

**LS-DYNA®**

**РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

**ЧАСТЬ 1**

**May 2007  
Version 971**

**LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC)**

### Corporate Address

Livermore Software Technology Corporation  
P. O. Box 712  
Livermore, California 94551-0712

### Support Addresses

Livermore Software Technology Corporation  
7374 Las Positas Road  
Livermore, California 94551  
Tel: 925-449-2500 ♦ Fax: 925-449-2507  
**Email: [sales@lstc.com](mailto:sales@lstc.com)**  
**Website: [www.lstc.com](http://www.lstc.com)**

Livermore Software Technology Corporation  
1740 West Big Beaver Road  
Suite 100  
Troy, Michigan 48084  
Tel: 248-649-4728 ♦ Fax: 248-649-6328

### Disclaimer

Copyright © 1992-2007 Livermore Software Technology Corporation. All Rights Reserved.

LS-DYNA®, LS-OPT® and LS-PrePost® are registered trademarks of Livermore Software Technology Corporation in the United States. All other trademarks, product names and brand names belong to their respective owners.

LSTC reserves the right to modify the material contained within this manual without prior notice.

The information and examples included herein are for illustrative purposes only and are not intended to be exhaustive or all-inclusive. LSTC assumes no liability or responsibility whatsoever for any direct or indirect damages or inaccuracies of any type or nature that could be deemed to have resulted from the use of this manual.

Any reproduction, in whole or in part, of this manual is prohibited without the prior written approval of LSTC. All requests to reproduce the contents hereof should be sent to [sales@lstc.com](mailto:sales@lstc.com).

ISBN 0-9778540-2-7

---

AES

Copyright © 2001, Dr Brian Gladman <[brg@gladman.uk.net](mailto:brg@gladman.uk.net)>, Worcester, UK. All rights reserved.

#### LICENSE TERMS

The free distribution and use of this software in both source and binary form is allowed (with or without changes) provided that:

1. distributions of this source code include the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer;
2. distributions in binary form include the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other associated materials;
3. the copyright holder's name is not used to endorse products built using this software without specific written permission.

#### DISCLAIMER

This software is provided 'as is' with no explicit or implied warranties in respect of any properties, including, but not limited to, correctness and fitness for purpose.

---

Issue Date: 21/01/2002

This file contains the code for implementing the key schedule for AES (Rijndael) for block and key sizes of 16, 24, and 32 bytes.

---

Перевод выполнен ООО «Стрела» под редакцией к.т.н. Бориса Гавриловича Рубцова

ООО «Стрела» – дистрибьютор корпорации LSTC на территории России и стран СНГ  
456770, РФ, г.Снежинск, Челябинская область, ул.Васильева д.13,  
Телефоны: 8 (35146) 3-91-30, 8 (35190) 3-35-51  
[lsdyna@strela.snz.ru](mailto:lsdyna@strela.snz.ru), [lsdyna@lsdyna.ru](mailto:lsdyna@lsdyna.ru)  
<http://lsdyna.ru/>

# **РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРОГРАММЫ LS-DYNA**

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **ХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ СПРАВКА**

Программа DYNA3D была создана в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса [1]. Самые первые ее приложения преимущественно относились к анализу напряженного состояния конструкций, подвергаемых разного рода ударным нагрузкам. Эти приложения требовали значительных для того времени компьютерных ресурсов, поэтому сразу же стала очевидной потребность в существенно более производительной версии программы. Одна из причин низкого быстродействия была обусловлена неэффективной реализацией конечно-элементной технологии и тем фактом, что суперкомпьютеры 1976 года были значительно медленнее, чем современные PC. Кроме того, простой способ моделирования скользящих при контактном взаимодействии поверхностей оказался непротиворечивым только в случае регулярных поверхностей раздела, которые нетипичны для большей части конечно-элементных отображений объектов сложной трехмерной геометрии; в результате часто было очень трудно получить нужную сетку для моделирования контакта. Первая версия включала стержневые, мембранные элементы и набор объемных элементов. Перечень объемных элементов начинался 8-узловым элементом с одной точкой интегрирования и контролем искажений формы типа песочных часов и заканчивался 20-узловым элементом с восемью точками интегрирования. Из-за высоких издержек использования 20-узлового элемента, наличия режимов нулевой энергии, связанных с редуцированным 8-точечным интегрированием, и высоких частот колебаний объема элемента, уменьшающих шаг решения по времени, в поздних версиях программы DYNA3D отказались от элементов высокого порядка. Одновременно разрабатывалась двумерная версия программы - DYNA2D.

Новая версия программы DYNA3D появилась в 1979 году и обеспечивала почти оптимальное быстродействие на базе суперкомпьютера CRAY-1, включала улучшенный вариант контактного взаимодействия поверхностей раздела, который допускал наличие сегментов треугольной формы и работал на порядок быстрее, чем предшествующий обработчик контактов. Из версии 1979 года были исключены строительные стержневые элементы и объемные элементы высокого порядка, а также некоторые модели материалов первой версии. В новой версии была представлена реализация элементов с опцией интегро-дифференциального метода, разработанного Уилкинсоном и др. [2].

Версия 1981 года [3] представляет собой развитие версии 1979 года. Для расширения круга решаемых задач, включающих взаимодействие конструкций с грунтом и взрывной волной, были добавлены девять моделей материалов. Для случая действия угловых скоростей и ускорений системы отсчета, с которой связана расчетная модель, были введены инерционные нагрузки. Также была разработана процедура обмена данными с трехмерным эйлеровским кодом JOY [4] для изучения отклика конструкций на действие импульса пробивающего тела. Была предусмотрена опция для накопления в дисковой памяти данных, относящихся к элементу, что удвоило возможности программы DYNA3D.

# ВВЕДЕНИЕ

---

Следующая версия программы DYNA3D [5] унаследовала непосредственный ввод характеристик материала, реализованный в программе DYNA2D [6]. Эта новая возможность позволяла легко добавлять уравнения состояния и определяющие соотношения любой сложности. Полная векторизация данных, относящихся к материалу модели, была почти завершена, что дало примерно 10 процентов приращения скорости выполнения программы по сравнению с версией 1981 года.

Много новых особенностей было добавлено в появившуюся в 1986 году версию программы DYNA3D [7]. Среди них балочные, оболочечные и недеформируемые конечные элементы, контактные элементы для поверхностей, элементы трения между поверхностями, дискретные пружины и демпферы, опция контроля формоизменения элемента по типу песочных часов, опция точного интегрирования по объему, совместимость с операционными системами VAX/VMS, IBM, UNIX, COS, что значительно расширило область приложений. Соответственно программа DYNA3D стала первым кодом, в котором был реализован общий алгоритм единой поверхности контакта.

В следующей версии программы DYNA3D [7] реальностью стал анализ процессов формовки металла и расчет композитных материалов. Эта версия включала учет изменений толщины оболочки, конечный оболочечный элемент Бельченко-Цая [8] и динамическую релаксацию. Были также включены незеркальные границы, задаваемые пользователем правила интегрирования для оболочечных и балочных элементов, модели многослойных композитных материалов с повреждениями и одноточечные условия-ограничения.

Новые возможности, появившиеся в 1988 году в версии программы DYNA3D [9], включали следующее: эффективно работающий балочный элемент на основе гипотезы плоских сечений, стержневой элемент, треугольный оболочечный элемент с функциями формы класса  $C^0$ , треугольный оболочечный элемент BCIZ [10], смешанную формулировку элементов при вычислениях, модель разрушения композита для объемных элементов, конечные соотношения пластичности для плоского напряженного состояния, поверхности контакта при наличии точечной сварки, скольжение поверхностей с разрывами связей, балочные поверхности контакта, элемент каменной кладки конечных размеров, усилия взаимодействия с каменной кладкой, энергетические расчеты для всех элементов, модель разрушаемого пеноматериала, карты-комментарии при вводе данных и одномерные линии скольжения.

К концу 1988 года стало очевидным, что для успешного решения проблемы моделирования отклика конструкций на ударные нагрузки в разработку этого программного продукта требуется вложить значительно более концентрированные усилия. Было основано акционерное общество Livermore Software Technology Corporation для продолжения разработки программы DYNA3D в качестве коммерческой версии, названной LS-DYNA3D; позднее это название было сокращено до LS-DYNA. Версия 1989 года представляла новые расширенные возможности: однопроходную обработку поверхностей скольжения при наличии разрывов и трения; расчет усилий в поперечном сечении элемента конструкции; выбор пользователем минимального шага по времени для оболочечных элементов, использующих упругую и упругопластическую модель поведения материала; сохранение узловых ускорений в базе данных истории нагружения; модель сжимаемого материала Муни-Ривлина; модель пластического поведения оболочечных элементов в замкнутой форме; общую модель материала из резины; уникальный штрафной метод для каждой скользящей поверхности; отслеживание внешней работы, опцию выбора критерия для шага по времени для 4-узлового оболочечного элемента; внутреннюю сортировку для элемента с целью полной векторизации силовых факторов в правосторонней системе координат.

За последние десять лет сделан значительный прогресс, что можно видеть по приведенной ниже хронологии усовершенствований программы.

Добавленные в 1989-1990 гг. возможности перечислены ниже:

- произвольные номера узлов и элементов,
- модель ткани для привязных ремней и подушки безопасности,
- модель композитного стекла,
- векторизация данных для элементов контакта типа 3 и единой контактной поверхности,
- много новых опций ввода-вывода,
- всевозможные модели материалов, пригодные для 8-узлового элемента толстостенной оболочки,
- пластичность для балочных элементов, зависящая от скорости деформаций,
- полностью векторизованная итеративная пластичность,
- интерактивная графика для некоторых операционных систем,
- узловое демпфирование,
- учет толщины оболочки в оболочечных контактах типа 3,
- уменьшение толщины оболочки, учитываемое в контактах типа 3 и 4,
- “мягкая” каменная кладка,
- опция подавления печати данных для узлов и элементов,
- безмассовые стержневые элементы с заклепочными соединениями на основе уравнений динамики твердого тела,
- безмассовые балочные элементы с точечной сваркой на основе уравнений динамики твердого тела,
- расширенные базы данных с увеличенным числом переменных истории нагружения и точек интегрирования,
- балочный элемент с предельными усилиями для жесткопластического материала,
- модели пружин и демпферов для вращательных степеней свободы, локальная система координат для дискретных элементов,
- конечные соотношения пластичности для треугольных элементов с функциями формы класса  $C^0$ ,
- расчеты рассеяния энергии для элементов каменной кладки,
- расчеты энергии, связанной с искажениями формы элемента типа песочных часов, для объемных и оболочечных элементов,
- вязкое и сухое трение с произвольным распределением по поверхности,
- распределенные нагрузки для балочных элементов,
- модель Купера и Саймондса зависимости параметров от скорости деформаций,
- каменная кладка, разделенная на сегменты,
- сухое трение для каменной кладки,
- рассеяние энергии для каменной кладки,
- подушки безопасности (в 1990 г.),
- жесткие тела в узлах сетки,
- автоматическая сортировка треугольных оболочечных элементов на группы функций класса  $C^0$ ,
- масштабирование массы элементов для квазистатического анализа,
- обращение к подпрограммам, написанным пользователем,
- контроль искривления оболочечных элементов,
- учет толщины элемента во всех типах контактов,
- автоматическая ориентация сегментов контактной поверхности,

## ВВЕДЕНИЕ

---

- расчет энергии рассеяния при скольжении поверхностей раздела,
- база данных для усилий и энергии в узлах для заданных граничных условий,
- задание скорости для каменной кладки с расчетом ввода энергии.

В 1991-1992 гг. были добавлены следующие возможности:

- “переключение” свойства материала: жесткий/деформируемый,
- соударение твердых тел с недеформируемыми преградами,
- влияние скорости деформации на поведение металлических сотовых конструкций модели 26,
- контактное взаимодействие оболочек и балок с последующим анализом детали,
- расчет внешней работы для заданных перемещений/скоростей/ускорений,
- линейные уравнения-ограничения,
- база данных MPGS,
- база данных MOVIE,
- файл линий скольжения для контактной поверхности,
- автоматическая расстановка контактов для всех заданных типов контакта,
- автоматическая расстановка контактов для единой поверхности контакта без ориентации элементов,
- инструментарий введения ограничений для контакта,
- “режущие” плоскости для получения результирующих усилий,
- разрушаемые ячеистые пеноматериалы,
- модель для уретанового пеноматериала с гистерезисом,
- вложенные итерационные циклы,
- трение в контактирующих объектах моделирования,
- расчет и сохранение деформаций для 8-узлового элемента толстостенной оболочки,
- “хороший” 4-узловой тетраэдрный объемный элемент с поворотными степенями свободы,
- 8-узловой объемный элемент с поворотными степенями свободы,
- интегрирование 2×2 для мембранного элемента,
- балочный элемент с интегрированием по Бельчико-Шверу,
- тонкостенный балочный элемент с интегрированием по Бельчико-Шверу,
- улучшенная база данных TAURUS,
- нуль-материал балочных элементов для представления пружин и привязных ремней в модуле TAURUS,
- параллельная обработка на компьютерах Cray и SGI,
- стыковка с кодами для расчета твердотельных систем,
- моделирование привязных ремней.

Возможности, добавленные в 1993-1994 гг.:

- элемент в виде прямоугольного параллелепипеда (бруска) с независимыми переменными Лагранжа-Эйлера,
- четырехугольный оболочечный элемент Бельчико-Вонга-Чанга,
- жесткость депланации для оболочечного элемента Бельчико-Цая,
- “быстрый” оболочечный элемент Хьюса-Лю,
- полноинтегрируемый элемент толстостенной оболочки,
- дискретный трехмерный балочный элемент,
- обобщенные демпферы,
- моделирование гибких нитей,

- исходная геометрия подушки безопасности,
- модель многоструйного впуска газовой смеси в подушку безопасности,
- обобщенная жесткость подвижных соединений,
- усовершенствованный контакт “твердое тело-твердое тело”,
- жесткие преграды из ортотропного материала,
- масштабирование массы элементов в момент времени “нуль”,
- стыковка с модулем USA (Underwater Shock Analysis – анализ подводного удара),
- многослойная точечная сварка с критерием разрушения на базе общих или пластических деформаций,
- угловой сварной шов с разрушением,
- стыковой сварной шов с разрушением,
- автоматически разрушаемый контакт,
- контакт “край оболочки-край оболочки”,
- автоматическая генерация сетки для контактирующих объектов,
- моделирование штамповки гофров,
- оболочечные ограничения для параллелепипедных элементов (брусков),
- стыковка с кодом NIKE3D для расчета упругой отдачи,
- анизотропная пластичность по Барлату,
- опция сверхпластичного формования,
- ограничители для недеформируемого тела,
- ввод с использованием ключевого слова,
- приспособляемость,
- первая версия для процессоров с распределенной памятью (MPP - Massively Parallel Processing) с ограниченными возможностями,
- встроенная функция обработки данных по методу наименьших квадратов для определения констант резины,
- большие гистерезисы в гиперупругих пеноматериалах,
- модель пеноматериала Билхку/Дюбуа,
- обобщенная модель резины.

Возможности, добавленные в 1995 году:

- оболочечный элемент Белычко-Левиатана,
- автоматическое переключение свойства тела: твердое/деформируемое,
- точность на процессорах с совместно используемой памятью (SMP – Shared Memory Parallel), необходимая для получения идентичных результатов для одного, двух и более процессоров,
- возможность задания локальных координатных систем для выдачи данных в поперечном сечении элемента,
- нуль-материал для оболочечных элементов,
- возможность задания глобальных инерционных нагрузок для набора материалов,
- обращение к подпрограммам приложения нагрузок, написанным пользователем,
- улучшенная интерактивная графика,
- новая опция задания начальных скоростей для предписанных скоростей вращения,
- возможность определения изменений геометрии после динамической релаксации в случае задания начальных скоростей,
- вариант задания скоростей с помощью идентификатора материала или идентификатора детали,
- ускоренные расчеты усилий и энергии для элементов-брусков при искажениях формы элемента типа песочных часов,

# ВВЕДЕНИЕ

---

- граничные условия в виде давления истечения, добавленные к опциям алгоритма ALE (независимые переменные Лагранжа-Эйлера),
- дополнительные средства для контроля пользователем искажений оболочечных элементов типа песочных часов,
- полная векторизация данных для определяющих моделей пеноматериалов типа 57 и 63,
- модель пластического разрушения материала типа 81,
- зависимость для обобщенной линейной вязкоупругости в виде шестичленного ряда,
- использование метода наименьших квадратов для определения констант вязкоупругого материала,
- табличное задание параметров для материала типа 24 с учетом скорости деформаций,
- улучшенная обработка освободившихся узлов элемента после его разрушения,
- автоматическое продвижение узлов для опции CONTACT\_TIED с целью исключения зазоров на поверхности контакта,
- расширение средств контроля пользователя при ошибках процедуры контактного взаимодействия,
- улучшение предупреждающих сообщений о взаимопроникании, выдаваемых на печать при автоматической расстановке контактов,
- флаг-признак для использования фактической толщины оболочки в случае единой поверхности контакта вместо значения по умолчанию,
- использование свободной части идентификатора детали,
- вентилируемые/сегментированные подушки безопасности,
- ускорение расчета подушки безопасности за счет использования исходной геометрии для определения шага счета по времени,
- непосредственное задание изотропного материала подушки безопасности для повышения эффективности счета,
- задание коэффициента демпфирования для материала подушки безопасности как доли критического затухания,
- возможность присоединять впускные коллекторы к конструкции так, что подушка безопасности, коллектор и конструкция движутся совместно,
- доступ к модулю PVM 5.1 Madymo,
- генерация сетки в программе LS-DYNA3D для всех стандартных объектов контактного взаимодействия,
- демпфирование подвижных сочленений при поступательном движении,
- сохранение значений угловых перемещений, скоростей перемещений, усилий демпфирования и т.п. в файле JNTFORC,
- связь кода LS-NIKE3D с программой LS-DYNA3D с помощью ключевых слов \*INITIAL\_STRESS,
- кривые окончательной геометрии после упругой отдачи при формовании,
- решатель уравнений с разреженной матрицей для процесса упругой отдачи,
- улучшенная сеточная генерация для файлов формата IGES и VDA, позволяющая получить сетку, которую можно непосредственно использовать для моделирования процесса штамповки.

Возможности версии 940, добавленные в 1996-1997 гг.:

- идентификатор детали/материала может быть задан восемью цифрами,
- движение твердого тела может быть описано в локальной системе, связанной с твердым телом,



- нелинейный метод наименьших квадратов для модели резины Огдена,
- метод наименьших квадратов для описания кривых релаксации при вязкоупругом поведении резины,
- модель Фу-Чанга для пеноматериала, чувствительного к скорости деформирования,
- шестичленное представление влияния скорости деформирования для модели материала 57 (теперь это модель 73),
- реализация модели вязкоупругого материала 76 для оболочечных элементов,
- модель пластического поведения на основе величины технического порогового напряжения (MTS) для описания влияния скорости деформирования,
- модель термоупругопластического материала для балочного элемента Хьюса-Лю,
- модель грунта Рамберга-Осгуда,
- опция локальной инвариантной системы координат для оболочечных элементов,
- метод уточнения напряжений второго порядка точности,
- 4-узловой линейный тетраэдрный элемент,
- объемный элемент для пеноматериала на основе гипотезы плоских сечений, инвертирующийся без возникновения проблем устойчивости,
- ускоренная обработка контактов между твердыми телами,
- улучшенная процедура поиска замыканий для контактов типов a\_3, a\_5 и a10,
- инвариантные результаты на процессорах с совместно используемой памятью (SMP) для контактов типа a\_n,
- компенсация за счет толщины в алгоритмах разрыва связей типа 8 и 9,
- колебания подушки безопасности по типу бака с жидкостью могут контролироваться с помощью соответствующей кривой нагружения,
- при автоматической расстановке контактов каждый идентификатор детали может содержать уникальные параметры:
  - статический коэффициент трения,
  - динамический коэффициент трения,
  - экспоненциально уменьшающийся коэффициент затухания,
  - коэффициент вязкого трения,
  - выбор толщины контакта по усмотрению,
  - выбор масштабного фактора для толщины по усмотрению,
  - локальный штрафной коэффициент
- автоматические алгоритмы контакта “балка-балка”, “край оболочки-балка”, “край оболочки-край оболочки” и алгоритм единой контактной поверхности,
- критерий прекращения контактного взаимодействия может быть выбран кратным толщине оболочки для контактов типа a\_3, a\_5, a10, 13 и 26,
- преобразование силовых факторов для получения реактивных усилий при автоматической расстановке контактов. Задаются вручную с помощью сегментов или автоматически с помощью идентификаторов детали,
- глубина поиска замкнутых контактов может задаваться как функция времени,
- колебания по типу бака с жидкостью могут задаваться как функция времени,
- внутренний контакт для объемных элементов из пеноматериала с целью предотвращения “отрицательных объемов”,
- замыкание подвижных соединений,
- зависящая от температуры теплоемкость для модели нагнетателя Ванг-Нефске,
- гибридная модель нагнетателя Ванга [11] с опциями описания впуска и продувания “от подушки к подушке”,
- включение в гибридную модель Ванга [12] процесса отсасывания,

# ВВЕДЕНИЕ

---

- расширенная модель гибридного нагнетателя Ванга с квадратичным вариантом зависимости теплоемкости от температуры [13],
- пористость ткани как часть определяющей модели подушки безопасности,
- запирающие вентиляционные отверстия и блокирование отдельных частей ткани за счет их контакта между собой или с конструкцией в случае надувания подушки с утечками газа,
- опция отсрочки учета исходной геометрии при заполнении подушки безопасности до тех пор, пока не достигается базовая площадь конечных элементов,
- время появления базовой геометрии подушки безопасности,
- жидкие многокомпонентные среды в переменных Эйлера или в независимых переменных Эйлера/Лагранжа:
  - соотношения второго порядка точности,
  - автоматическое связывание оболочечных, параллелепипедных и балочных элементов,
  - связывание с помощью контактных опций программы LS-DYNA,
  - элемент “жидкость+пустоты” и “пустота”,
  - элемент из нескольких материалов и равновесным давлением,
- тензоры узловой инерции,
- элементы плоского напряженного состояния, плоского деформированного состояния, недеформируемые и осесимметричные элементы,
- двумерные оболочечные элементы плоского деформированного состояния,
- двумерные осесимметричные оболочечные элементы,
- полная интерактивная поддержка контактных процедур при использовании двумерных, связанных, только скользящих контактов, а также в случае применения штрафных коэффициентов и условий-ограничений,
- доступность большинства типов материалов для двумерных элементов,
- опции интерактивного перестроения сетки и графической информации для двумерного случая,
- внутрисистемное определение выходных значений энергии и импульса,
- метод граничных элементов для проблем динамики жидких несжимаемых сред и взаимодействия жидкости с конструкцией.

Возможности версии 950, добавленные в течение 1997-1998 гг.:

- адаптивное измельчение сетки в области закруглений, обеспечиваемых инструментом при механической обработке, с помощью контактного модуля FORMING,
- вывод на экран линий скольжения, поскольку эти объекты теперь являются объектами вывода в базе данных D3PLOT,
- меню адаптивных опций, \*DEFINE\_BOX\_ADAPTIVE, для контроля над измельчением сетки и местоположением адаптируемых элементов,
- корневого файла идентификаторов, ADAPT.RID, для связи идентификатора ID “родительского” элемента с адаптирующими элементами,
- меню опций для упрощения ввода линий скольжения, \*DEFINE\_BOX\_DRAWBEAD,
- новая опция контроля, CONTROL\_IMPLICIT, для активирования неявной схемы решения,
- двумерные элементы с независимыми переменными Эйлера-Лагранжа,
- автоматическая расстановка двумерных контактов, задаваемая идентификатором детали,

- двумерное  $g$ -адаптирование для плоскодеформируемых и осесимметричных моделей процессаковки,
- автоматическое двумерное исключение зон, не требующих итеративных процедур решения, как это реализовано в программе LS-DYNA2D,
- двумерные элементы плоской деформации и осесимметричные элементы с выборочно-сокращенной 2x2 схемой интегрирования,
- неявные двумерные твердотельные элементы и элементы плоской деформации,
- неявное двумерное контактное взаимодействие,
- новое ключевое слово, \*DELETE\_CONTACT\_2DAUTO, для отмены автоматического задания контактов в двумерном случае,
- ключевое слово, \*LOAD\_BEAM, для задания граничных условий в виде давления на двумерные элементы,
- опция зависимости параметров вязкопластичности от скорости деформаций для следующих материалов:
  - \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC
  - \*MAT\_JOHNSON\_COOK
  - \*MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY
  - \*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY
  - \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY
  - \*MAT\_RATE\_SENSITIVE\_POWERLAW\_PLASTICITY
  - \*MAT\_ZERILLI-ARMSTRONG
  - \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE
  - \*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION
- модель материала, \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE, с кусочнолинейной кривой повреждения, задаваемой с помощью идентификатора кривой нагружения,
- гипервязкоупругая модель Арруда-Бойса для резины, \*MAT\_ARRUDA\_BOYCE,
- трансверсально-анизотропный вязкоупругий материал для тканей сердца, \*MAT\_HEART\_TISSUE,
- гипервязкоупругий материал для тканей легких, \*MAT\_LUNG\_TISSUE,
- модель пластичности при сжатии-растяжении, \*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION,
- модель Лунда зависимости от скорости деформаций, \*MAT\_STEINBERG\_LUND, введенная в модель пластичности Стейнберга-Гуинана,
- модель пеноматериала, чувствительного к скорости деформаций, MAT\_FU\_CHANG\_FOAM, включающая скорости инженерных деформаций и т.п.,
- модель материала, \*MAT\_MODIFIED\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, для моделирования разрушения алюминия,
- модель материала, \*MAT\_SPECIAL\_ORTHOTROPIC, для расчета теневых телевизионных масок,
- деформации, обусловленные эрозией, для материала \*MAT\_BAMMAN\_DAMAGE,
- уравнение состояния, \*EOS\_JWLB, для моделирования расширения продуктов взрыва,
- опция исходной геометрии расширена для пеноматериалов и резин и может использоваться для инициализации напряжений. См. \*INITIAL\_FOAM\_REFERENCE\_GEOMETRY,
- опция позиционирования экипажа для задания начальной ориентации и скоростей, см. \*INITIAL\_VEHICLE\_KINEMATICS,
- метод граничных элементов для задач динамики жидких несжимаемых сред,
- термические материалы с мгновенным коэффициентом теплового расширения:

# ВВЕДЕНИЕ

---

\*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL  
\*MAT\_ORTHOTROPIC\_THERMAL  
\*MAT\_TEMPERATURE\_DEPENDENT\_ORTHOTROPIC  
\*MAT\_ELASTIC\_WITH\_VISCOSITY,

- скорость наполнения подушки безопасности в зависимости от разности давлений,
- опция поиска контактирующих сегментов, (в первую очередь для параллелепипедных элементов),
- интегрирование по Гауссу с числом точек по толщине оболочечных элементов от 1 до 10; прежде число точек не превышало 5,
- формулировку оболочечных элементов можно изменить при полном рестарте,
- связанное взаимодействие, определяемое уравнениями-ограничениями,
- TIED\_SURFACE\_TO\_SURFACE, теперь может не работать, если добавлена опция FAILURE,
- общий критерий разрушения для объемных элементов, не зависящий от типа материала, см. \*MAT\_ADD\_EROSION,
- контроль кривой нагрузки может базироваться на уменьшении толщины и диаграмме предельного течения, см. \*DEFINE\_CURVE\_FEEDBACK,
- опция фильтрации равнодействующих усилий для зон точечной сварки перед проверкой условий разрушения в виде добавления слов FILTERED\_FORCE к ключевому слову \*CONSTRAINED\_SPOTWELD,
- объемная вязкость для оболочечных элементов типов 1, 2, 10 и 16,
- при задании локальной системы координат для тензора инерции твердого тела можно использовать идентификатор локальной системы. Это упрощает фиктивное позиционирование,
- предписанные перемещения, скорости и ускорения для узлов твердого тела,
- выбор по усмотрению однонаправленного течения для сегментированной подушки безопасности,
- можно использовать зависимость давления в подушке безопасности от времени, LINEAR\_FLUID,
- опция независимого масштабирования затухания по каждому глобальному направлению с помощью идентификатора детали,
- опция независимого масштабирования затухания по каждому глобальному направлению,
- добавлена опция для ограничения глобальной степени свободы вдоль линий, параллельных глобальным осям. Ключевое слово \*CONSTRAINED\_GLOBAL. Эта опция полезна при адаптивном перестроении сетки,
- доступно программное освобождение концов балки, см. \*ELEMENT\_BEAM,
- непосредственное задание начальных усилий для материала гибких нитей \*MAT\_CABLE\_DISCRETE\_BEAM. При использовании этой опции не требуется задание провисания,
- внезапный рост давления в подушке безопасности можно активизировать с помощью датчиков ускорения (акселерометров),
- приостановку программы можно контролировать с помощью параметров контакта, см. \*TERMINATION\_CONTACT,
- модифицированы оболочечные элементы типов 8, 10 и опция элемента Бельчко-Цая для жесткости, обусловленной искривлением, чтобы обеспечить ортогональность с движением тела как жесткого целого в том случае, когда оболочка сильно искривляется. Выбор по усмотрению предусмотрен для элемента Бельчко-Цая и оболочечного элемента типа 10,

- для использования в явной и неявной схемах расчета введен параллелепипедный элемент с одной точкой интегрирования и точной матрицей жесткости для контроля искажений формы типа песочных часов,
- автоматическое определение длины файла для базы двоичных данных D3PLOT. Это гарантирует, что в каждом таком файле содержится неразделенная на части информация о состоянии расчета и тем самым исключается расщепление одного состояния между файлами,
- файлы сброса информации, которые могут быть очень большими, можно разместить в еще одной директории с помощью командной строки `d=/home/user/test/d3dump`,
- флаг печати управляет выводом данных в файлы MATSUM и RBDOUT посредством идентификатора детали. Эта опция, PRINT, добавлена как альтернатива ключевому слову \*PART,
- добавлен флаг для отмены информации о материалах, содержащейся в файле D3THDT. См. \*DATABASE\_EXTENT\_BINARY и столбец 25 контрольной карты 19 структурированного ввода,
- после завершения динамической релаксации создается файл, в который записывается новое состояние. Это можно использовать для инициализации напряжений при последующих расчетах.

Далее приведены возможности, добавленные в версию 960 в 1998-2000 гг. Большинство новых возможностей работают как на процессорах с рассредоточенной памятью (MPP), так и на процессорах с совместно используемой памятью (SMP); однако те возможности, которые реализованы только для процессоров с совместно используемой памятью и не рассматриваются как критические для этой версии, приведены ниже. Эти уникальные возможности работы процессоров SMP уже расширены для вычислений на процессорах MPP и будут доступны в ближайшем будущем. Для реализации неявного метода на процессорах MPP требуется разработка решателя задачи о собственных значениях, который появится в более поздней версии программы LS-DYNA.

- Появился решатель для задач о течении несжимаемой жидкости. Стыковка с расчетами прочности пока не реализована.
- Можно выполнить адаптивное снижение плотности сетки перед расчетом явным методом упругой отдачи в задачах формования металла.
- Двухразмерная адаптивная схема может быть использована как для неявного, так и явного метода решения (только для SMP).
- Внутренне генерируемая гладкая кривая нагрузки для задания движения инструмента при формовании металла может быть активирована с помощью ключевого слова \*DEFINE\_CURVE\_SMOOTH.
- Нагружение деформируемой точечной сварки крутящими усилиями можно осуществить с помощью контактов \*CONTACT\_SPOTWELD\_WITH\_TORSION (только для SMP с высокой вероятностью реализации этой опции для MPP, если в этом сохранится потребность).
- Автоматическая расстановка контактов с разрывом связей теперь доступна с помощью опции \*CONTACT\_AUTOMATIC\_...\_TIEBREAK. Эту опцию можно использовать для склеенных панелей (только для SMP).
- Доступна опция \*CONTACT\_RIGID\_SURFACE для моделирования поверхности дороги (только для SMP).
- Неподвижно закрепленные жесткие стенки PLANAR и PLANAR\_FINITE представлены в двоичном выходном файле одним оболочечным элементом.

# ВВЕДЕНИЕ

---

- Подробности контактного взаимодействия можно моделировать с помощью опции INTERFERENCE.
- Теория слоистых оболочек внедрена для нескольких определяющих моделей, включая модели композитов, с целью более точного представления сдвиговой жесткости ламинированных оболочек.
- Соотношения механики разрушения введены для “смягчения” падения усилий в определяющей модели материала \*MAT\_SPOTWELD\_DAMAGE после завершения аварийного воздействия.
- Модель изотропной пластичности с упругими конечными деформациями для объемных элементов \*MAT\_FINITE\_ELASTIC\_STRAIN\_PLASTICITY.
- Модель материала с памятью формы: \*MAT\_SHAPE\_MEMORY.
- Исходная геометрия для материала, \*MAT\_MODIFIED\_HONEYCOMB, может быть задана в случае появления произвольно связанных объемов или при достижении шагом по времени предельного значения. Эта опция теперь доступна для элементов всех типов, включая полноинтегрируемые объемные элементы.
- Неортогональные оси в моделях для материала подушки безопасности, см. \*MAT\_FABRIC.
- Новые определяющие модели материалов для балочных элементов:
  - \*MAT\_MODIFIED\_FORCE\_LIMITED
  - \*MAT\_SEISMIC\_BEAM
  - \*MAT\_CONCRETE\_BEAMдля оболочечных и объемных элементов:
  - \*MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMALдля оболочечных элементов:
  - \*MAT\_GURSON
  - \*MAT\_GEPLASTIC\_SRATE2000
  - \*MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMAL
  - \*MAT\_COMPOSITE\_LAYUP
  - \*MAT\_COMPOSITE\_LAYUP
  - \*MAT\_COMPOSITE\_DIRECTдля объемных элементов:
  - \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS
  - \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE
  - \*MAT\_INV\_HYPERBOLIC\_SIN
  - \*MAT\_UNIFIED\_CREEP
  - \*MAT\_SOIL\_BRICK
  - \*MAT\_DRUCKER\_PRAGER
  - \*MAT\_RC\_SHEAR\_WALL;для всех элементов доступна опция очень быстрой и эффективной версии Джонсона-Кука модели пластичности:
  - \*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK
- Версия полноинтегрируемого оболочечного элемента типа 16 доступна для определяющих моделей материала с конечными соотношениями пластичности.
- Нелокальная теория разрушения реализована для предсказания разрушения металлических материалов. Ключевое слово \*MAT\_NONLOCAL активизирует эту опцию для подмножества определяющих моделей упругопластических материалов.
- Дискретный треугольный оболочечный элемент Кирхгоффа (DKT) для явной схемы решения с тремя точками интегрирования в плоскости помечается как оболочечный.

- чечный элемент типа 17. Этот элемент значительно лучше описывает изгиб, чем треугольный элемент с функциями формы класса  $C^0$ .
- Дискретный линейный треугольный и четырехугольный оболочечный элемент Кирхгоффа доступен как оболочечный элемент типа 18. Используется для выявления нормальных мод колебаний и статического анализа.
  - Линейный 4-узловой четырехугольный оболочечный элемент с функциями класса  $C^0$  введен как элемент типа 20 с продольной жесткостью для нормальных мод колебаний и статического анализа.
  - Параллелепипедный линейный элемент с произвольной деформацией доступен для выявления нормальных мод колебаний и статических расчетов.
  - Полностью интегрируемый элемент толстостенной оболочки теперь можно использовать в неявных вычислениях.
  - Доступен полностью интегрируемый элемент толстостенной оболочки, основанный на принятой формулировке закона деформаций. Этот элемент использует полную трехмерную определяющую модель, которая содержит компоненты нормальных напряжений и поэтому не использует предположения о плоском напряженном состоянии.
  - 4-узловой тетраэдный элемент с постоянной деформацией расширен для использования в неявных расчетах.
  - Доступно относительное демпфирование между деталями, см. \*DAMPING\_RELATIVE (только для SMP).
  - Усилия предварительного нагружения можно ввести для дискретных балочных элементов.
  - Введена корректировка действительных напряжений для полноинтегрируемого параллелепипедного оболочечного элемента.
  - Может быть задана зависимость ускорения от времени для недеформируемых тел.
  - Стало возможным задавать движение для жестких тел в узлах элемента.
  - Обобщенное задание набора данных, т.е. опция SET\_SHELL\_GENERAL и т.д. предоставляет значительные удобства при определении набора.
  - Командой "sw4." записываются параметры состояния в файл динамической релаксации, D3DRLF, во время фазы расчета релаксации, если файл D3DRLF затребован при вводе задачи.
  - Масса, добавляемая к элементу идентификатором PART ID, записывается в файл MATSUM, если для установления шага по времени используется масштабирование массы конечного элемента (только для SMP).
  - После остановки программы из-за чрезмерного возрастания массы модели при масштабировании масс элементов, выдается на печать сводка результатов для 20 узлов с максимальной прибавкой массы.
  - Теперь доступен анализ собственных значений для моделей, содержащих твердые тела, с помощью решателя BCSLIB-EXT фирмы Боинг (только для SMP).
  - Корректировка напряжений второго порядка точности может быть активирована идентификатором детали вместо глобального ввода с помощью ключевого слова \*CONTROL\_ACCURACY.
  - Энергия диссипативных сил на поверхности контакта вычисляется по усмотрению пользователя для учета генерируемого тепла и выводится в файл усилий на поверхности раздела (только для SMP).
  - Бинарная база данных для усилий на поверхности контакта теперь включает расстояние от контактной поверхности при задании опции FORMING. Это расстояние

## ВВЕДЕНИЕ

---

определяется после того, как устанавливаются узлы возможного контакта (только для SMP).

- Реализован параллелепипедный элемент типа 14 для акустического анализа. Является полноинтегрируемой версией элемента типа 8 (только для SMP).
- Для акустических приложений доступна опция погруженной в среду поверхности (только для SMP).
- Для абсолютно твердого тела можно задать присоединенные узлы. Эта опция полезна для приложений NVH.
- Опция `CONSTRAINED_POINTS` связывает вместе любые две точки. Эти точки должны принадлежать оболочечному элементу.
- Доступно “мягкое” ограничение для контакта “край оболочки-край оболочки” типа 26.
- Опция `CONSTAINED_INTERPOLATION` для взаимодействия балки и объемного элемента и для “размазывания” масс и нагрузок (только для SMP).
- Добавлена опция для базы данных, которая дает возможность выводить значения прибавленных масс для оболочечных элементов вместо величины шага решения по времени.
- Новая опция для контактного взаимодействия `*CONTACT_GENERAL` позволяет присоединять все внутренние края оболочечных элементов типа 26. Эта опция активизируется добавлением `_INTERIOR` после ключевого слова `GENERAL`.
- Новая опция позволяет использовать девиаторы скоростей деформации, а не суммарные скорости, для материала 24 с моделью Купера-Саймондса зависимости от скорости деформаций.
- Опция `CADFEM` для базы данных ASCII теперь задается по умолчанию. Эта опция записывает больше значащих цифр в выходные файлы.
- При использовании деформируемой точечной сварки добавленная масса для точки сварки теперь выводится на печать в том случае, когда активизировано глобальное масштабирование масс элементов. Эта опция используется в log-файле, файлах `D3HSP` и `MESSAG`,
- Сообщения о начальном внедрении для контакта “край оболочки-край оболочки” теперь записываются в файлы `MESSAG` и `D3HSP`.
- Каждой компиляции программы `LS-DYNA` присваивается уникальный номер версии.
- Дискретные балки конечной длины с различными опциями локальных осей доступны теперь для типов материала 66, 67, 68, 93 и 95. В этой реализации абсолютная величина параметра `SCOOR` должна быть установлена равной 2 или 3 при вводе ключевого слова `*SECTION_BEAM`.
- Доступны новые дискретные определяющие модели элементов:
  - \*`MAT_ELASTIC_SPRING_DISCRETE_BEAM`
  - \*`MAT_INELASTIC_SPRING_DISCRETE_BEAM`
  - \*`MAT_ELASTIC_6DOF_SPRING_DISCRETE_BEAM`
  - \*`MAT_INELASTIC_6DOF_SPRING_DISCRETE_BEAM`
- Две последние модели можно использовать в качестве балок конечной длины с локальной системой координат.
- Движущиеся системы координат `SPC` задаются по усмотрению в тех ограничениях, которые заданы в локальной системе координат, поворачивающейся вместе с тремя заданными узлами.
- Идентификатор движущейся локальной системы координат, `CID`, может использоваться для задания ориентации дискретных балочных элементов.



- Модальный анализ с суперпозицией форм можно выполнять после анализа собственных значений. Восстановление напряжений базируется на оболочечных элементах типа 18 и элементах-параллелепипедах (только для SMP).
- Коэффициент рэлеевского демпфирования теперь вводится как доля критического затухания, т. е. равен 0.10. Прежний метод требовал знания нужной частоты и мог быть неустойчивым при больших вводимых значениях.
- Опция для подушки безопасности “SIMPLE\_PRESSURE\_VOLUME” позволяет при инициализации заменить константу CN кривой нагружения. Кроме того, может быть задана еще одна кривая нагружения, что дает возможность меняться CN как функции времени при динамической релаксации. После динамической релаксации константа CN может использоваться как фиксированная величина или кривая нагружения.
- Теперь доступна гибридная модель CHEMKIN и NIST нагнетательного насоса. Число смешиваемых газов – до десяти.
- Опция для отслеживания начального внедрения (а не движения узлов обратно к поверхности) для типов контактного взаимодействия для процессоров с совместно используемой памятью (SMP). Некоторое время эта опция была доступна для контактов, обрабатываемых MPP. Этот ввод может быть задан четвертой картой ввода \*CONTROL\_CONTACT и заданием каждого контакта с помощью задаваемой по усмотрению третьей картой определения контактов \*CONTACT.
- При активном флаге-признаке среднего ускорения значения ускорений (средних) узлов твердого тела теперь записываются в файлы D3THDT и NODOUT. В предыдущей версии программы LS-DYNA ускорения в узлах твердого тела не усреднялись.
- Опция инициализации толщины и пластических деформаций в модели столкновения, \*INCLUDE\_STAMPED\_PART, которая обращается к результатам численного моделирования штамповки по программе LS-DYNA и отображает распределение толщин и деформаций на те же самые детали, но с другой сеткой.
- Опция включения конечно-элементных данных из других моделей, \*INCLUDE\_TRANSFORM. Эта опция будет обращаться к модели, заданной в файле INCLUDE: смещать все идентификаторы ID; перемещать, вращать и масштабировать координаты, а также преобразовывать определяющие константы из одной системы единиц в другую.

При создании версии 970 программы LS-DYNA в 2001-2002 гг. было добавлено множество новых возможностей, перечисленных ниже. Некоторые из них добавлены в более поздние реализации версии 960. Большинство возможностей, относящихся к явным методам решения, могут использоваться как для MPP, так и для SMP версий. Однако возможности неявных методов для версии MPP требуют разработки масштабируемого решателя для нахождения собственных значений матрицы и параллельного ввода ограничивающих условий в глобальные матрицы. Эта работа находится в процессе реализации. Выпуск последней версии 970 относится к 2003 году и способствует развитию методов получения неявных решений.

Ниже приведен перечень новых возможностей и особенностей программы:

- Распараллеливание типа MPP можно осуществлять с помощью команд \*CONTROL\_MPP\_DECOMPOSITION во входном наборе карт.
- Используемая при MPP возможность использования произвольного Лагранжа-Эйлера метода (ALE) для текучей среды теперь работает при моделировании развертывания подушки безопасности как в SMP, так и в MPP расчетах.
- Связывание типа Эйлер-Эйлер теперь доступно с помощью ключевого слова \*CONSTRAINED\_EULER\_TO\_EULER.

## ВВЕДЕНИЕ

---

- Можно задавать до десяти ALE-мультматериальных групп. Прежде число таких групп не превышало трех.
- Объем составных частей смеси можно автоматически вводить при инициализации мультматериальных ячеек. См. опцию GEOMETRY ключевого слова \*INITIAL\_VOLUME\_FRACTION.
- Для точного описания ударного фронта методом ALE доступна новая опция сглаживания.
- База данных DATABASE\_FSI активизирует вывод сведений, относящихся к взаимодействию текучей среды с конструкцией, в файл DBFSI формата ASCII.
- Доступны точечные источники для нагнетателей подушки безопасности. Начало координат и вектор массового расхода для этих нагнетателей могут меняться во времени.
- Для расчетов с использованием опции SPH (гидродинамика сглаженных частиц) доступно большинство моделей твердых материалов.
- Доступен метод свободного элемента Галеркина (EFG или метод свободной сетки) для двумерных или трехмерных задач механики твердого тела (для MPP приложенный эта возможность не реализована).
- Доступна бинарная опция для файлов формата ASCII. Может использоваться для всех таких файлов и результатов в одном бинарном файле, который содержит всю информацию, обычно распределенную между большим числом отдельных ASCII файлов.
- Теперь модели материалов могут быть заданы их номерами, а не длинными именами в ключевом вводе. Например, вместо \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY можно использовать ключевое слово \*MAT\_024.
- Доступен встроенный считывающий код для прямого чтения входных файлов NASTRAN. Опция позволяет непосредственно распознавать и использовать типичные файлы ввода для программы NASTRAN. См. ключевое слово \*INCLUDE\_NASTRAN.
- Имена ключевого слова можно заменять числами, если для соотнесения имени и соответствующего числа используется опция \*PARAMETER.
- Теперь можно по выбору вносить информацию о модели в основные выходные файлы формата ASCII. Эта опция дает возможность включать в файлы ASCII дескрипторы (описатели), которые документируют содержимое файла.
- Добавлены идентификаторы для следующих ключевых слов:
  - \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION
  - \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_SPC
  - \*CONSTRAINED\_GENERALIZED\_WELD
  - \*CONSTRAINED\_JOINT
  - \*CONSTRAINED\_NODE\_SET
  - \*CONSTRAINED\_RIVET
  - \*CONSTRAINED\_SPOTWELD
  - \*DATABASE\_CROSS\_SECTION
  - \*ELEMENT\_MASS
- Доступно ключевое слово \*DATABASE\_ADAMS для получения выходного промежуточного файла – в случае обращения пользователя к библиотечному файлу программы ADAMS.
- Добавлена опция выдачи сообщения (в виде символа  $\hat{i}$ ) о возникновении проникания в области контакта. При этом начальное проникание игнорируется. Раньше предупреждение о проникании не выдавалось.
- Для узлов в срединной поверхности элемента сообщение о проникании выводится в случае опции контакта AUTOMATIC. Раньше эти узлы игнорировались, так как предполагалось, что они принадлежат связанным поверхностям взаимодействия и не могут смещаться относительно друг друга, т. е. они не рассматривались как находящиеся в контакте.

- В случае опции точечной сварки ее узлы и контактные сегменты по выбору записываются в файл D3HSP. См. \*CONTROL\_CONTACT.
- В том случае, когда контактный сегмент для точечной сварки не определяется, предусмотрена опция завершения счета. См. \*CONTROL\_CONTACT.
- Результирующие усилия в точечной сварке записываются в файл SWFORC для твердотельных элементов, соединенных сваркой.
- Для “неудачных” элементов добавлен вывод материала.
- Доступна новая опция \*TERMINATION\_CURVE для завершения счета.
- Доступен 10-узловой четырехгранный твердотельный элемент с 4 или 5 точками интегрирования. Этот элемент можно использовать для неявных методов решения.
- Доступен новый 4-узловой линейный оболочечный элемент (тип 21), сочетающий свойства элемента Вильсона для пластин и мембранного элемента Пиан-Сумахара.
- Добавлен элемент для линейных задач расчета панелей с учетом сдвига (тип 22). Может также использоваться для неявных методов решения.
- Доступен балочный нуль-элемент для визуализации. Элемент задается ключевым словом \*ELEMENT\_PLOTEL. Необходим для совместимости с программой NASTRAN.
- Для описания систем “масса-пружина” имеется возможность задания скалярного узла. Вводится ключевым словом \*NODE\_SCALAR. Узел может иметь от 1 до 6 степеней свободы.
- Для задания теплопроводности по толщине оболочечного элемента введена термическая оболочка. Создается 8 дополнительных узлов: по четыре узла выше и ниже срединной поверхности оболочечного элемента. По толщине моделируется квадратичный закон распределения температуры. Термическая оболочка представляет собой 12-узловой твердотельный элемент.
- Для ключевого слова \*ELEMENT\_BEAM доступна опция OFFSET, разрешающая смещение балки относительно ее узловых точек. Это позволяет использовать все балочные формулировки для описания оболочечных элементов жесткости.
- Для векторной ориентации балок (вместо использования третьего узла) доступна опция ORIENTATION ключевого слова \*ELEMENT\_BEAM, используемого для совместимости с программой NASTRAN.
- Для балочных элементов добавлена подгоночная (корректирующая) масса, используемая для обеспечения совместимости с программой NASTRAN.
- Доступна факультативная проверка оболочечных элементов с целью избежать ненормального прекращения счета. См. \*CONTROL\_SHELL. Если эта опция активна, то на каждом шаге по времени для каждого оболочечного элемента проверяется, может ли произойти его инвертирование за счет искажения формы, что вызовет останов программы. Если обнаруживается плохой элемент, то либо он удаляется, либо прекращается счет.
- Добавлена опция смещения к формулировке инерционных свойств. См. ключевое слово \*ELEMENT\_INERTIA\_OFFSET. Это дает возможность смещать тензор инерции от узловой точки.
- К опции контактного взаимодействия выступа волочения добавлен учет пластических деформаций и изменения толщины. См. \*CONTACT\_DRAWBEAD\_INITIALIZE.
- Связанный контакт со смещениями строится как с учетом ограничивающих условий, так и путем введения балочных элементов для твердотельных и оболочечных элементов, которые соответственно имеют 3 и 6 степеней свободы на узел. См. контактные опции BEAM\_OFFSET и CONSTRAINED\_OFFSET. Эти опции не вызывают проблем при описании движения твердого тела.
- Разработан контакт на базе сегмента (SOFT=2) для проведения расчетов типа MPP. Это позволяет легко реализовать моделирование разрывания подушки безопасности в MPP-версии программы.

## ВВЕДЕНИЕ

---

- Проведена модернизация контакта на базе сегмента для условий край-край и условий скольжения, а также для условий контактного взаимодействия, относящихся к искривленным сегментам.
- Внедрен улучшенный внутренний контакт для обработки больших деформаций сдвига в твердотельных элементах. Для четырехгранных элементов доступен специальный алгоритм расчета внутреннего контактного взаимодействия.
- Использовано расширенное связывание с программой MADYMO 6.0, которое дает пользователю возможность соединить большинство геометрических объектов программы MADYMO с конечно-элементным расчетом по программе LS-DYNA. В этом связывании контактные алгоритмы программы MADYMO используются для расчета усилий в области взаимодействия двух расчетных моделей.
- Доступны флаги-признаки сброса степеней свободы для узловых точек внутри жесткого тела. Это делает такую опцию практически совместимой с опцией RBE2, используемой в программе NASTRAN.
- Теперь можно выполнять быстрое обновление данных для жестких тел при моделировании обработки металлов давлением – путем игнорирования вращательных степеней свободы, которые обычно остаются малоподвижными в процессе обработки. См. ключевое слово \*CONTROL\_RIGID.
- Ограничения для центра масс жесткого тела можно вводить с помощью опции SPC, используя локальную или глобальную систему координат.
- Теперь можно использовать результирующие силы и моменты в соединениях при моделировании их разрушения.
- Теперь существует опция TRANSLATIONAL для соединений, обеспечивающих поступательное движение (трансляционные и цилиндрические соединения). См. ключевое слово \*CONSTRAINED\_JOINT\_STIFFNESS.
- Добавлено трение в соединениях с использованием табличного поиска – теперь момент трения может быть функцией результирующей трансляционной силы.
- Опции узловых ограничений \*CONSTRAINED\_INTERPOLATION и \*CONSTRAINED\_LINEAR теперь снабжены локальной опцией для приложения этих ограничений в локальной системе координат.
- Загрубление сетки теперь может быть приложено к краш-моделям автомобилей в начале анализа – для снижения затрат времени. См. новое ключевое слово \*CONTROL\_COARSEN.
- Добавлена опция задания зависимости усилия преднатяжителя ремня безопасности от времени.
- Для колец держателя ремня безопасности доступны как статические, так и динамические коэффициенты трения. Ранее для трения можно было задать только одну константу.
- Ключевое слово \*MAT\_SPOTWELD теперь включает новую модель разрушения, учитывающую эффекты скорости нагружения, а также дополнительные опции разрушения.
- Добавлены определяющие модели для дискретных балочных элементов:
  - \*MAT\_1DOF\_GENERALIZED\_SPRING
  - \*MAT\_GENERAL\_NONLINEAR\_6dof\_DISCRETE\_BEAM
  - \*MAT\_GENERAL\_NONLINEAR\_1dof\_DISCRETE\_BEAM
  - \*MAT\_GENERAL\_SPRING\_DISCRETE\_BEAM
  - \*MAT\_GENERAL\_JOINT\_DISCRETE\_BEAM
  - \*MAT\_SEISMIC\_ISOLATOR
- для оболочечных и твердотельных элементов:
  - \*MAT\_plasticity\_with\_damage\_ortho
  - \*MAT\_simplified\_johnson\_cook\_orthotropic\_damage
  - \*MAT\_HILL\_3R
  - \*MAT\_GURSON\_RCDC
- для твердотельных элементов:

\*MAT\_SPOTWELD  
\*MAT\_HILL\_FOAM  
\*MAT\_WOOD  
\*MAT\_VISCOELASTIC\_HILL\_FOAM  
\*MAT\_LOW\_DENSITY\_SYNTHETIC\_FOAM  
\*MAT\_RATE\_SENSITIVE\_POLYMER  
\*MAT\_QUASILINEAR\_VISCOELASTIC  
\*MAT\_TRANSVERSELY\_ANISOTROPIC\_CRUSHABLE\_FOAM  
\*MAT\_VACUUM  
\*MAT\_MODIFIED\_CRUSHABLE\_FOAM  
\*MAT\_PITZER\_CRUSHABLE\_FOAM  
\*MAT\_JOINTED\_ROCK  
\*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER  
\*MAT\_FHWA\_SOIL  
\*MAT\_SCHWER\_MURRAY\_CAP\_MODEL

- Для модели твердотельных элементов MAT\_EROSION добавлено время разрушения.
- Теперь затухание в моделях материалов \*MAT\_LOW\_DENSITY\_FOAM и \*MAT\_LOW\_DENSITY\_VISCOUS\_FOAM можно задавать в виде табулированной функции наименьшего относительного удлинения.
- Модель материала \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE допускает табличное задание скорости деформации.
- Модификация ключевого слова \*INCLUDE\_STAMPED\_PART теперь допускает отображение на штампованной детали всех зависящих от времени данных, полученных при краш-испытаниях этой детали. Кроме того, при задании начальных условий можно использовать плоскости симметрии для выполнения штамповки за один проход.
- Достигнуто значительное улучшение результатов обрезки (выравнивания) за счет построения гораздо более качественных конечных элементов. Кроме того, такое выравнивание может быть задано в локальной или глобальной системе координат. Это новая опция ключевого слова \*DEFINE\_CURVE\_TRIM.
- Доступна опция сближения частей модели перед решением контактной задачи. См. \*CONTACT\_AUTO\_MOVE.
- Для нового ключевого слова \*PART\_SENSOR доступна опция добавления или удаления дискретных балочных элементов при выполнении расчета.
- Теперь для моделей Hybrid и Chemkin, используемых в расчетах нагнетания подушек безопасности, доступен учет нескольких газовых струй.
- Теперь при проведении расчетов неявными методами могут использоваться практически все типы ограничений.
- Расчет при наличии ограничений и присоединенных режимов можно легко выполнить с помощью опции \*CONTROL\_IMPLICIT\_MODES.
- Штрафная опция, см. \*CONTROL\_CONTACT, теперь может использоваться со всеми вариантами ключевого слова \*RIGIDWALL и всегда применяется при решении неявных задач.
- Твердотельные элементы типов 3 и 4 (4- и 8-узловые элементы с 6 степенями свободы на каждый узел) доступны для проведения неявных расчетов.
- Для неявных решений реализована опция искривленной жесткости для оболочечного элемента Бельчико-Цай. Для приложений с использованием неявных методов теперь доступен оболочечный элемент Бельчико-Вонг-Чанга. Предпочтение отдано методу полной проекции, более точному по сравнению с методом поворотной проекции.
- Реализовано переключение “жесткий/деформируемый материал” для неявных методов решения.
- Можно использовать автоматическое переключение между расчетами явными и неявными методами. См. ключевое слово \*CONTROL\_IMPLICIT\_GENERAL.

## ВВЕДЕНИЕ

---

- Реализован метод неявного динамического расчета для жестких тел. См. ключевое слово `*CONTROL_IMPLICIT_DYNAMIC`.
- При выполнении переходного анализа можно периодически выполнять поиск собственных значений.
- Реализована опция определения линейной устойчивости. См. новую карту ввода `*CONTROL_IMPLICIT_BUCKLE`.
- Вместо динамической релаксации можно использовать неявную инициализацию. См. ключевое слово `*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION`, где параметр `IDFLG` задан равным 5.
- Суперэлемент (`*ELEMENT_DIRECT_MATRIX_INPUT`) теперь доступен для неявных приложений.
- Существует расширение опции `*BOUNDARY_CYCLIC` для плоскостей симметрии в глобальной декартовой системе. Кроме того, теперь в программе LS-DYNA делается автоматическая сортировка узлов в плоскостях симметрии.
- Доступно моделирование контакта “рельс-колесо” в соответствующих приложениях. См. ключевые слова `*RAIL_TRACK` и `*RAIL_TRAIN`.
- Для проведения анализа вибрационных процессов доступна новая формулировка элемента, снижающая потребление ресурсов CPU. Элемент связан с глобальной системой координат. См. формулировку 98 для ключевых слов `*SECTION_SOLID` и `*SECTION_SHELL`.
- Реализована опция для задания почти постоянного затухания колебаний в некоторой области частот, см. `*DAMPING_FREQUENCY_RANGE`.

Много новых возможностей было добавлено в течение 2003-2005 гг. при создании версии 971 программы LS-DYNA. Первоначально было намечено вслед за версией 970 быстро выпустить версию 971 (с полностью функционирующими возможностями для процессов с распределенной памятью, которые используют технологию MPI). К сожалению, усилия, которые требовались для распараллеливания этой версии, были сильно уменьшены и, в результате, выпуск версии был отсрочен. Из-за этой задержки версия 971 превратилась в основной релиз программы. Некоторые из новых особенностей, которые приведены ниже, были также включены в более поздние выпуски версии 970. Новые возможности для неявных методов реализованы в MPP варианте и, за исключением одного случая, – также и в варианте SMP.

Ниже приводится перечень новых возможностей и особенностей:

- С помощью ключевого слова `*AIRBAG_ALE` теперь доступен упрощенный метод использования подхода ALE к расчету подушек безопасности.
- Способ последовательного выполнения нескольких расчетных вариантов за один прогон обеспечивается картой контроля случаев нагружения `*CASE`.
- Для расчета контактного взаимодействия соответствующих поверхностей используется ключевое слово `*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_SMOOTH`.
- Стыковой сварной шов задается новой опцией `*CONSTRAINED_BUTT_WELD`.
- С помощью ключевого слова `*CONTROL_ADAPTIVE` процесс плавления можно рассматривать как h-адаптивный.
- Добавлен параметр `*CONTROL_ADAPTIVE` для указания числа элементов, генерируемых на дуге в 90 градусов. Также реализована новая опция для более точного расчета кривизны.
- Для измельчения элементов вдоль выравнивающих кривых добавлено новое ключевое слово `*CONTROL_ADAPTIVE_CURVE`.
- Моменты времени для расчетов динамики неявными методами определяются ключевым словом `*CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS`.
- Добавлена опция масштабирования результирующих сил и моментов при разрушении точечной сварки с целью учета расположения сварного соединения на поверхности сегмента. См. `*CONTROL_SPOTWELD_BEAM`.

- Добавлена опция, которая автоматически заменяет точечную сварку для балки набором твердотельных элементов с сохранением идентификатора замещаемой балки. См. \*CONTROL\_SPOTWELD\_BEAM.
- Задание ограничения на границе в локальной системе координат с использованием ключевого слова \*CONSTRAINED\_LOCAL.
- Для доступа к элементу с интерполяцией кубическим сплайном используется ключевое слово \*CONSTRAINED\_SPLINE.
- С помощью ключевого слова \*CONTROL\_IMPLICIT\_INERTIA\_RELIEF возможен неявный статический анализ конструкции в режиме твердого тела.
- Учет изменения толщины оболочечных элементов теперь можно проводить для ограниченного набора идентификаторов. См. \*CONTROL\_SHELL. С целью повышения устойчивости краш-анализа такой учет можно факультативно ограничить пластической частью тензора деформаций.
- Напряжения в объемных элементах, обусловленные точечной сваркой факультативно можно вывести в локальной системе, используя параметр SWLOCL ключевого слова \*CONTROL\_SOLID.
- Опция SPOTHIN ключевого слова \*CONTROL\_CONTACT локально утоняет части, свариваемые точечной сваркой, для того чтобы предотвратить преждевременное разрушение сварного соединения в процессе расчета.
- Введена новая функция \*CONTROL\_FORMING\_PROJECT, которая может изначально переместить проникающие подчиненные узлы к мастер-поверхности.
- Новая функция \*CONTROL\_FORMING\_TEMPLATE позволяет пользователю легко собрать входную колоду. Она содержит автопозиционирование карт, задание кривых, время останова и большинство формирующих параметров для типичных процессов штампования.
- Новые карты \*CONTROL\_FORMING\_USER, \*CONTROL\_FORMING\_POSITION и \*CONTROL\_FORMING\_TRAVEL, используемые совместно, могут помочь пользователю задать нетипичный процесс штамповки.
- Добавлен новый тип контакта \*CONTACT\_GUIDED\_CABLE.
- При использовании ключевого слова \*DATABASE\_CROSS\_SECTION доступны плоскости в виде круга.
- Новая бинарная база данных FSIFOR для связанных задач “текущая среда-конструкция”.
- Добавлена карта \*DATABASE\_BINARY\_D3PROP для записи свойств материалов в первый файл D3PLOT или в новую базу данных D3PROP.
- Карта DATABASE\_EXTENT\_BINARY снабжена новыми флагами-признаками для организации вывода значений пикового давления, плотности поверхностной энергии, увеличения узловых масс за счет масштабирования, тепловых потоков и температур на внешней поверхности термической оболочки.
- Теперь для параметров SECID, MID, EOSID, HGID и TMID ключевого слова \*PART можно использовать буквенно-цифровые обозначения из 8 символов.
- Для сохранения выходных узловых результатов теперь используются 2 файла NODOUT: один для “высокочастотного” вывода, другой – для “низкочастотного”.
- Информация о масштабировании узловых масс может факультативно записываться в файл D3PLOT.
- Добавлена опция MASS\_PROPERTIES для включения массовых и инерционных свойств в файлы GLSTAT и SSSTAT.
- Добавлена опция ключевого слова \*CONTROL\_CPU для вывода значений времени CPU и фактической продолжительности работы в файл GLSTAT.
- Добавлена опция IERODE ключевого слова \*CONTROL\_OUTPUT для включения значения энергии, рассеянной в части с идентификатором ID, в файл MATSUM. Сосредоточенная кинетическая энергия массы также вносится в файл MATSUM с идентификатором ID 0.

## ВВЕДЕНИЕ

---

- Добавлена опция TET10 ключевого слова \*CONTROL\_OUTPUT для вывода 10 связанных узлов в базу данных D3PLOT (а не 4, как прежде).
- Добавлено новое ключевое слово \*ELEMENT\_SOLID\_T4TOT10 для преобразования 4-узловых четырехгранных элементов в 10-узловые четырехгранные элементы.
- Новое ключевое слово \*ELEMENT\_MASS\_PART задает взвешенное распределение дополнительной массы по всем узлам части с идентификатором ID.
- Новая опция SET ключевого слова \*INITIAL\_STRESS\_SHELL\_SET задает напряженное состояние для набора оболочечных элементов.
- Новая опция ключевого слова \*KEYWORD используется для вывода числа CPU.
- Введена опция выделения выступа волочения для элементов, которые входят в выделенную область контакта. См. \*DEFINE\_BOX\_DRAWBEAD.
- Новая функция \*DEFINE\_CURVE\_DRAWBEAD позволяет пользователю удобно задавать область выступа волочения с помощью кривых (в координатах x, y или в формате IGES).
- Новая функция \*DEFINE\_DRAWBEAD\_BEAM позволяет пользователю удобно задавать область выступа волочения с помощью части-балки с идентификатором ID и указывать усилие контакта.
- Вместо кривой нагружения можно использовать аналитическую функцию с опцией \*DEFINE\_CURVE\_FUNCTION.
- Теперь для задания трения между двумя частями модели можно использовать ввод \*DEFINE\_FRICTION.
- Новое ключевое слово \*DEFINE\_CURVE\_TRIM\_3D позволяет проводить выравнивание с использованием нормалей пустых элементов, а не путем указания заранее выбранных направлений.
- Добавлен новый алгоритм выравнивания \*DEFINE\_CURVE\_TRIM\_NEW, который использует начальный (“посеянный”) узел и работает намного быстрее прежнего алгоритма.
- Доступно новое ключевое слово \*DEFINE\_HEX\_SPOTWELD\_ASSEMBLY для задания кластера объемных элементов, который отображает одиночную сварную точку.
- Можно задать вектор (см. \*DEFINE\_VECTOR), указав его координаты в локальной системе.
- Возможно табличное задание критерия разрушения для сварного соединения двух частей модели (См. \*DEFINE\_SPOTWELD\_FAILURE\_RESULTANTS).
- Доступно новое ключевое слово \*DEFINE\_CONNECTION\_PROPERTIES для задания прочностных свойств точечной сварки.
- Добавлено ключевое слово \*DEFINE\_SET\_ADAPTIVE для задания уровня адаптации и размера элемента с использованием идентификаторов части или набора элементов.
- Напряжения статического разрушения для точечной сварки балочного типа можно задавать картой \*DEFINE\_SPOTWELD\_RUPTURE\_STRESS.
- Параметры поперечного сечения можно задать с помощью опции SECTION ключевого слова \*ELEMENT\_BEAM.
- Физическое смещение исходной поверхности оболочечного элемента можно указать с помощью опции OFFSET ключевого слова \*ELEMENT\_SHELL.
- Имена файлов могут находиться в удаленных каталогах, доступ к которым обеспечивается ключевым словом \*INCLUDE\_PART.
- Новые свойства ключевого слова \*INCLUDE\_STAMPED\_PART: две зеркальные опции и задаваемый пользователем перебор радиусов.
- Ключевое слово \*INITIAL\_STRESS\_SECTION используется для задания напряжений в поперечном сечении, образованном твердотельными элементами.
- Доступна опция IVATN для установки значений скорости подчиненных узлов и частей в ключевом слове \*INITIAL\_VELOCITY\_GENERATION.



- Теперь доступны 22 встроенных поперечных сечений при задании законов интегрирования для балочных элементов, см. \*INTEGRATION\_BEAM.
- Доступна возможность изменения типа материала для оболочечных элементов, в которых используется заданный пользователем закон интегрирования, см. \*INTEGRATION\_SHELL.
- Файл пружинения границы раздела, который создается при обращении к ключевому слову \*INTERFACE\_SPRINGBACK, факультативно можно записать в двоичном формате.
- Задаваемая факультативно строка ввода для ключевого слова \*KEYWORD дает возможность задать префикс для всех имен файлов, создаваемых во время расчета. Это позволяет выполнить несколько заданий в одной директории.
- Теперь объемные нагрузки можно прикладывать в локальной системе координат. См. \*LOAD\_BODY.
- Особенностью задания поверхностной нагрузки является приложение движущегося по поверхности давления. Это имитирует действие на поверхность струи газа, истекающей из сопла. См. \*LOAD\_MOVING\_PRESSURE.
- Термическое расширение учитывается для любого материала ключевым словом \*MAT\_ADD\_THERMAL\_EXPANSION.
- Теперь вместо задания параметров модели материала в виде восьмизначных чисел можно использовать графические зависимости, используя ключевое слово \*MAT\_ELASTIC\_WITH\_VISCOSITY\_CURVE.
- Для балочных и объемных элементов существуют новые опции, определяющие критерии разрушения точечной сварки. См. \*MAT\_SPOTWELD.
- В ключевое слово \*MAT\_ANISOTROPIC\_VISCOPLASTIC добавлен критерий разрушения, основанный на величине пластической деформации.
- В ключевое слово \*MAT\_MODIFIED\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY введен критерий разрушения, учитывающий скорость деформации.
- Зависимость напряжений текучести от скорости деформации можно ввести отдельно для растяжения и сжатия для материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию. См. \*MAT\_PLASTICITY\_TENSION\_COMPRESSION.
- Теперь модель разрушения RCDC доступна при использовании материала \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE.
- Добавлены две дополнительные поверхности текучести для модели материала \*MAT\_MODIFIED\_HONEYCOMB. Это сделано для более точного описания поведения ячеистого материала преград.
- Для двух узлов модели \*MAT\_1DOF\_GENERALIZED\_SPRING могут использоваться уникальные системы координат.
- Для материала \*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER/FOAM доступны кривые нагружения, учитывающие влияние коэффициента Пуассона.
- В резиновых и вспененных материалах, свойства которых заданы кривыми в ключевом слове \*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER/FOAM\_WITH\_FAILURE, доступны эффекты разрушения.
- Опция ключевого слова \*MAT\_ADD\_EROSION позволяет теперь задавать максимальное давление при разрушении и минимальное значение главной деформации при разрушении.
- В модели материала для дискретной балки, задаваемого ключевым словом \*MAT\_GENERAL\_NONLINEAR\_6DOF\_DISCRETE\_BEAM, теперь можно использовать значения деформаций, а не перемещений.
- Два способа изменения значения модуля Юнга при моделировании формоизменения заготовки при штамповке обеспечивает новая опция ключевого слова \*MAT\_TRANSVERSELY\_ANISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC\_(ECHANGE).
- Новая модель материала \*MAT\_HILL\_3R, учитывающая сдвиг, использует модель анизотропного материала, предложенную Хиллом в 1948 году.
- Свойства материала Mat #37 и предложенная Ёшида модель для материала с кинематическим упрочнением интегрированы в новую модель анизотропного

## ВВЕДЕНИЕ

---

- материала \*MAT\_KINEMATIC\_HARDENING\_TRANSVERSELY\_ ANISOTROPIC.
- Улучшены формулировки 2, 3 и 4 тканого материала \*MAT\_FABRIC. Новые формулировки имеют обозначения 12, 13 и 14.  
Улучшены формулировки следующих ключевых слов:
    - \*MAT\_MUSCLE;для балочных элементов
    - \*MAT\_MOMENT-CURVATURE;для оболочечных элементов
    - \*MAT\_RESULTANT ANISOTROPIC
    - \*MAT\_RATE\_SENSITIVE\_COMPOSITE\_FABRIC
    - \*MAT\_SAMP-1
    - \*MAT\_SHAPE\_MEMORY (реализовано для оболочечных элементов);для оболочечных и объемных элементов
    - \*MAT\_BARLAT\_YLD2000 (для анизотропных алюминиевых сплавов)
    - \*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER\_WITH\_DAMAGE
    - \*MAT\_VISCOELASTIC\_THERMAL
    - \*MAT\_THERMO\_ELASTO\_VISCOPLASTIC\_CREEP;для объемных элементов
    - \*MAT\_ARUP\_ADHESIVE
    - \*MAT\_BRAIN\_LINEAR\_VISCOELASTIC.
    - \*MAT\_CSCM (для моделирования бетона)
    - \*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION\_EOS (для моделирования льда)
      - \*MAT\_COHESIVE\_ELASTIC
      - \*MAT\_COHESIVE\_TH
      - \*MAT\_COHESIVE\_GENERAL
      - \*MAT\_EOS\_GASKET
      - \*MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK (реализовано для оболочечных элементов)
      - \*MAT\_PLASTICITY\_WITH\_DAMAGE (реализовано для оболочечных элементов)
      - \*MAT\_SPOTWELD\_DAIMLERCHRYSLER.
  - Теперь доступны уравнения состояния, заданные пользователем.
  - Теперь существует интерфейс для кода MOLDFLOW.
  - Затухание, заданное в карте \*DAMPING\_PART\_STIFFNESS, теперь применимо к балочному элементу Бельчко-Швера.
  - Опция \*NODE\_TRANSFORMATION дает возможность преобразовать набор узлов в соответствии с условиями преобразования, которые заданы в карте \*DEFINE\_TRANSFORMATION.
  - Параметры могут быть заданы выражениями, аналогичными используемым в языке программирования FORTRAN с помощью карты \*PARAMETER\_EXPRESSION.
  - Часть модели можно переместить в локальную систему координат. См. карту \*PART\_MOVE.
  - Доступен упрощенный метод задания слоев композита с помощью ключевого слова \*PART\_COMPOSITE.
  - Ключевое слово \*CHANGE\_RIGID\_BODY\_INERTIA может изменять инерционные свойства жесткого тела при рестарте.
  - Теперь набор частей можно задавать путем комбинирования других наборов частей в карте \*SET\_PART\_ADD.
  - Прекращение расчета теперь возможно в случае, если в части с идентификатором ID будет удалено заданное наперед число оболочечных элементов. См. \*TERMINATION\_DELETED\_SHELLS.

- Добавлен контроль (типа 7) искажений формы объемных элементов при использовании сверхупругих материалов.
- Теперь для моделирования резины можно использовать оболочечные элементы с формулировками 4, 11, 16 и 17.
- Добавлен новый преднатяжитель ремня безопасности типа 7, для которого усилия преднатяжителя и натяжителя ремня безопасности рассчитываются независимо и складываются.
- Доступен новый объемный элемент типа 17 в виде композитного четырехгранного элемента, состоящего из 12 четырехгранников.
- Теперь смещение толщины, задаваемое картой \*SECTION\_SHELL, доступно для большинства оболочечных элементов, а не только для элемента Хьюса-Лю.
- Балочный элемент Хьюса-Лю включает искривление открытых поперечных сечений.
- Доступна формулировка балочного элемента типа 12, учитывающая искривление сечения при расчете результирующих усилий и моментов.
- Доступны два нелинейных оболочечных элемента с 8 степенями свободы на узел, учитывающие изменение толщины.
- Четырехгранный элемент типа 13, для которого используется приложение давление в узлах, теперь реализован для неявных приложений.
- Клеящиеся объемные элементы теперь можно использовать в расчетах разрушения.
- Оболочечные элементы для ремня безопасности теперь обладают всеми необходимыми расчетными возможностями.
- Теперь суперэлементы могут делиться степенями свободы и использоваться в неявных приложениях с учетом требований стандарта MPI.
- Для объемных и оболочечных элементов доступен интерфейс, задаваемый пользователем.
- Доступны тепловые оболочечные элементы, которые можно использовать для расчета теплового потока в оболочечных элементах.
- Реализованы формулировки оболочечных элементов EFG типа 41 и 42 для явных методов анализа.
- Реализована опция EFGPACK для решателя BCSLIB-EXT, используемого с ключевым словом \*CONTROL\_EFG.
- Версия EFG MPP доступна для явного анализа.
- Быстрый метод преобразования EFG реализован для случая объемной формулировки EFG-подхода.
- Для вспененных материалов добавлены опции EFG: с ядром “полулагранжева” метода и ядром метода Эйлера.
- Для металлических материалов реализован адаптивный метод расчета EFG 3D.
- Формулировка 4-узловых элементов среды дополнена уравнением состояния EFG E.O.S. и картой материала \*MAT\_ELASTIC\_FLUID.
- Численный расчет подушки безопасности методом ALE можно переключить на метод контрольного объема с помощью ключевого слова \*ALE\_CV\_SWITCH.
- Ключевое слово \*MAT\_ALE\_VISCOUS теперь обеспечивает учет неньютоновской вязкости заданием степенной зависимости или графика.
- Ключевое слово \*DATABASE\_BINARY\_FSIFOR используется для вывода в бинарный файл результатов решения связанной задачи взаимодействия текучей среды с конструкцией.
- Вывод значений давления для элементов метода ALE в файл dbsof формата ASCII осуществляется картой \*DATABASE\_FSI\_SENSOR.
- Ключевое слово \*MAT\_GAS\_MIXTURE поддерживает нелинейные тепловые возможности.
- Ключевое слово \*INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY использует расширенный алгоритм обработки поверхностей как вогнутой геометрии, так и выпуклой, что существенно снижает затраты времени.

## ВВЕДЕНИЕ

---

- Новое ключевое слово \*DELETE\_FSI разрешает отмену связывания.
- Конвективный теплоперенос в анализе взаимодействия ALE FSI активизируется картой \*LOAD\_ALE\_CONVECTION.
- Ключевое слово \*ALE\_FSI\_SWITCH\_MMG используется для переключения между мультиматериальными ALE группами при решении задач взаимодействия FSI в случае заглубления.
- Для ключевого слова \*ALE\_REFERENCE\_SYSTEM\_GROUP добавлена опция типа 9 для обработки сложных движений сетки ALE (перемещение, вращение, растяжение, сжатие и т. д.)
- Новые опции карты \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID:
  - толщина оболочечного элемента при связывании типа 4;
  - связывание жесткости на базе объемных модулей;
  - обработка разрушения оболочечного элемента;
  - запуск/отмена файла для фиксации усилия в области раздела.
- Для ключевого слова \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID реализован новый метод связывания для задачи протекания жидкости в пористой среде: тип 11 (оболочечные элементы) и тип 12 (объемные элементы).
- Ключевое слово \*ALE\_MODIFIED\_STRAIN допускает наличие нескольких полей деформации в определенных ALE элементах при решении задач FSI с учетом “прилипания”. Метод MPP находится в стадии разработки.
- Добавлено ключевое слово \*ALE\_FSI\_PROJECTION, реализующее новый метод ограничения для решения связанной задачи при малых вариациях давления. Метод MPP находится в стадии разработки.
- Добавлена карта \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_ORIENTATION\_RIGID в качестве средства задания общей ориентации жесткого тела как функции времени, полученной различными методами. Эта возможность доступна начиная с релиза R3 версии 971.
- Добавлена карта \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_ACCELEROMETER\_RIGID для задания движения жесткого тела в соответствии с экспериментальными данными, полученными с помощью акселерометров, закрепленных на жестком теле. Эта возможность доступна начиная с релиза R3 версии 971.

## МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

Некоторые из моделей материалов, реализованные к настоящему времени, представлены ниже:

- упругость,
- ортотропная упругость,
- кинематическая/изотропная пластичность [14],
- термоупругопластичность [15],
- грунт и сминаемый/несминаемый пеноматериал [16],
- линейновязкоупругость [16],
- резина Блац-Ко (Blatz-Ko) [16],
- модель горения бризантного взрывчатого вещества,
- бездевиаторная гидродинамика жидкости,
- упругопластическая гидродинамическая модель,
- упругопластичность, зависящая от температуры [17],
- изотропная упругопластичность,
- изотропная упругопластичность с учетом разрушения,
- грунт и сминаемый пеноматериал с учетом разрушения,
- модель пластичности Джонсона/Кука (Johnson/Cook) [18],
- модель геологического материала, используемая в коде TENSOR [19],
- упругопластичность с учетом разрушения,

- изотропная пластичность со степенным законом упрочнения,
- пластичность с учетом скорости деформаций,
- абсолютно твердое тело,
- ортотропная термопрочность,
- модель композитного материала с повреждениями [20, 21],
- 12 соотношений для ортотропной термопрочности,
- кусочнолинейная изотропная пластичность,
- двухинвариантная модель сыпучей среды для геологического материала [22, 23, 24],
- модель сминаемого ортотропного материала,
- резина Муни-Ривлина (Mooney-Rivlin),
- конечное соотношение деформационной теории пластичности,
- конечное соотношение деформационной теории с ограниченным взаимодействием усилий и моментов,
- замкнутая форма пластичности для оболочек,
- модель резины Фрезера-Нэша (Frazer-Nash),
- модель многослойного стекла,
- модель тканого материала,
- объединенная модель пластичности и ползучести,
- пластичность, зависящая от температуры и скорости деформаций,
- упругость с вязкостью,
- анизотропная пластичность,
- модель, определяемая пользователем,
- сминаемые сотовые пеноматериалы [25],
- уретановый пеноматериал с гистерезисом.

Имеются и другие модели вспененных и резиновых материалов, а также модели материалов для дискретных пружин и демпферов. Гидродинамические модели материалов определяют только девиаторные напряжения. Давление задается одним из десяти уравнений состояния, которые включают:

- линейный многочлен [26],
- уравнение состояния JWL (Jones, Wilkins и Lee) для взрывчатого вещества [27],
- соотношение Сэка «Вторник» для взрывчатого вещества [26],
- соотношение Грюнайзена [26],
- отношение полиномов [26],
- линейный полином с учетом вклада энергии,
- воспламенение и развитие реакции в высокоэнергетической взрывчатке [28, 29],
- табулированные данные в компактном виде,
- табулированные данные,
- разрушение пор в соответствии с реализацией в программе TENSOR [30].

Уравнение состояния с учетом воспламенения и развития реакции было адаптировано из программы KOVEC [26]; другие разработанные подпрограммы основаны частично на приведенных источниках и почти на 100% векторизованы. Форма первых пяти уравнений состояния приведена в Руководстве по программе KOVEC и сохранена в этом Руководстве.

Модель горения мощного взрывчатого вещества описана Джайруксом (Giroux) [23, 24]. В подпрограммах описания ортотропной упругости и поведения резинового материала используются деформации Сен-Венана для вычисления напряжений второго порядка Пиола-Кирхгоффа, которые преобразуются к напряжениям Коши. Для зависимости напряжений от скорости деформаций используется формулировка Джаумана для всех мо-

# ВВЕДЕНИЕ

---

делей материалов, кроме одной модели пластичности, в которой используется формулировка Грина-Нагди.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ

Доступные в настоящее время конечные элементы приведены на рис. I.1. Включены дискретные пружины, амортизаторы и конечные элементы: балочные, мембранные, оболочечные, элементы-бруски, толстостенные оболочечные, а также элементы для моделирования ремней безопасности.

Первым оболочечным элементом в программе DYNA3D был элемент Хьюса и Лю (Hughes и Liu) [31, 32, 33], который был реализован так, как представлено в работе [34, 35]. Этот элемент (обозначаемый далее как HL) был выбран из большого числа описанных в литературе оболочечных элементов потому, что он обладает несколькими замечательными особенностями:

- Используются приращения деформаций (поворот элемента как твердого тела деформаций не вызывает), что позволяет учитывать конечные деформации во многих практических приложениях.
- Совместим с элементами-брусками, поскольку элемент HL построен в соответствии с формулировкой вырожденного элемента в форме бруска. Такая совместимость дает возможность использовать для оболочечных элементов многие рациональные и эффективные приемы, разработанные для элементов-брусков программы DYNA3D.
- Учитывает конечные деформации сдвига в поперечном направлении.
- Имеет опцию учета изменения толщины поперечного сечения (см. [36]).

Все оболочечные элементы, используемые в данной версии программы LS-DYNA, должны, хотя бы до некоторой степени, располагать такими крайне желательными особенностями, которые делают их полезными при моделировании процессов формования металлов и анализе столкновений.

Основной недостаток элемента HL связан с высокими затратами вычислительных ресурсов. По этой причине в течение года после его внедрения шло ознакомление с оболочечным элементом ВТ - элементом Бельчико-Цая (Belytschko-Tsay) [8, 37, 38] в качестве более эффективного с точки зрения затрат вычислительных ресурсов, но, возможно, менее точного варианта. Для элемента ВТ принято, что геометрия оболочки совершенно плоская, локальная система координат относится к первому узлу связности элемента, а расчет напряжений делается на основе гипотезы плоских сечений, без использования трудоемкого подхода Джаумана. На основе этих и других упрощений был получен очень эффективный оболочечный элемент, который стал, возможно, самым распространенным элементом для моделирования процессов формования металлов и анализа столкновений. Результаты, полученные с использованием элемента ВТ, обычно хорошо согласуются с результатами для более затратного элемента HL. На основе работы Бельчико и других авторов [39, 10, 40] реализован треугольный оболочечный элемент, который часто применяется, так как разрушенные четырехугольные оболочечные элементы имеют тенденцию смыкаться и давать очень плохие результаты. Программа LS-DYNA автоматически обрабатывает разру-

шенные четырехугольные оболочечные элементы как треугольные элементы с функциями формы класса  $C^0$ .

Поскольку элемент Бельчко-Цая описывает совершенно плоскую геометрию, то его искривления не рассматриваются. И хотя в общем случае это не вызывает больших трудностей и обеспечивает высокую эффективность, известны некорректные результаты, полученные для задачи о кривом стержне, а также в ситуациях, когда узлы элементов некомпланарны. Оболочечный элемент Хьюса-Лю применим для искривленных поверхностей и обеспечивает хорошие результаты для кривого стержня. В типичных приложениях эффект пренебрежения искривлением трудно предвидеть заранее и это может привести к несколько неточным результатам, но это только предположение, которое трудно проверить практически. Очевидно, лучше использовать оболочечный элемент, который учитывает искривления, если затраты достаточно разумны, а неизвестные эффекты не проявляются. Еще один оболочечный элемент, представленный Бельчко, Вонгом и Чангом [Belytschko, Wong и Chiang 1989, 1992], включает изгибную жесткость в элемент Бельчко-Цая сравнительно простым способом. Уточненная трактовка деформаций поперечного сдвига в этом элементе позволяет обойти ограничения гипотез Кирхгоффа. Теперь этот элемент используется в программе LS-DYNA. Кроме того, эта программа располагает двумя полноинтегрируемыми оболочечными элементами в формулировке Хьюса-Лю, но их применение обходится довольно дорого. Сравнительно недавно добавлен быстродействующий элемент, который, по существу, является версией элемента Бельчко-Вонга-Чанга, тип 16. Его рекомендуется использовать, если есть потребность в весьма эффективном, полноинтегрируемом элементе.

Реализованы определяющие подпрограммы расчета трехмерного напряженного состояния для итеративной корректировки тензора напряжений оболочечных элементов таким образом, чтобы нормальные к срединной поверхности напряжения были равны нулю. Итеративное обновление необходимо для точного определения нормальной компоненты деформации, чтобы иметь возможность рассчитать изменение толщины оболочки. Такие вычисления проводятся для каждой точки интегрирования по толщине оболочки.

Формы оболочечных или объемных элементов с нулевой энергией подавляются с помощью введения вязкости или жесткости. Реализованы восьмиузловые элементы толстостенной оболочки, оказавшиеся полезными во многих приложениях. Все классы элементов почти на 100% векторизованы. Конечные элементы всех классов могут быть включены как части твердого тела. Формулировка абсолютно твердого тела приведена в работе [41]. К такому твердому телу можно присоединить твердотельные точечные узлы, а также сосредоточенные массы, пружины и амортизаторы.

Мембранные элементы можно определить непосредственно как оболочечные элементы при соответствующем выборе опции или как оболочечные элементы только с одной точкой интегрирования по толщине. В последнем случае не исключается наличие жесткости поперечного сдвига, что может оказаться неуместным. Для материала подушки безопасности разработан специальный, полноинтегрируемый мембранный элемент с тремя или четырьмя узлами.

Доступны два типа балочных элементов: с вычислением напряжений по заданным характеристикам поперечного сечения балки (на основе гипотезе плоских сечений) и с интегрированием по поперечному сечению в одной точке. Интегрирование по поперечному сечению позволяет учесть нелинейность материала при произвольной форме сечения.

Пружины и амортизаторы могут иметь поступательные или поворотные степени свободы. Имеется возможность задавать многие опции поведения, например, произвольное нелинейное поведение конечных элементов с блокированием и разделением их соединений.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Объемные элементы в программе LS-DYNA могут быть заданы 4- или 8-узловыми. Стандартные элементы построены на функциях линейной формы и используют одноточечное интегрирование с подавлением искажений формы типа песочных часов. 8-узловой элемент с избирательно пониженным порядком интегрирования (называемый полноинтегрируемым) полезен в ситуациях, когда подавление искажений формы элемента в форме песочных часов затруднено. Кроме того, введены два дополнительных объемных элемента. 4-узловой тетраэдрный и 8-узловой шестигранный с поворотными степенями свободы в узлах – для реализации идеи Альмана [42] о замене поступательных степеней свободы в узлах на середины сторон элементов с квадратичными функциями формы, соответствующими поворотными степенями свободы в угловых узлах. Эти элементы, не нуждающиеся в подавлении искажений формы, требуют выполнения большого числа арифметических операций по сравнению с элементами, подавляющими искажения, и должны использоваться там, где последние не справляются. Однако хорошо известно, что элементы, которые используют более одной точки интегрирования, в большей степени чувствительны к искажениям формы, чем элементы с одноточечным интегрированием.

Элемент толстостенной оболочки является оболочечным элементом с одной поступательной степенью свободы в восьми узлах. Предположения теории оболочек реализованы нестандартным образом. В элементе также используется подавление искажений формы и избирательно понижаемый порядок интегрирования. Его можно использовать вместо любого 4-узлового оболочечного элемента. Элемент полезно применять в областях перехода от оболочечных элементов к элементам-брускам, поскольку нет необходимости в дополнительных условиях-ограничениях. Однако следует принимать во внимание, в каком направлении ориентированы оболочечные свойства элемента; поэтому важным является порядок нумерации узлов элемента.

Элементы для моделирования ремней безопасности можно отдельно определить для модели работы привязных ремней в сочетании с моделями манекенов. Возможно отдельное моделирование привязных ремней одномерными конечными элементами вместе с акселерометрами, сенсорами, натяжителями и зажимными кольцами. Можно также произвольно комбинировать функционирование различных составных частей ремня безопасности.



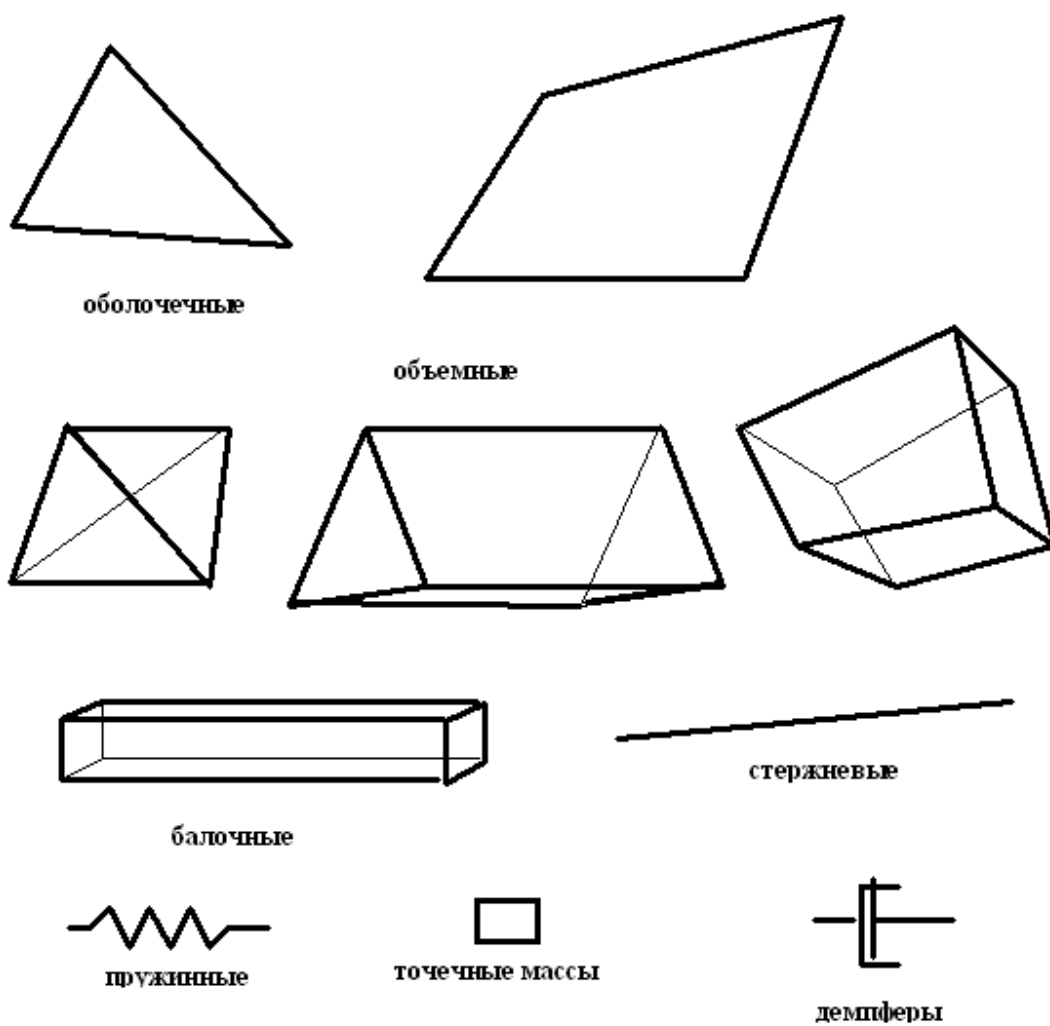


Рис. I.1. Конечные элементы программы LS-DYNA.

## КОНТАКТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Трехмерный алгоритм контактного взаимодействия первоначально был расширением двумерного алгоритма программы NIKE2D [15]. В настоящее время принято считать, что одна из граничащих поверхностей определяется как главная поверхность (мастер-поверхность), а другая — как подчиненная. Каждая поверхность задается набором из 3-узловых или 4-узловых сегментов, называемых главными и подчиненными сегментами, по которым должны скользить узлы подчиненной и главной поверхностей соответственно. В общем случае исходными данными для контактного алгоритма является перечень главных и подчиненных сегментов. При использовании алгоритма единой поверхности задается только подчиненная поверхность, и на каждом шаге решения для каждого узла этой поверхности делается проверка, нет ли проникания узла сквозь поверхность. Логика алгоритма [34, 43] определяет главный сегмент для каждого подчиненного узла и подчиненный сегмент для каждого главного узла, обновляя эту информацию на каждом шаге решения, так как узлы скользят по соответствующей поверхности. Следует заметить, что для полной автоматизации задания контактов должны быть определены только данные раздела Части/Материалы или трехмерные прямоугольные области. Контактующие поверхности определяются затем внутренней логикой программы LS-DYNA. В настоящее время можно задать более 20 типов контактного взаимодействия, к которым относятся следующие:

- только скольжение для границ раздела жидкость/структура или газ/структура, связанные поверхности,
- скольжение, соударение, трение,
- единая поверхность контакта,
- дискретные узлы ударяющей поверхности,
- дискретные узлы, связанные с поверхностью,
- край оболочки, связанный с поверхностью оболочки,
- узлы, закрепленные точечной сваркой на поверхности,
- поверхность раздела с разрывом связей,
- односторонняя обработка линий скольжения контакта, соударение, трение,
- автоматический контакт для оболочек с вводом исходных данных для материала,
- автоматический контакт для оболочек (дополнительный ввод данных не требуется),
- автоматический контакт балок по единой поверхности при произвольной ориентации,
- разрушаемый контакт "поверхность-поверхность",
- разрушаемый контакт узла с поверхностью,
- разрушаемый контакт для единой поверхности,
- метод симметричных ограничений "поверхность-поверхность" [44],
- метод ограничений "узел-поверхность" [44],
- контакт "твердое тело-твердое тело" с произвольной кривой "сила-смещение",
- контакт "твердые узлы-твердое тело" с произвольной кривой "сила-смещение",
- контакт "кромка-кромка",
- контакт для моделирования штамповки сферических или прямоугольных выступов.

Наличие трения между контактирующими поверхностями можно учитывать для большей части типов контакта. Варианты контактного взаимодействия со связями и со скольжением подобны двумерному алгоритму, реализованному в программе LS-DYNA2D [1, 6, 45]. В отличие от общего подхода контакт со связями не является симметричным; поэтому поверхность с более крупной сеткой должна выбираться в качестве главной (ма-

стер-поверхности). При использовании поверхности с однонаправленным скольжением в качестве главной следует выбирать поверхность твердого материала.

При наличии геометрического контакта объектов их контактное взаимодействие должно быть задано отдельно. Следует заметить, что при контакте твердого тела с податливым можно использовать или задание скользящей поверхности, как пояснено выше, или геометрический контакт. В настоящее время для проблем формования листового металла рекомендуется задание геометрического контакта объектов, что объясняется высокой точностью и эффективностью расчета в этом случае.

### КОНТАКТНЫЙ ИНТЕРФЕЙС ПРИ АНАЛИЗЕ ДЕТАЛЕЙ

Определение контактного интерфейса для анализа детали используется с тем, чтобы задать поверхности, линии узлов или положения узлов (\*INTERFACE\_COMPONENTS), для которых зависимости перемещений и скоростей от времени записаны с некоторой периодичностью (\*CONTROL\_OUTPUT). Эти данные затем могут быть использованы для проведения последующего анализа с целью получения параметров контактного взаимодействия (\*INTERFACE\_LINKING). Такая возможность особенно полезна при исследовании подробного отклика малой части большой структуры. При первоначальном анализе достаточно выполнить дискретизацию интересующей детали таким образом, чтобы получить приемлемые значения перемещений и скоростей на ее границах. После завершения этого этапа деталь разбивается более мелко, и задаются границы контактного взаимодействия в соответствии с проведенным анализом. Затем, для получения подробной информации в локальной области структуры, выполняется второй анализ.

Перед выполнением анализа задается имя для файла записи сегментов в области контактного интерфейса: Z = параметр командной строки программы LS-DYNA. Перед выполнением второго анализа имя для файла интерфейса (созданного при первом прогоне) следует указать таким образом: L = параметр командной строки программы LS-DYNA.

Следуя указанной выше процедуре, легко обеспечить несколько уровней вложенного моделирования. Файл интерфейса может содержать большое число определений контактного интерфейса, поэтому один прогон полной модели может обеспечить достаточно данных для анализа многих деталей структуры. Такая особенность представляет собой мощное расширение возможностей программы LS-DYNA.

### ОБЪЕМ ПАМЯТИ

Распределение памяти для хранения данных является динамическим. Единственным ограничением для числа карт, которые содержат граничные условия, свойства материалов, нагрузки в виде давления и т. д., является объем памяти компьютера. Типичный расчет по программе LS-DYNA может содержать от 10000 до 500000 элементов. Динамическое распределение памяти контролируется во время выполнения программы.

### ТОЧНОСТЬ

В общем случае используемый в программе LS-DYNA явный алгоритм интегрирования по времени мало чувствителен к аппаратной точности по сравнению с другими ко-

## ВВЕДЕНИЕ

---

нечно-элементными методами решения. Как следствие, двойная точность не используется. Полезный результат этого состоит в существенно лучшем использовании оперативной и дисковой памяти. При обнаружении проблем их обычно удается преодолеть за счет перестройки алгоритма или локального перехода к двойной точности в тех подпрограммах, где выявляется проблема. Некоторые из этих проблем приведены ниже (**только для 32-битовых компьютеров!**):

- Ошибка округления может стать источником проблем для задач с чрезвычайно малыми амплитудами отклонений. (Максимальное значение амплитуды колебаний составляет менее одной миллионной части от значений узловых координат.) Решение проблемы: увеличить нагрузку.
- Анализ устойчивости очень чувствителен к малым несовершенствам.

Однако пользователи программы LS-DYNA должны отдавать себе отчет о других возможных проблемах.

Одно из преобразований кода LS-DYNA привело к версии, использующей двойную точность во всей программе. Поскольку объем памяти и дискового пространства — это менее важная проблема, то предпочтительнее создать такую версию для всех машин. Это также позволит программе LS-DYNA получить преимущество перед 64-битовой технологией, предлагаемой некоторыми производителями компьютеров.

# **\*AIRBAG**

Назначение: описание подушки безопасности или контрольного объема.

Ключевое слово **\*AIRBAG** (подушка безопасности) используется для описания термодинамических свойств газа, поступающего в подушку безопасности, а также для описания конфигурации полностью наполненной подушки. Управляющие карты ключевого слова в этом разделе вводятся в алфавитном порядке:

**\*AIRBAG\_OPTION1\_{OPTION2}\_{OPTION3}\_{OPTION4}**  
**\*AIRBAG\_ADVANCED\_ALE**  
**\*AIRBAG\_ALE**  
**\*AIRBAG\_INTERACTION** (ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ПОДУШЕК)  
**\*AIRBAG\_PARTICLE**  
**\*AIRBAG\_REFERENCE\_GEOMETRY\_OPTION\_OPTION** (ИСХОДНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПОДУШКИ)  
**\*AIRBAG\_SHELL\_REFERENCE\_GEOMETRY**  
**\*AIRBAG\_OPTION1\_{OPTION2}\_{OPTION3}\_{OPTION4}**

Опция *OPTION1* задает одно из следующих термодинамических соотношений:

**SIMPLE\_PRESSURE\_VOLUME** (Простое соотношение давление-объем)  
**SIMPLE\_AIRBAG\_MODEL** (Элементарная модель подушки безопасности)  
**ADIABATIC\_GAS\_MODEL** (Адиабатическая газовая модель)  
**WANG\_NEFSKE** (Модель Ванга-Нефске)  
**WANG\_NEFSKE\_JETTING** (Модель Ванга-Нефске с впрыскиванием струи)  
**WANG\_NEFSKE\_MULTIPLE\_JETTING** (Многоструйная модель Ванга-Нефске)  
**LOAD\_CURVE** (Задающая кривая)  
**LINEAR\_FLUID** (Линейная модель жидкости)  
**HYBRID** (Гибридная модель)  
**HYBRID\_JETTING** (Гибридная модель с впрыскиванием струи)  
**HYBRID\_CHEMKIN** (Гибридная модель для кода CHEMKIN)

Опция *OPTION2* указывает на считывание дополнительной строки данных для термодинамических соотношений типа Ванга-Нефске. Эти дополнительные данные определяют условия инициирования выходного потока из подушки безопасности. Опция *OPTION2* задается единственным образом:

**POP**

Опция *OPTION3* указывает на использование постоянства импульса при расчете воздействия струи на подушку безопасности. Считывается дополнительная строка данных. Опция *OPTION3* задается только единственным образом:

### CM

Опция *OPTION4* задает идентификатор подушки безопасности:

### ID

Эта опция указывает, что первой картой в задании подушки безопасности будет идентификатор ID и заголовок. Идентификатор ID представляет собой уникальный номер, который необходим для отождествления подушек безопасности в задании взаимодействия подушек с помощью ключевого слова \*AIRBAG\_INTERACTION. Цифровой идентификатор и заголовок записываются в файлы ABSTAT и D3HSP.

**Следующая карта считывается, если задан идентификатор ID.**

**Внимание: идентификатор ID необходим для карта \*AIRBAG\_INTERACTION.**

По выбору 1 2-8

Переменная	ABID	HEADING
Тип	I	A70

### ПЕРЕМЕННАЯ

### ОПИСАНИЕ

ABID Идентификатор ID контакта. Это должен быть уникальный номер.

HEADING Описатель подушки безопасности. Предполагается, что используется уникальный номер.

Карта 1 2 3 4 5 6 7 8

Переменная	SID	SIDTYP	RBID	VSCA	PSCA	VINI	MWD	SPSF
Тип	I	I	I	F	F	F	F	F
Умолчание	нет	0	0	1.	1.	0.	0.	0.
Примечания			необязат.					

<b><u>ПЕРЕМЕННАЯ</u></b>	<b><u>ОПИСАНИЕ</u></b>
SID	Идентификатор набора
SIDTYP	Тип набора: = 0: сегмент, ≠ 0: идентификаторы частей расчетной модели.
RBID	Идентификатор части абсолютного твердого тела для написанной пользователем подпрограммы активации: = - <i>RBID</i> : флаги подпрограммы датчика инициируют нагнетатель; задающие кривые сдвигаются на время инициирования, = 0: контрольный объем активизирован с момента времени 0, = <i>RBID</i> : пользовательская подпрограмма датчика отмечает начало наполнения подушки; задающие кривые сдвигаются на время инициирования. См. Приложение D.
VSCA	Коэффициент пересчета объема $V_{sca}$ (по умолчанию = 1.0)
PSCA	Коэффициент пересчета давления $P_{sca}$ (по умолчанию = 1.0)
VINI	Начальный заполненный объем $V_{ini}$
MWD	Усредненный по массе коэффициент демпфирования D
SPSF	Коэффициент пересчета давления в заторможенном потоке $0 \leq \gamma \leq 1$

**Примечания:**

Первая карта необходима для всех опций подушки безопасности. Порядок следующих карт, различный для каждой из опций, приведен на следующих страницах.

Контрольные объемы с сосредоточенными параметрами – это способ определения объемов внутри замкнутых поверхностей и приложения давления, основанный на некоторых термодинамических соотношениях. Объем задается набором многоугольников, как при задании граничных условий для давления, или заданием подмножества материалов оболочечных элементов, образующих замкнутую границу. Все нормали многоугольника должны быть ориентированы наружу по отношению к контрольному объему. Образовавшиеся “дыры” считаются закрытыми плоскими поверхностями.

Коэффициенты  $V_{sca}$  и  $P_{sca}$  используются для пересчета величин применяемой системы единиц при переходе от конструкции нагнетателя к его конечно-элементной модели. Для каждого контрольного объема используется два набора значений объема и давления. Первый набор появляется как результат использования конечно-элементной модели для расчета объема ( $V_{femodel}$ ) и прикладываемого давления ( $P_{femodel}$ ). Термодинамические

параметры контрольного объема могут быть рассчитаны в некоторой другой системе единиц; так, существуют независимые объем ( $V_{cvolume}$ ) и давление ( $P_{cvolume}$ ), которые используются при интегрировании дифференциальных уравнений для контрольного объема. Формулы перехода имеют вид:

$$V_{cvolume} = (V_{sca} V_{femodel}) - V$$

$$P_{femodel} = P_{sca} P_{cvolume}$$

Сила сопротивления, усредненная по массе потока, которая действует на конструкцию, содержащую контрольный объем, подсчитывается по формуле:

$$F_i^d = m_i D (v_i - v_{cg})$$

где  $F_i^d$  - сила сопротивления,  $m_i$  - узловая масса,  $v_i$  - узловая скорость,  $v_{cg}$  - средняя взвешенная по массе скорость конструкции, ограничивающей контрольный объем, и  $D$  - коэффициент торможения потока.

Альтернативное, независимое описание сопротивления основано на понятии давления остановленного потока. Это давление приблизительно равно максимальному давлению, которое действует на пластинку, ориентированную по нормали к стационарному потоку. Давление заторможенного потока определяется как  $p = \gamma \rho V^2$ , где  $V$  - нормальная скорость контрольного объема относительно скорости окружающего воздуха,  $\rho$  - плотность окружающего воздуха,  $\gamma$  - коэффициент, который выбирается пользователем пределах от 0 до 1. Для предотвращения избыточного торможения потока рекомендуется выбирать небольшие значения коэффициента.

**Входные данные для сенсора, включающего нагнетатель.**

**Данные вводятся только в случае, если параметр *RBID* не равен нулю.**

Если параметр *RBID* равен нулю, эти данные не вводятся. Если идентификатор абсолютно твердого тела не равен нулю, необходимо задать входные данные для пользовательской подпрограммы описания реакции сенсора (A) или задать данные для сенсора, выбранного по умолчанию (B).

Сенсор устанавливается на абсолютно твердом теле, связанном с конструкцией. Движение сенсора происходит в локальной системе координат, заданной для абсолютно твердого тела при описании его материала, см. \*MAT\_RIGID. Это важно, так как по умолчанию в качестве локальной системы координат берутся главные оси тензора инерции. Поворот и перенос локальной системы происходит вместе с абсолютно твердым телом. Если выполняется заданный пользователем критерий для развертывания подушки, устанавливается флаг-метка и начинается развертывание. В этом случае все задающие кривые, определяющие зависимость массового расхода от времени, сдвигаются на время иницирования.

**A. Входные данные для пользовательской подпрограммы (*RBID*>0).**

**См. Приложение D. Подпрограмма пользователя должна быть в наличии.**

Следующие карты используются при задании входных параметров для пользовательской подпрограммы. Для каждого контрольного объема можно использовать не более 25 параметров.