

Моделирование взрывного воздействия на конструкцию в LS-DYNA

Смирнов А.А., МГТУ им. Н.Э. Баумана

www.niism-kb.narod.ru

1. Введение

При расчете отклика конструкции на взрывное воздействие с помощью программного комплекса LS-DYNA возможны два различных подхода для задания нагрузки.

Первый связан с постановкой задачи детонации взрывчатого вещества (ВВ), распространения ударной волны в среде (обычно воздух) и взаимодействие ударной волны с элементами конструкции. Эта задача может быть решена в LS-DYNA с привлечением многокомпонентной гидродинамики (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics) и произвольных лагранжево-эйлеровых секток (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [1]. Этот подход хотя и является более общим и, возможно, более точным для решения задач взрыва, однако он более трудоемок как в подготовке анализа, так и при расчете.

Второй подход состоит в задании взрывного воздействия на элемент конструкции в виде функции давления от времени. При этом давление, действующее на элемент, рассчитывается по эмпирическим зависимостям, полученным на основе обширного экспериментального материала. Для применения этого подхода в LS-DYNA реализована специальная функция CONWER, позволяющая определить и задать давление, действующее на элемент, зная массу заряда (в ТНТ-эквиваленте), расстояние до него, а также ориентацию элемента в пространстве. Функция CONWER вводится в расчетный k-файл с помощью ключевого слова *LOAD_BLAST. Применение данной функции позволяет моделировать взрывное воздействие на конструкцию с приемлемой точностью, не решая при этом трудоемкую задачу детонации ВВ, распространения ударной волны и ее взаимодействия с конструкцией. Данный подход и рассмотрен более подробно ниже.

2. Функция CONWER

Согласно разработчикам функции CONWER [2], она представляет собой реализацию эмпирической модели Кингери и Балмэша (Kingery and Bulmash) для воздушной ударной волны. Проведенные авторами сравнения результатов вычислительного эксперимента с экспериментальными данными показали адекватность разработанной функции при решении таких задач, как воздействие ударной волны от наземных мин на транспортные средства. Имеющиеся зарубежные публикации также показывают, что данная функция может успешно применяться при моделировании взрывного воздействия на здания и другие строительные конструкции.

Ограничения в применении данной функции состоят в том, что она не учитывает эффекты "затенения" ударной волны объектами, лежащими на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции.

Входными переменными для функции CONWEP являются следующие параметры:

- 1) **weight** – масса заряда в ТНТ-эквиваленте;
- 2) **x0, y0, z0** – координаты расположения заряда в глобальной системе координат модели;
- 3) **t0** – время задержки между началом расчета и моментом начала детонации заряда (может быть отрицательным);
- 4) **nunit** - флаг единиц измерения. Возможны следующие значения:
 - 1 – фунты, футы, фунты на квадратный дюйм (psi), секунды;
 - 2 – килограммы, метры, Паскали, секунды;
 - 3 – десятки слагов¹, дюймы, фунты на квадратный дюйм (psi), секунды;
 - 4 – граммы, сантиметры, мегабары, микросекунды;
 - 5 – единицы измерения, определяемые пользователем;
- 5) **isurf** - флаг типа взрывной волны. Возможны следующие значения:
 - 1 – взрыв на поверхности;
 - 2 – взрыв в воздухе.

Кроме этого функция CONWEP требует указания списка оболочечных (shell) элементов, на которые прикладывается взрывное воздействие. Если воздействие необходимо приложить к объемным (solid) элементам, то для функции необходимо задать список соответствующих сегментов.

3. Подготовка расчетной модели

Рассмотрим подготовку расчетной модели для моделирования взрывного воздействия на примере использования программного комплекса ANSYS в качестве препроцессора.

Геометрическая модель, содержащая поверхности, создается в пакете 3-х мерного моделирования (например, в SolidWorks) и сохраняется в нейтральном формате IGES, PARASOLID или другом. Перед сохранением необходимо правильно установить единицы измерения длины. Обычно это – метры, так как в ANSYS и LS-DYNA удобно использовать систему единиц СИ. Загрузив ANSYS, импортируем созданную модель с помощью команд **File>Import>IGES...**или **File>Import>PARA...** Интересно, что после успешного импорта объемы в ANSYS отображаются в виде набора линий. Чтобы они отображались в привычном виде необходимо выполнить команду **/facet, NORM**.

Далее построение расчетной модели мало чем отличается от обычной процедуры в ANSYS. Перечислим лишь основные этапы этого процесса, и остановимся кратко на некоторых особенностях, характерных именно для LS-DYNA. Для того чтобы появились некоторые пункты в меню, позволяющие использовать препроцессор для подготовки анализа LS-DYNA, необходимо выполнить команду **Main Menu>Preferences... LS-DYNA Explicit**.

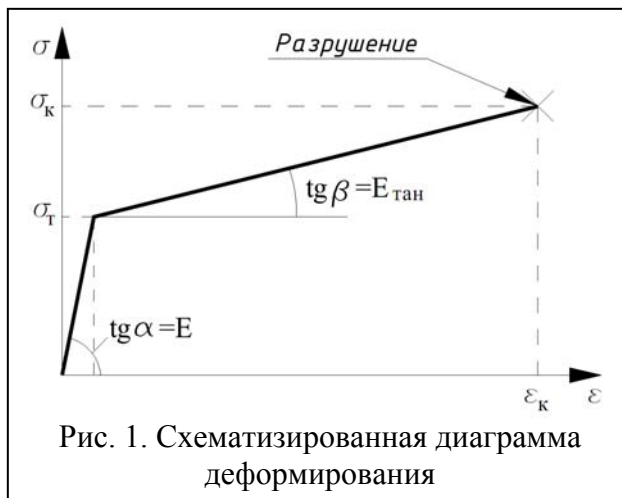
¹ Слаг (от англ. slug) – масса, которой сила в 1 фунт сообщает ускорение в 1 фут/с²; 1 слаг = 14,594 кг.

1. Задание типов элементов и параметров сечений. Для расчета в LS-DYNA применимы типы элементов SHELL163 (для оболочечных элементов) и SOLID164 (для объемных элементов).

2. Задание моделей материалов. Для металлических материалов, подвергающихся ударному нагружению в первом приближении можно воспользоваться моделью материала с билинейным кинематическим упрочнением (соответствует 3-ей модели материала в LS-DYNA – *MAT_PLASTIC_KINEMATIC). Эта модель в простейшем случае описывается четырьмя параметрами: плотностью ρ , модулем упругости (Юнга) E , пределом текучести σ_T и касательным модулем упругости $E_{\text{тан}}$. Смысл этих параметров ясен из рис. 1, на котором представлена схематизированная диаграмма деформирования образца материала. Например, для стали Ст3 данная модель материала может быть задана с помощью следующих команд:

mp, ex, 1, 2e11	! модуль Юнга
mp, dens, 1, 7800	! плотность
tb, bkin, 1	! модель с билинейным упрочнением
tbdatt, 1, 252e6	! предел текучести
tbdatt, 2, 104e7	! касательный модуль упругости

Для отечественных марок сталей и некоторых сплавов параметры E , σ_T и $E_{\text{тан}}$ можно найти в [3, 4, 5].



Кроме того, при расчетах часто требуется учесть разрушение материала при слишком больших деформациях. Как это сделать описано в разделе, посвященном корректировке k-файла.

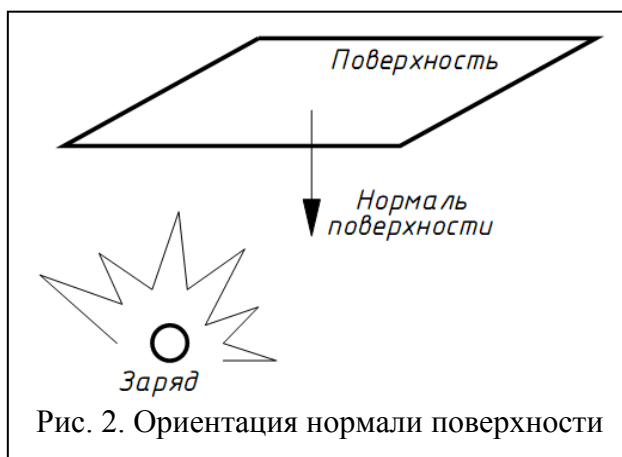
3. Разбиение на конечные элементы. Перед тем, как приступить к разбиению поверхностей на элементы необходимо проверить ориентацию их нормалей по отношению к точке расположения заряда. Нормаль поверхности должна быть направлена в сторону заряда (рис. 2). Отобразить нормали поверхностей можно с помощью команды:

PlotCtrl>Symbols>ADIR Area direction>On.

Изменить направление нормали можно с помощью команды:

Main Menu>Preprocessor> Modeling>Move/Modify>Reverse Normals > of Areas.

После разбиение на элементы



совпадающие узлы элементов, моделирующих одно тело, необходимо слить воедино. Это производится с помощью команды **Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl's>Merge Items... Nodes**.

4. Создание Parts и компонентов. Для дальнейшего анализа в LS-DYNA необходимо создать так называемые Parts. Parts – это совокупность элементов, обладающих уникальной комбинацией типа элемента, модели материала и параметров сечения. Для автоматического создания Parts возможно использование команды **Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options... Create all parts**. Для удобства приложения взрывной нагрузки необходимо создать компонент, содержащий элементы, подвергающиеся взрывному воздействию. Для этого необходимо сначала выбрать нужные элементы, затем, используя команду **Select>Component Manager>Create Component>Elements**, задать создаваемому компоненту имя, например, E_BLASTLOAD.

5. Задание граничных условий и нагрузок. Кроме обычных граничных условий, задающих тип закрепления, условия симметрии и т.д., необходимо подготовить модель к заданию взрывного воздействия. Для этого следует задать действие давления на элементы, объединенные в ранее созданном компоненте E_BLASTLOAD.

Особенностью LS-DYNA является то, что все нагрузки в ней задаются в виде кривых нагружения, зависящих от времени.

Следует отметить, что для правильной работы функции CONWER в к-файле должно быть определено как минимум две кривые нагружения. Одна кривая задается в препроцессоре ANSYS – она будет имитировать взрывное воздействие, вторая задается при корректировке к-файла (см. ниже) и является "фиктивной".

Для того чтобы определить кривую в ANSYS необходимо задать два массива параметров, например PLOAD и TIME с помощью команды **Parameters>Array Parameters>Define/ Edit...Add...** Необходимо ввести хотя бы две точки в каждом массиве.

Давление на элементы задается с помощью команды **Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads** (рис. 3).

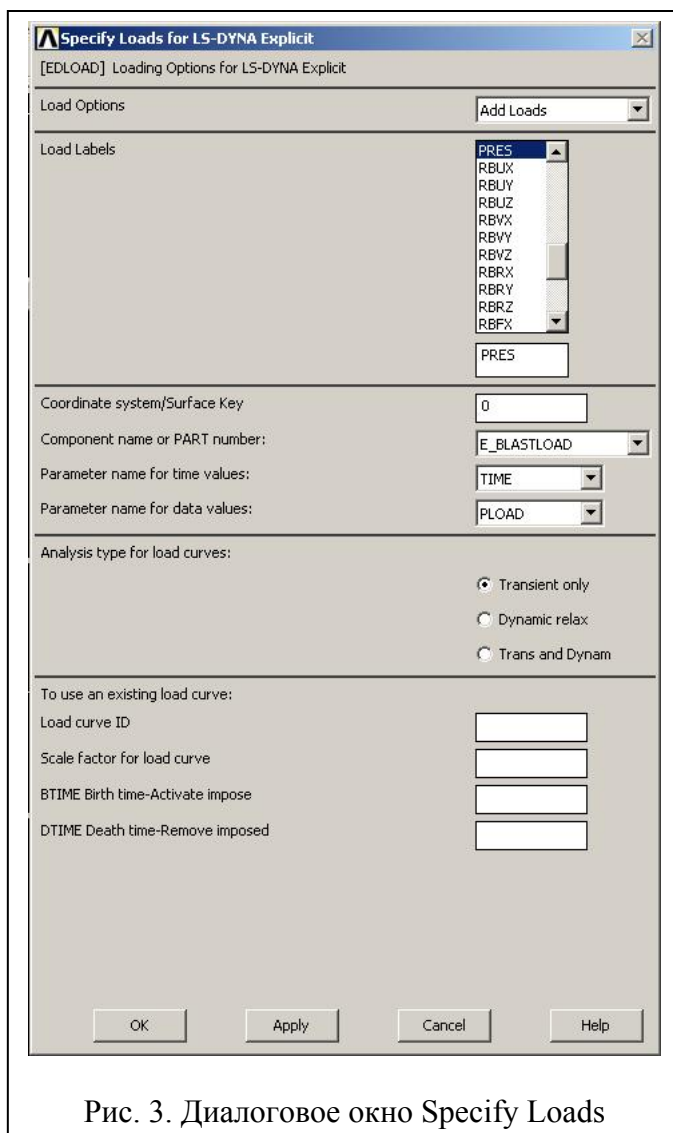


Рис. 3. Диалоговое окно Specify Loads

Необходимо указать:

Load Labels: PRES;

Component name or Part number: E_BLASTLOAD;

Parameter name for time values: TIME

Parameter name for data values: PLOAD.

6. Задание контактных условий. В LS-DYNA имеется более десятка различных типов контактных условий, которые учитывают тип контактирующих элементов, возможность разрушения (эрозии) элементов при контакте и др. Но, пожалуй, одним из универсальных типов контакта является тип Automatic single surface contact (ASSC). При задании этого типа контакта нет необходимости указывать контактирующие поверхности – они автоматически определяются в ходе расчета. Тип контакта и параметры трения в контакте задаются с помощью команды **Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Contact>Define Contact**. В появляющемся диалоговом окне можно задать: тип контакта (Contact Type), коэффициент трения покоя (Static Friction Coefficient, FS), коэффициент вязкого трения (Viscous Friction Coefficient, VC), коэффициент вязкого демпфирования в процентах от коэффициента критического демпфирования (Viscous Damping Coefficient, VDC).

Коэффициент вязкого трения VC вводится для того, чтобы ограничить максимальную силу трения, возникающую в контакте. Рекомендуемое значение VC равно пределу текучести по касательным напряжениям, который может быть оценен по формуле: $\tau_t = \sigma_t / \sqrt{3}$.

Коэффициент VDC обычно принимается равным 10–20%.

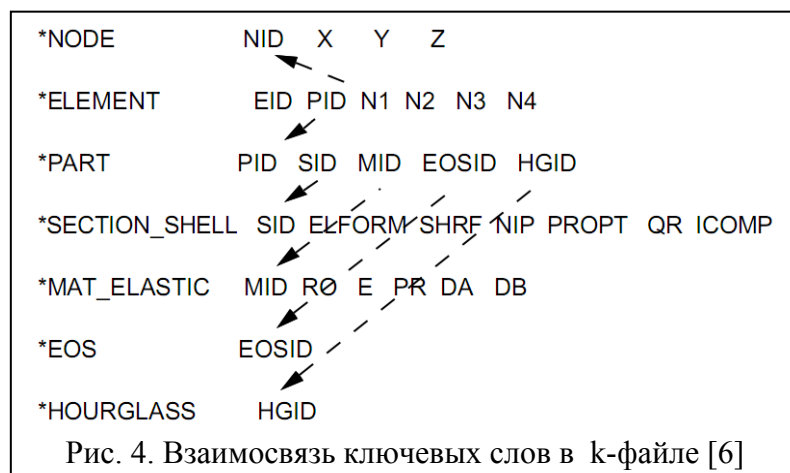
7. Задание параметров управления расчетом и типа выходных данных. В этой части подготовки анализа задается время расчета, интервал записи результатов расчета во внешний файл, необходимые файлы с дополнительными выходными данными. Для этих действий используются команды из ветки меню **Main Menu>Solution>Output Controls**

8. Генерация k-файла. По окончании этапа подготовки анализа необходимо создать k-файл, который в дальнейшем будет корректироваться для моделирования взрывной нагрузки: **Main Menu>Solution>Write Jobname.k**. При сохранении k-файла выдается запрос, в каком формате сохранять результаты. Так как для анализа результатов в общем случае удобнее пользоваться постпроцессором от LS-DYNA (файл lsprepostd.exe), то необходимо указать: **Write results files for ... LS-DYNA**.

4. Корректировка k-файла

Созданный k-файл является обыкновенным текстовым файлом и может быть открыт и отредактирован в любом текстовом редакторе. В этом файле содержатся так называемые карты (cards), начинающиеся с того или иного ключевого слова (keyword). Ключевое слово всегда начинается со звездочки (*), и обычно записывается заглавными буквами. Если в k-файле не используются разделители в виде запятых (а ANSYS создает файл без разделите-

лей), то числовые параметры, записываемые в картах, должны быть расположены в строго определенной позиции на строке. Это необходимо учитывать при редактировании файла, иначе при запуске LS-DYNA будут выдаваться ошибки. Ключевые слова и формат соответствующих карт подробно описаны в [6]. Если строка начинается со знака \$, то она воспринимается как комментарий. На рис. 4 проиллюстрирована взаимосвязь основных ключевых слов в k-файле. Каждая карта определяет в модели некоторый объект или объекты: узлы, элементы, детали, поперечные сечения, материалы, уравнения состояний и т.д. Определяемому объекту присваивается идентификатор ID, с



помощью которого он может быть однозначно идентифицирован в любом месте файла. Важно отметить, что кривой нагружения, определяемой функцией CONWER соответствует идентификатор –2.

Итак, проведем корректировку k-файла в следующем порядке.

1. Зададим деформационный критерий разрушения для материала, из которого состоят элементы конструкции, подвергающиеся взрывному воздействию. Для этого в карте, начинающейся с ключевого слова ***MAT_PLASTIC_KINEMATIC**, изменим третий параметр во второй строке с 0.00 на 0.78 (для стали Ст3):

```
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
      1 0.783E+04 0.200E+12 0.300000 0.322E+09 0.340E+09 0.00
0.00      0.00      0.78
```

2. Определим вторую кривую нагружения (фиктивную), которая необходима для корректной работы функции CONWER. Если в файле уже присутствуют две кривые, то этот этап можно пропустить. Находим в файле карту с ключевым словом ***DEFINE_CURVE**, копируем ее и изменяем у новой кривой идентификатор:

```
*DEFINE_CURVE
      1      0      1.000      1.000      0.000      0.000
0.000000000000E+00 -5.000000000000E+02
6.000000000000E-03 -5.000000000000E+02
*DEFINE_CURVE
      2      0      1.000      1.000      0.000      0.000
0.000000000000E+00 -5.000000000000E+02
6.000000000000E-03 -5.000000000000E+02
```

3. Зададим взрывную нагрузку. Функция CONWER определяется в k-файле с помощью ключевого слова ***LOAD_BLAST**. Ниже приведен фрагмент, который необходимо вставить в файл, чтобы задать взрывное воздействие от заряда массой 6 кг в ТНТ-эквиваленте (wgt), расположенного в точке

с координатами $x=0$ (xbo), $y=-0,4$ (ybo), $z=3,2$ (zbo) в глобальной системе координат на поверхности (isurf). Время срабатывания заряда совпадает с началом расчета (tbo), числовые параметры заданы в единицах системы СИ (iunit):

```
*LOAD_BLAST
$      wgt      xbo      ybo      zbo      tbo      iunit      isurf
  6.000000    0.000   -0.40000    3.20000    0.0          2          1
$      cfm      cfl      cft      cfp
  0.000      0.000      0.000      0.000
```

Ранее в ANSYS было задано действие давления на элементы, которые подвергаются взрывному воздействию. В k-файле за это отвечает фрагмент следующего вида:

```
*SET_SHELL
  1
  31          32          33          34          35          36          37          38
  .....
  1425        1426        1427        1428        1429        1430
*LOAD_SHELL_SET
  1          1          1.000      0.000
```

Здесь необходимо изменить второй параметр (ID кривой нагружения) на -2 в карте, начинающейся с ключевого слова *LOAD_SHELL_SET:

```
*LOAD_SHELL_SET
  1          -2          1.000      0.000
```

Отметим, что цифра '2' должна находиться на той же позиции, где раньше находилась цифра '1'.

После проведенной корректировки расчетная модель, заданная в k-файле готова к расчету в LS-DYNA.

Литература

1. Муйземнек А.Ю. Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005.
2. G. Randers-Pehrson, K.A. Bannister. Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D. ARL-TR-1310, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, March 1997.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с., ил. – (Основы проектирования машин).
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., "Машиностроение", 1975. – 400 с., ил.
5. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с., ил.
6. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970. LSTC.