000000
    1319      5.00000000      45.00000000      50.00000000
    1321      0.000      50.00000000      50.00000000
    1322      5.00000000      50.00000000      50.00000000
*PART
$#   title
boxsolid
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    1
*END
```

Рис. 2 – Пример k-файла

Здесь представлен пример создания конечно-элементной модели, состоящей из одного элемента, изображенного на рис. 1 (элемент H799). k-файл начинается с ключевого слова *keyword и заканчивается *end, также можно заметить, что все ключевые слова начинаются со звездочки. Если в начале строки стоит \$, то это означает, что вся эта строка закомментирована и она не влияет на исполнение k-файла.

Строки, которые не являются комментариями и идут после ключевых слов, называются картами. Каждая карта представляет собой набор чисел или свойств, записанных в определенном формате.

Например, за ключевым словом *node идет 8 карт, каждая из которых определяет номера и координаты узлов, а также граничные условия (в данном примере отсутствуют). Первое число – номер узла (целое число, на него

отводится 8 символов), второе – координата по оси X (число с плавающей точкой, на него отводится 16 символов), третье – координата по оси Y (число с плавающей точкой, на него отводится 16 символов), четвертое – координата по оси Z (число с плавающей точкой, на него отводится 16 символов), пятое – ограничение перемещений (число с плавающей точкой, на него отводится 8 символов), шестое – ограничение вращения (число с плавающей точкой, на него отводится 8 символов). За ключевым словом `*element_solid` идет одна карта – карта задания элемента. В ней задается номер элемента, номер части (задается с помощью ключевого слова `*part`), к которой он принадлежит и номера узлов, из которых элемент состоит, (последовательность задания узлов имеет значение), все задаваемые числа являются целыми, и на них отводится по 8 символов.

Что же такое `*part`? Все просто. Вернемся к ассоциациям с кирпичной стеной. Что если у нас не одна, а две стены и сделаны они из разных кирпичей? Как узнать, где первая, где вторая стена и из чего каждая из них состоит? Вот именно `*part` (в переводе – часть) и поможет нам с этим. За этим ключевым словом идут 2 карты. Первая карта – это заголовок (в ней обычно пишут название части). Вторая – определяет номер части, номер секции (будет описано далее), номер материала, номер уравнения состояния, идентификатор контроля искажений элементов по типу песочных часов, инициализатор гравитационной нагрузки, возможность перестроения сетки, а также идентификатор теплофизических свойств материала. Для второй карты все числа целые и для них отводится 8 символов.

Посмотреть описание ключевых слов и карт можно в руководстве пользователя (Keyword user's manual).

Отметим, что записать k-файл, изображенный на рис. 2, можно в следующем виде (рис. 3), при этом его суть не изменится (преимущество в том, что вместо отсчета определенного числа символов можно использовать запятую, а комментарии можно просто удалить).

```

*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
799,1,1255,1256,1259,1258,1318,1319,1322,1321
*NODE
1255,0.0,45.0,45.0,,
1256,5.0,45.0,45.0,,
1258,0.0,50.0,45.0,,
1259,5.0,50.0,45.0,
1318,0.0,45.0,50.0,
1319,5.0,45.0,50.0
1321,0,50,50
1322,5,50,50
*PART
boxsolid
1
*END

```

Рис. 3 – Пример k-файла

Для полного задания конечно-элементной модели требуется задать секцию и материал. Для задания секции используется ключевое слово, начинающееся с *section, оно необходимо для формулировки конечных элементов, определения правила интегрирования и характеристики поперечного сечения. В зависимости от задаваемого конечного элемента могут использоваться различные ключевые слова:

*section_beam – задает характеристики поперечного сечения для балочных, стержневых и дискретных элементов;

*section_shell – задает параметры поперечного сечения для оболочечных элементов;

*section_solid – задает характеристики поперечного сечения для элементов сплошной среды;

*section_sph – задает характеристики сечения для потока среды из частиц;

и др.

Для объемного восьмиузлового элемента используется ключевое слово *section_solid, для него задается одна карта, в которой указывается номер секции, опция формулировки элемента, тип элемента для задания окружающей среды. Пример задания и описание параметров приведены на рис. 4.

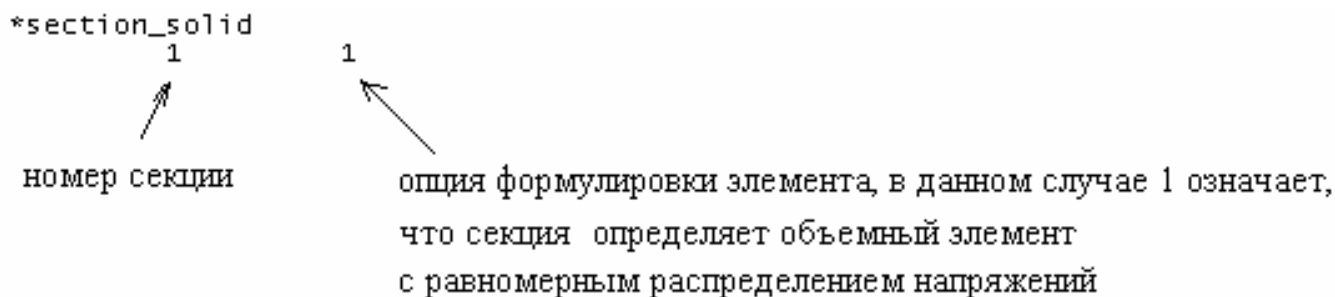


Рис. 4 – Section_solid

Остается задать материал. В пакете LS-DYNA представлено много вариантов задания материалов, для каждого варианта имеется свое ключевое слово. Для примера приведем несколько из них:

*mat_elastic – упругий изотропный материал;

*mat_plastic_kinematic – модель используется для расчета изотропного и кинематического упрочнения пластичных материалов;

*mat_johnson_cook – материал использующий модель Джонсона-Кука;

*mat_rigid – модель абсолютно жесткого материала.

В качестве примера задания используем модель упругого материала. Она задается ключевым словом *mat_elastic (существует дополнительная опция для этого ключевого слова fluid, т.е. ключевое слово будет иметь вид *mat_elastic_fluid, эта опция может быть использована для моделирования жидкости (см. Keyword user's manual)). Для задания упругого материала требуется ввести уникальный идентификатор материала (номер, целое число), плотность материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент демпфирования при осевом нагружении и коэффициент демпфирования при изгибе (последние два параметра требуется вводить при использовании балочного элемента Белычко-Швера, тип 2 в карте для ключевого слова *section_beam), остальные параметры требуется вводить при использовании опции fluid. Для всех параметров отводится 8 символов.

Зададим материал со следующими свойствами:

$\rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $E = 210 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,3$. Полученная запись в k-файле представлена на рис. 5.

```
*MAT_ELASTIC
1 7850 2.1e11 0.3
```

Рис. 5 – Mat_elastic

Возникает вопрос, как мы можем понять в каких единицах задаются параметры, а именно килограммы или граммы или вообще тонны, секунды или часы или еще что-то, и в каких единицах задается длина и сила? А задаются они в тех единицах, которые определяет пользователь сам, и придерживается их во время всей постановки задачи и соответственно полученные результаты будут в тех же единицах. Например, если длина задается в метрах (м), время в секундах (с), масса в килограммах (кг), остальные параметры получаются из этих базовых, т.е. сила в Ньютонах ($\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}$), давление в паскалях ($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$), энергия в Джоулях ($\text{кг} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = \text{Дж}$). Если задать, к примеру, длину в миллиметрах (мм), время в секундах (с), массу в тоннах (т), то получится, что сила определяется в Ньютонах ($\text{т} \cdot \frac{\text{мм}}{\text{с}^2} = 1000 \text{ кг} \cdot \frac{0,001 \text{ м}}{\text{с}^2} = \text{Н}$), давление в мегапаскалях ($\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} = \frac{\text{Н}}{10^{-6} \text{ м}^2} = 10^6 \text{ Па} = \text{МПа}$), энергия в 0,001 Джоуля ($\text{т} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{с}^2} = 1000 \text{ кг} \cdot \frac{10^{-6} \text{ м}^2}{\text{с}^2} = 0,001 \text{ Дж}$).

Подведем итог, все приведенные ключевые слова и соответствующие им карты позволяют задать конечно-элементную модель, в которой определена одна часть, одна секция, один материал, восемь узлов и один элемент. Полный код показан на рис. 6.

```

*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
    799      1      1255    1256    1259    1258    1318    1319    1322    1321
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
    1255      0.000    45.0000000    45.0000000
    1256      5.0000000    45.0000000    45.0000000
    1258      0.000    50.0000000    45.0000000
    1259      5.0000000    50.0000000    45.0000000
    1318      0.000    45.0000000    50.0000000
    1319      5.0000000    45.0000000    50.0000000
    1321      0.000    50.0000000    50.0000000
    1322      5.0000000    50.0000000    50.0000000
*PART
$# title
boxsolid
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    1      1      1
*SECTION_SOLID
    1      1
*MAT_ELASTIC
    1      7850.00      2.1e11      0.3
*END

```

Рис. 6 – Полученный k-файл

Обратите внимание на вторую карту ключевого слова `*part`, в ней присутствует запись номеров секции и материала.

Модель может состоять из огромного числа узлов, элементов и т.д., также отличия могут содержаться в задании элементов (разное количество узлов), в задании секций (задание свойств для оболочечных, балочных, дискретных элементов или элементов других типов), но принцип их построения всегда один и тот же (всегда присутствуют ключевые слова начинающиеся с `*part`, `*section`, `*mat`, `*element`, `*node`). Для наглядности опишем связь в задании частей, секций, материалов, элементов и узлов графически (рис. 7).

Используем тот же k-файл, что и на рис.6, но с другой нумерацией. Некоторую аналогию можно увидеть в руководстве (LS-DYNA Keyword user's manual, vol.1, august 2012, ver.971 R6.1.0, P.61.).

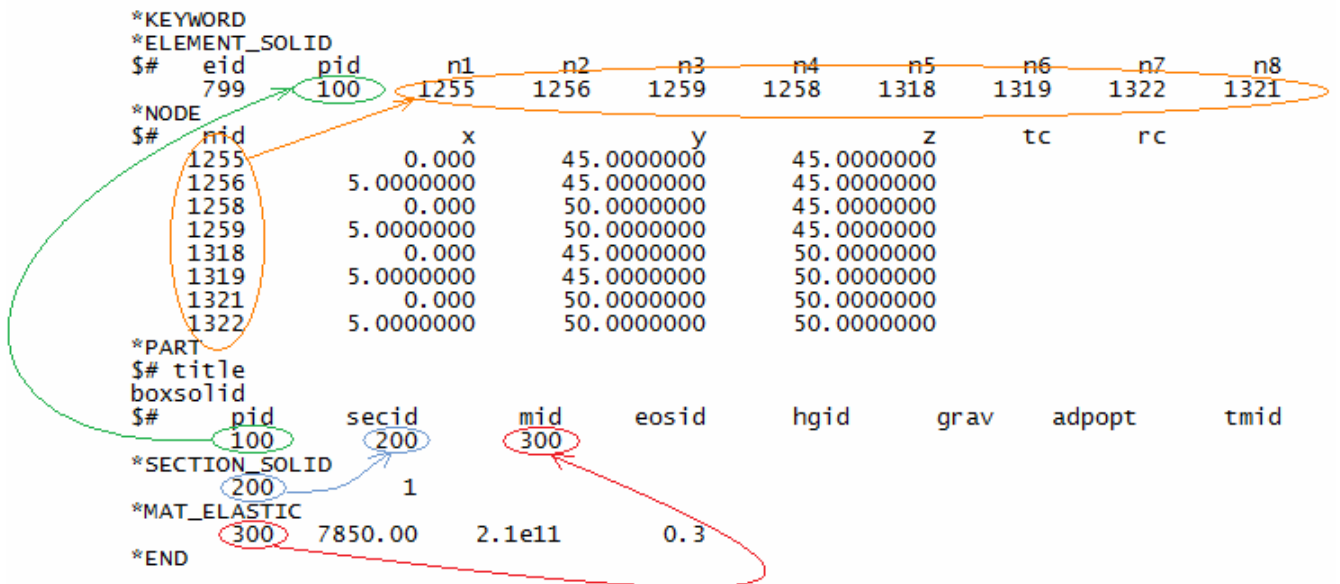


Рис. 7 – Графическое представление связи

Первый пример

На примере восьмиузлового элемента рассмотрим задание некоторых начальных и граничных условий. Зададим вращение элемента вокруг его центра. Нужно задать угловую скорость таким образом, чтобы элемент сделал один полный оборот вокруг оси вращения. Угловая скорость задается в $\frac{\text{радиан}}{\text{ед.измерения времени}}$. Так как в нашем случае время задано в секундах, то угловая

скорость определяется в $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Время счета будет составлять 1 секунду, тогда

угловая скорость будет $\frac{2\pi}{\text{с}} \approx \frac{6,28}{\text{с}}$. Ось вращения будет проходить через центр

элемента, как показано на рис. 8.

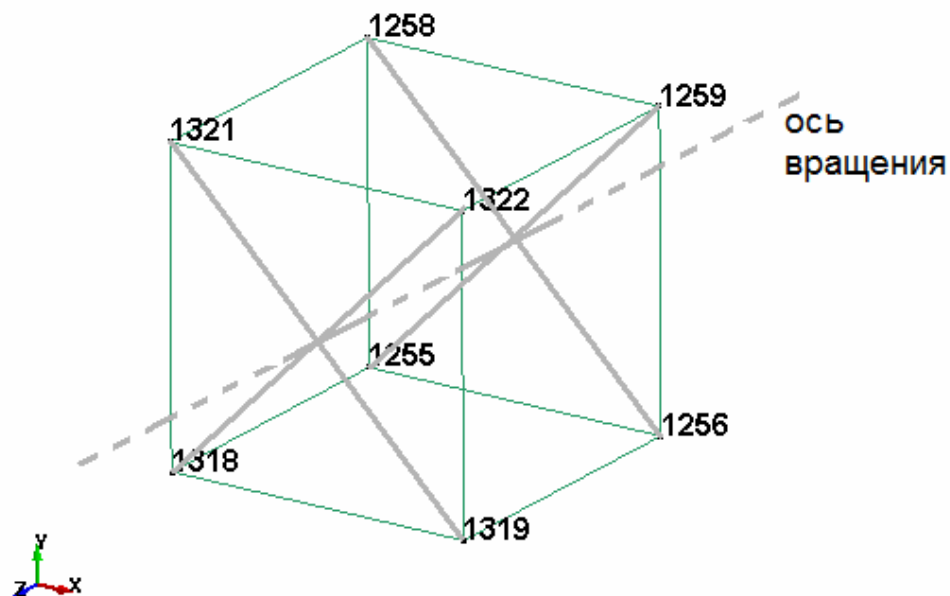


Рис. 8 – Ось вращения элемента

Используем ключевое слово `*initial_velocity_generation`. Для этого ключевого слова требуется две карты. В первой введен номер части, к которой прикладывается скорость, затем идентификатор того, что первый параметр определяет номер части, угловая скорость вокруг оси вращения, скорость по оси X, скорость по оси Y, скорость по оси Z, остальные параметры см. руководство (Keyword user's manual). Во второй карте определяется ось вращения (x, y, z координаты на оси вращения и косинусы углов наклона оси вращения относительно осей X, Y, Z) и дополнительные параметры. Тогда карты для ключевого слова `*initial_velocity_generation` запишутся в виде, показанном на рис. 9.

```
*initial_velocity_generation
100,2,6.28,0,0,0
2.5,47.5,45,0,0,1
```

Рис. 9 – Initial_velocity_generation

Время счета определяется с помощью ключевого слова `*control_termination`. Шаг выдачи результатов определяется с помощью ключевого слова `*database_binary_d3plot` (рис. 10).

```

*control_termination
1
*database_binary_d3plot
0.01

```

Рис. 10 – Задание времени счета и шага выдачи результатов

К-файл в итоге запишется в следующем виде (см. рис. 11).

```

*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
      799      100     1255     1256     1259     1258     1318     1319     1322     1321
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
      1255      0.000  45.0000000  45.0000000
      1256      5.0000000  45.0000000  45.0000000
      1258      0.000  50.0000000  45.0000000
      1259      5.0000000  50.0000000  45.0000000
      1318      0.000  45.0000000  50.0000000
      1319      5.0000000  45.0000000  50.0000000
      1321      0.000  50.0000000  50.0000000
      1322      5.0000000  50.0000000  50.0000000
*PART
$# title
boxsolid
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
      100      200      300
*SECTION_SOLID
      200      1
*MAT_ELASTIC
      300  7850.00  2.1e11  0.3
*initial_velocity_generation
100,2,6.28,0,0,0
2.5,47.5,45,0,0,1
*control_termination
1
*database_binary_d3plot
0.01
*END

```

Рис. 11 – К-файл

После запуска этой простой задачи на счет никаких проблем не возникает, но при просмотре результатов возникает проблема, а именно результатов нет. Почему? Ведь все параметры введены правильно или что-то все-таки не учтено? Посмотрите на ключевое слово `*control_timestep`. Карты для этого ключевого слова задают параметры управления размером шага по времени прочностного расчета.

Чтобы учесть нелинейное влияние на частоты конструкции, в программе LS-DYNA временной шаг, определенный из условия Куранта-Фридрихса-Леви,

умножается на коэффициент безопасности (по умолчанию 0.9). Изменить это значение по умолчанию можно заданием параметра TSSFAC в первой карте ключевого слова *control_timestep. В приведенном на рис. 11 примере повысим устойчивость расчета путем задания коэффициента безопасности 0.7. Дополним k-файл следующей записью (см. рис. 12) и запустим задачу на счет.

```
*control_timestep  
,0.7
```

Рис. 12 – Control_timestep

Результат теперь можно посмотреть, но он не точный. Чтобы в этом убедиться достаточно построить график перемещения одного из узлов элемента вдоль оси Y (см. рис. 13)

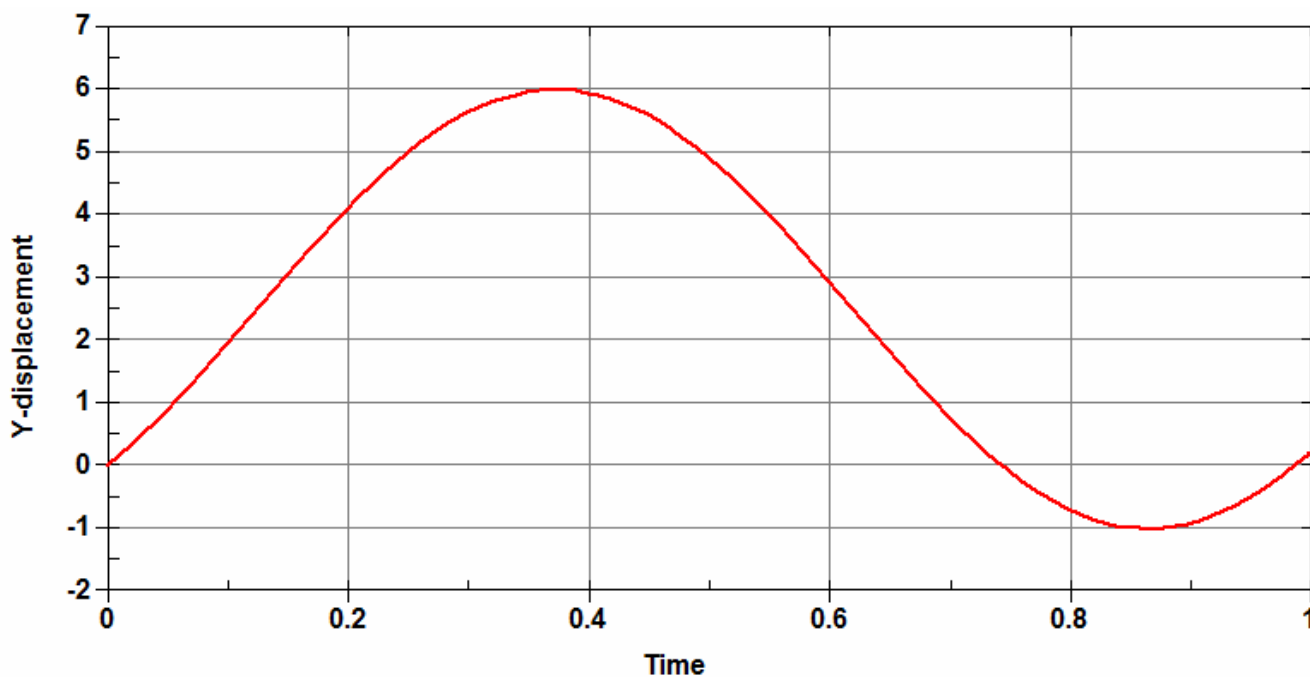


Рис. 13 – Зависимость перемещения от времени

Из рис. 13 видно, что перемещение координаты узла не возвращается в начальное значение. Уменьшим значение параметра TSSFAC до 0.01, в результате получим (см. рис. 14).

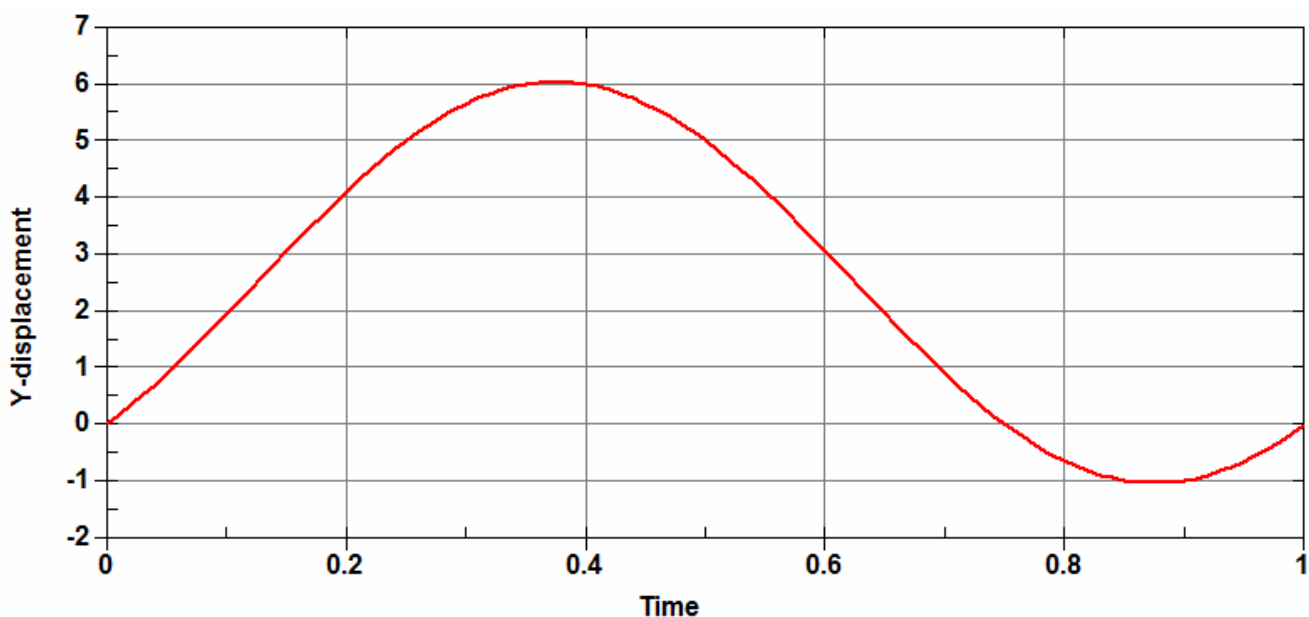


Рис. 14 – Зависимость перемещения от времени

Как и следовало ожидать, точность расчета увеличилась. Приведенный пример показывает, что уменьшение значения параметра безопасности повышает точность расчета, но это не значит, что нужно всегда изменять значение параметра безопасности, заданное по умолчанию, все зависит от качества созданной сетки (в приведенном примере она состоит всего из одного элемента).

Пример с неподвижной стенкой

Рассмотрим следующую задачу. На стальной куб с одной стороны давит пресс, с другой стороны он упирается в неподвижную стенку (см. рис. 15).

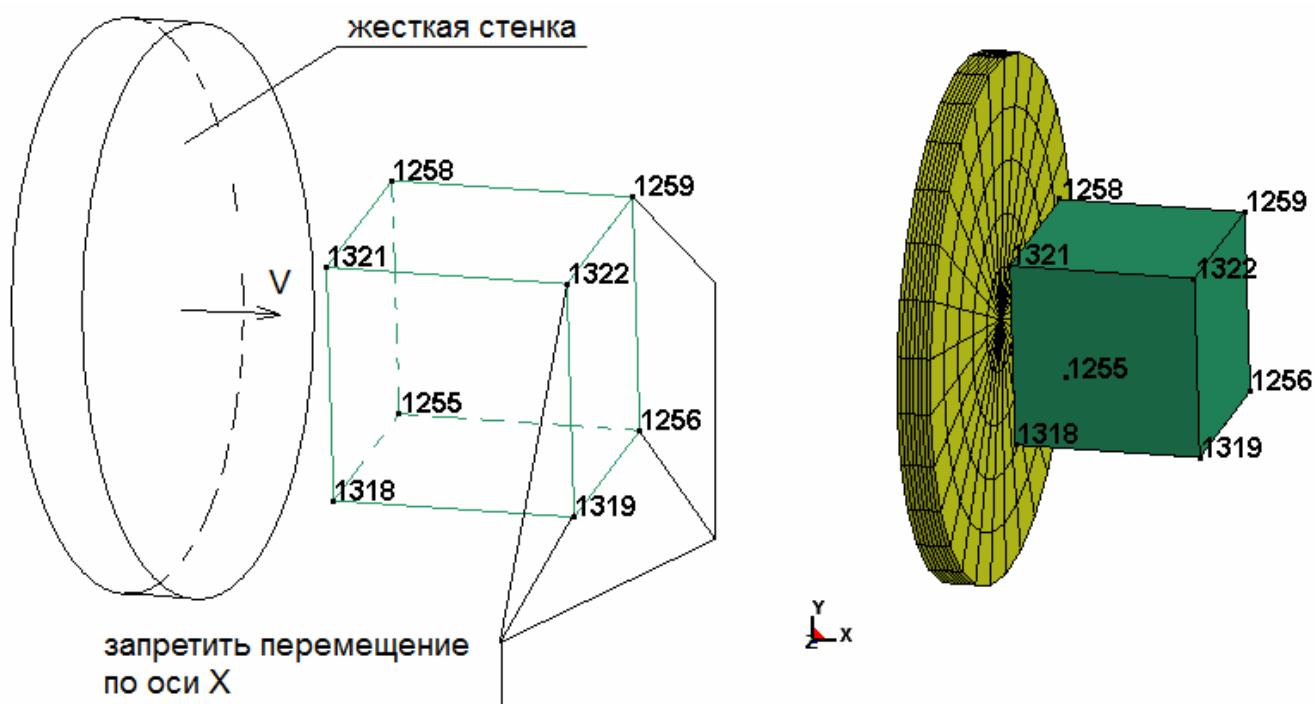


Рис. 15 – Пример

Для решения задачи используем тот же k-файл, что на рис. 11, только без задания ключевого слова `*initial_velocity_generation` и с заданием ключевого слова `*control_timestep`. Для задания прессы, можно воспользоваться ключевым словом, начинающимся с `*rigidwall`. Эта опция позволяет задать простой контакт между жесткой поверхностью и узлами деформируемого тела. Для задания ограничения перемещения определенных узлов воспользуемся ключевым словом `*boundary_spc_set`. В итоге получится следующий k-файл (см. рис. 16).

```

*KEYWORD
*ELEMENT_SOLID
$#   eid      pid      n1      n2      n3      n4      n5      n6      n7      n8
    799      100      1255    1256    1259    1258    1318    1319    1322    1321
*NODE
$#   nid      x      y      z      tc      rc
    1255      0.000  45.0000000  45.0000000
    1256      5.0000000  45.0000000  45.0000000
    1258      0.000  50.0000000  45.0000000
    1259      5.0000000  50.0000000  45.0000000
    1318      0.000  45.0000000  50.0000000
    1319      5.0000000  45.0000000  50.0000000
    1321      0.000  50.0000000  50.0000000
    1322      5.0000000  50.0000000  50.0000000
*PART
$# title
boxsolid
$#   pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt      tmid
    100      200      300
*SECTION_SOLID
    200      1
*MAT_ELASTIC
    300  7850.00  2.1e11  0.3
*$initial_velocity_generation
$100,2,6,28,0,0,0
$2.5,47.5,45,0,0,1
*control_termination
1
*database_binary_d3plot
0.01
*control_timestep
,0.1
*set_node_list
1000
1256,1259,1319,1322
*boundary_spc_set
1000,1,0,0,0,0,0
*rigidwall_geometric_cylinder_motion_display
0
-1,47.5,47.5,1,47.5,47.5,0
7,0.9
2,1,1,0,0
*define_curve
2
0,0
1.1,3
*END

```

закomentировано, в расчете не участвует

зadание набора узлов

зadание ограничений на перемещение узлов

зadание движущейся цилиндрической жесткой стенки

зadание кривой, определяющей зависимость перемещения (в данном случае) от времени

Рис. 16 – Получившийся k-файл с пояснениями

Полученные результаты приведены на рис. 17.

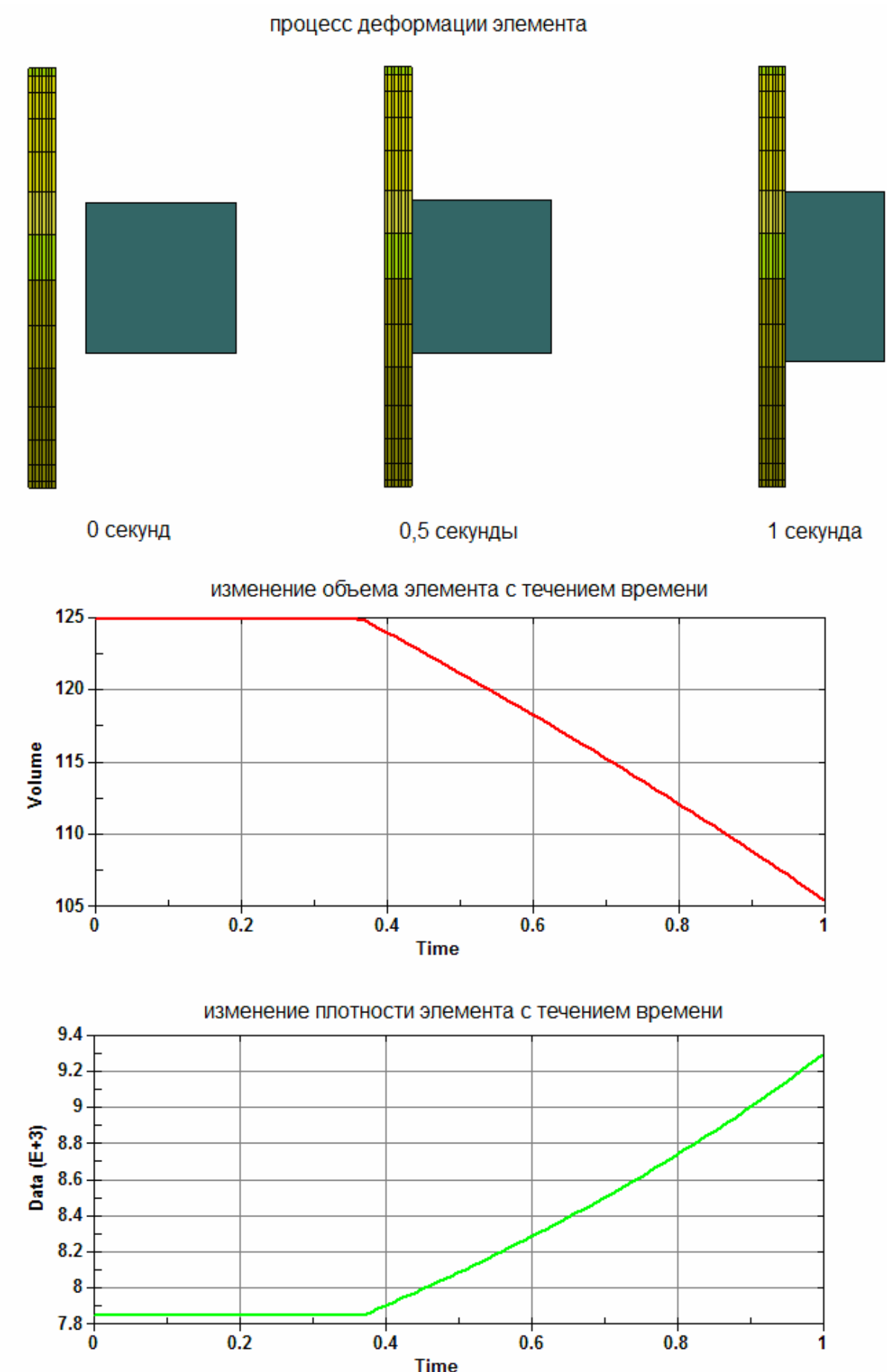


Рис. 17 – Получившиеся результаты расчета

Задачей рассмотренных примеров являлось описание азов работы с программой LS-DYNA и структуры организации k-файлов.

Конечно, для задания сложной конечно-элементной модели можно воспользоваться обычным текстовым редактором и прописывать всё (каждое ключевое слово, каждую карту) вручную, но это займет много времени и сил, гораздо проще воспользоваться редактором создания моделей, препроцессором, входящим в состав пакета LS-DYNA (см. рис. 18).

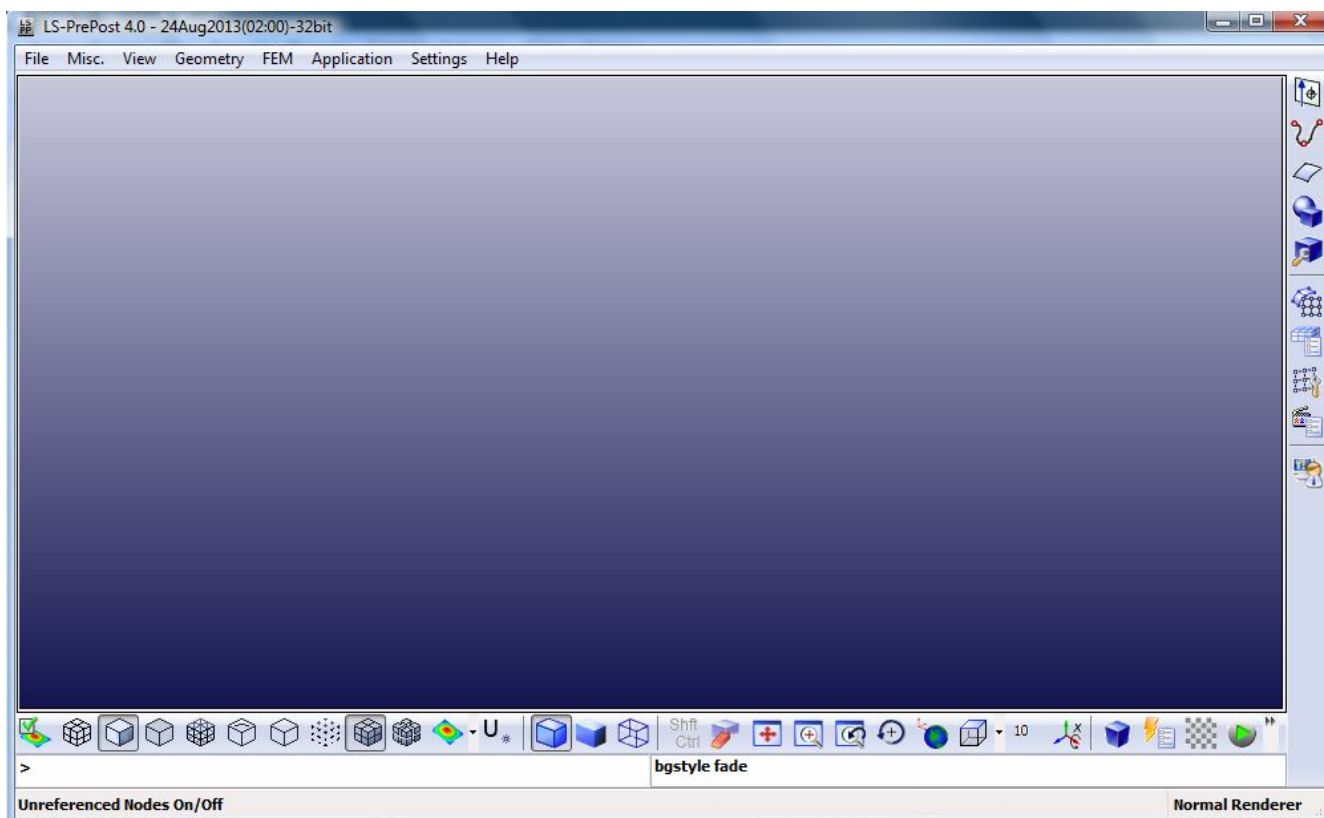


Рис. 18 – LS-PrePost

О том, как пользоваться препроцессором читайте в следующих статьях.

Спасибо за внимание.