

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**Инженерно-физический факультет высоких технологий**

**ОАО «УЛЬЯНОВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ**  
**АВИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА»**

**М.В. Илюшкин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ**  
**ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**  
**В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA**

**(осадка цилиндрической заготовки)**

Учебно-методическое пособие

Ульяновск

2013

УДК 004.942  
ББК 34.62  
И49

*Печатается по решению Ученого совета  
инженерно-физического факультета высоких технологий  
Ульяновского государственного университета*

**Рецензенты:**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э.Баумана А.В. Власов;

к-т техн. наук, доцент Самарского аэрокосмического университета, ведущий инженер ОАО «Кузнецов» В.И. Сусликов.

Илюшкин, М.В.

И49

**Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки). Учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин – Ульяновск: УлГУ, 2013 – 112 с.**

В учебно-методическом пособии изложены основы работы с программой ANSYS/LS-DYNA применительно к процессам обработки металлов давлением. Приведен пошаговый учебный пример для моделирования процесса осадки цилиндрической заготовки.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, изучающих курс «Моделирование процессов деформирования твердых тел», а также специалистов в области машиностроения.

**УДК  
004.942  
ББК 34.62**

© Илюшкин М.В., 2013  
© Ульяновский государственный университет, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ОМД.....	8
1.1. Общий обзор.....	8
1.2. Основы теории явного метода динамики.....	11
1.3. Программное обеспечение для математического моделирования процессов ОМД.....	13
1.4. Описание программы ANSYS/LS-DYNA.....	17
2. ОСНОВЫ РАБОТЫ В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ ОМД.....	21
2.1. Описание графического интерфейса программы ANSYS/LS-DYNA.....	21
2.2. Единицы измерения.....	25
2.3. Операции управления моделью на экране.....	26
2.4. Основные этапы моделирования.....	27
2.5. Типы элементов Shell и Solid.....	27
2.6. Модели материалов для процессов ОМД.....	31
2.7. Создание геометрической модели.....	37
2.8. Управление видами.....	37
2.9. Создание конечно-элементной сетки. Меню MeshTool.....	38
2.10. Определение частей.....	38
2.11. Определение контакта.....	39
2.12. Определение нагрузки.....	43
2.13. Определение ограничений.....	47
2.14. Определение дополнительных параметров.....	48
2.14.1. Определение параметра контроля Hourglass.....	48
2.14.2. Определение время завершения анализа.....	49

2.14.3. Изменение временного шага.....	49
2.14.4. Определение частоты записи выходных файлов.....	50
2.14.5. Определение дополнительных выходных файлов (файлы ASCII).....	51
2.15. Создание k-файла.....	52
2.16. Решение задачи.....	53
2.17. Постпроцессорная обработка POST1.....	54
2.18. Постпроцессорная обработка POST26.....	55
3. УЧЕБНЫЙ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA.....	58
3.1. Начальные установки для сохранения вводимых данных...	59
3.2. Определение начальных установок.....	59
3.3. Определение типов элементов.....	60
3.4. Определение действующих постоянных.....	61
3.5. Определение параметров моделей материала.....	63
3.6. Создание модели цилиндрической заготовки.....	66
3.7. Создание нижней плоскости.....	68
3.8. Создание верхней плоскости.....	68
3.9. Сеточное разбиение модели.....	70
3.10. Представление модели в исходном виде.....	74
3.11. Сохранение модели.....	74
3.12. Создание сеточного разбиения плоскостей.....	75
3.13. Определение частей модели.....	78
3.14. Определение контакта между частями модели.....	79
3.15. Определение параметров массива.....	81
3.16. Создание нагрузки.....	84
3.17. Определения параметра контроля Hourglass.....	85
3.18. Введение времени окончания анализа.....	85
3.19. Введение частоты вывода данных.....	86
3.20. Создание выходных файлов с сохранением данных по усилиям и энергии.....	87

3.21. Создание k-файла.....	87
3.22. Запуск на решение.....	88
3.23. Загрузка данных в POST1 для чтения определенного ша- га решения.....	90
3.24. Просмотр контуров деформированной заготовки.....	91
3.25. Изменение вида масштаба отображения модели на экране.....	91
.....	91
3.26. Сохранение полученных графических результатов.....	93
3.27. Просмотр других параметров контуров на заготовке.....	93
3.28. Определение рабочей плоскости для сечения модели.....	93
3.29. Установка параметров для сечения модели.....	94
3.30. Просмотр контуров по сечению заготовки по полным деформациям вдоль оси Y.....	96
3.31. Просмотр контуров по сечению заготовки по полным деформациям вдоль оси Z.....	96
3.32. Загрузка данных в POST26 для построения графиков в зависимости от времени.....	98
3.33. Чтение файла с сохраненными данными по усилиям.....	100
3.34. Построение графика зависимости усилия от времени.....	101
3.35. Чтение файла с сохраненными данными по энергиям.....	102
3.36. Построение графика зависимости внутренней энергии от времени.....	103
3.37. Сравнение результатов моделирования и теории.....	103
 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ.....	106
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	111

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы обработки металлов давлением (ОМД) находят широкое применение во многих отраслях промышленности: машиностроении, авиастроении, вагоностроении, судостроении и др. К примеру, автомобиль на 80-85 % состоит из деталей полученных методами обработки металлов давлением.

К процессам обработки металлов давлением относят процессы горячей и холодной штамповки, осадки,ковки, прокатки, вытяжки, прошивки, гибки и многие другие. К отдельным методам обработки металлов давлением можно отнести процессы изготовления гнутых профилей получаемых на гибочно-прокатных станах.

Несмотря на широкое применение методов ОМД сами процессы еще недостаточно изучены, что сдерживает разработку оптимальных технологий, позволяющих оптимизировать технологический процесс изготовления деталей и снизить расходы для их производства. В первую очередь, это связано со сложностью процессов, происходящих при пластическом течении металла при обработке металлов давлением. Исследованию пластического течения посвящено немало научной литературы, где выводятся расчетные формулы для различных процессов ОМД. К сожалению, теоретические формулы можно вывести только для относительно простых процессов и со значительными допущениями, например, к процессам гибки, вытяжки, осадки и к заготовкам простой формы: цилиндр, круглой формы, плоского квадратного листа. При применении заготовок более сложной формы и применению более совершенных методов ОМД такие формулы уже не работают или дают значительную погрешность и не могут применяться при разработке оптимальных технологий. Применяемые в теории ОМД различные приближенные методы сложны в освоении и требуют тщательного подхода при их применении.

Выходом из этой ситуации является применение программ основанных на методе конечных элементах. Наилучшая в своей области

– это программа ANSYS/LS-DYNA. Программа предназначена для расчетов быстротекущих и динамичных задач физики и процессов, имеющих значительную нелинейность, и идеально подходит для решения задач обработки металлов давлением, поскольку процессы пластической деформации в процессах ОМД обладает большой нелинейностью и быстротечны.

ANSYS/LS-DYNA позволяет моделировать практически все процессы обработки металлов давлением, начиная от простой гибки или осадки заготовки, заканчивая деформацией многослойных материалов или штамповкой взрывом. При этом в отличие от теоретических расчетов, где есть существенные ограничения по размерам и форме заготовки, здесь практически нет ограничений по размерам и формам заготовок. Связано это с тем, что при построении конечно-элементной модели происходит разбиение заготовки любой сложности на элементарные ячейки (треугольники, четырехугольники, пирамиды и др.). Таким образом, значительно расширяя области применения этой программы.

Моделирование процессов ОМД в программе ANSYS/LS-DYNA позволяет определить все необходимые параметры: напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени, а также энергетические параметры процесса, величины усилий и моментов, нормальных и касательных сил, контактные параметры процесса и много другое, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и для глубокого анализа и понимания процессов, происходящих в заготовке при пластическом течении материала.

Основные сложности моделирования в программе ANSYS/LS-DYNA это наличие большого количества разнообразных меню и параметров, требующих ввода, что требует высокой подготовки и глубокого понимания процесса и необходимость высокопроизводительных систем для их решения.

## ГЛАВА 1

### ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ОМД

#### *1.1. Общий обзор*

Математическое моделирование является эффективным средством анализа и понимания различных объектов нашего мира.

Математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, открывая путь для применения современных мощных методов математического анализа, вычислительной математики и программирования при исследовании и оптимизации технологических процессов. В настоящее время количественные методы исследования проникают практически во все сферы человеческой деятельности, а математические модели становятся средством познания основных закономерностей реального мира. Большой вклад в развитие методов математического моделирования процессов обработки металлов давлением внесли отечественные и зарубежные учёные - В. Джонсон, Э. Томсен, Р. Хилл, А.И. Целиков, П.И. Полухин, И.Я. Тарновский, Г.Я. Гун, А.А. Поздеев, В.П. Полухин, А.П. Чекмарев, В.П. Северденко, Г.А. Смирнов-Аляев, В.С. Смирнов, И.Л. Перлин, А.Д. Томленов, Б.В. Кучеряев и др. Анализу современных подходов к моделированию процессов обработки металлов давлением посвящены работы Г.Я. Гуна, А.П. Грудева, Б.В. Кучеряева, С.Е. Рокотяна, А.В. Выдрина и многих других [1].

Начало 80-х годов XX века можно считать временем первого внедрения компьютерного моделирования процессов ОМД в промышленность. Тогда несколько машиностроительных компаний США начали использовать программный пакет ALPID (Analysis of Large Plastic Incremental Deformation), разработанный Баттельским мемориальным институтом при содействии ВВС США. Этот программный продукт имел множество технических проблем, например, таких как



малая функциональность препроцессора и большие временные затраты на моделирование штамповки поковок даже простой формы. В частности, моделирование процесса штамповки диска турбины простейшей формы занимало несколько дней. Кроме того, в этот период пользователю приходилось несколько раз останавливать моделирование, чтобы внести некоторые необходимые поправки в исходные данные. Пакет ALPID позволял решать лишь двумерные задачи (2D), а именно — моделировать течение металла при штамповке осесимметричных деталей. Трёхмерное моделирование в то время казалось невозможным вследствие соответствующего уровня развития вычислительной техники, сложностей с генерацией сетки конечных элементов и т.п. Несмотря на все эти проблемы, ALPID показал весьма достойные результаты, позволяющие предприятиям-пользователям значительно экономить средства, необходимые для проведения экспериментальных исследований при разработке новых технологических процессов. Шаг за шагом моделирование процессов ОМД стало важным элементом разработки технологического процесса. Сегодня более 80% крупных (250 и более сотрудников), более 75% средних (100-249 сотрудников) и более 50% мелких (50-99 сотрудников) машиностроительных компаний США используют моделирование процессов ОМД при разработке технологических процессов [2].

Современная форма математического моделирования - это моделирование на компьютере. Вычислительные машины дали учёным мощное средство для математического моделирования. Развитие методов математического моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением в сочетании с широким внедрением персональных компьютеров позволяют создавать уникальные программы, позволяющие в автоматизированном режиме моделировать процессы пластического формоизменения, исследовать напряжённо-деформированное состояние, температурные поля при обработке металлов давлением [3].

Исследования, проводимые в программах конечно-элементного моделирования, позволяют подобрать оптимальный технологический

процесс при обработке металлов давлением, оптимальные, рациональные марки материала в зависимости от напряженно-деформированного состояния конструкции, рациональные материалы и форму для максимальной эффективности удара при разрушении и др.

Результаты моделирования позволяют выявить напряженно-деформированное состояние, как самой конструкции, так и формующего элемента в любой точке модели и любой промежуток времени; критические, опасные зоны и участки модели, в которых возможно возникновения разрушения или деформации конструкции; силовые, энергетические, деформационные, контактные величины при взаимодействии частей модели и многое другое.

Внедрение компьютерного моделирования в производство сопровождалось серьезными изменениями в подходе к разработке технологических процессов. Двадцать пять лет назад очень немногие технологи пользовались такими понятиями, как напряжение текучести, интенсивность деформаций, интенсивность скоростей деформаций. При моделировании процессов ОМД эти показатели весьма существенны. На данный момент вузы и промышленные предприятия осознали важность моделирования процессов ОМД при разработке технологических процессов и в связи с этим уделяют данному вопросу все больше внимания. Моделирование процессов ОМД в вузах часто выделяется в отдельную дисциплину. Во-первых, это позволяет студентам лучше освоить теорию обработки металлов давлением — не только по рисункам и диаграммам из справочников, но и на основе расчетов и анализа результатов. Во-вторых, проведение лабораторных работ помогает студентам лучше понять специфику каждого технологического процесса обработки металлов, изучить его особенности и проблемы. В третьих, работа на компьютере для современных студентов намного привлекательнее работы в читальном зале библиотеки [2].

## 1.2. Основы теории явного метода динамики

Явными (Explicit) методами называют методы решения уравнений динамики, не связанные с решением систем уравнений, но использующие рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предшествующих шагах. В случае использования диагональной матрицы масс (вместо стандартной – согласованной разряженной) удается ее “обратить”, упростив тем самым расчет и многократно уменьшив время одной итерации (посредством замены триангуляции матриц с решениями при переменных уравновешивающих нагрузках на матричные умножения). Такая методика предполагает малые шаги и достаточно мелкую разбивку, чтобы правильно описать диагональной матрице распределения масс. В качестве компенсации, малый шаг позволяет отследить все изменения в характеристиках конструкции и в ее поведении. Все нелинейности (включая контакт) учитываются в векторе внутренних сил. Основное время занимает не формирование и обращение матриц, а вычисление этого вектора. Из-за очень малого размера шага (на практике  $10^{-7} - 10^{-6}$ ) явные методы обычно применяются только для расчета кратковременных процессов. В ANSYS/LS-DYNA при явном интегрировании применяется метод центральных разностей, когда ускорение полагается постоянным в течение шага. Для трех последовательных моментов времени принимается квадратичная аппроксимация вектора перемещений [4].

При использовании явного метода решения применяется метод центральных разностей [5] – это ускорение, оцененное за время  $t$ :

$$a_t = [M]^{-1} \left( (F_t^{ext}) - (F_t^{int}) \right);$$

где  $a_t$  - вектор ускорения;

$F_t^{ext}$  - приложение внешней силы;

$F_t^{int}$  - внутренние силы;

$$F_t^{int} = \sum \left( \int_{\Omega} B^T \cdot \sigma_n \cdot d\Omega + F^{hg} \right) + F^{cont};$$

где  $F^{hg}$  - сила сопротивления искажению hourglass;

$F^{cont}$  - контактная сила.

Исходя из полученных значений ускорений ( $a_i$ ) вычисляются скорости и перемещения:

$$\{V_{t+\Delta t/2}\} = \{V_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t; \quad \{U_{t+\Delta t}\} = \{U_t\} + \{V_{t+\Delta t/2}\}\Delta t_{t+\Delta t/2};$$

где  $\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0,5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$ ;

$$\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0,5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t});$$

Геометрия обновляется добавлением приращения перемещения и исходной геометрии  $\{x_0\}$ :

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}$$

Некоторые замечания:

- для упрощения обращения матриц требуется диагональная матрица масс;

- уравнения становятся разьединенными и могут быть решены явно;

- не требуется обращение матрицы жесткости, все нелинейности (включая контакт) включены в вектор внутренних сил;

- не требуется проверка сходимости, т.к. уравнения несвязанны;

- для устойчивости решения требуются очень малые временные шаги.

Решение будет устойчиво, только если временной шаг (такт) меньше критического:

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}};$$

где  $\omega_{max}$  - максимальная собственная круговая частота.

Поскольку этот шаг очень мал, то явный метод применяется только для очень быстрых процессов.

Критический шаг для участка длиной L будет равен:

$$\Delta t^{crit} = \frac{L}{c};$$

где  $c$  – скорость прохождения звука для используемого материала.

Для увеличения стабильности процесса используют по умолчанию масштабный коэффициент 0,9:

$$\Delta t^{crit} = 0,9 \frac{L}{c}.$$

Для конечных элементов величина  $L$  зависит от длины конечного элемента:

$$\text{для оболоченных элементов: } L = \frac{A}{\max(L_1, L_2, L_3, L_4)};$$

для треугольных оболоченных элементов:

$$L = \frac{2A}{\max(L_1, L_2, L_3)}.$$

### ***1.3. Программное обеспечение для математического моделирования процессов ОМД***

Рассмотрим аналоги программного обеспечения для математического моделирования процессов ОМД, их краткое описание. Это такие пакеты как **MSC Nastran, Marc, Dytran, PAM-STAMP 2G, QForm 3D, ANSYS** [6] (табл. 1.1).

**ANSYS/LS-DYNA** - многоцелевая программа, использующая явную постановку метода конечных элементов (explicit finite element program) - предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования (процессов ОМД).

Рассмотренные программы можно разделить на универсальные и специализированные. Универсальные позволяют решать более широкий круг задач, более гибки к нестандартным и сложным задачам. Однако, такие программы сложны в обучении, требуют наличия спе-

Таблица 1.1

Программы конечно-элементного моделирования и их краткое описание

Назначение	Прим. в ОМД*	Универсальная/ специализиров.
1	2	3
<b>MSC Nastran</b>		
<p>Обеспечивает полный набор расчетов, включая расчет напряженно-деформированного состояния, запасов прочности, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, исследование установившихся и неустановившихся динамических процессов, решение задач теплопередачи, акустических явлений, нелинейных статических и нелинейных переходных процессов, анализ сложного контактного взаимодействия, расчет критических частот и вибраций роторных машин, анализ частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок и импульсного широкополосного воздействия, исследование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях.</p>	4	Универсальная
<b>Marc</b>		
<p>Представляет собой универсальную конечно-элементную программу для проведения углубленного анализа высоконелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи. Она широко используется для компьютерного моделирования технологических процессов прокатки, прессования, листового и объемного формования, производства шин, суперпластического формования и т.д.</p>	5	Универсальная

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
<b>Dytran</b>		
<p>Система анализа высоконелинейных быстротекущих процессов, связанных с взаимодействием конструкции и жидкости (газа) или конструкции и конструкции. Программа позволяет решать широкий спектр задач, связанных с быстротекущими процессами (моделирование столкновения конструкций, разрушения лопатки и т.д.). Dytran применяется в автомобильной, аэрокосмической, оборонной, обрабатывающей и многих других отраслях промышленности.</p>	4	Специализир.
<b>РАМ-STAMP 2G</b>		
<p>Специализированное, интегрированное и масштабируемое решение для листовой штамповки. Оно моделирует весь процесс изготовления оснастки от проектирования рабочей поверхности штампа до анализа формообразующих характеристик с проверкой правильности решения, включая анализ и компенсацию пружинения. РАМ-STAMP 2G — специально-ориентированное средство разработки и анализа для проектных организаций, КБ и предприятий Автомобильной и Аэрокосмической промышленности.</p>	5	Специализир.
<b>QForm 3D</b>		
<p>Основана на методе конечных элементов (ядро системы), предназначена для проектирования оснастки, штампового инструмента, моделирования штамповки, ковки и других процессов ОМД, оптимизации технологических процессов. Конечно-элементные алгоритмы специальным образом адаптированы для расчета процессов формоизменения.</p>	5	Специализир.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
<b>DEFORM</b>		
<p>Специализированный инженерный программный комплекс, предназначенный для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки, позволяет моделировать практически все процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.), а также операции термической обработки (закалка, старение, отпуск и др.) и механообработки (фрезерование, сверление и др.).</p>	5	Специализир.
<b>ANSYS</b>		
<p>Универсальная программная система конечно-элементного анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет. Является довольно популярной у специалистов в области компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.</p>	5	Универсальная

\* - оценка по 5-и бальной системе

специальных знаний в области исследуемых задач и основ конечно-элементного моделирования. Подходят для исследовательских и научных организаций, для глубокого анализа исследуемых процессов. Специализированные направлены на определенный класс задач, просты в обучении и не требуют глубокого знания процесса и отдельных



дополнительных знаний, отличных от исследуемого процесса. Однако такие программы не обладают достаточной гибкостью и позволяют решать лишь определенный узкий класс задач. Специализированные программы подходят для технологических отделов производственных организаций занимающихся конкретным классом задач.

Для исследования процессов ОМД и разработки данных методических материалов использовалась программа ANSYS/LS-DYNA, позволяющая исследовать практически любой из процессов обработки давлением.

#### ***1.4. Описание программы ANSYS/LS-DYNA***

Пакет ANSYS/LS-DYNA объединяет в себе расчетный модуль LS-DYNA со средствами подготовки исходных данных и обработки результатов в пакете ANSYS. Соответственно, не выходя из сессии ANSYS, можно создавать конечно-элементную модель в препроцессоре ANSYS, получать решение по явной схеме интегрирования, используя LS-DYNA, и просматривать результаты с помощью стандартных постпроцессоров ANSYS [4].

Стандартная конфигурация ANSYS и пакет ANSYS/LS-DYNA дополняют друг друга. В ANSYS поддерживаются неявные (implicit) методы интегрирования динамики, использующие схему Ньюмарка. Расчет сводится к серии решений квазистатических задач с нагрузками, зависящими от времени. Временной шаг может быть не очень малым, поскольку при каждом шаге выполняется решение системы уравнений и проводятся уравнивающие итерации, связанные с матричными операциями. При линейной матрице жесткости интегрирование является, безусловно, устойчивым. Для высокоскоростных процессов (протекающих обычно несколько миллисекунд) и при очень больших деформациях приходится делать шаги весьма малыми, чтобы отследить изменение нагрузки и поведение конструкции. Инерционные нагрузки велики и определяются ускорениями конструкции. Для более точного их расчета эффективно будет вводить ускорения (и скорости)

в число узловых степеней свободы и вычислять из напрямую, а не дважды, дифференцируя перемещения. В случае вынужденных постоянных пересчетов матриц формирование полной матрицы и ее многократное решение при переменных нагружениях неэффективны. Критерий сходимости установленные по умолчанию, настроены на достаточно длительные задачи, поэтому их подбор на практике весьма трудоемок (а порой невозможен). Таким образом, при малом шаге решения задач (например, удара) может потребовать больше (в десятки-сотни раз) времени ЭВМ, чем при использовании явных методов, либо не сойтись [4].

В отличие от ANSYS расчетный модуль LS-DYNA использует явную постановку решения задачи и позволяет успешно решать кратковременные и быстротекущие задачи, такие как удары, столкновения и задачи обработки металлов давлением.

Особенности ANSYS/LS-DYNA[4]:

- В программе ANSYS/LS-DYNA не очень много типов элементов, но для каждого из них имеется выбор множества формулировок, и почти все они поддерживают практически все разрешенные модели материалов;
- Хотя препроцессор ANSYS поддерживает далеко не все из более чем 230 моделей материалов LS-DYNA, их можно ввести «вручную», отредактировав файл \*.k. Следует отметить, что поставляемый модуль позволяет решать все задачи, не поддерживаемый ANSYS/LS-DYNA. Пользователям представляется полная версия LS-DYNA (с моделями подушек и ремней безопасности, взрывчатки и т.п., сложными моделями материалов).
- В отличие от ANSYS Implicit очень многие модели материалов поддерживают разрушение.
- Наряду с привычными компонентами, многие команды подразумевают ввод частей (Part) — групп элементов, имеющих одинаковые атрибуты: тип элементов, номер материала и номер набора действующих постоянных. Группы Part создаются автоматически после ввода элементов.

- Решение контактных задач в ANSYS/LS-DYNA организовано удобнее, чем в обычном ANSYS. Существует множество контактных алгоритмов, вместо специальных контактных элементов назначаются контактные пары (возможен и автоматический поиск контактирующих пар). Значения параметров, принятые по умолчанию, как правило, обеспечивают хорошую сходимость.
- Применение концепции жестких тел (Rigid Body) для тел, напряженное состояние которых в данный момент времени неактуально (например, при падении вплоть до момента контакта, либо инструмента в процессах ОМД), позволяет значительно экономить машинные ресурсы. При этом тела в процессе расчета могут переводиться из жестких в деформируемые и обратно.
- Нагрузки всегда вводятся массивами по времени и соответствуют одному шагу нагружения.
- Расчеты ANSYS/LS-DYNA можно проводить и в стандартной лагранжевой постановке, и в комбинированной лагранж-эйлеровой (Arbitrary Lagrange-Euler) постановке. В LS-DYNA поддерживается и полная эйлерова постановка, для которой следует дополнить файл, подготовленный препроцессором ANSYS. Лагранжевая постановка подразумевает деформируемую сетку, а при эйлеровой — сетка неподвижна и должна создаваться всюду, где возможно нахождение конструкции. Элементы в эйлеровой сетке могут быть заполнены и воздухом и материалом, в том числе и частично. ALE-формулировка – промежуточный вариант между лагранжевой и эйлеровой постановкой. В ALE формулировке сетка двигается вместе с материалом (происходит адвекция сетки).
- Исполняемым файлом для LS-DYNA является Jobname.k-входной файл, автоматически создаваемый ANSYS при исполнении команды SOLVE. Файл содержит полную геометрию, нагрузки и характеристики материалов, присутствующие в базе данных ANSYS. Файл на 100% совместим с LS-DYNA.

- После запуска появляется DOS-окно с указанием параметров задачи и с оценкой времени счета (на основе начального шага). Шаг по времени устанавливается автоматически, исходя из минимального текущего размера элемента и скорости звука в его материале. В процессе решения можно запросить уточненную оценку времени счета.
- Довольно удобно сделано прерывание решения — его можно выполнить в любой момент с автоматическим созданием файла рестарта.
- В постпроцессор ANSYS можно передать как напряжения, перемещения и деформации, так и специфические параметры LS-DYNA: суммарные контактные силы, кинетическую и иные энергии и т.д. Создаются не только полное напряженно-деформированное состояние — файл \*.rst, с возможностью анимации, например по 100 шагам, но и особый файл \*.his, включающий результаты, например 10 тыс. шагов для нескольких заданных узлов (с возможностью построения графиков).

Среди особенностей **программы ANSYS-LS-DYNA применительно к ОМД** можно отметить следующие [7]:

- модели анизотропной пластичности (Hill, Barlat);
- абсолютно жесткий инструмент;
- семь специальных типов контакта, включая термический контакт;
- автоматическая ориентация сегментов;
- связанный термомеханический анализ;
- анализ пружинения;
- произвольные лагранжево-эйлеровые сетки;
- исключение разрушихся элементов.

## ГЛАВА 2

### ОСНОВЫ РАБОТЫ В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ ОМД

#### 2.1. Описание графического интерфейса программы ANSYS/LS-DYNA

Графический интерфейс (рис. 2.1) служит для удобства работы пользователя в программе ANSYS/LS-DYNA, позволяет осуществлять все необходимые действия для решения поставленной задачи.

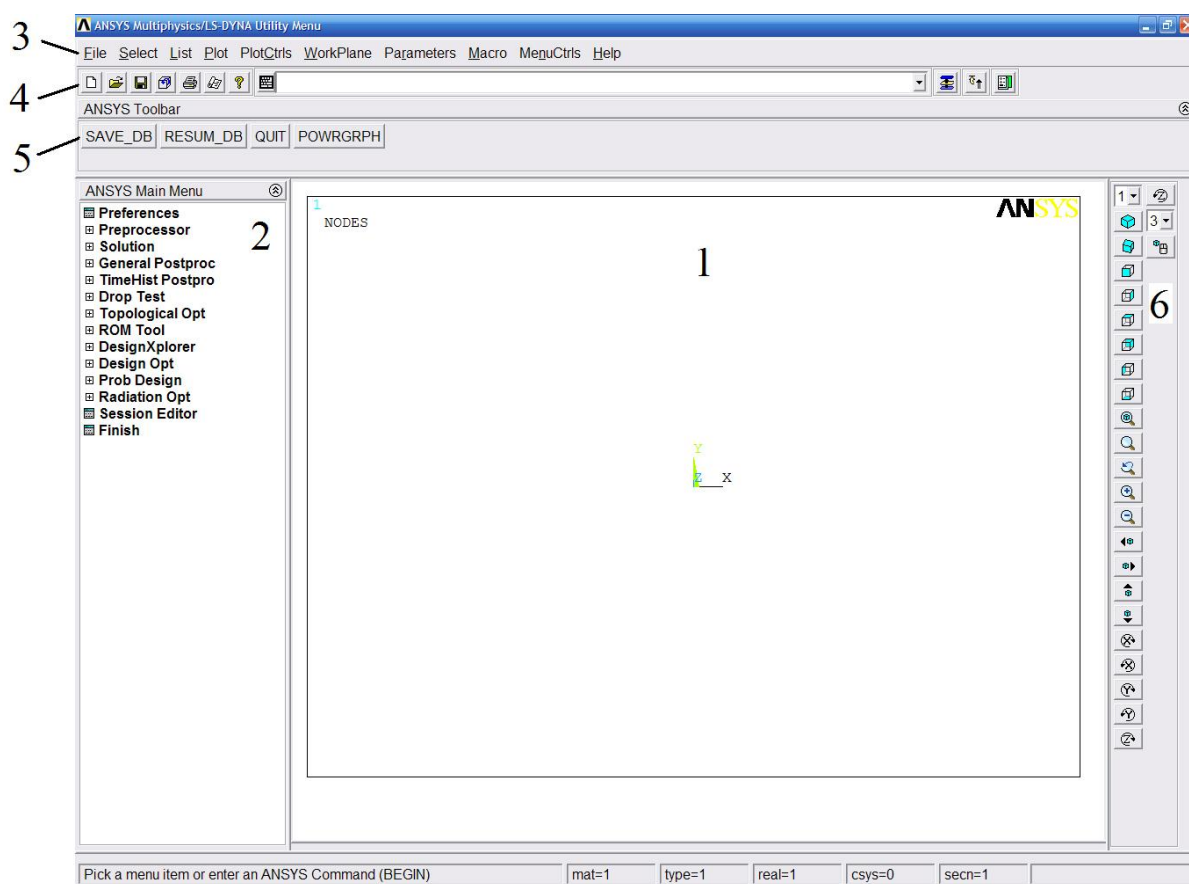


Рис. 2.1. Графический интерфейс программы ANSYS/LS-DYNA: 1 – графическое окно, 2 – главное меню (Ansys Main Menu), 3 – сервисное меню (Ansys Utility Menu), 4 – стандартное меню, 5 – линейка инструментов (Ansys toolbar), 6 – меню изменения вида модели на экране

Графический интерфейс пользователя включает в себя:

- 1 – графическое окно;
- 2 – главное меню (Ansys Main Menu);
- 3 – сервисное меню (Ansys Utility Menu);
- 4 – стандартное меню;
- 5 – линейку инструментов (ANSYS toolbar);
- 6 – меню изменения видов.

**Главное меню (Main Menu)** позволяет осуществлять доступ ко всем основным модулям и операциям программы, начиная от создания модели и заканчивая выводом полученных результатов расчета на экран.

Для решения задач ANSYS/LS-DYNA в первую очередь должен быть настроен фильтр **Preferences** (рис. 2.2) который расположен в самом начале главного меню.

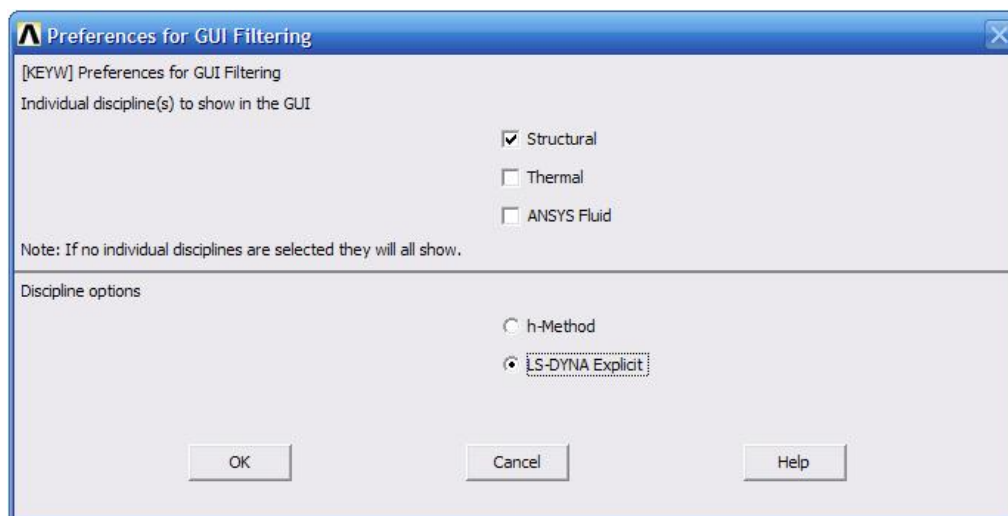


Рис. 2.2. Выбор параметров фильтра **Preferences** для решения задач ANSYS/LS-DYNA

Главное меню (Main Menu) состоит из следующих основных модулей (рис. 2.3):

Модуль **Preprocessor** (рис. 2.3.a) предназначен для подготовки геометрической и конечно-элементной модели, определения типа элементов, модели материала и других необходимых параметров.

Модуль **Solution** (рис. 2.3.б) предназначен для подготовки модели к расчету, определения ограничений и нагрузок, параметров времени расчета, выходных данных и проведение самого расчета.

Модуль **General Postproc** (рис. 2.3.в) предназначен для графического и текстового вывода на экран полученных результатов расчета, для определенного временного шага.

Модуль **TimeHist Postproc** предназначен для графического и текстового вывода на экран полученных результатов расчета для всего времени расчета, как правило, в виде графиков “исследуемый параметр” - время.

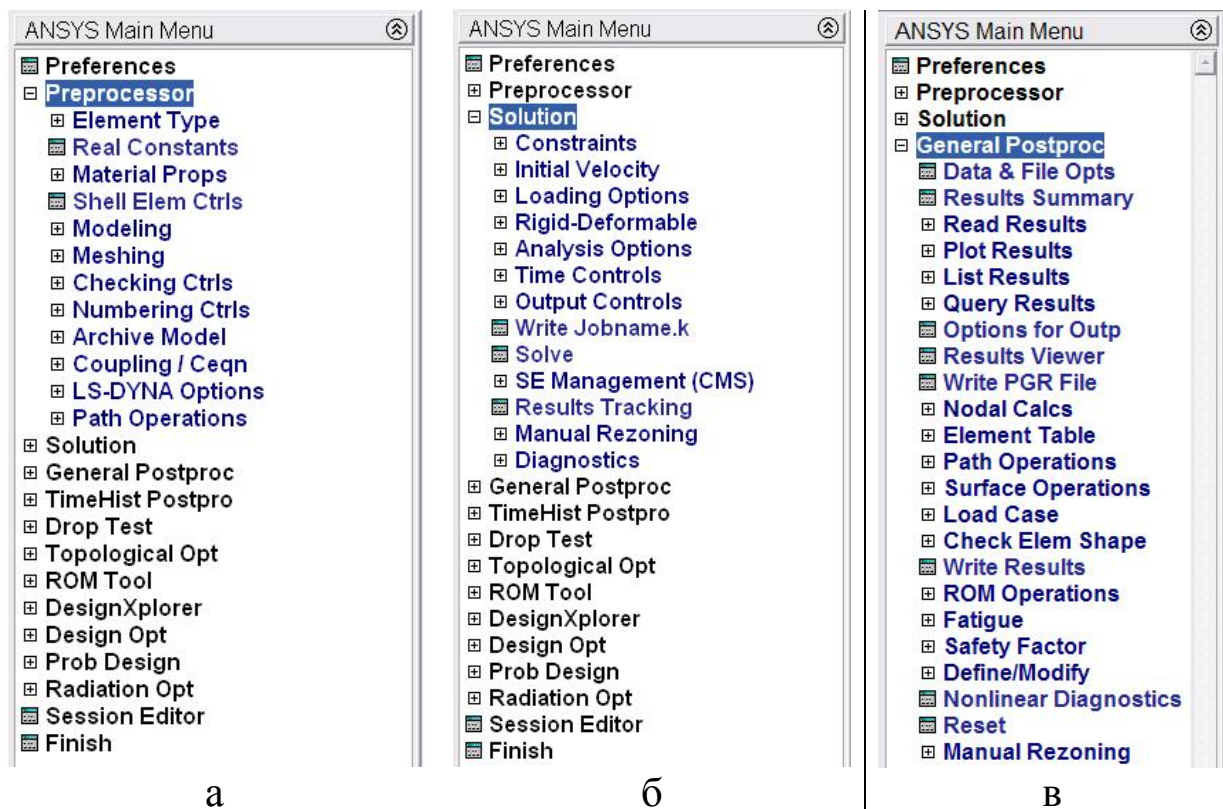


Рис. 2.3. Основные модули и пункты главного меню (Ansys Main Menu): а – модуль препроцессорной подготовки, б – модуль решения, в – модуль постпроцессорной обработки результатов

Модуль Preprocessor состоит из следующих основных пунктов.

**Element Type** - выбор типов элементов, которые будут использованы в модели.

**Real Constants** - определение постоянных которые используются совместно с типами элементов.

**Material Props** - выбор параметров моделей материалов и задание их характеристик.

**Modeling** - создание геометрической модели.

**Meshing** - присвоение атрибутов всем частям модели (тип элемента, постоянные, модели материала) и создание конечно-элементной модели.

**LS-DYNA Options** - задание параметров модели применительно к программе LS-DYNA.

Модуль Solution состоит из следующих основных пунктов.

**Constraints** - определение ограничений частей, элементов или узлов модели.

**Initial** - задание начальной скорости движения частей или узлов модели.

**Loading Option** - задание нагрузок на части, элементы и узлы модели.

**Analysis option** - задание опции расчета, параметров рестарта, контроля искажения и др.

**Time controls** - задание временных параметров расчета: время завершения, массовое скалирование и др.

**Output Controls** - определение выходных файлов параметров энергии, результирующих сил, перемещения узлов и элементов, частоты записи этих файлов.

**Write Jobname.k** - сохранение k-файла для выполнения расчета в программе LS-DYNA.

**Solve** - запуск процесса расчета.

Модуль General Postproc состоит из следующих основных пунктов.

**Read results** - чтение сохраненных данных расчета для определенного шага или в определенный момент времени.

**Plot results** - вывод результатов расчета на экран в виде цветных контуров.



**List results** - вывод результатов расчета на экран в текстовом виде.

**Сервисное меню (ANSYS Utility Menu)** предназначено для работы с файлами модели, выбора необходимых объектов модели, управлением отображения модели на экране и др. (рис. 2.4).



File Select List Plot PlotCtrls WorkPlane Parameters Macro MenuCtrls Help

Рис. 2.4. Сервисное меню (ANSYS Utility Menu)

**File** - стандартное меню для работы с файлами.

**Select** - осуществление выбора необходимых объектов модели.

**List** - вывод списков характеристик объекта в текстовом виде.

**Plot** - отображение модели в виде точек, линий, плоскостей, объема и др. в зависимости от того из чего состоит модель.

**PlotCtrls** - осуществление действия по отображению модели на экране.

**WorkPlane** - управление рабочей плоскостью модели и системами координат.

**Parameters** - определение базы данных в виде массивом, переменных и др.

**Help** – помощь.

## 2.2. Единицы измерения

Для работы в программе ANSYS/LS-DYNA необходимо корректно задавать все используемые единицы измерений. Размерность каждой единицы должна быть соответственной и согласовываться с общими правилами [8, 9]:

- [усилие] = [масса]\*[ускорение];

- [ускорение] = [длина]/[время<sup>2</sup>].

Примеры некоторых из согласованных единиц измерений приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

## Примеры согласованных единиц измерений

№	масса	длина	время	усилие	напряж.	плотн.	Мод. Юнга	Уск. св. пад.
1	кг	м	с	Н	Па	7,83e+3	2,1e11	9,8
2	г	см	мкс	1e+7	Мбар	7,83	2,1	9,8e-10
<b>3</b>	<b>тонна</b>	<b>мм</b>	<b>с</b>	<b>Н</b>	<b>МПа</b>	<b>7,83e-9</b>	<b>2,1e5</b>	<b>9,8e3</b>

Система единиц измерений №1 соответствует системе СИ. В ряде случаев использовать ее не совсем удобно, например, при небольших размерах модели и при моделировании кратковременных процессов.

Система единиц измерений №2 обычно применяется в процессах длящихся очень малое время (мкс и мс), например, в процессах взрыва (при использовании полной LS-DYNA).

**Система единиц измерений №3 наиболее удобна в процессах ОМД, поэтому все вводимые далее параметры будут соответствовать этой системе измерений.**

### *2.3. Операции управления моделью на экране*

Вращение – правая кнопка мыши + кнопка Ctrl.

Перемещение – левая кнопка мыши + кнопка Ctrl.

Масштабирование – колесико мыши.

Масштабирование и вращение – средняя кнопка мыши + кнопка Ctrl.

Выбор объектов геометрической модели осуществляется левой кнопкой мыши.

Отмена выбранных объектов осуществляется переключением вида курсора при помощи правой кнопки мыши.

## **2.4. Основные этапы моделирования**

Выполнение процесса моделирования состоит из 3-х основных этапов:

- препроцессорная подготовка;
- решение задачи;
- постпроцессорная обработка.

**Препроцессорная подготовка** включает в себя создание геометрической и конечно-элементной модели процесса, определение типов элемента, моделей материала, контактных параметров процесса, введение ограничений и нагрузок, действующих на модель, определение времени расчета и всех других необходимых параметров для выполнения расчета.

**Решение задачи** позволяет запустить и контролировать процесс решения.

**Постпроцессорная обработка** позволяет в графическом виде получить результаты выполненного расчета путем построения графиков и эпюр исследуемых процессов, создания анимации процесса и прочее.

В программе ANSYS/LS-DYNA в качестве препроцессора и постпроцессора используются типовые модули Ansys, а при решении задачи используется решатель программы LS-DYNA.

## **2.5. Типы элементов Shell и Solid**

Программа ANSYS /LS-DYNA имеет несколько типов элемента. Для определения типов элемента в графическом интерфейсе ANSYS используется следующая команда:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete**

---

Необходимые типы элемента выбираются из библиотеки типов элемента (рис. 2.5).

При решении **трехмерных задач ОМД** в большинстве случаев используются типы элемента Solid 164 и Shell 163 [5].

Тип элемента **Solid 164** представляет собой 8-и узловой объемный элемент, позволяет использовать 2 подхода к интегрированию конечного элемента: пониженное интегрирования, когда используется одна точка интегрирования и полное интегрирование (рис. 2.6).

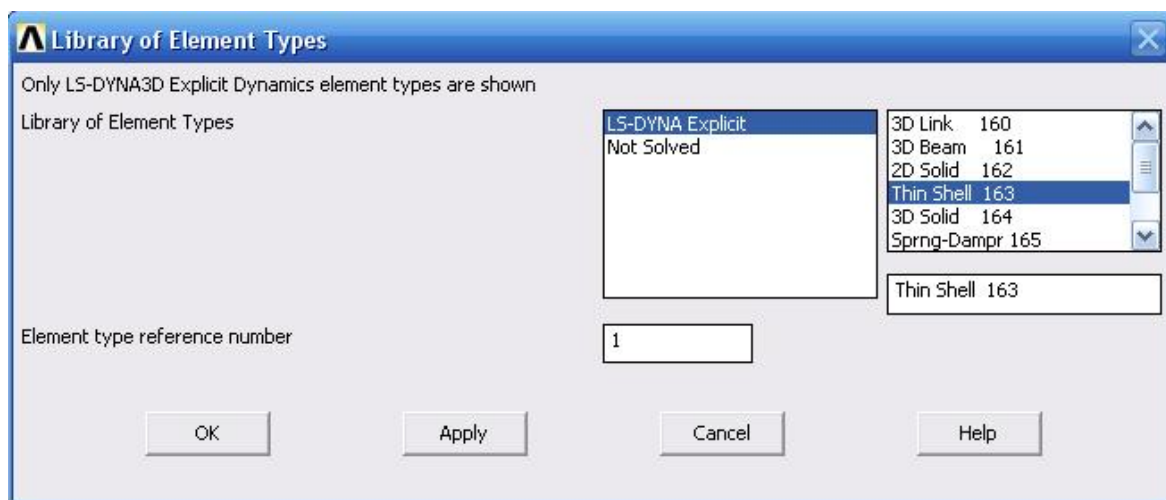


Рис. 2.5. Библиотека типов элемента (выводится по кнопке Add)

Пониженное интегрирование позволяет уменьшить время расчета, такой элемент устойчив к воздействию больших деформаций, но в тоже время требует включения контроля искажения типа песочных часов Hourglass.

Полное интегрирование не требует контроля искажения, но увеличивает время расчета.

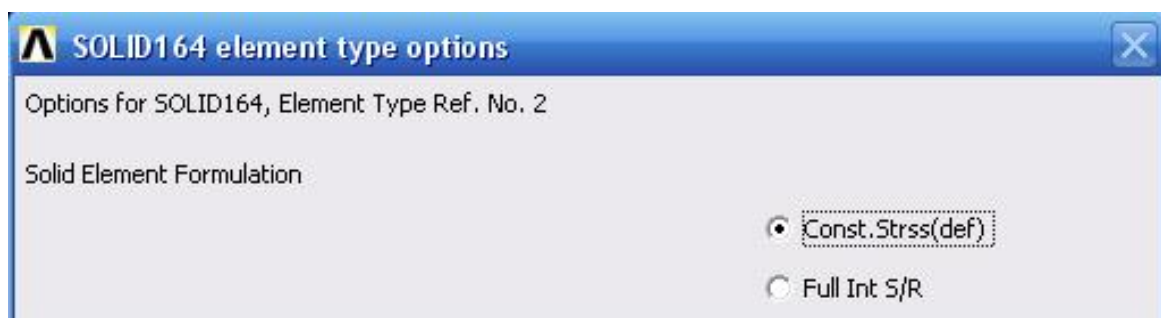


Рис. 2.6. Опции типа элемента SOLID 164

Тип элемента **Shell 163** представляет собой 3-х или 4-х узловой трехмерный оболоченный элемент с возможностями определения мембранных свойств.

Элемент дает возможность выбрать один из 12 элементных формулировок (рис. 2.7).

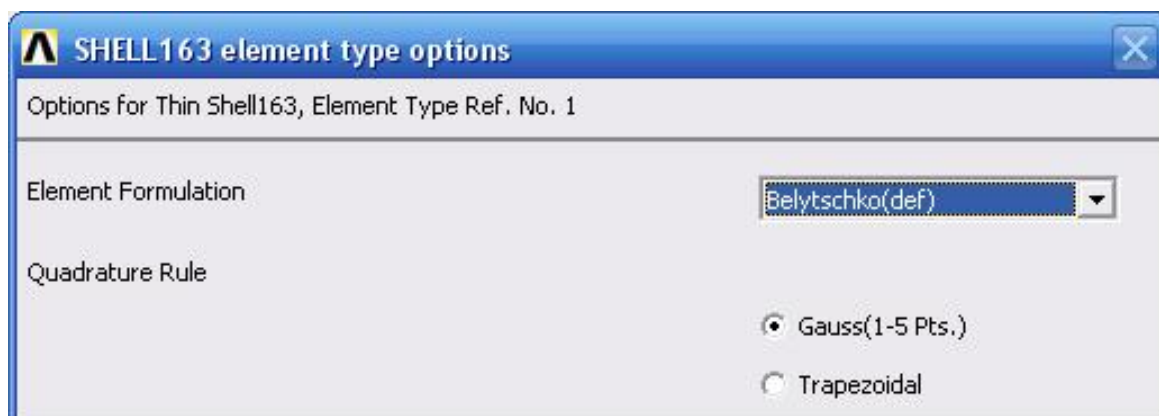


Рис. 2.7. Опции типа элемента SHELL 163

Элементная формулировка **Hughes-Liu (1)** использует пониженное интегрирование с некоторым контролем искажения hourglass.

Элементная формулировка **Belytschko-Tsay (0, 2)** самая быстрая из всех формулировок (применяется по умолчанию). Использует пониженное интегрирование элемента с контролем искажения hourglass. Не должна использоваться, когда элементы испытывают большие деформации.

Элементная формулировка **BCIZ Triangular Shell (3)** основана на теории пластин Kirchhoff, включает пониженное интегрирование элемента.

Элементная формулировка **C<sup>0</sup> Triangular Shell (4)** основана на теории пластин Mindlin-Reissner, применяет пониженное интегрирование. Формулировка довольно жесткая.

Элементная формулировка **Belytschko-Tsay membrane (5)** аналог Belytschko-Tsay, но без жесткости при изгибе. Использует пониженное интегрирование. Эффективна для большинства мембранных приложений. Применяется где образование складок нежелательно.

Элементная формулировка **S/R Hughes-Liu (6)** аналог Hughes-Liu, но применяет выборочное пониженное интегрирование, время расчета увеличено в 3-4 раза, формулировка позволяет избегать некоторого искривления формы элемента.

Элементная формулировка **S/R corotational Hughes-Liu (7)** близка к формулировке S/R Hughes-Liu, имеет полное интегрирование. Рекомендуется если в задаче будут наблюдаться искажения формы.

Элементная формулировка **Belytschko-Leviathan (8)** подобна Belytschko-Wong-Chiang, имеет пониженное интегрирование элемента, но содержит контроль искажений.

Элементная формулировка **Fully-integrated Belytschko-Tsay membrane (9)** полностью интегрированная мембранная элементная формулировка. Не имеет искажения формы, но медленная при расчете и более жесткая при деформировании.

Элементная формулировка **Belytschko-Wong-Chiang (10)** содержит пониженное интегрирование, аналог Belytschko-Tsay, но лишена недостатков при деформировании конструкции.

Элементная формулировка **Fast (corotational) Hughes-Liu (11)** аналог Hughes-Liu, использует пониженное интегрирование и corotational систему.

Элементная формулировка **Fully-integrated Belytschko-Tsay (12)** полностью интегрированная формулировка, не нуждается в контроле искажения формы.

**Для процессов ОМД рекомендуется использовать формулировки 10 и 12.**

Shell 163 предусматривает ввод следующих констант (**Real Constants**) (рис. 2.8).

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Real Constants**

---

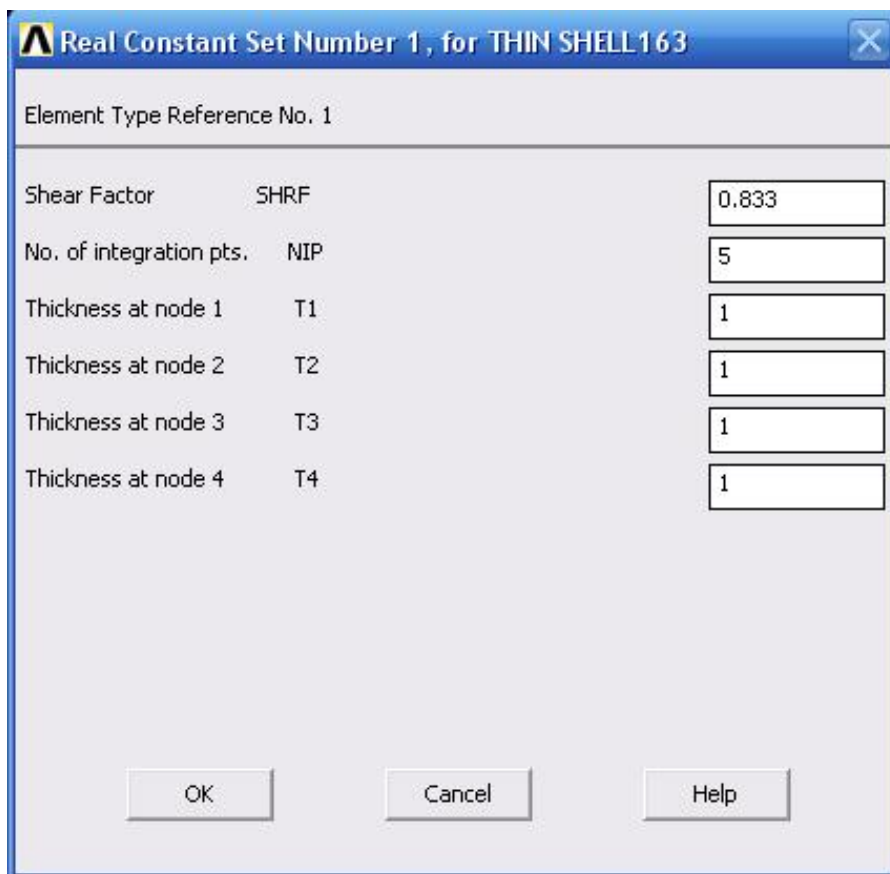


Рис. 2.8. Определение констант для элемента shell 163

SHRF – поправочный коэффициент для поперечных касательных напряжений, по умолчанию, **рекомендуется значения 5/6.**

NIP – количество точек интеграции по толщине элемента. По умолчанию устанавливается значение 2. **В процессах ОМД в зависимости от величины предполагаемой деформации рекомендуется назначение 3, 5 или 7 точек интеграции по толщине.**

T1-T4 – толщина оболочки в каждом из 4-х узлов.

## ***2.6. Модели материалов для процессов ОМД***

ANSYS/LS-DYNA включает большой ряд моделей материала. Ниже приведены модели материала, которые наиболее часто используются при моделировании процессов ОМД (табл. 2.2).

**Ansys main menu → Preprocessor → Material Props → Material Models**

В диалоговом окне **Define Material Model Behavior** можно выбрать необходимые модели материалов.

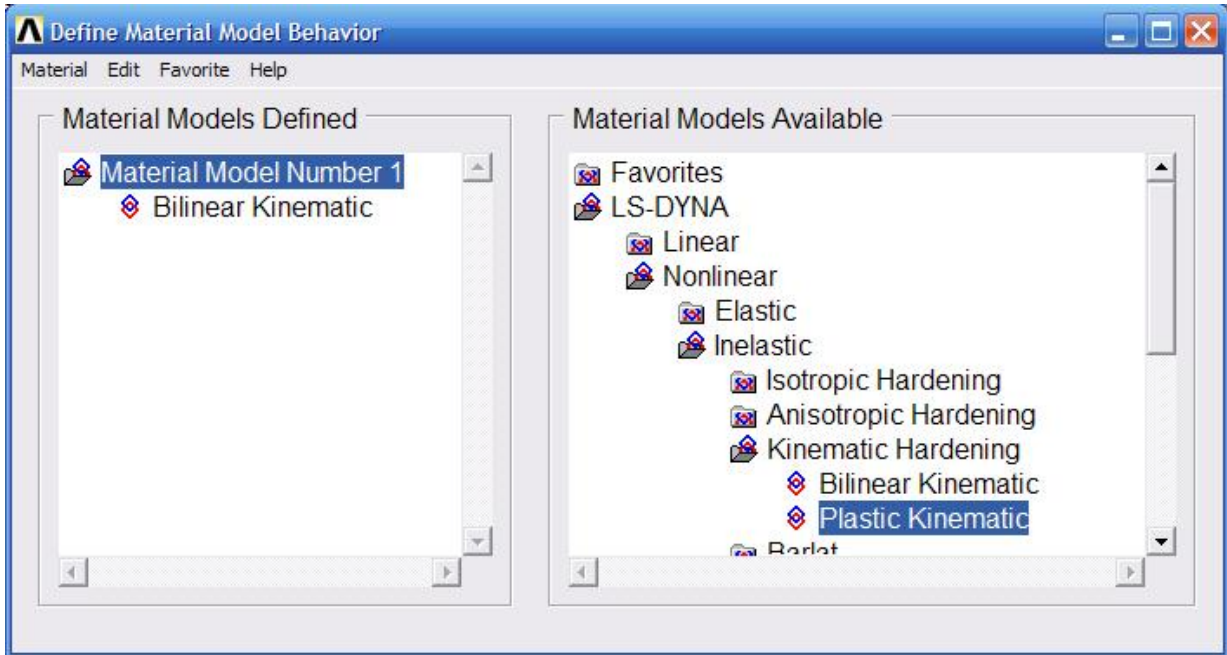
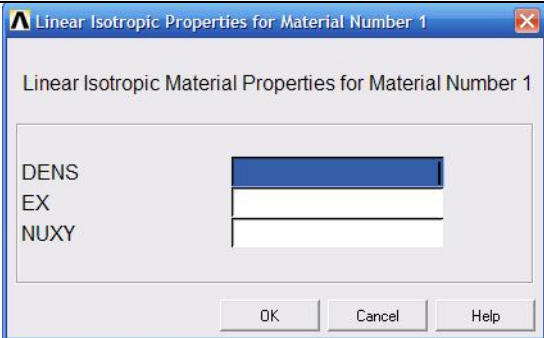


Рис. 2.9. Окно выбора модели материала

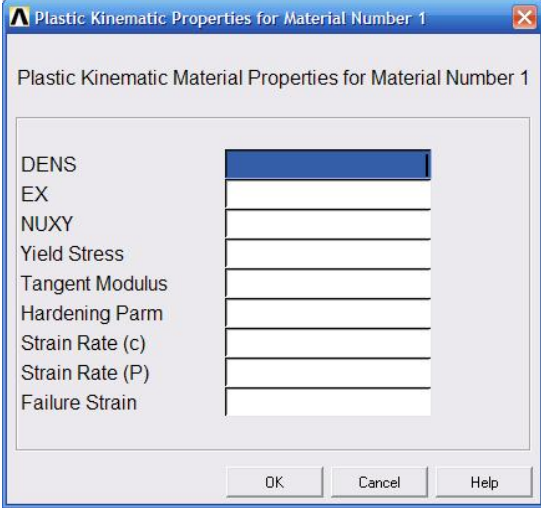
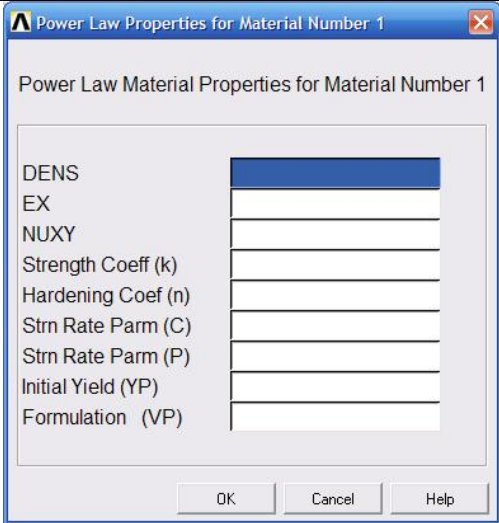
Таблица 2.2

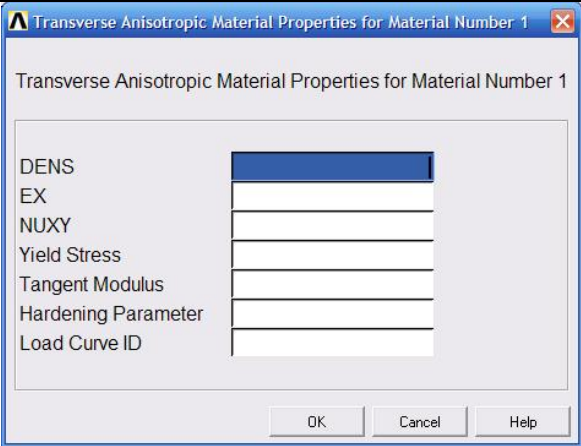
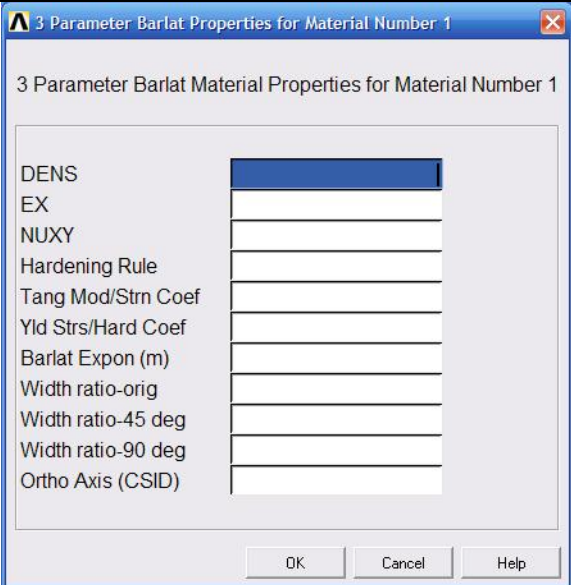
**Модели материалов для процессов ОМД**

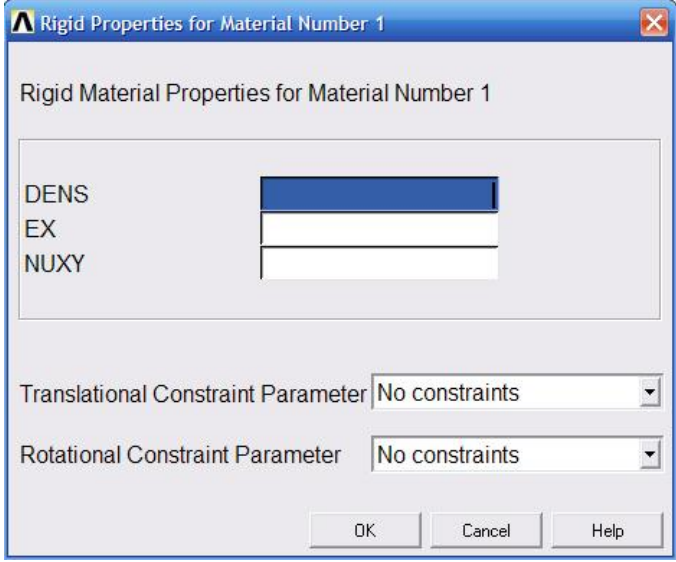
№	Модель матер-ла	Общий вид и путь команды	Параметры материала
1	Изотропный упругий	 <p>LSDYNA→Linear→Elastic→Isotropic</p>	<p>DENS – плотность;  EX – модуль Юнга;  NUXY – коэффициент Пуассона.</p> <p>График на рис. 2.10.а</p>



	<p>Применяется для описания материала, который подчиняется линейному закону Гука. Используется для металлических элементов конструкции работающих в упругих диапазонах*.</p>	
2	<p>Билинейный изотропный</p>	<div data-bbox="475 353 1066 772" data-label="Image"> </div> <p>LS-DYNA→Nonlinear→Inelastic→Kinematic Hardening→Bilinear Kinematic</p> <p>DENS – плотность;  EX – модуль Юнга;  NUXY – коэффициент Пуассона;  Yield Stress – предел текучести;  Tangent Modulus - модуль пластичности.</p> <p>График на рис. 2.10.б</p> <p>Предел текучести - <math>\sigma_T</math></p> <p>Модуль пластичности <math>\frac{\sigma_B - \sigma_T}{\epsilon_B - \epsilon_T}</math></p>
<p>Используется для описания упругопластических деформаций. Кривая модели состоит из двух элементов – упругой составляющей и пластической составляющей.</p> <p>Билинейная модель может быть изотропная и кинематическая. Эти модели отличаются наличием/отсутствием эффекта Баушингера.</p> <p>При определении модуля пластичности нужно учесть, что расчет нужно вести в истинных (лагранжевых), а не в инженерных параметрах [10].</p>		

3	Пластиче- ский ки- нематиче- ский	 <p>LSDYNA→Nonlinear→Inelastic →Kinematic Hardening→Plastic Kinematic</p>	<p>DENS – плотность; EX – модуль Юнга; NUXY – коэффициент Пуассона; Failure Strain - де- формация разруш. График на рис. 2.10.в</p>
<p>Модель отличается от билинейных моделей возможностью введения дополнительных параметров, таких как, зависимость от степени деформации, определение деформации разрушения и др.</p> <p>Изотропная, кинематическая или комбинированная модель изотропного и кинематического упрочнения с зависимым от степени деформации и разрушением. Изотропные и кинематические комбинации могут варьироваться, регулируя параметр упрочнения <math>\beta</math> между 0 (только кинематическое упрочнение) и 1 (только изотропное упрочнение).</p>			
4	Пластиче- ский в степенном виде	 <p>LSDYNA→Nonlinear→Inelastic →Power Law</p>	<p>DENS – плотность; EX – модуль Юнга; NUXY – коэффициент Пуассона; Strength Coeff - ко- эффициент прочн.; Hardening Coef - ко- эффициент упроч- нения. График на рис. 2.10.г</p>

	<p>Пластическая модель, зависящая от степени деформации обычно используется для металла и пластического анализа. Модель представлена упруго-пластическим поведением с изотропным упрочнением, имеет степенную зависимость, которая включает Cowper-Symonds множители для расчета степени деформации.</p>	
5	<p>Поперечно анизотропный упрочняющий</p>  <p>LSDYNA→Nonlinear→Inelastic→Anisotropic Hardening→Transverse Anisotropic</p>	<p>DENS – плотность; EX – модуль Юнга; NUXY – коэффициент Пуассона; Load Curve – кривая нагружения.</p>
<p>Полностью итерационная анизотропная пластическая модель только для оболочных и 2-D элементов. В этой модели в поле функции дается параметр Hill и есть понижение для случая плоского напряженного состояния.</p>		
6	<p>3-х параметрная BARTAL</p>  <p>LSDYNA→Nonlinear→Inelastic→Barlat</p>	<p>DENS – плотность; EX – модуль Юнга; NUXY – коэффициент Пуассона; Hardening Rule - правило упрочнения; Yld Strs – предел текучести; Barlat Expon - экспонента Barlat.</p>

	<p>Анизотропная пластическая модель (развита Barlat и Lian) используется для моделирования алюминиевого листа в условиях плосконапряженного состояния. Возможны экспоненциальные и линейные правила упрочнения.</p>	
7	<p>Твердый (Rigid)</p>	 <p>LSDYNA→Rigid Material</p>
<p>Используется для определения твердого (недеформируемого) материала. <b>В ОМД материал Rigid применяется для определения свойств недеформируемого инструмента (матрицы, пуансона).</b></p>		

\* - может применяться для тестовых задач

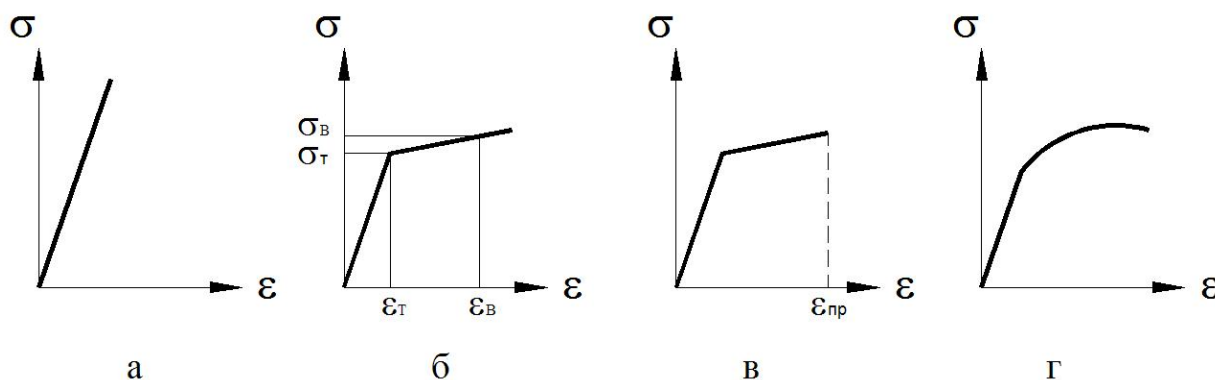


Рис. 2.10. Графики моделей материала: а – изотропная упругая модель; б – билинейная изотропная (кинематическая) модель, в – пластическая кинематическая модель с коэффициентом разрушения, г – пластическая модель в степенном виде

## ***2.7. Создание геометрической модели***

Геометрическая модель может быть создана как внутренними возможностями программы ANSYS, так и импортированием геометрии из других программ.

Создание модели может осуществляться как снизу вверх, так и сверху вниз. При создании модели снизу вверх сначала создаются точки, затем, на основе точек, линии, далее поверхности и объемы. При создании модели сверху вниз сразу строят поверхности и объемы, используют операции копирования, масштабирования, а также булевы операции.

Например, для создания цилиндра используется команда:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → By Dimensions**

---

В открывшемся окне вводятся значения радиуса основания цилиндра, высота цилиндра и угол поворота окружности основания цилиндра.

Для создания плоскости:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle → By Dimensions**

---

В открывшемся окне вводятся координаты крайних точек плиты.

Более подробную информацию по созданию геометрических моделей в программе ANSYS можно узнать из источника [11, 12].

## ***2.8. Управление видами***

Для управления видами модели может использоваться меню изменения вида (см. рис. 2.1). В этом окне можно выбрать один из 6 ос-

новных видов расположения модели, изометрический вид, осуществлять приближение-удаление модели и др.

## 2.9. Создание конечно-элементной сетки. Меню MeshTool

Процедура создания конечно-элементной сетки состоит из следующих этапов:

1. Определение атрибутов геометрическим частям модели;
2. Установка параметров качества сетки;
3. Создание сетки.

Наиболее удобным для построения сетки является использование сеточного меню MeshTool (рис. 2.11).

Для вызова панели MeshTool используется следующая команда:

---

**Ansys main menu → Meshing → MeshTool**

---

## 2.10. Определение частей

После создания конечно-элементной сетки в ANSYS/LS-DYNA требуется определение частей (Part). Каждой части (Part) соответствует определенный геометрический объект, материал, действующая постоянная и тип конечного элемента.

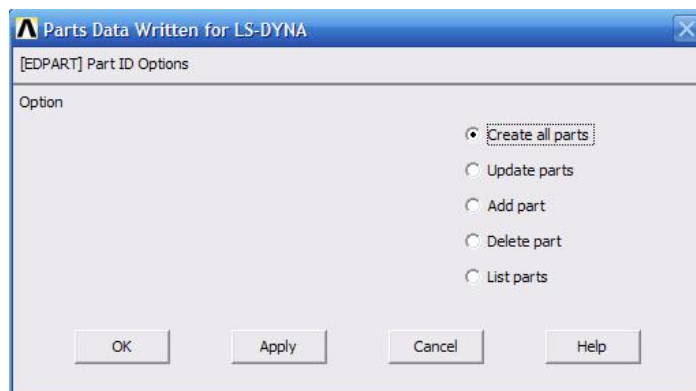


Рис. 2.12. Панель определения частей (Part)

Сеточное меню содержит следующие основные секции:

Секция Element Attributes (а) предназначена для присвоения атрибутов определенным частям геометрической модели (типа элемента, модели материала, действующих постоянных).

Секция Size Controls (б) предназначена для разбиения кромок модели на необходимые длины элементов.

Секция Mesh (в) предназначена для выбора типа наносимой сетки и непосредственного нанесения сетки на геометрическую модель.

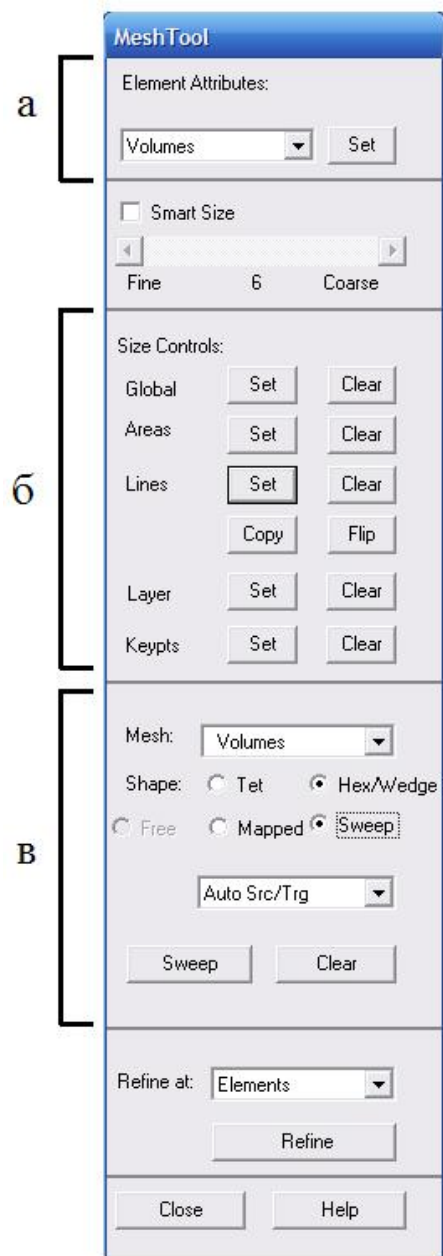


Рис. 2.11. Сеточное меню MeshTool:  
а – секция Element Attributes,  
б – секция Size Controls,  
в – секция Mesh

## 2.11. Определение контакта

Определение контакта необходимо для исключения взаимного проникновения геометрических объектов сквозь друг друга.

Команда для определения контакта:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → LS-DYNA Options →  
Contact → Define Contact**

---

В окне определения контактных параметров (рис. 2.13) задается:

- тип контакта;
- коэффициенты трения (статический, динамический);
- параметры демпфирования и вязкости.

Контакт поверхностей в ANSYS/LS-DYNA позволяет моделировать большое разнообразие взаимодействий между компонентами и частями модели.

В программе ANSYS/LS-DYNA контакт представлен несколько иначе, чем в других типах анализа ANSYS. В обычном ANSYS контакт представлен фактическими контактными элементами. В ANSYS/LS-DYNA нет контактных элементов, а указываются только компоненты и части (part) модели, что значительно облегчает пользователю процесс определения контакта.

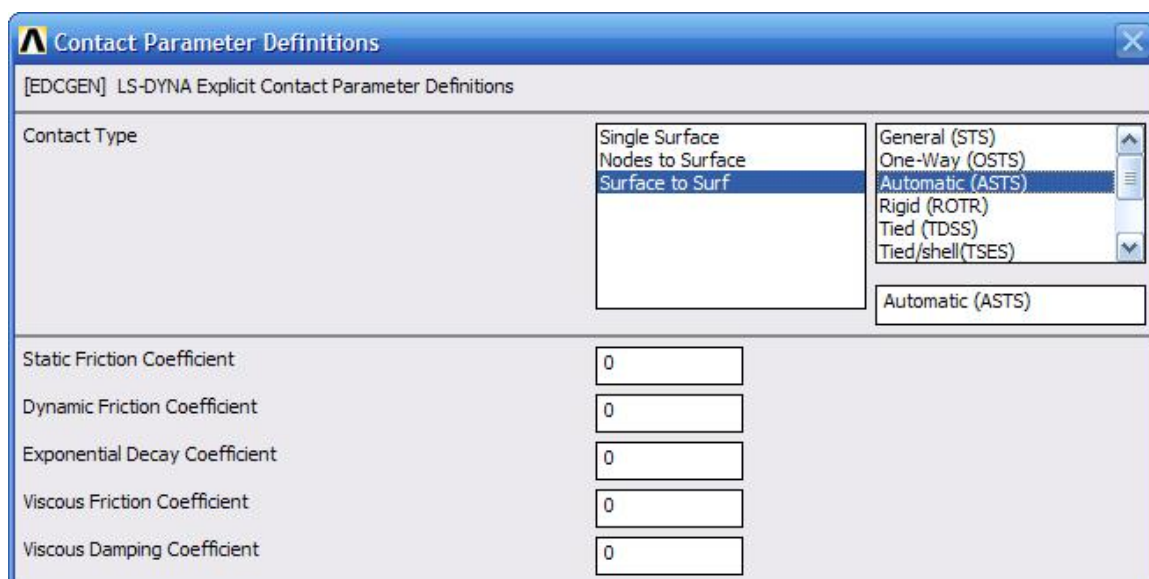


Рис. 2.13. Панель определения контактных параметров

Для описания взаимодействия между частями со сложной геометрией в ANSYS/LS-DYNA включены несколько контактных типов [5]:



1. **Single Surface** (тип контакта - единственная поверхность).

Контакт определяется когда поверхность одного тела входит во взаимодействие с собой или с поверхностью другого тела. Преимущество данного контакта в том, что не требуется указания контактных тел. Применяется для самоконтактных задач или задач с большими деформациями, где области контакта заранее неизвестны.

2. **Nodes to Surface** (тип контакта - узлы-поверхность).

Контакт определяется, когда в контактный узел проникает главная (target) поверхность. Контакт применяется для контакта между двумя поверхностями. Особенно эффективно, когда меньшая поверхность приходит в контакт с большей поверхностью.

3. **Surface to surface** (тип контакта – поверхность - поверхность).

Контакт определяется, когда поверхность одного тела проникает в поверхность другого. Контакт применяется для произвольно расположенных тел, которые могут иметь большие области контакта и эффективны для тел которые подвержены большому относительно-му скольжению относительно друг-друга.

Каждый из приведенных выше типов контакта включает в себя опции контакта:

1. **General contact** – быстрый и надежный контакт, использующий простые контактные алгоритмы, но требует контроля контактной ориентации поверхностей. Для твердых элементов ориентация поверхностей устанавливается автоматически.

2. **Automatic contact** имеет наиболее общие контактные алгоритмы. В отличие от General contact контакт проверяется по обеим сторонам элементов оболочки. Контакт ограничен глубиной контакта, которую при необходимости можно изменить.

3. **Eroding contact** устанавливается когда поверхностные элементы в процессе контроля могут разрушаться, после этого контакт передается во внутренние элементы. Контакт используется с твердыми элементами, в задачах проникновения и приложений, где имеется разрушение поверхности.

4. **Rigid contact** - используется в случае когда все тела твердые.

5. **Tied contact** позволяет связать узлы контактных поверхностей. Поверхности должны быть параллельны. В результате главная (target) поверхность подчиняет контактные узлы другой поверхности и поверхности деформируются совместно.

6. **Tiebreak contact** аналогичен предыдущему за исключением того, что контактные узлы привязаны к главной поверхности пока не достигнут критерий разрушения. Требуется определение значения критерия разрушения.

7. **Forming contact** основан на автоматических контактных типах и используется в процессах обработки металлов давлением. Инструмент задается как главная (target) поверхность, заготовка как подчиненная поверхность.

При определении контактных параметров также требуется вести ряд значений:

**Static Friction Coefficient** – статический коэффициент трения;

**Dynamic Friction Coefficient** – динамический коэффициент трения;

**Exponential Decay Coefficient** – коэффициент экспоненциального затухания;

**Viscous Friction Coefficient** – коэффициент вязкого трения. Позволяет ограничить силы трения, которая не может превышать значения  $\sigma_T / \sqrt{3}$ , где  $\sigma_T$  - предел текучести для использованного материала;

**Viscous Damping Coefficient** – коэффициент демпфирования, который устанавливается в процентах от критического. Как правило, для процессов обработки металлов давлением его значение принимают равным 20%.

После определения всех параметров в панели определения контактных параметров (см. рис. 2.13) для большинства контактных типов требуется определение контактного и главного (целевой, target) компонента (рис. 2.14). В процессах ОМД контактным компонентом (Contact Component) является заготовка, а целевым компонентом (Target Component) является инструмент. Для

примера рис. 3.1, где контактным компонентом является заготовка 1, а целевым компонентом – плоскости 2 и 3.

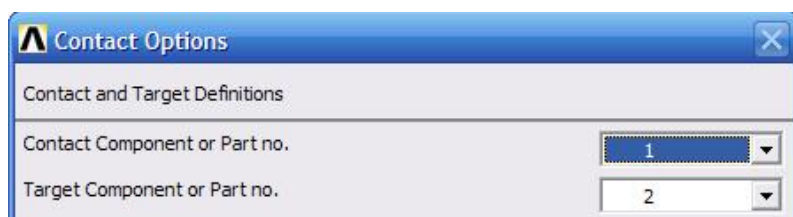


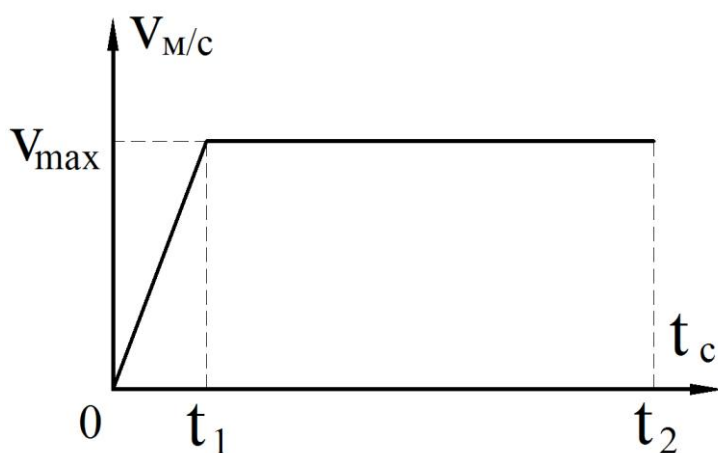
Рис. 2.14. Опции контакта, выбор контактных объектов

## 2.12. Определение нагрузки

В программе ANSYS/LS-DYNA все вводимые значения должны задаваться с привязкой к значениям времени.

В процессах ОМД нагрузка, как правило, прикладывается на недеформируемый (rigid) инструмент в виде силы или скорости. По возможности параметр, определяющий нагрузку, должен соответствовать реальному процессу.

Рекомендуется задавать следующий график нагрузки (рис. 2.15).



Обозначение на графике:

$V_{\max}$  – максимальная скорость

$t_1$  – время разгона;

$t_2$  – время завершения.

**Рекомендуемые значения:**

$V_{\max} = 2-5$  м/с

$t_1 = 0,001-0,005$  с

Рис. 2.15. График нагрузки и рекомендуемые значения для процессов ОМД

В случае, когда на инструмент прикладывается скорость, начинать моделирование нужно с нулевого значения, как показано на гра-

фике (рис. 2.15). При этом максимальная скорость движения инструмента должна быть ограничена значениями **2-5 м/с** [7, 13] (рекомендуется величина **2 м/с**).

В случае, когда на инструмент прикладывается параметр отличный от скорости (например, перемещение, усилие и т.п.) нужно контролировать скорость движения инструмента в процессе расчета, ее значение не должна превышать параметра 2-5 м/с.

Для задания кривой нагружения в программе ANSYS/LS-DYNA используются массивы данных:

---

**Ansys utility menu → Parameters → Array Parameters → Define/Edit**

---

В открывшемся меню (Add) рис. 2.16 можно задать название параметра и величину массива. Для определения кривой необходимо задать 2 массива: скорость и время. Размеры обоих массивов будут соответствовать размеру 3x1.

Параметры массива вводятся в следующем окне (рис. 2.17).  
Примеры определения массива (Perem – скорость, Time – время):  
Perem = 0, -1000, -1000; Time = 0, 0.001, 0.05.

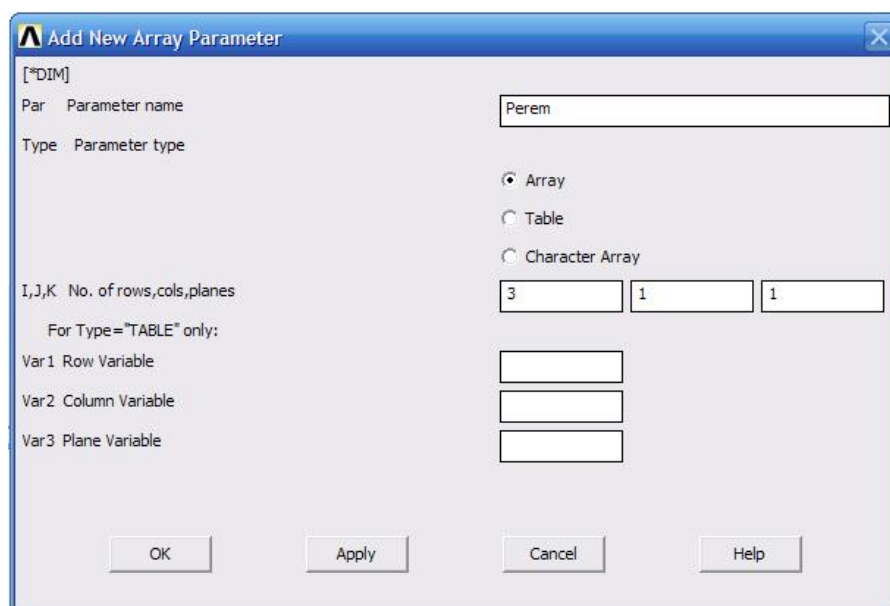


Рис. 2.16. Окно определения параметров массива

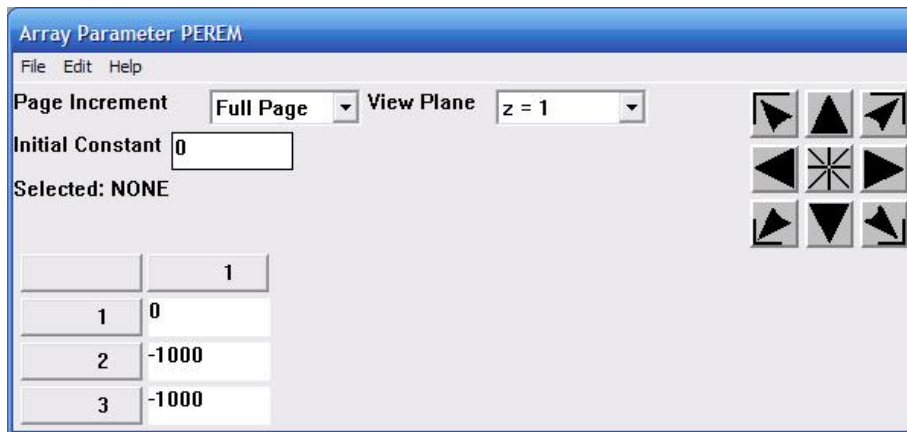


Рис. 2.17. Окно определения значения массива

Нагружение модели (части) осуществляется при помощи команды:

---

**Ansys main menu → Solution → Loading Options → Specify Loads**

---

В окне определения нагрузки (рис. 2.18) вводятся:  
 - определение/удаление/просмотр нагрузки (Load Options);

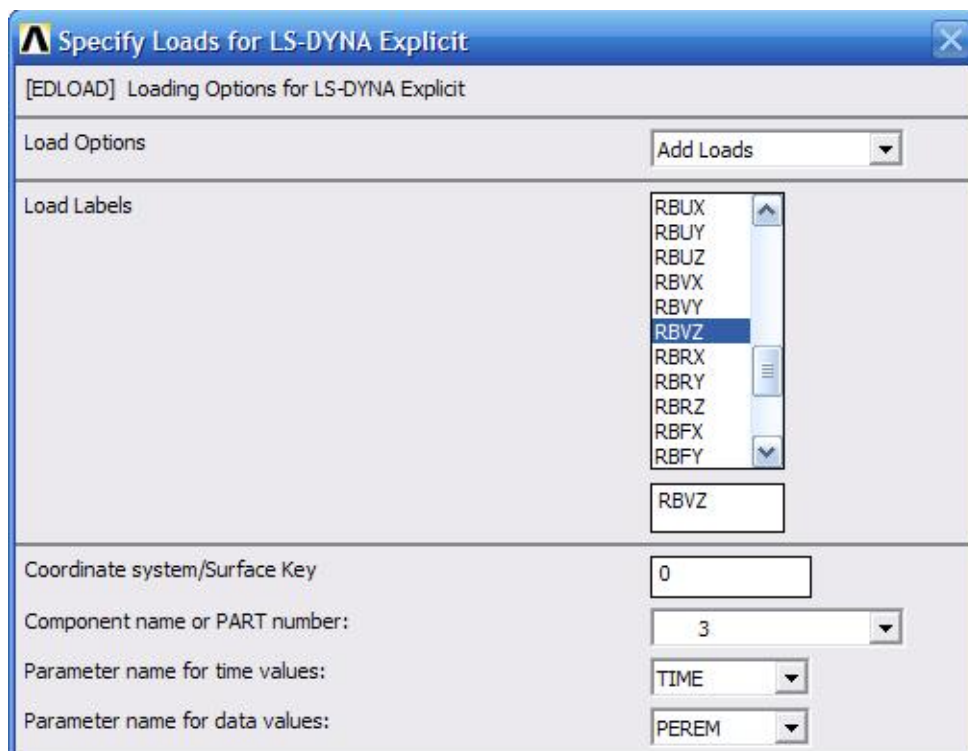


Рис. 2.18. Окно определения нагрузки

- вид нагрузки (Load Labels);
- номер части или имя компонента (Component name or PART number);
- имя параметра временной оси;
- имя параметра оси нагружения.

**В большинстве случаев в процессах ОМД нагрузка прикладывается к твердым телам (которые задают инструмент) и определяются как части (part). Основные виды нагрузок для твердых тел приведены в таблице 2.3.**

Таблица 2.3

Основные виды нагрузок для твердых тел и их обозначения

Вид нагрузки	Обозначение метки по осям
Сила	RBFX, RBFY, RBFZ
Моменты	RBMX, RBMY, RBMZ
Перемещения	RBUX, RBUY, RBUZ
Поворот	RBRX, RBRY, RBRZ
Скорости	RBVX, RBVY, RBVZ
Угловые скорости	RBOX, RBOY, RBOZ

Пример: для задания скорости движения пуансона (представленного как твердое тело) вдоль оси Z мы должны использовать метку RBVZ.

Номер части (Part Number) соответствует номеру присвоенной ранее инструменту в меню Part.

Имя параметра (parameter name) соответствуют именам заданным ранее в массиве.

### 2.13. Определение ограничений

Ограничения применяют для фиксации узлов или элементов модели, как в поступательном движении, так и при вращении.

Для приложения ограничений служит команда:

---

**Ansys main menu** → **Solution** → **Constraints** → **Apply** → **On Lines/Areas/Nodes**

---

Такие ограничения действуют лишь на деформируемые тела. Ограничения на недеформируемые (твердые) тела задаются при определении свойств материала (таблица 2.2, п.7).

Используя пункты меню Translation Constrain Parameter (ограничение перемещения) и Rotational Constrain Parameter (ограничение вращения) можно задать соответствующие ограничения (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Ограничения твердых тел

Направления ограничений вдоль осей	
No constraints	Без ограничений
X displacement/ X rotation	Ограничение X перемещения/вращения
Y displacement/ Y rotation	Ограничение Y перемещения/вращения
Z displacement/ Z rotation	Ограничение Z перемещения/вращения
X and Y disps/ X and Y rotate	Ограничение X и Y перемещения/ вращения
Y and Z disps/ Y and Z rotate	Ограничение Y и Z перемещения/ вращения
Z and X disps/ Z and X rotate	Ограничение Z и X перемещения/ вращения
All disps/ All rotation	Полное ограничение перемещения/вращения

## 2.14. Определение дополнительных параметров

### 2.14.1. Определения параметра контроля Hourglass

Параметр контроля искажения Hourglass применяется для элементов с пониженным интегрированием. Назначение параметра – подавлять искажения формы элементов.

Команда для определения параметра контроля Hourglass:

---

**Ansys main menu → Solution → Analysis Options → Hourglass  
Ctrls → Local**

---

Окно определения параметров контроля Hourglass позволяет ввести тип контроля Hourglass (VAL1), коэффициент подавления искажения формы элементов (VAL2), квадратичные и линейные коэффициенты объемной вязкости (VAL3,4) и др.

Для процессов ОМД рекомендованные значения типа контроля Hourglass (VAL1) значения 4 и 5. Остальные коэффициенты по умолчанию. Более подробно про параметры контроля Hourglass можно узнать из источника [8].

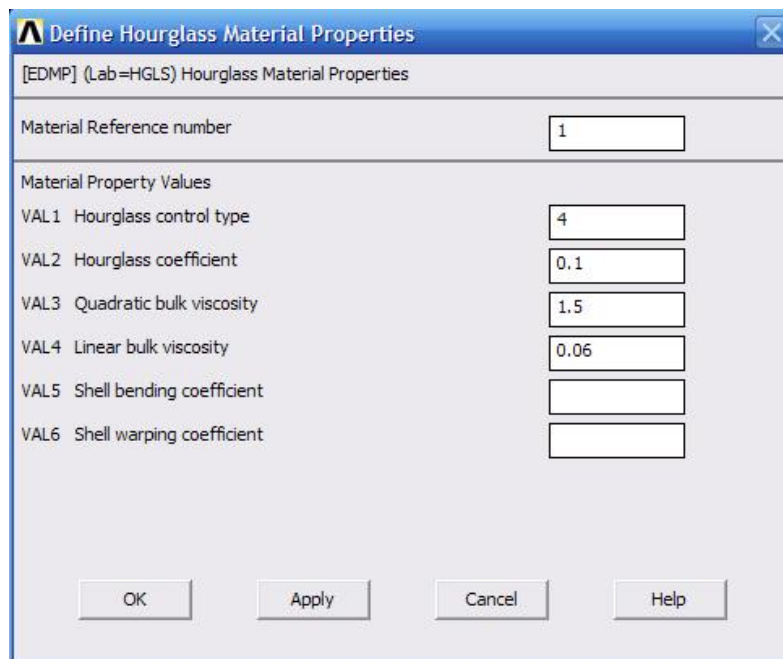


Рис. 2.19. Окно определения параметров контроля Hourglass



### ***2.14.2. Определения время завершения анализа***

Время завершения анализа устанавливается командой:

---

**Ansys main menu → Solution → Time Controls → Solution Time**

---

Время завершения анализа должно быть не больше (можно меньше), чем задано кривой нагружения (см. рис. 2.15).

### ***2.14.3. Изменение временного шага***

Временной шаг или такт является единицей времени которая обеспечивает стабильность расчета. В ряде случаев, этот шаг можно искусственно повысить, что приведет к уменьшению времени расчета. Характерно обратнопропорциональная зависимость времени расчета от величины временного шага.

Величину временного шага можно искусственно повысить в случаях если:

- максимальная скорость движения отдельных частей модели меньше 2 м/с;
- расчет осуществляется для предварительной тестовой модели;
- время расчета нереально большое.

В случае увеличения временного шага необходимо:

- использовать правильную сетку (для оболочных элементов – 4-х узловой, для объемных – 8-и узловую) с адекватными соотношениями сторон;
- отслеживать появление динамических эффектов, например, контролируя кинетическую и внутреннюю энергию, кинетическая энергия не должна превышать внутреннюю более чем на 5% [7].

Для изменения временного шага используется команда:

---

**Ansys main menu → Solution → Time Controls → Time Step Ctrls**

---

В появившемся окне (рис. 2.20) можно внести измененное значение временного шага (опция Mass scaling time step size).

Для этого:

1. запускают процесс решения задачи с временным шагом по умолчанию;
2. в окне выполнения процесса (см. далее рис. 2.22) отмечают значение time step;
3. процесс останавливают;
4. значение временного шага пересчитывают исходя из коэффициента увеличения;
5. новое значение записывают в окно масштабирование временного шага;
6. процесс запускают уже с измененным временным шагом.

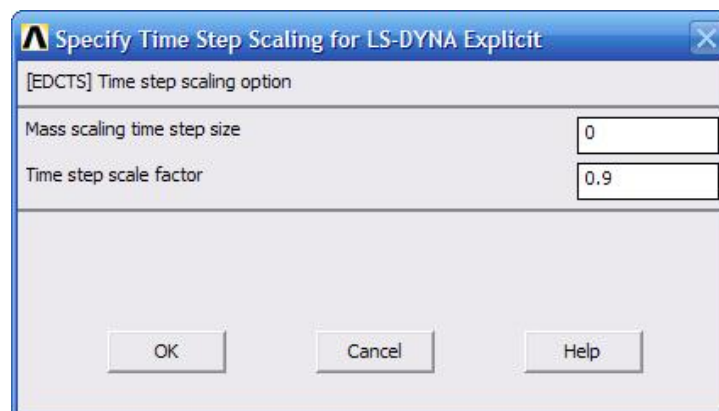


Рис. 2.20. Окно масштабирования временного шага

**Как показывает практика моделирования процессов ОМД, временной шаг можно увеличивать до 10-30 раз без значительной потери качества результатов (в случае применения ранее описанных условий).**

#### ***2.14.4. Определение частоты записи выходных файлов***

Результаты расчета будут записаны программой с некоторым интервалом. Для определения количества шагов записи результатов служит следующая команда:

---

**Ansys main menu → Solution → Output Controls → File Output Freq → Number of Steps**

---

В этом окне по умолчанию задано число шагов записи равное 100 для постпроцессора POST1 и 1000 для постпроцессора POST26.

#### ***2.14.5. Определение дополнительных выходных файлов (файлы ASCII)***

Выходные файлы ASCII позволяют сохранить в процессе расчета дополнительные выходные параметры для последующего просмотра их во временном постпроцессоре POST26.

---

**Ansys main menu → Solution → Output Controls → ASCII Output**

---

В открывшемся окне (рис. 2.21) можно выбрать различные выходные данные расчета.

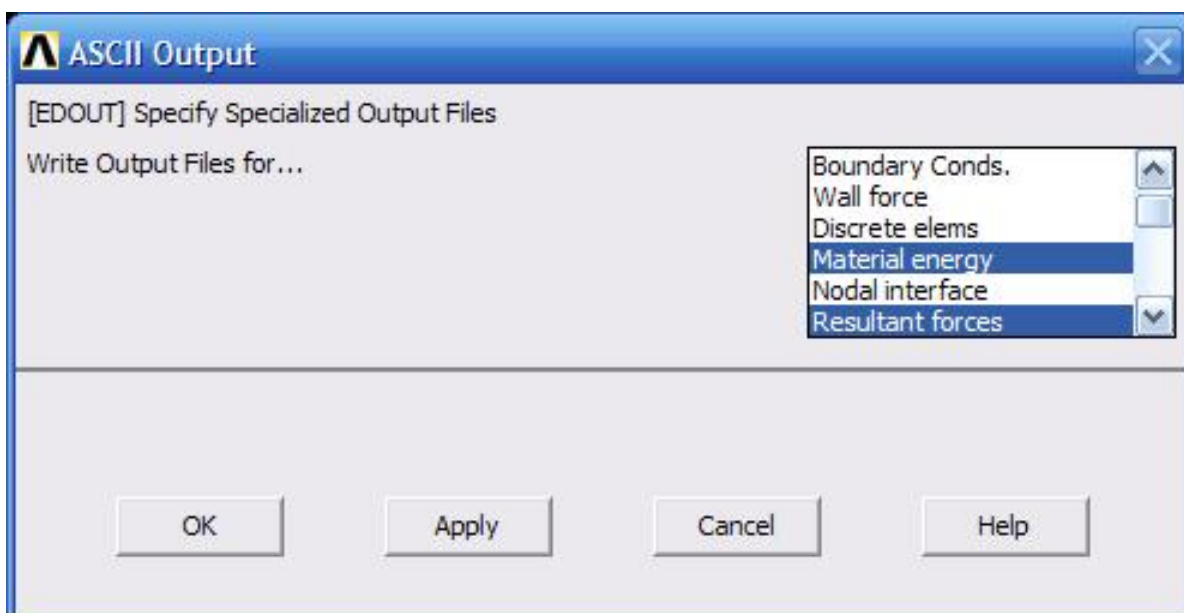


Рис. 2.21. Окно определения дополнительных выходных файлов ASCII

Вот некоторые из выходных файлов ASCII:  
Global data - общие данные;  
Material energy - данные энергии материала;  
Resultant force - результирующие силы;  
Nodal interface - силы в узлах элемента;  
Element data - данные по элементам;  
Nodal data - данные по узлам.

### **2.15. Создание k-файла**

Для запуска расчета в решателе LS-DYNA необходимо создание k-файла, представляющего собой текстовый файл со всей информацией по модели.

Для создания k-файла используется команда:

---

**Ansys main menu → Solution → Write Jobname.k**

---

Использование данной команды позволяет сохранить результаты в разных форматах:

- 0 – формат LS-DYNA;
- 1 – формат ANSYS;
- 2 – формат ANSYS и LS-DYNA.

Использование формата LS-DYNA позволит сохранить результаты в форматах пригодных для их чтения в препостпроцессоре LS-PREPOST.

Отметим, что поскольку k-файл имеет текстовый вид, то легко поддается правке в любом текстовом редакторе (блокноте), что позволяет при необходимости быстро исправить в нем данные и запустить на расчет.

Также отметим, что k-файл сохраняется автоматически при запуске процесса расчета, но при этом формат будет соответствовать только формату ANSYS.

## 2.16. Решение задачи

Запуск задачи на расчет осуществляется по следующей команде:

---

**Ansys main menu → Solution → Solve**

---

После вывода окна Status, процесс перейдет к решателю программы LS-Dyna, и появиться окошко процесса решения (рис. 2.22).

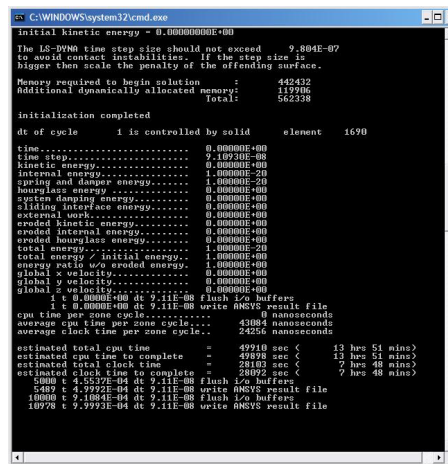


Рис. 2.22. Окошко выполнения процесса решения в решателе программы LS-Dyna

В этом окошке отображается вся необходимая информация, такая как:

- версия решателя;
- минимальный шаг по времени;
- требуемая величина оперативной памяти;
- энергетические параметры процесса;
- временные параметры процесса (текущий временной шаг).

Программа имеет специальные ключи для контроля и завершения процесса решения (для вызова которых нужно нажать сочетание клавиш Ctrl + C):

Sw1 – завершить процесс решения на текущем шаге (с сохранением всей информации);

Sw2 – вывести на экран оставшееся и полное время процесса и продолжить выполнение данного процесса.

### ***2.17. Постпроцессорная обработка POST1***

Постпроцессорная обработка, следующая за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения, позволяет обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом, используя набор команд и возможности интерфейса. Результаты решения (применительно к задачам инженерной механики) включают значения перемещений, напряжений, деформаций, энергии и др. Результатом работы программы может быть как графическое, так и табличное представление результатов. Графическое изображение можно вывести на монитор, преобразовать в файлы с различными расширениями (форматы BMP, JPEG и др.). Программа позволяет создать AVI-файлы, что позволяет наблюдать анимацию процесса. На стадии получения решения результаты записываются в базу данных программы ANSYS и в так называемый файл результатов. Результаты, полученные на каждом дополнительном шаге решения, накапливаются как наборы данных [14].

Существуют две возможности обратиться к записанным результатам для последующей постпроцессорной обработки. Для ознакомления с определенным набором полученных данных, которые относятся ко всей модели или ее части, можно использовать постпроцессор общего назначения (POST1). Или можно использовать постпроцессор истории нагружения (POST26) для выделения из массивов результатов нужных параметров, например, узловых перемещений или напряжений в элементе. При считывании данных из файла, они сохраняются в базе данных программы ANSYS, что на стадии постпроцессорной обработки дает возможность иметь доступ ко всем входным параметрам модели (геометрии, свойствам материалов, нагрузкам и т.д.). Кроме того, средства графического отображения инфор-

мации включают векторное представление, профили результатов вдоль заданной кривой. При векторном представлении используются отрезки со стрелками, чтобы показать как абсолютное значение, так и направление векторной величины, например, вектора перемещения. Профиль результатов представляет собой график, который показывает изменение полученных величин в зависимости от заданного пользователем пути [14].

Для извлечения данных по результатам расчета применяется следующая команда:

---

**Ansys main menu → General Postproc → Read Results → First Set / Next Set / Last Set / By Pick...**

---

Последняя опция выбирается исходя из того, какой шаг решения хотим открыть First Set – первый шаг, Last Set – последний шаг, By Pick – указать шаг.

Для просмотра контуров деформированной формы применяется следующая команда:

---

**Ansys main menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu**

---

В появившемся окне (рис. 2.23) можно выбрать параметр, по которому интересуется просмотр результатов.

### **2.18. Постпроцессорная обработка POST26**

Постпроцессор истории нагружения POST26 (для результатов, зависящих от времени), дает возможность представить полученные данные расчета, например, узловые перемещения, напряжения или силы реакций, в виде зависимостей от времени или от шагов нагружения. Эти данные доступны для обозрения в графической или табличной форме [14].

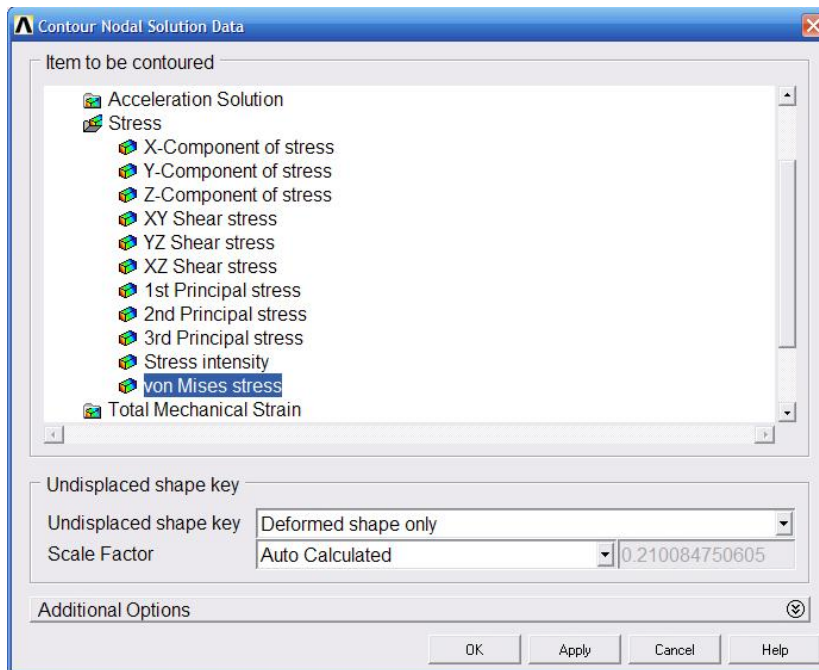


Рис. 2.23. Окно выбора данных по узлам модели

Загрузка данных в постпроцессор истории нагружения выполняется по команде:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc**

---

В результате появляется окно истории нагружения (рис. 2.24).

Данное окно позволяет загружать базу с сохраненными результатами, строить графики зависимостей исследуемых значений от времени, выводить табличные значения полученных данных и т.п.

Для чтения сохраненных дополнительных данных базы ASCII используются следующие команды:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Read LSDYNA Data  
→ RCFORC file / MATSUM file ...**

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Variable Viewer**

---



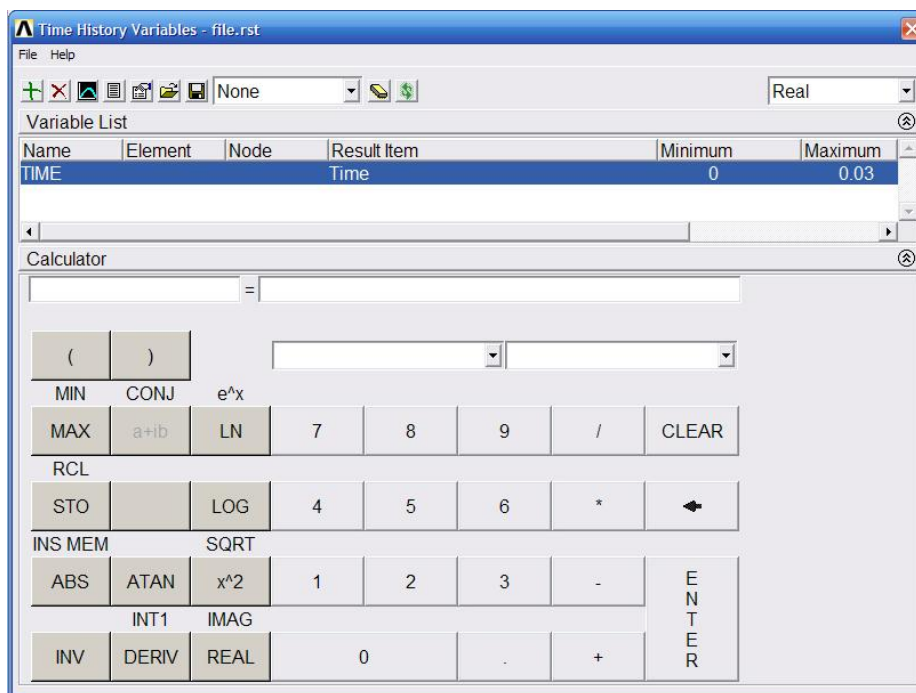


Рис. 2.24. Окно истории нагружения

Команды позволяют загрузить сохраненную базу данных по требуемым параметрам, назначить интересующие параметры и через окно истории нагружения (рис. 2.24) построить интересующий график.

## ГЛАВА 3

### УЧЕБНЫЙ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA

#### Моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки

##### Задача

Цилиндрическая заготовка 1 диаметром  $D1=60$  мм и высотой  $H1=80$  мм (рис. 3.1) сжимается под воздействием двух плит – подвижной 3 и неподвижной 2, в процессе осадки заготовка деформируется и ее размеры становятся следующими: диаметр  $D2$  и высота  $H2$ .

В качестве материала используем материал со следующими механическими характеристиками:  $\sigma_T = 250$  МПа,  $\sigma_B = 280$  МПа,  $\varepsilon = 30\%$ ,  $\mu = 0,3$ .

По результатам моделирования требуется определить напряженно деформированное состояние материала заготовки и энергосиловые параметры процесса осадки.

Учебный пример выполнен в программе ANSYS/LS-DYNA с подробным описанием всех операций.

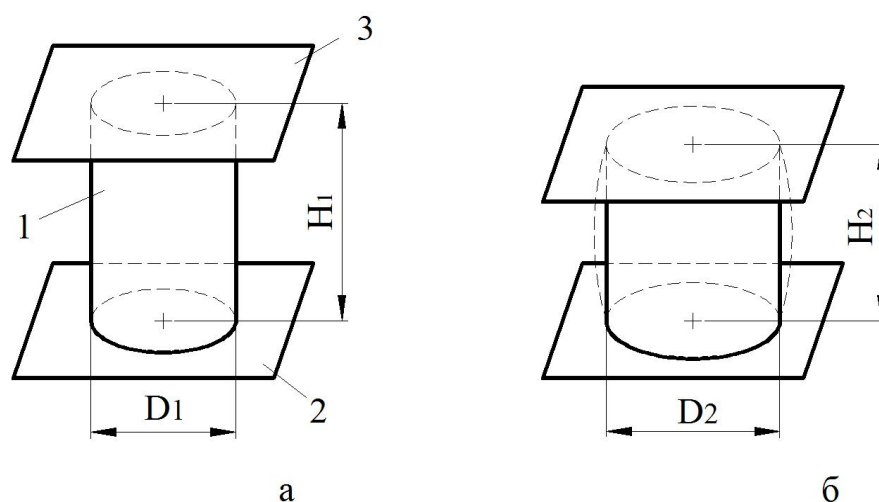


Рис. 3.1. Геометрическая модель процесса осадки цилиндрической заготовки в начале процесса (а), в конце процесса (б): 1 – заготовка, 2 - нижняя неподвижная плоскость, 3 – верхняя подвижная плоскость

### 3.1. Начальные установки для сохранения вводимых данных

Выберем папку, в которые будут сохраняться все данные расчета:

---

**Ansys utility menu → File → Gchange directory**

---

Откроется окно **Change Working Directory** как показано на рис. 3.2.

1. Выберите папку [А] для сохранения ваших файлов (папка предварительно должна быть создана);
2. Нажмите кнопку **Ок** [Б].

Все ваши файлы (файлы модели, расчетов и др.) будут находиться в данной папке.



Рис. 3.2. Выбор рабочей папки для сохранения данных

### 3.2. Определение начальных установок

Установим опции проведения явного динамического анализа в программе ANSYS/LS-DYNA:

---

**Ansys main menu → Preference**

---

Откроется окно Preferences for GUI Filtering (рис. 3.3).

1. Поставьте галочку на Structural [А];
2. Выберите LS-DYNA Explicit [Б];
3. Нажмите кнопку **ОК** [В].

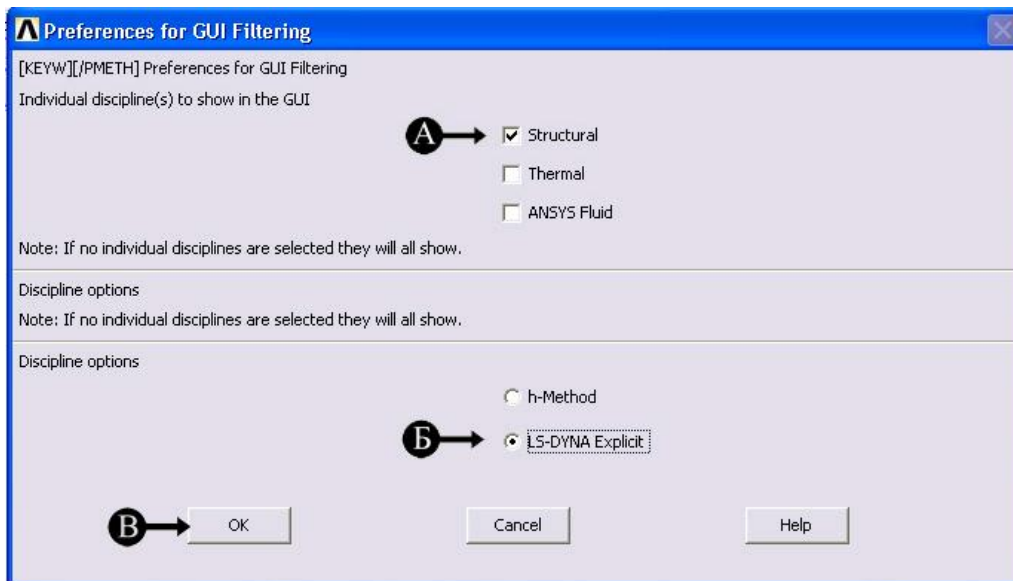


Рис. 3.3. Исходные установки для выбора опций явного анализа

### 3.3. Определение типов элементов

Выберем типы конечных элементов, на которые будут разбиты части модели:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete**

---

Откроется окно Element Types (рис. 3.4).

1. Нажмите кнопку Add [A];  
Откроется окно Library of Element Types (рис. 3.5).
2. Выберите в правом окне “Thin Shell 163” [Б];
3. Нажмите кнопку “Apply” [B];
4. Выберите в правом окне “3D Solid 164” [Г];

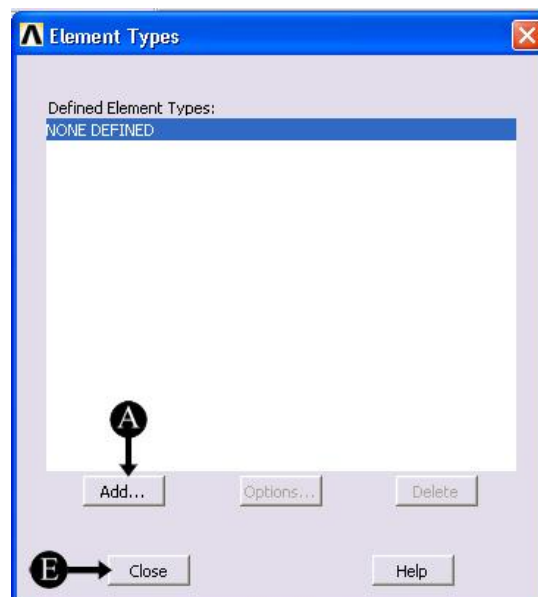


Рис. 3.4. Определение типа элемента

5. Нажмите кнопку “Ok” [Д];
6. Нажмите кнопку “Close” [E] (рис. 3.4).

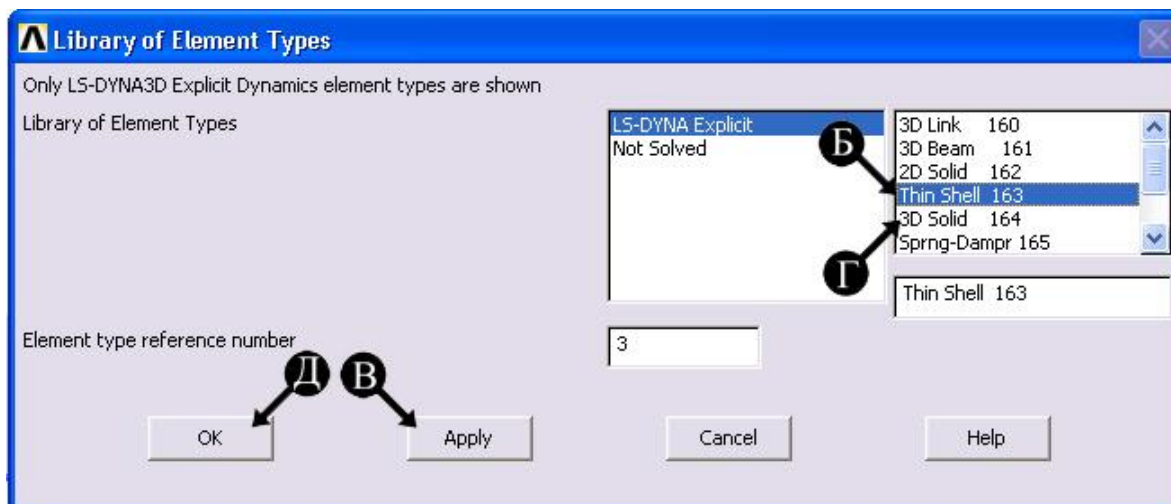


Рис. 3.5. Выбор типа элемента из библиотеки

### 3.4. Определение действующих постоянных

Определим действующие постоянные модели:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Real Constants**

---

Откроется окно Real Constants (рис. 3.6).

1. Нажмите кнопку Add [A];

Откроется окно Element Type for Real Constants (рис. 3.7).

2. Выберите “Type 1 SHELL163” [Б];
3. Нажмите кнопку “OK” [В].

4. В окне Real Constants Set Number 1 (рис. 3.8) нажмите “Ok” [Г];

Откроется окно Real Constants Set Number 1 (рис. 3.9).

5. Введите Shear factor (фактор сдвига) [Д] – 5/6;
6. Введите No. of integration pts. (количество точек интеграции) [E] – 1;

7. Введите Thickness at node 1 (толщина в узле 1) [Ж] – 1 (остальные ячейки толщин в зонах 2,3 и 4 будут заполнены автоматически в процессе сохранения к-файла);
8. Закройте окно “OK” [З];
9. Закройте окно “Close” [И] (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Определение действующих постоянных

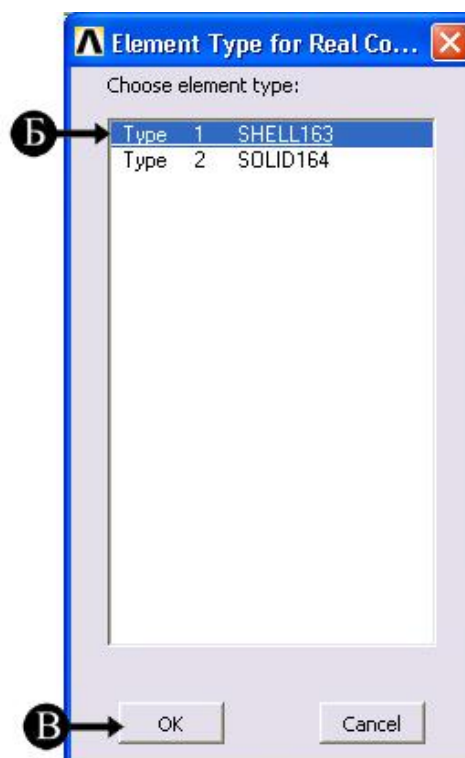


Рис. 3.7. Определение типа элемента для назначения действующих постоянных

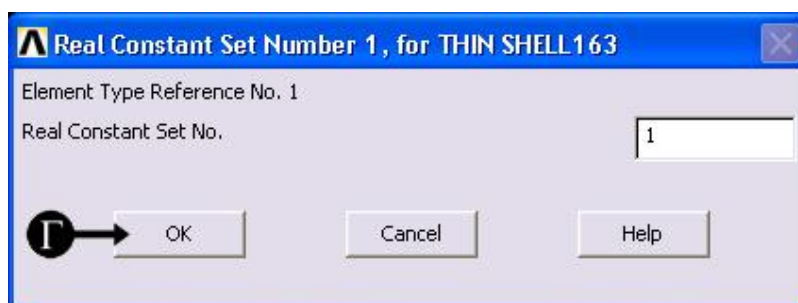


Рис. 3.8. Назначение номера действующих постоянных

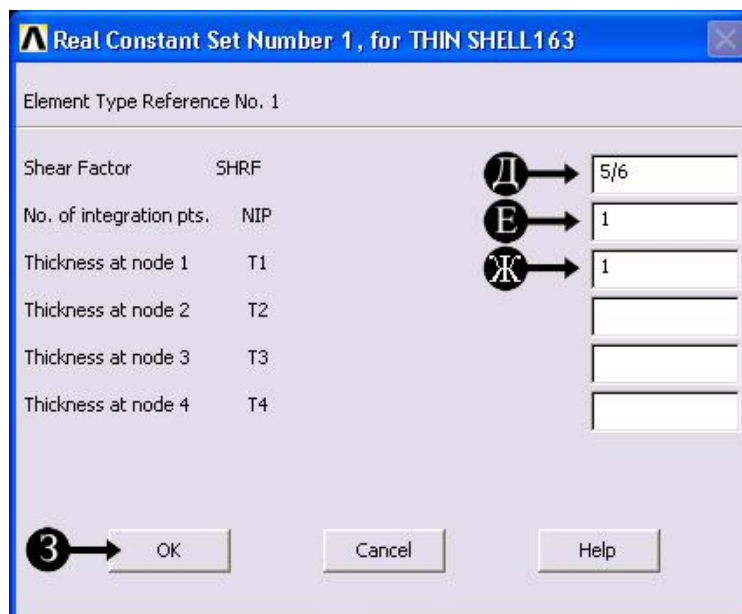


Рис. 3.9. Введение параметров действующих постоянных

### 3.5. Определение параметров моделей материала

Определим параметры моделей материала:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Material Props → Material Models**

---

**Определяем свойства материала цилиндрической заготовки.**

Откроется окно Define Material Model Behavior (рис. 3.10).

1. В правой стороне окна Material Models Available (доступные модели материалов) двойным щелчком выберите:

LS-DYNA → Nonlinear → Inelastic → Kinematic Hardening → Bilinear Kinematic

Откроется окно Bilinear Kinematic Material Properties for Mat... (рис. 3.11).

2. Введите DENS (плотность материала) [A] –  $7.85e-9$ ;

3. Введите EX (модуль Юнга) [B] –  $2e5$ ;

4. Введите NUXY (коэффициент Пуассона) [B] –  $0.3$ ;

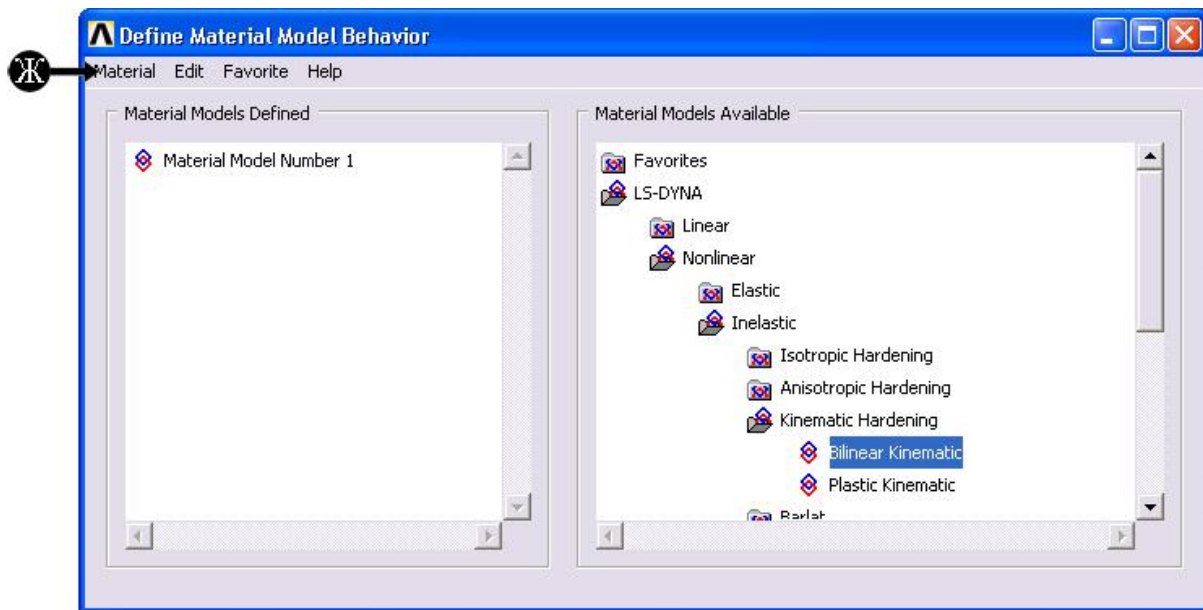


Рис. 3.10. Определение модели материала

5. Введите Yield Stress (предел текучести) [Г] – 250;
6. Введите Tangent Modulus (модуль пластичности) [Д] – 430;
7. Нажмите Ok [Е].

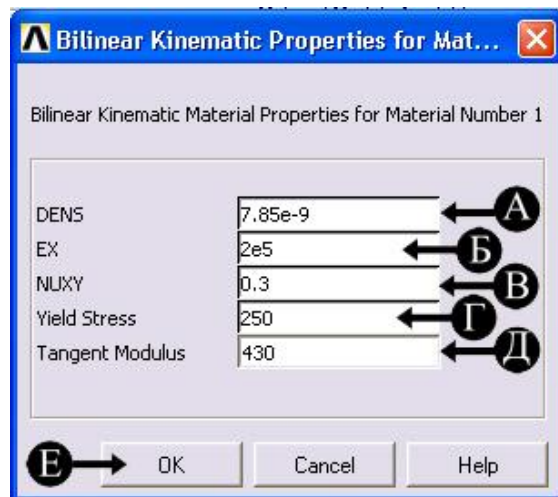


Рис. 3.11. Ввод параметров для билинейного кинематического свойства материала

**Определяем свойства материала нижней плоскости (неподвижной).**

8. В окне Define Material Model Behavior (рис. 3.10) выберите Material [Ж] → New Model..
- Откроется окно Define Material ID.
9. Нажмите “OK”;



10. В правой стороне окна Material Models Available двойным щелчком выберите:

LS-DYNA → Rigid Material

Откроется окно Rigid Properties for Material Number 2 (рис. 3.12).

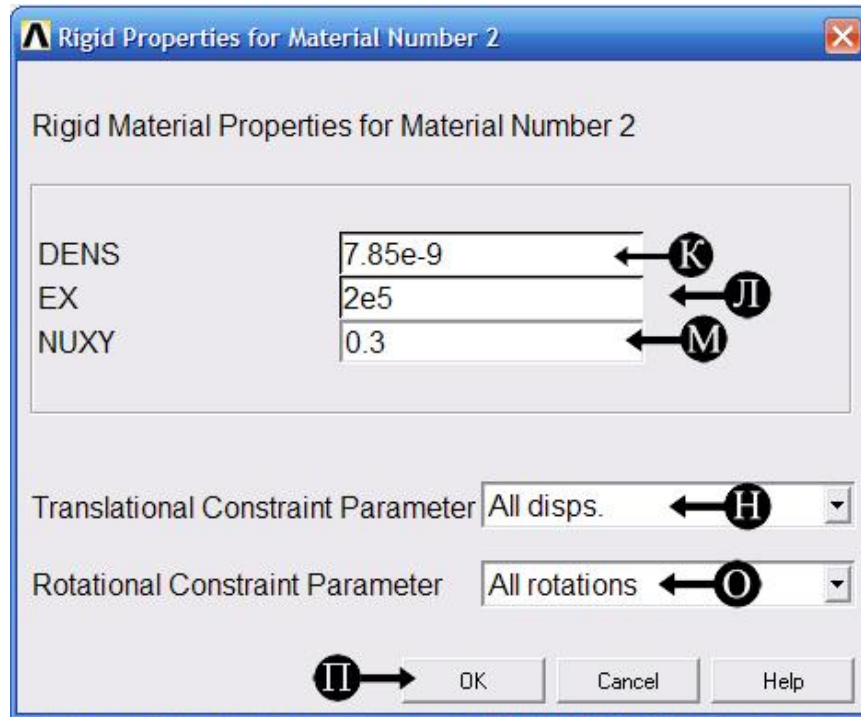


Рис. 3.12. Ввод параметров для недеформируемого (rigid) материала

11. Введите DENS (плотность материала) [К] –  $7.85e-9$ ;

12. Введите EX (модуль Юнга) [Л] –  $2e5$ ;

13. Введите NUXY (коэффициент Пуассона) [М] –  $0.3$ ;

14. В пункте Translation Constraint Parameter выберите All disps. [Н]  
(Запрещаем все перемещения);

15. В пункте Rotational Constraint Parameter выберите All rotations  
[О] (Запрещаем все вращения);

16. Нажмите Ok [П].

**Определяем свойства материала верхней плоскости (подвижной)**

17. В окне Define Material Model Behavior (рис. 3.10) выберите Ma-

terial [Ж] → New Model.

18. Нажмите “OK”

Откроется окно Define Material ID.

19. В правой стороне окна Material Models Available двойным щелчком выберите:

LS-DYNA → Rigid Material

Откроется окно Rigid Properties for Material Number 3.

20. Введите DENS (плотность материала) [К] – 7.85e-9;

21. Введите EX (модуль Юнга) [Л] – 2e5;

22. Введите NUXY (коэффициент Пуассона) [М] – 0.3;

23. В пункте Translation Constraint Parameter выберите X and Y disps. [Н] (Разрешаем перемещения по оси Z) (*Заметьте! Отличие от нижней плоскости*);

24. В пункте Rotational Constraint Parameter выберите All rotations [О] (Запрещаем все вращения);

25. Нажмите Ok [П];

26. Закройте окно Material – Exit.

### ***3.6. Создание модели цилиндрической заготовки***

Создадим цилиндрическую модель заготовки:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → By Dimensions**

---

Откроется окно Create Cylinder by Dimensions (рис. 3.13).

1. Введите RAD1 (внутренний радиус) [А] – 0;

2. Введите RAD2 (наружный радиус) [Б] – 30;

3. Введите Z1 (координата по Z1) [В] – 1;

4. Введите Z2 (координата по Z2) [Г] – 81;

5. Нажмите Ok [Д].

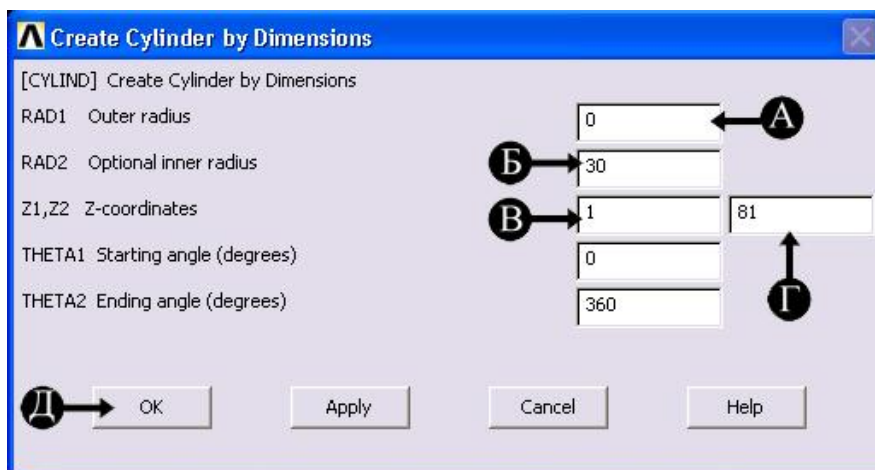


Рис. 3.13. Определение параметров цилиндрической заготовки

На экране должно появиться изображение цилиндра (рис. 3.14) - положение цилиндра на экране можно изменить при помощи панели видов [E]. Задайте положение цилиндра как указано на рис. 3.14.

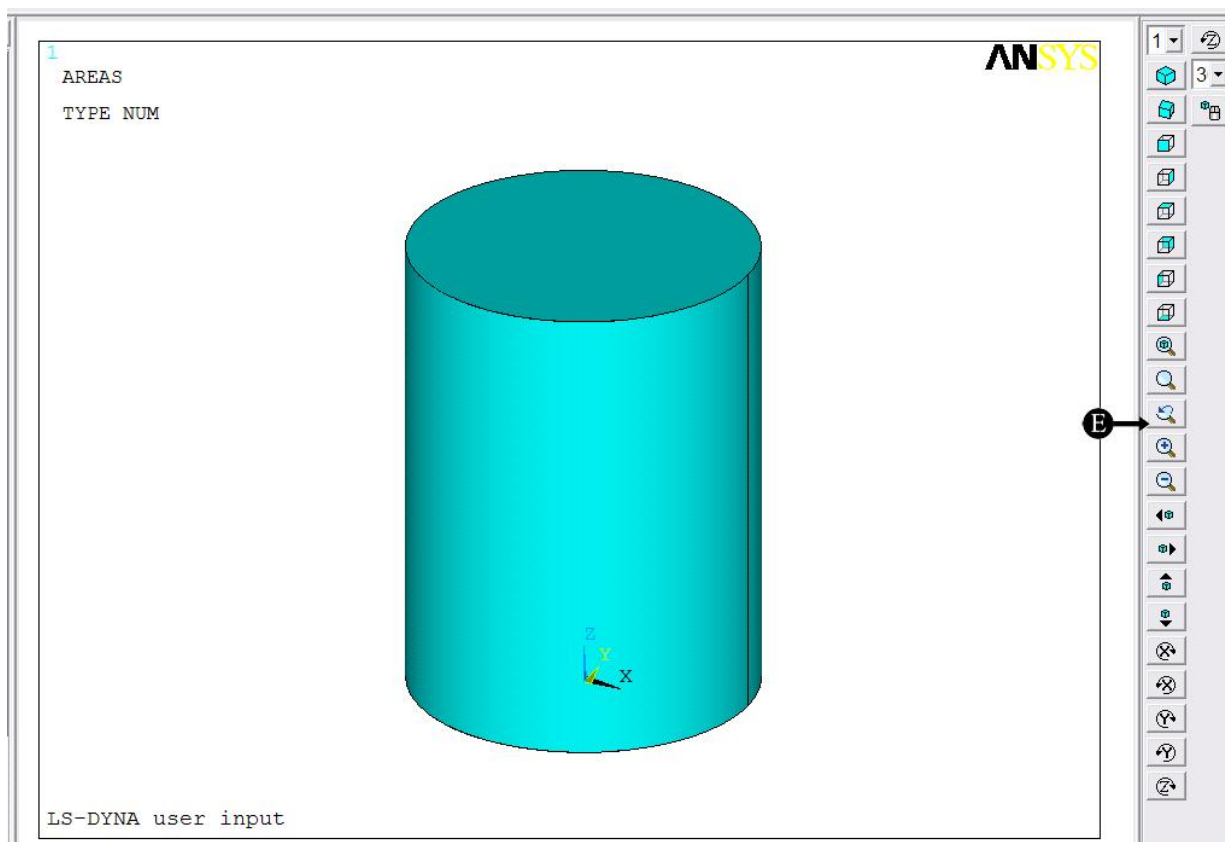


Рис. 3.14. Вид на экране цилиндрической заготовки

### 3.7. Создание нижней плоскости

Создадим плоскость в виде квадрата:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle → By Dimensions**

---

Откроется окно Create Rectangle by Dimensions (рис. 3.15).

1. Введите X1 [А] – -50;

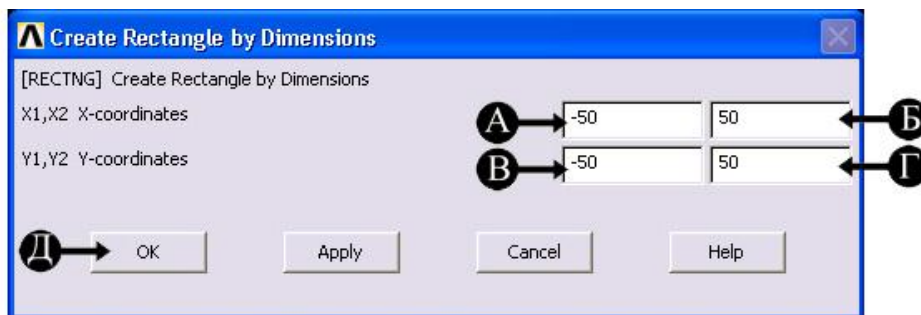


Рис. 3.15. Определение параметров плоскости

2. Введите X2 [Б] – 50;
3. Введите Y1 [В] – -50;
4. Введите Y2 [Г] – 50;
5. Нажмите Ok [Д].

На экране должно появиться изображение плоскости и цилиндра (рис. 3.17). Заметьте наличие зазора между цилиндром и плоскостью – для предотвращения начального контакта элементов модели.

### 3.8. Создание верхней плоскости

Верхнюю плоскость получим копированием нижней плоскости в направлении Z на 85 мм:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Modeling → Copy → Areas**

---

Откроется окно Copy Areas (рис. 3.16).

1. Левой кнопкой мыши укажите на нижнюю плоскость [А] (рис. 3.17);

2. Нажмите Ok [Б] (рис. 3.16);

Откроется следующее окно Copy Areas (рис. 3.18).

3. Введите DZ (величину смещения вдоль оси Z) [В] - 85;

4. Нажмите Ok [Г].

На экране должно появиться полное изображение модели, т.е. двух плоскостей и цилиндра (рис. 3.19).

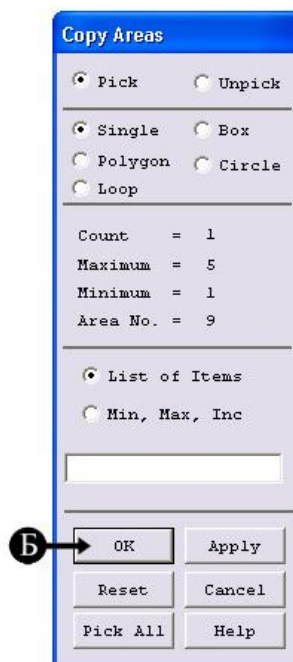


Рис. 3.16. Копирование плоскости

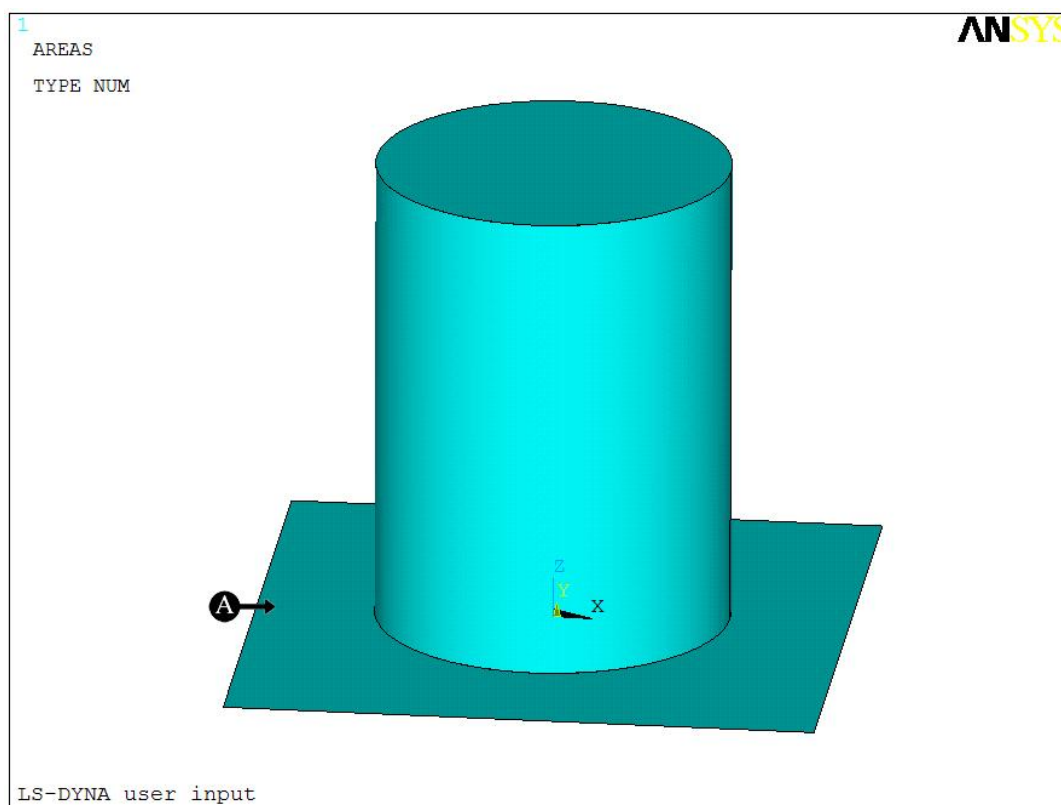


Рис. 3.17. Вид на экране цилиндрической заготовки и нижней плоскости

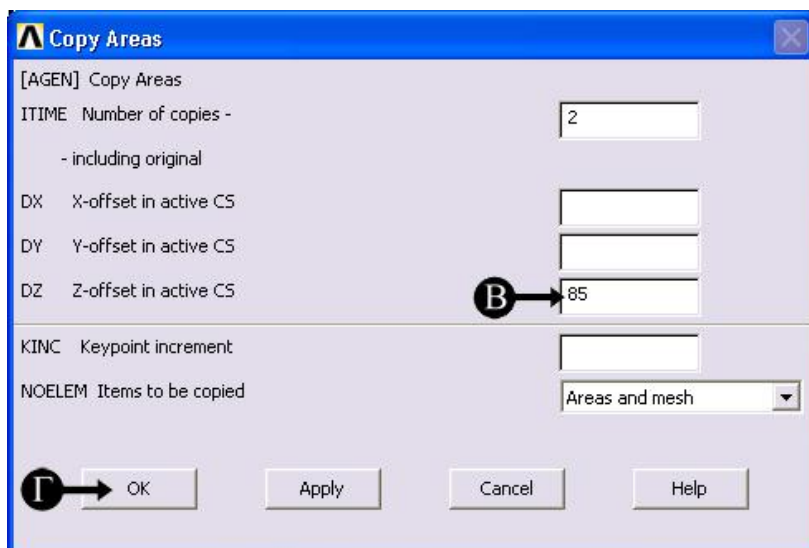


Рис. 3.18. Ввод параметра для копирования плоскости

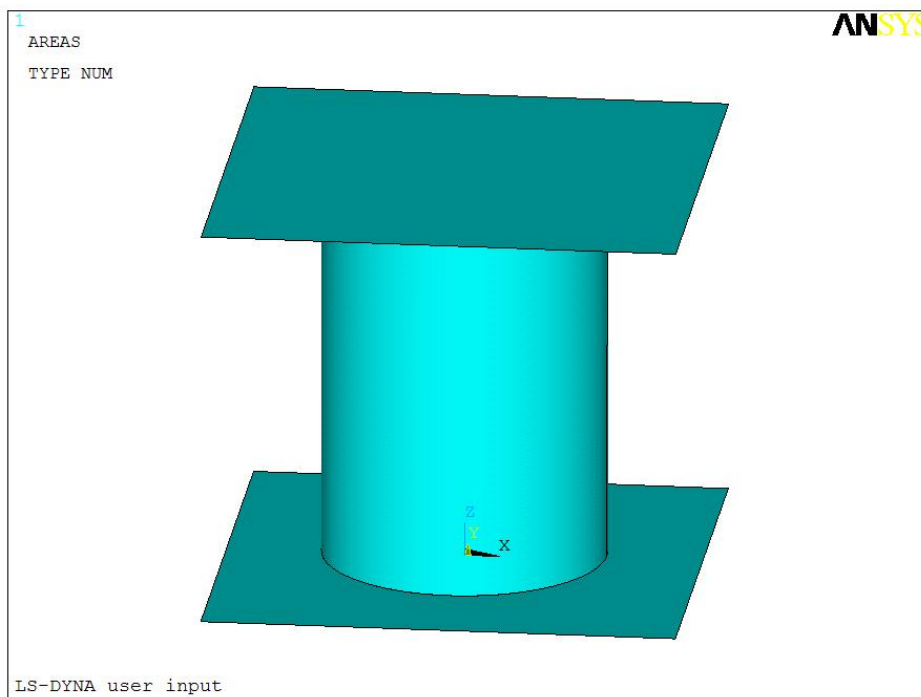


Рис. 3.19. Вид на экране всей модели

### 3.9. Сеточное разбиение модели

Разобьем модель на конечные элементы. Цилиндрическую заготовку представим объемными конечными элементами, плоскости – оболочными конечными элементами:

Откроется окно MeshToll (рис. 3.20).

1. В раскрывающемся меню [А] выберите Volume;
2. Нажмите Set [Б];

Откроется окно Volume Attributes (рис. 3.21).

3. На экране левой кнопкой мыши укажите цилиндрическую заготовку [В] (рис. 3.22);

4. Нажмите Ok [Г] (рис. 3.21);

Откроется окно Volume Attributes (рис. 3.23).

5. Выберите Material number – 1 [Д];
6. Выберите Element type number – 2 SOLID 164 [Е];
7. Нажмите Ok [Ж];
8. В третьей части окна MeshToll – Size control line (рис. 3.20). Нажмите Set [З];

На экране левой кнопкой мыши поочередно укажите все линии принадлежащие объему (цилиндрической заготовке) [И] (рис. 3.24) (всего 10 линий).

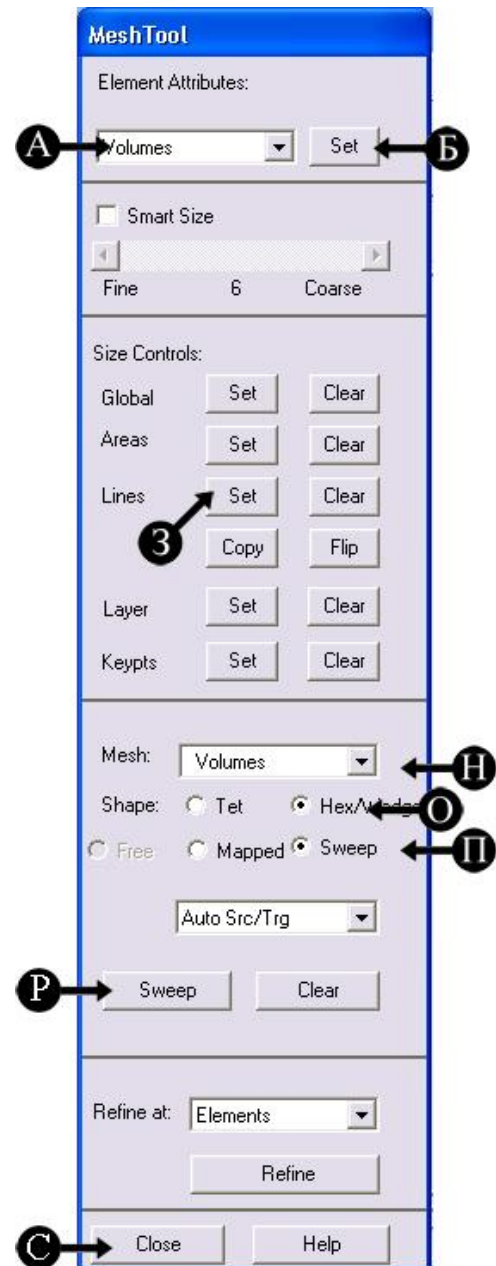


Рис. 3.20. Сеточное меню



Рис. 3.21. Атрибуты объема

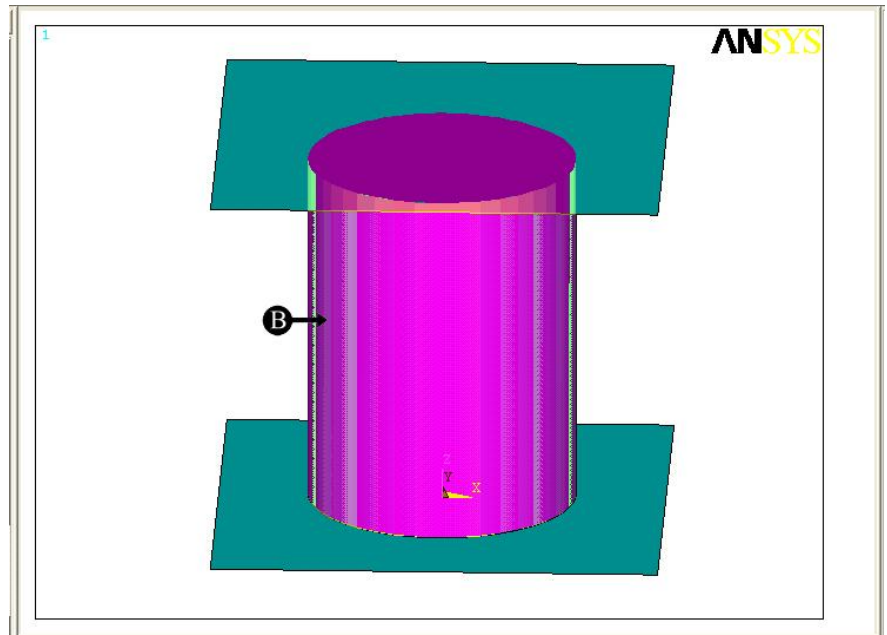


Рис. 3.22. Выбор на экране цилиндрической заготовки

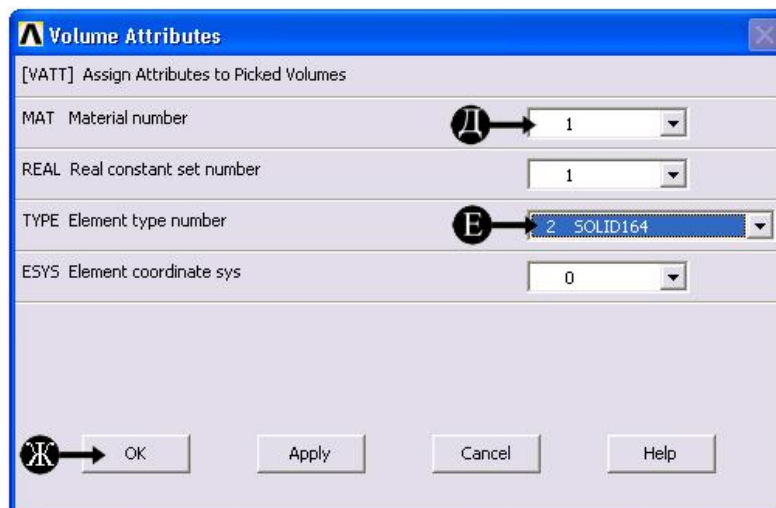


Рис. 3.23. Определение параметров цилиндрической заготовки

9. В окне Element Size on Picked... подтвердите выбранные элементы кнопкой Ok [К] (3.25);
- Откроется окно Element Sizes on Picked Lines (рис. 3.26).
10. Укажите параметр NDIV – 10 [Л];
11. Нажмите кнопку Ok [М];
12. В четвертой части окна MeshToll – Mesh (рис. 3.20) из открывающегося меню выберите Volume [Н];
13. Выберите форму сетки Hex [О];



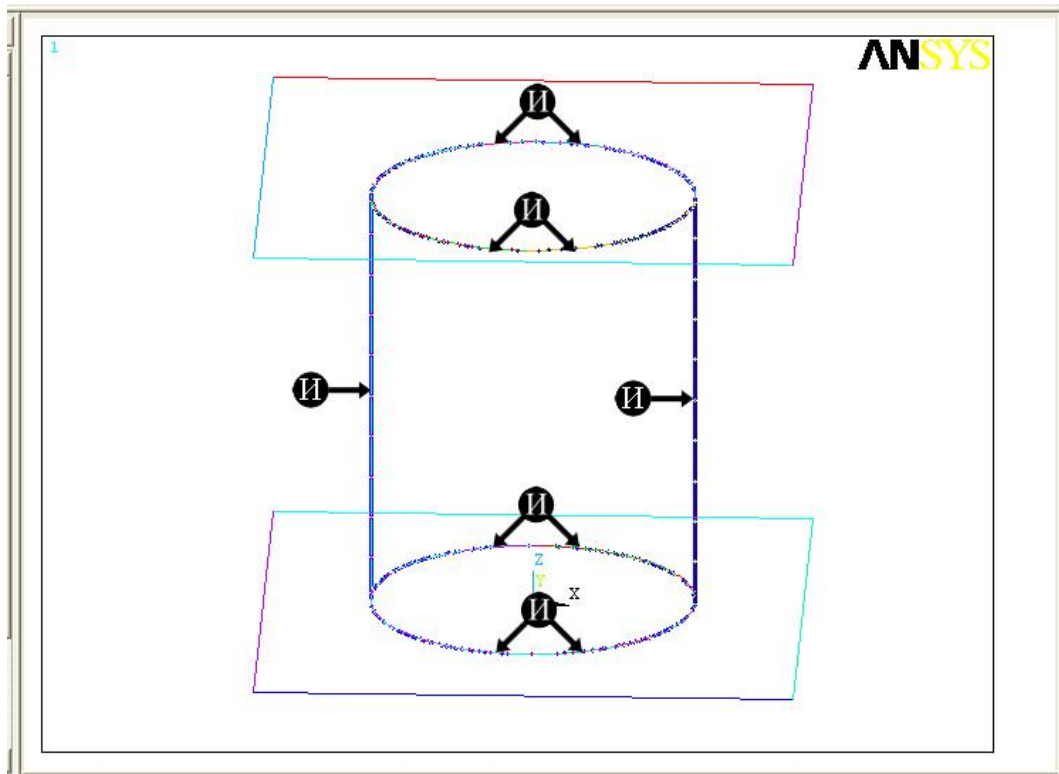


Рис. 3.24. Выбор линий принадлежащих цилиндру

14. Выберите свойства разбиения Sweep [И];
  15. Нажмите кнопку Sweep [Р];
  16. На экране левой кнопкой мыши укажите цилиндрическую заготовку [В] (рис. 3.22);
  17. Нажмите кнопку Ok на окне Volume Sweeping;
  18. Нажмите на кнопку Close [С] на окне MeshToll;
- На экране должно появиться сеточное разбиение цилиндрической заготовки (рис. 3.27).

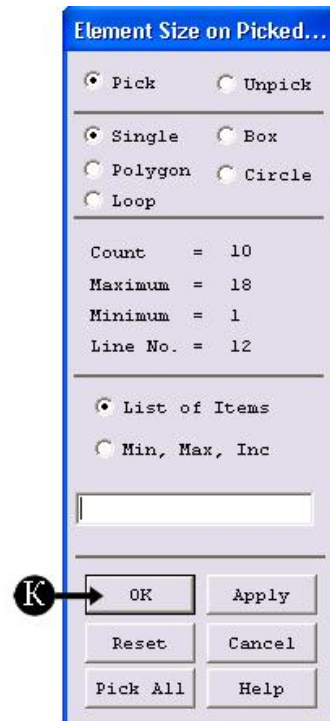


Рис. 3.25. Подтверждение выбора линий

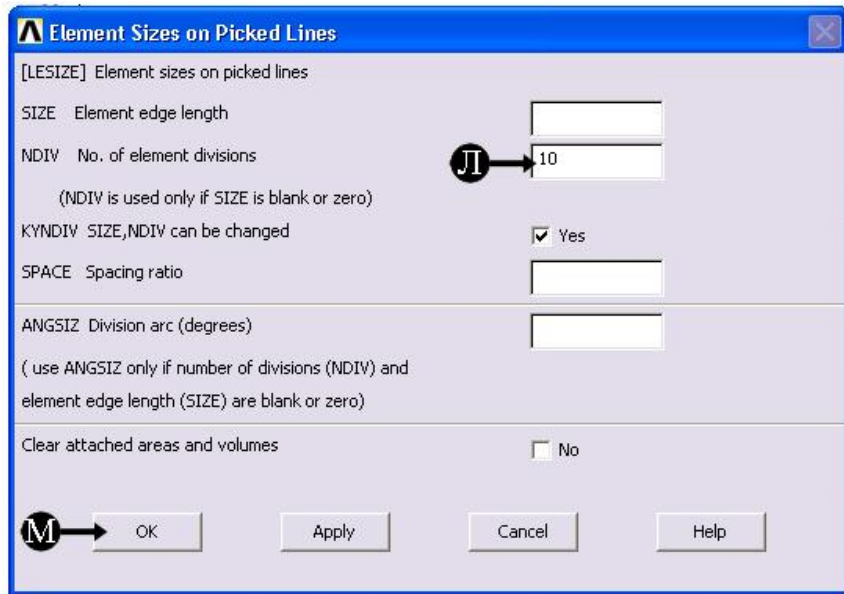


Рис. 3.26. Ввод параметра разделения линий для сеточного разбиения

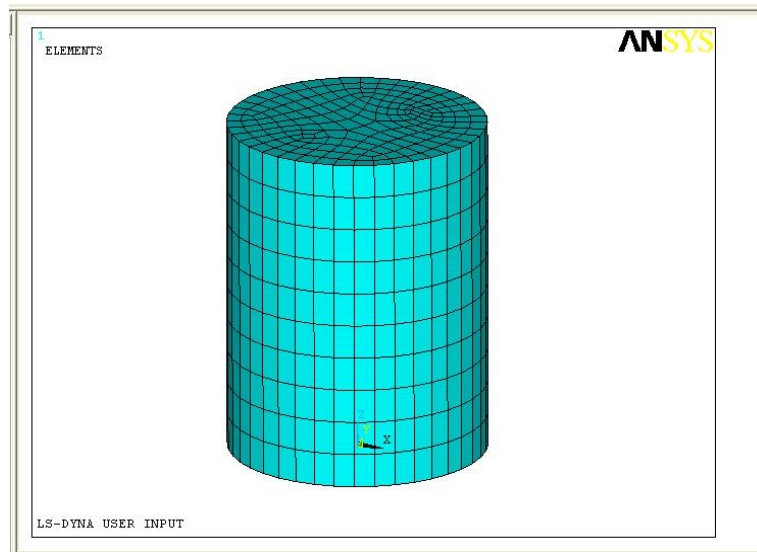


Рис. 3.27. Сеточное разбиение цилиндра

### *3.10. Представление модели в исходном виде*

---

**Ansys utility menu → Plot → Areas**

---

### *3.11. Сохранение модели*

---

**Ansys utility menu → File → Save as Jobname.db**

---

Модель сохранится. Чтобы восстановить данное сохранение (на любом последующем шаге) можно использовать следующую команду:

---

**Ansys utility menu → File → Resume Jobname.db**

---

### 3.12. Создание сеточного разбиения плоскостей

Создадим конечно-элементную модель на обеих плоскостях:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → Meshing → MeshToll**

---

Откроется окно MeshToll (рис. 3.28).

1. В раскрывающемся меню [А] выберите Areas;
2. Нажмите Set [Б];

Откроется окно Area Attributes (рис. 3.29).

3. На экране левой кнопкой мыши укажите нижнюю плоскость [В] (рис. 3.30) (нижняя плоскость у начала координат);
4. Нажмите Ok [Г] (рис. 3.29);

Откроется окно Area Attributes (рис. 3.31).

5. Выберите Material number – 2 [Д];
6. Выберите Real constant – 1 [Е];
7. Выберите Element type number – 1 SHELL 163 [Ж];
8. Нажмите Apply [З];
9. Снова откроется окно Area Attributes (рис. 3.29);
10. На экране левой кнопкой мыши укажите верхнюю плоскость [И] (рис. 3.30);
11. Нажмите Ok [Г] (рис. 3.29);

Откроется окно Area Attributes (рис. 3.31).

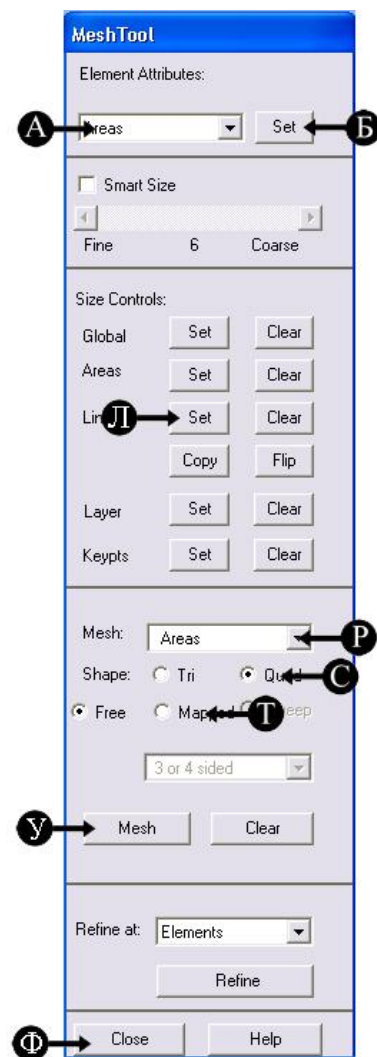


Рис. 3.28. Сеточное меню

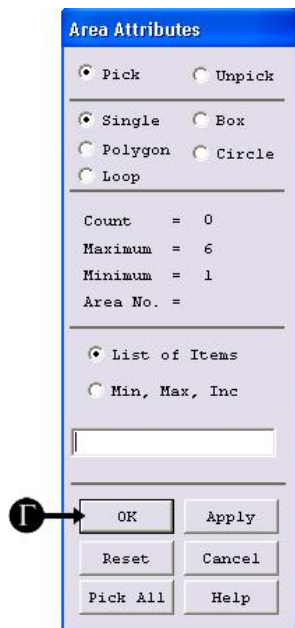


Рис. 3.29. Подтверждение выбора плоскостей

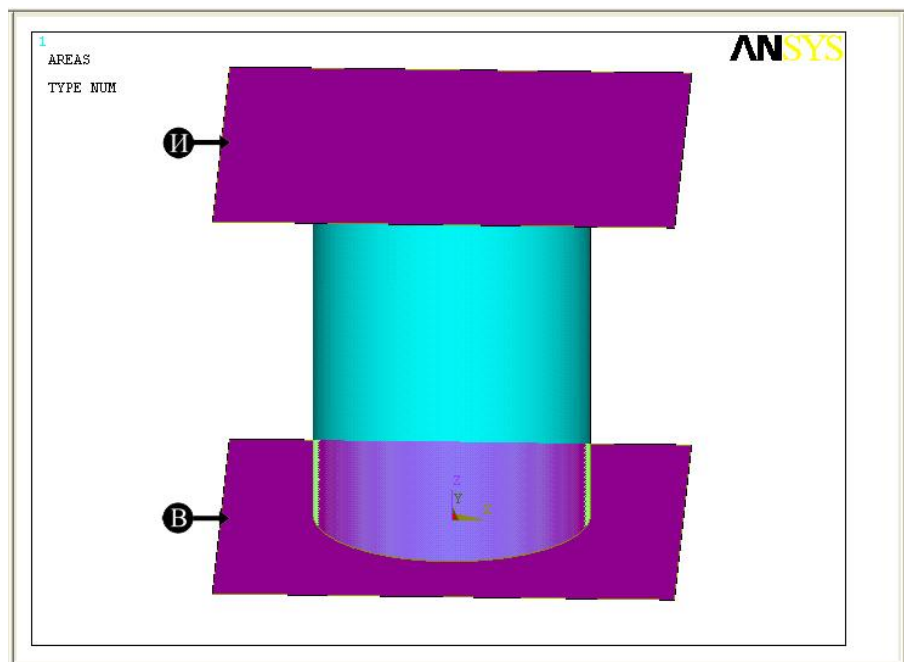


Рис. 3.30. Выбор плоскостей на экране

12. Выберите Material number – 3 [Д] (**Заметьте** отличие!);
13. Выберите Real constant – 1 (Е);
14. Выберите Element type number – 1 SHELL 163 [Ж];
15. Нажмите Ok [К];
16. В третьей части окна MeshToll – Size control line (рис. 3.28) нажмите Set [Л];
17. На экране левой кнопкой мыши поочередно укажите все линии, принадлежащие двум плоскостям [М] (рис. 3.32) (всего 8 линий);
18. В окне Element Size on Picked... подтвердите выбранные элементы кнопкой Ok [Н] (3.33);

Откроется окно Element Sizes on Picked Lines (рис. 3.34).

19. Укажите параметр NDIV – 5 [О];
20. Нажмите кнопку Ok [П];
21. В четвертой части окна MeshToll – Mesh (рис. 3.28) из открывающегося меню выберите Areas [Р];
22. Выберите форму сетки Quad [С];
23. Выберите свойства разбиения Mapped [Т];

24. Нажмите кнопку Mesh [У];

25. На экране левой кнопкой мыши укажите обе плоскости [В, И] (рис. 3.30);

26. Нажмите кнопку Ok на окне Mesh Areas [Г] (рис. 3.29);

27. Нажмите на кнопку Close [Ф] на окне MeshToll (рис. 3.28).

На экране должно появиться сеточное разбиение 2-х плоскостей и заготовки (рис. 3.35).

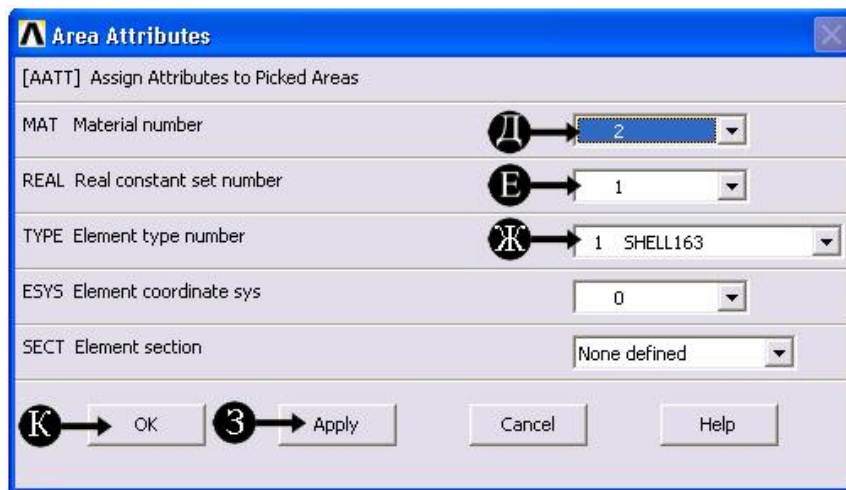


Рис. 3.31. Ввод атрибутов плоскостей модели

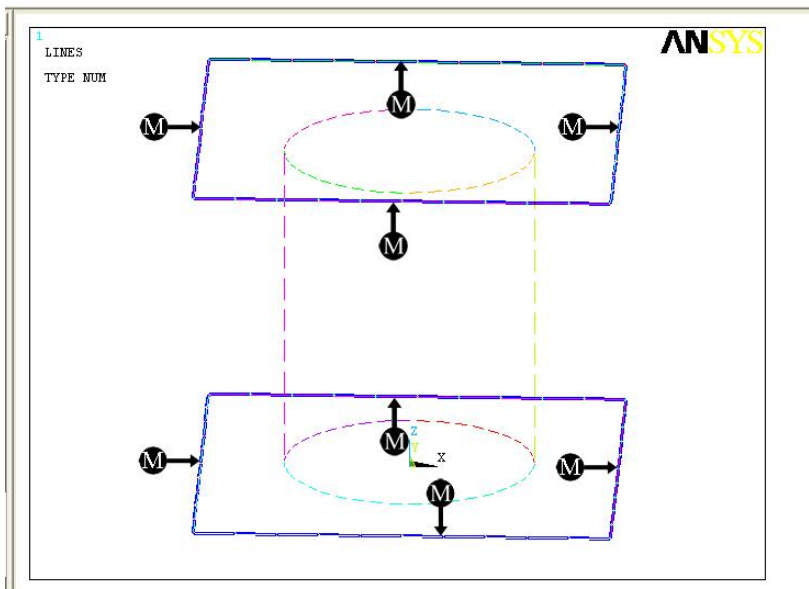


Рис. 3.32. Выбор линий принадлежащие плоскостям

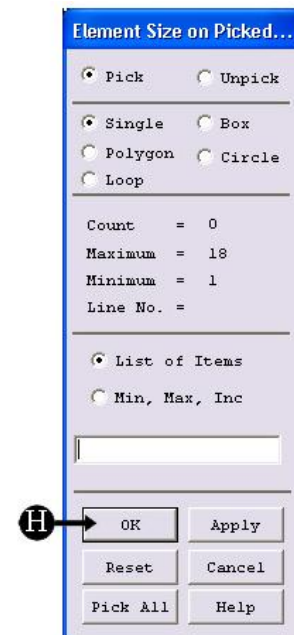


Рис. 3.33. Подтверждения выбора линий

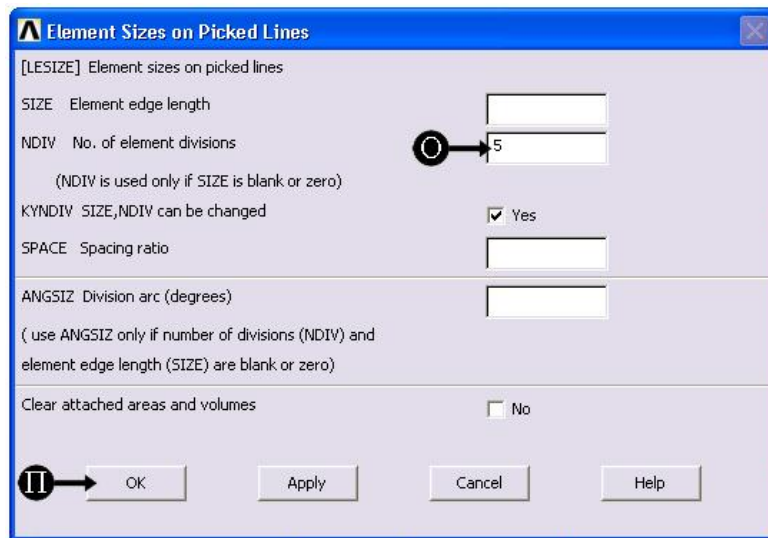


Рис. 3.34. Ввод параметра разделения линий для сеточного разбиения

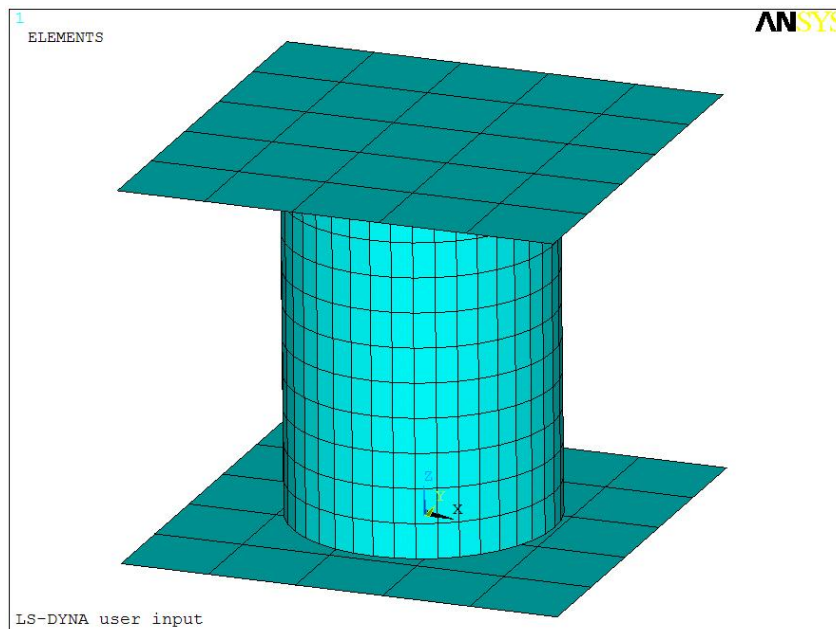


Рис. 3.35. Полная сеточная модель

### 3.13. Определение частей модели

Определим объекты модели в виде частей (part):

---

**Ansys main menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Parts Options**

---

Откроется окно Parts Data Written for LS-DYNA (рис. 3.36).

1. Укажите Create all parts (A);
2. Нажмите Ok [Б];

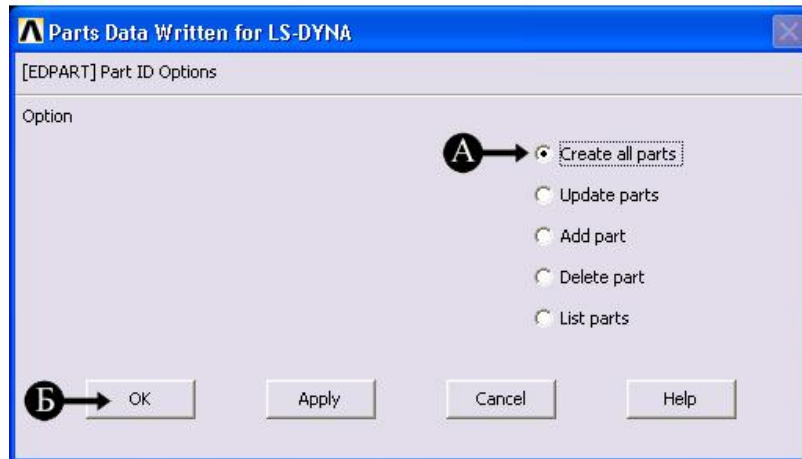


Рис. 3.36. Создание частей модели

Откроется окно, указывающее просмотр созданных частей. А также их атрибуты (рис. 3.37).

Проверьте ваши результаты с результатами в данном окне.

3. Закройте окно.

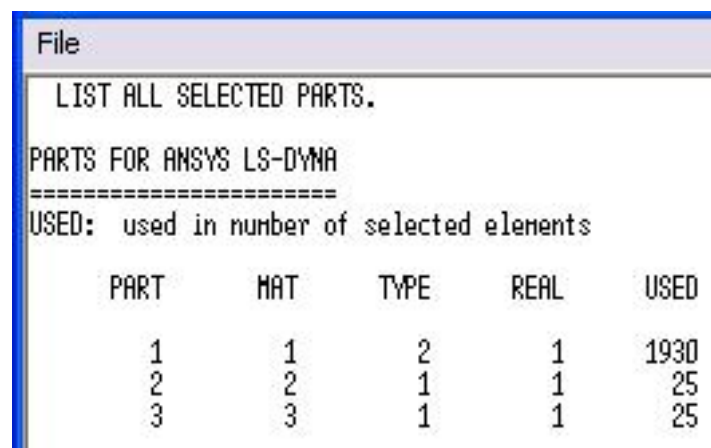


Рис. 3.37. Выходное окно с параметрами модели

### ***3.14. Определение контакта между частями модели***

Зададим контактные определения в модели:

---

**Ansys main menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Contact → Define Contact**

---

Откроется окно Contact Parameter Definitions (рис. 3.38).

1. Выберите тип контакта Contact Type – Surface to Surf [А], Automatic [Б];
2. Введите Static Friction Coefficient – 0.2 [В];
3. Введите Viscous Damping Coefficient – 20 [Г];
4. Нажмите Apply [Д];

Откроется окно Contact Options (рис. 3.39).

5. Введите Contact Part no. [Е] – 1;
6. Введите Target Part no. [Ж] – 2;
7. Нажмите Apply [З] ;
8. В окне (рис. 3.38) нажмите Ok [И];
9. Введите Contact Part no. [Е] – 1;
10. Введите Target Part no. [Ж] – 3;
11. Нажмите Ok [К].

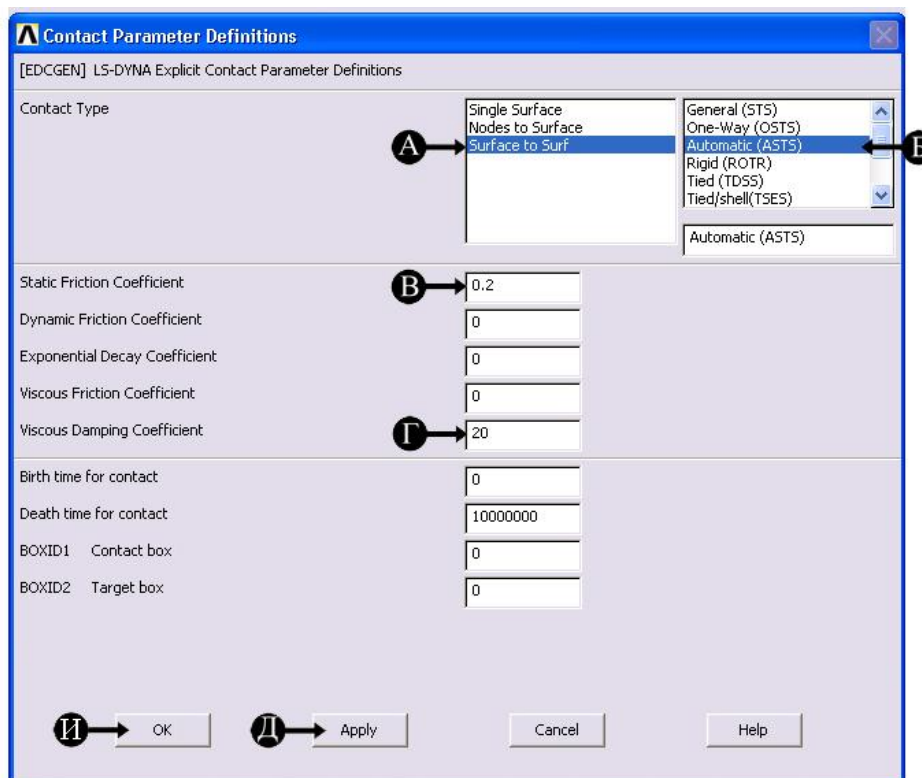


Рис. 3.38. Определение контактных параметров



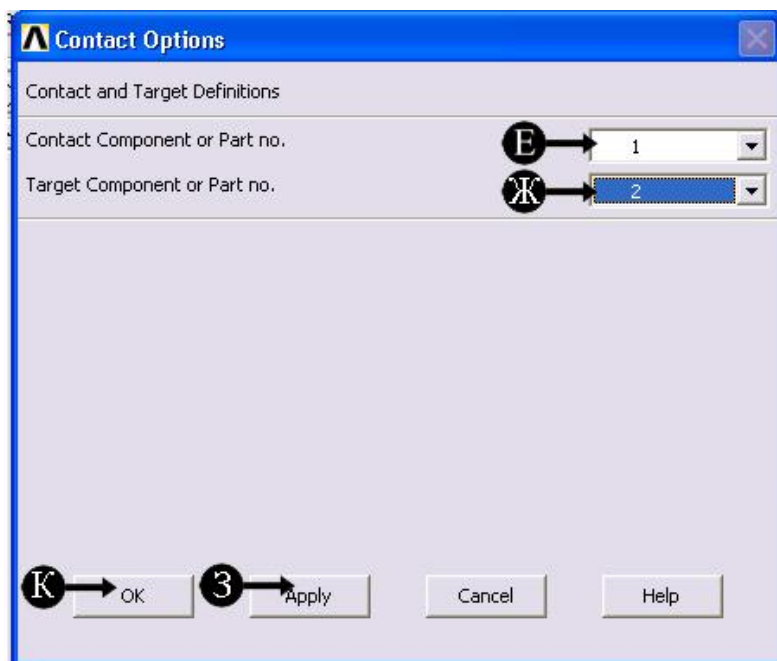


Рис. 3.39. Определение контактных частей

### 3.15. Определение параметров массива

Определим параметры массива для задания данных нагрузка-время:

---

**Ansys Utility menu → Parameters → Array Parameters → Define/Edit**

---

Откроется окно Array Parameters (рис. 3.40).

1. Нажмите кнопку Add [А];

Откроется окно Add New Array Parameter (рис. 3.41).

2. Введите Parameter name – Perem [Б];

3. Введите No of rows – 3 [В];

4. Нажмите Apply [Г];

5. Введите Parameter name – Time [Б];

6. Нажмите Ok [Д];

Откроется окно Array Parameters (рис. 3.42).

7. Отметьте в таблице Parameter первую строчку с названием Perem [Е];

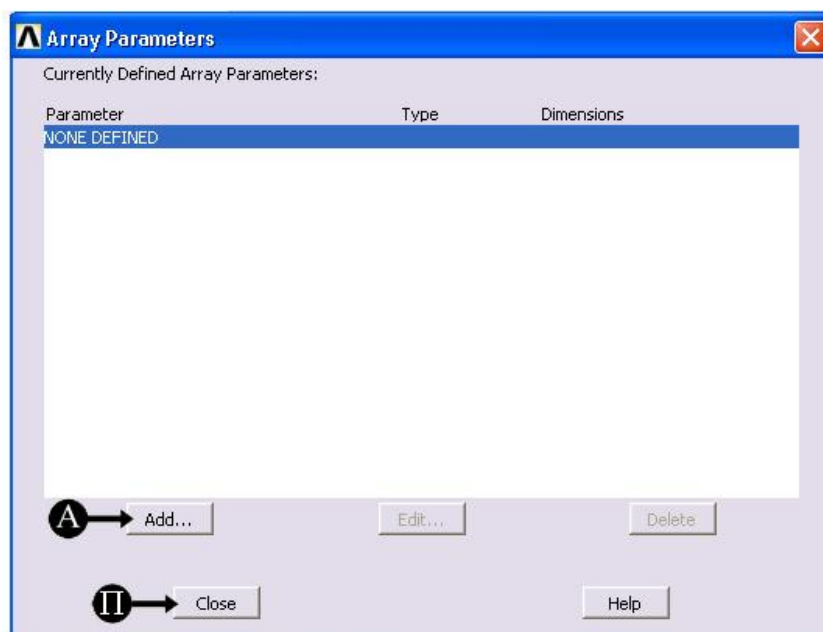


Рис. 3.40. Создание массива данных

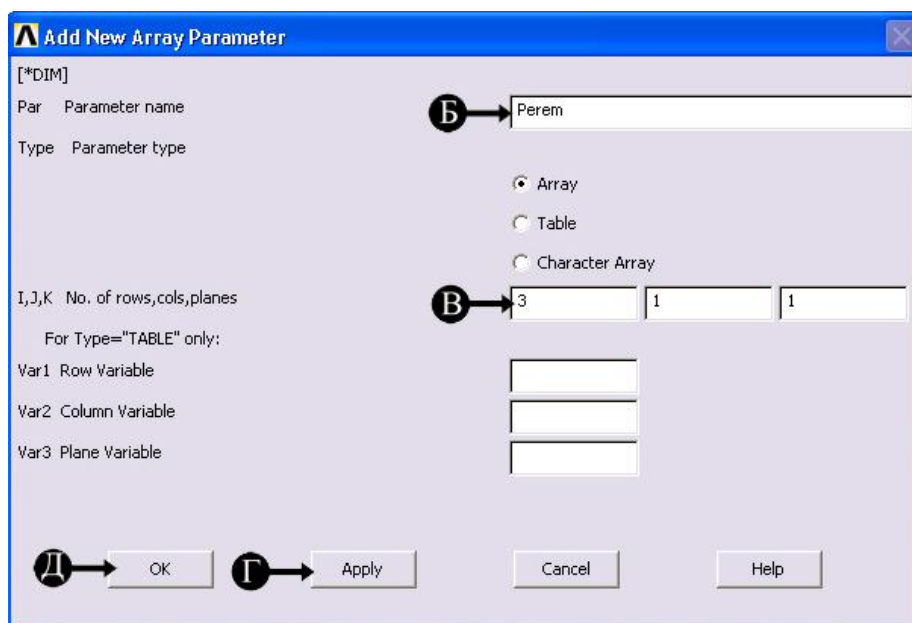


Рис. 3.41. Создание имени и размерности массива

8. Нажмите кнопку Edit [Ж];

Появится окно Array Parameter PEREM (рис. 3.43).

9. Введите параметры массива 2 – “- 1000” (3); 3 – “- 1000” [И];

10. Вверху окна Array Parameter PEREM выберите File → Ar-  
ple/quit;

11. В окне Array Parameters (рис. 3.42) выберите строчку Time [К];

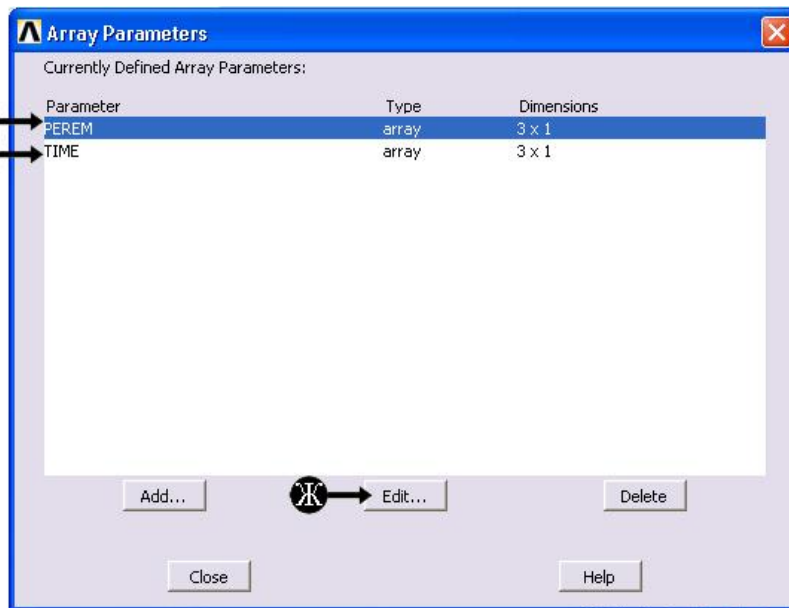


Рис. 3.42. Выбор соответствующего массива для ввода данных

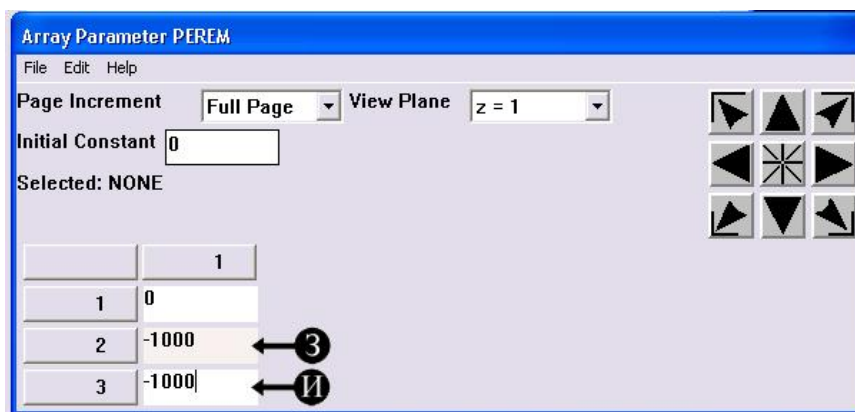


Рис. 3.43. Ввод данных для первого массива

12. Нажмите кнопку Edit [Ж].
13. В окне Array Parameter TIME введите параметры массива 2 – “0.001” [Л]; 3 – “0.05” [М] (рис. 3.44);
14. Вверху окна Array Parameter PEREM выберите File → Ap-ple/quit;
15. Закройте окно Array Parameters - нажмите на кнопку Close [П].

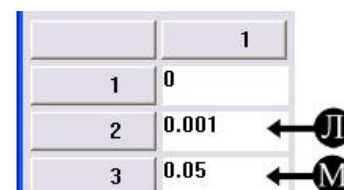


Рис. 3.44. Ввод данных для второго массива

### 3.16. Создание нагрузки

Определим нагрузку, действующую на верхнюю плоскость в виде скорости по оси Z:

---

**Ansys main menu → Solution → Loading Options → Specify Loads**

---

Откроется окно Specify Load for LS-DYNA Explicit (рис. 3.45).

1. Выберите Load option – Add Loads [A];
2. Выберите Load Labels – RBVZ [Б];
3. Выберите PART number – 3 [B];
4. Выберите Parameter name for time values – Time [Г];
5. Выберите Parameter name for data values – Perem[Д];
6. Нажмите Ok [E].

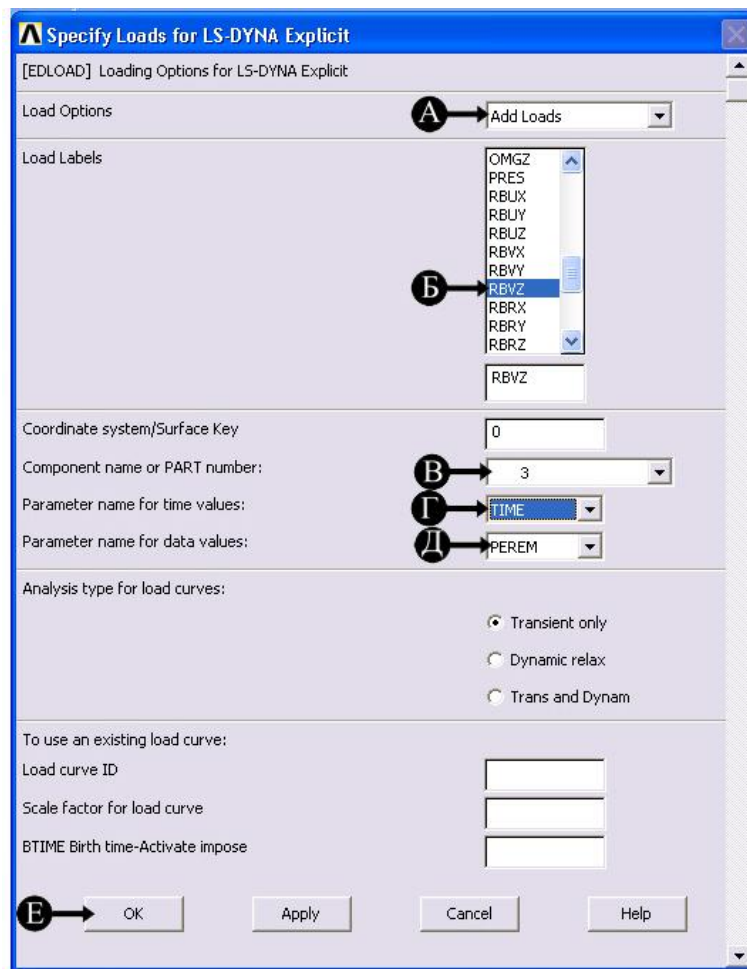


Рис. 3.45. Определение нагрузок

### 3.17. Определения параметра контроля Hourglass

Определим параметр контроля искажения Hourglass:

---

**Ansys main menu → Solution → Analysis Options → Hourglass  
Ctrls → Local**

---

Откроется окно Define Hourglass Material Properties (рис. 3.46).

1. Установите параметр Hourglass control type в значение 4 [А];
2. Нажмите Ok [Б].

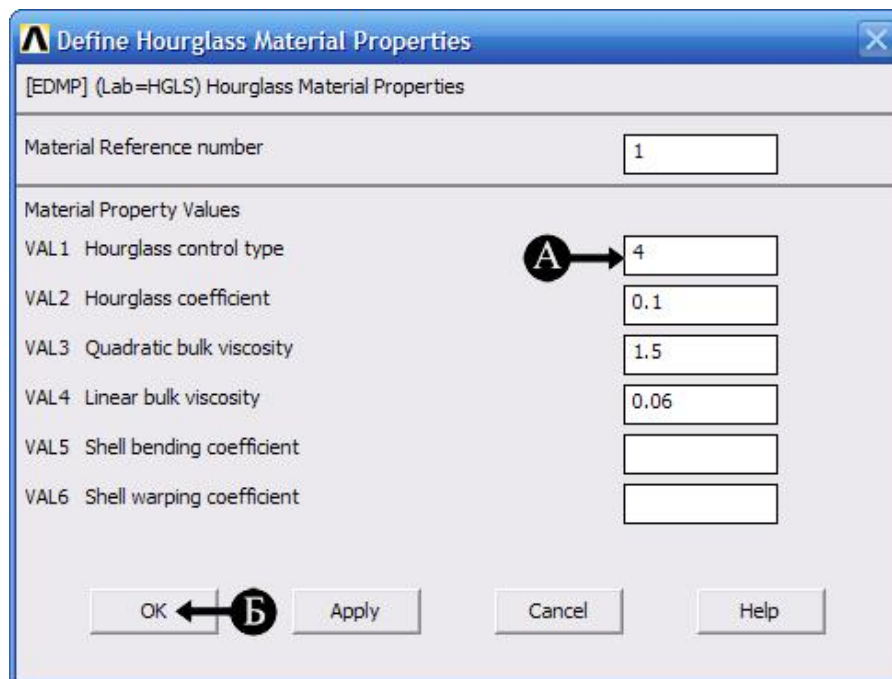


Рис. 3.46. Определение параметра Hourglass

### 3.18. Введение времени окончания анализа

Определим время окончания расчета:

---

**Ansys main menu → Solution → Time Controls → Solution Time**

---

Откроется окно Solution Time for LS-DYNA Explicit (рис. 3.47).

1. Выберите [TIME] – 0.03 [А];
2. Нажмите Ok [Б].

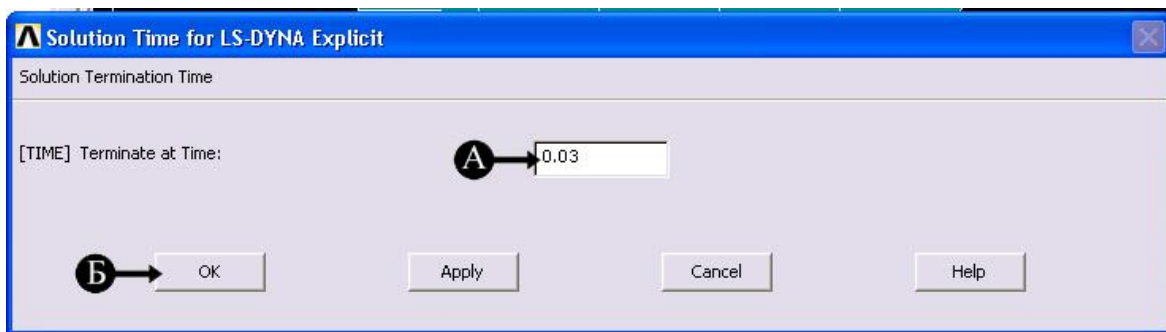


Рис. 3.47. Определение времени завершения процесса

### 3.19. Введение частоты вывода данных

Определим частоту вывода данных:

---

**Ansys main menu → Solution → Output Controls → File Output Freq → Number of Steps**

---

Откроется окно Specify File Output Frequency (рис. 3.48).

1. Выберите [EDRST] – 100 [A];
2. Выберите [EDHTIME] – 1000 [Б];
3. Нажмите Ok [B].

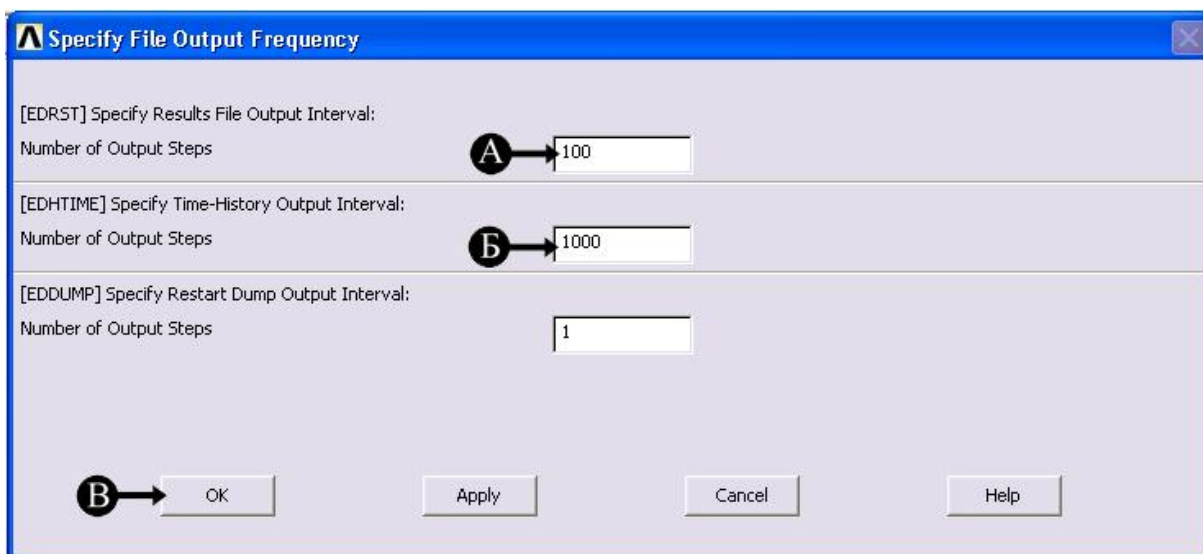


Рис. 3.48. Определение частоты выхода данных

### 3.20. Создание выходных файлов с сохранением данных по усилиям и энергии

Определим дополнительные выходные файлы баз ASCII:

---

**Ansys main menu → Solution → Output Controls → ASCII Output**

---

Откроется окно ASCII OUTPUT (рис. 3.49).

1. Выберите Material energy [A];
2. Выберите Resultant forces [B];
3. Нажмите Ok [B].

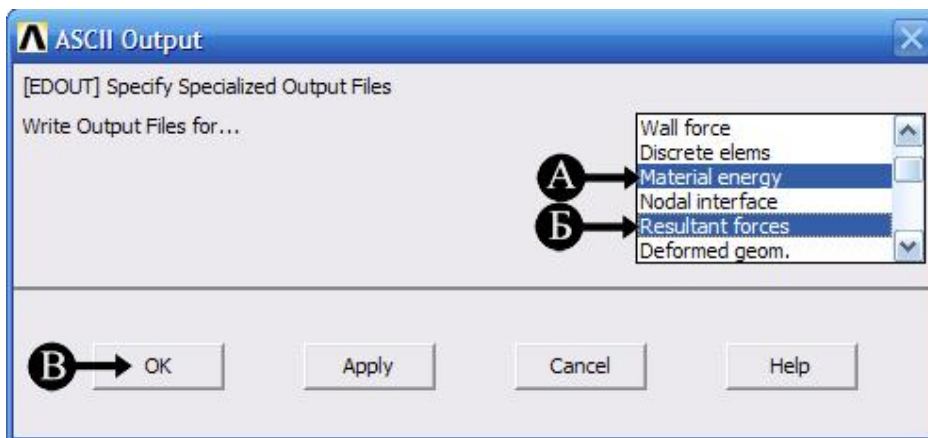


Рис. 3.49. Окно выбора выходных файлов базы ASCII

### 3.21. Создание K-файла

Определим выходной k-файл для решателя LS-DYNA:

---

**Ansys main menu → Solution → Write Jobname.k**

---

Откроется окно Input files to be Written for LS-DYNA (рис. 3.50).

1. Выберите Write results files for... – ANSYS and LS-DYNA [A];
2. Нажмите Ok [B].

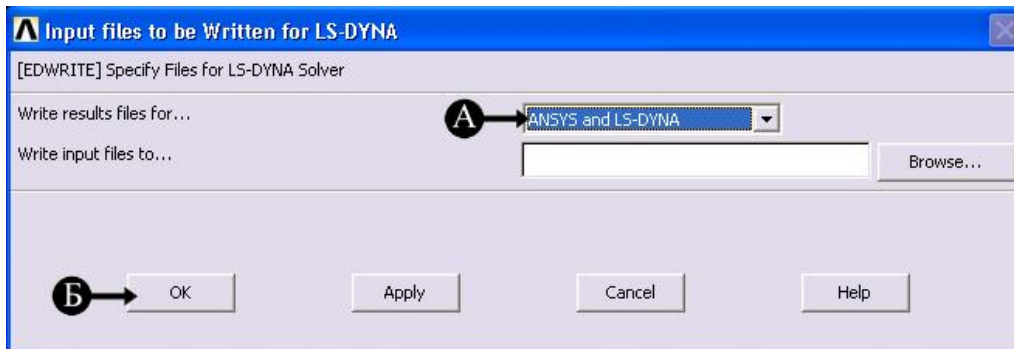


Рис. 3.50. Создания К-файла

Появится окошко (рис. 3.51) с информацией по к-файлу.

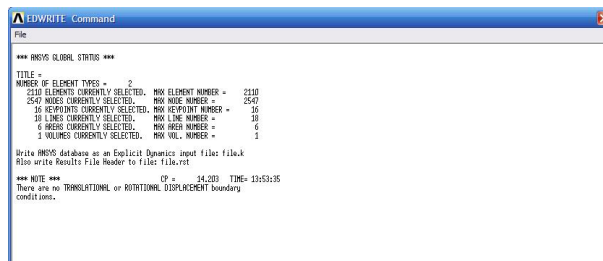


Рис. 3.51. Сохранение параметров в формате программы LS-Dyna

Закройте это окошко. Сохраните расчетную модель (см. п.3.11).

### 3.22. Запуск на решение

Запустим процесс решения:

---

**Ansyes main menu → Solution → Solve**

---

Появится окошко Solve Current Load Step (рис. 3.52).

Нажмите Ok [A].

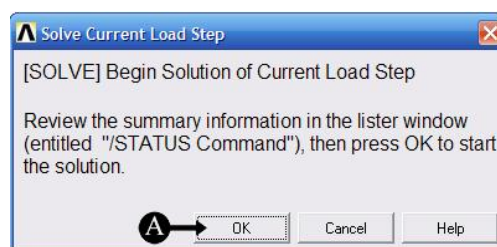


Рис. 3.52. Подтверждение запуска процесса на решение



\* - при появлении предупреждения об ошибке продолжите выполнение процесса (нажмите Yes)

Процесс перейдет к решателю программы LS-Dyna, и появиться окошко процесса решения (рис. 3.53).

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
initial kinetic energy = 0.00000000E+00
The LS-DYNA time step size should not exceed 9.804E-07
to avoid contact instabilities. If the step size is
bigger then scale the penalty of the offending surface.
Memory required to begin solution      : 442432
Additional dynamically allocated memory: 119906
Total:                                 562338

initialization completed

dt of cycle      1 is controlled by solid      element      1690
time ..... 0.00000E+00
time step..... 9.10930E-08
kinetic energy..... 0.00000E+00
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy ..... 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
eroded hourglass energy..... 0.00000E+00
total energy..... 1.00000E-20
total energy / initial energy.. 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy.. 1.00000E+00
global x velocity..... 0.00000E+00
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00
1 t 0.0000E+00 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
1 t 0.0000E+00 dt 9.11E-08 write ANSYS result file
cpu time per zone cycle..... 0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 43084 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 24256 nanoseconds
estimated total cpu time = 49910 sec < 13 hrs 51 mins>
estimated cpu time to complete = 49898 sec < 13 hrs 51 mins>
estimated total clock time = 28103 sec < 7 hrs 48 mins>
estimated clock time to complete = 28092 sec < 7 hrs 48 mins>
5000 t 4.5537E-04 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
5489 t 4.9992E-04 dt 9.11E-08 write ANSYS result file
10000 t 9.1084E-04 dt 9.11E-08 flush i/o buffers
10978 t 9.9993E-04 dt 9.11E-08 write ANSYS result file
```

Рис. 3.53. Окошко выполнения процесса решения в решателе программы LS-Dyna

По завершению процесса расчета на экран будет выведено сообщение (рис. 3.54).

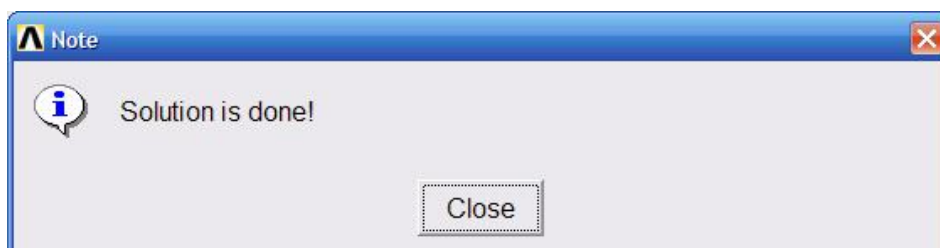


Рис. 3.54. Окно завершения выполнения процесса расчета

## Выполнение постпроцессорной обработки полученных результатов

### 3.23. Загрузка данных в POST1 для чтения определенного шага решения

Для начала прочитаем результаты для определенного шага (например, для шага 82 - соответствует осадке заготовки на 20 мм):

**Ansys main menu → General Postproc → Read Results → By Pick**

Откроется окно Results File (рис. 3.55).

1. Выберите шаг 82 [А];
2. Нажмите Read [Б];
3. Нажмите “Close” (В).

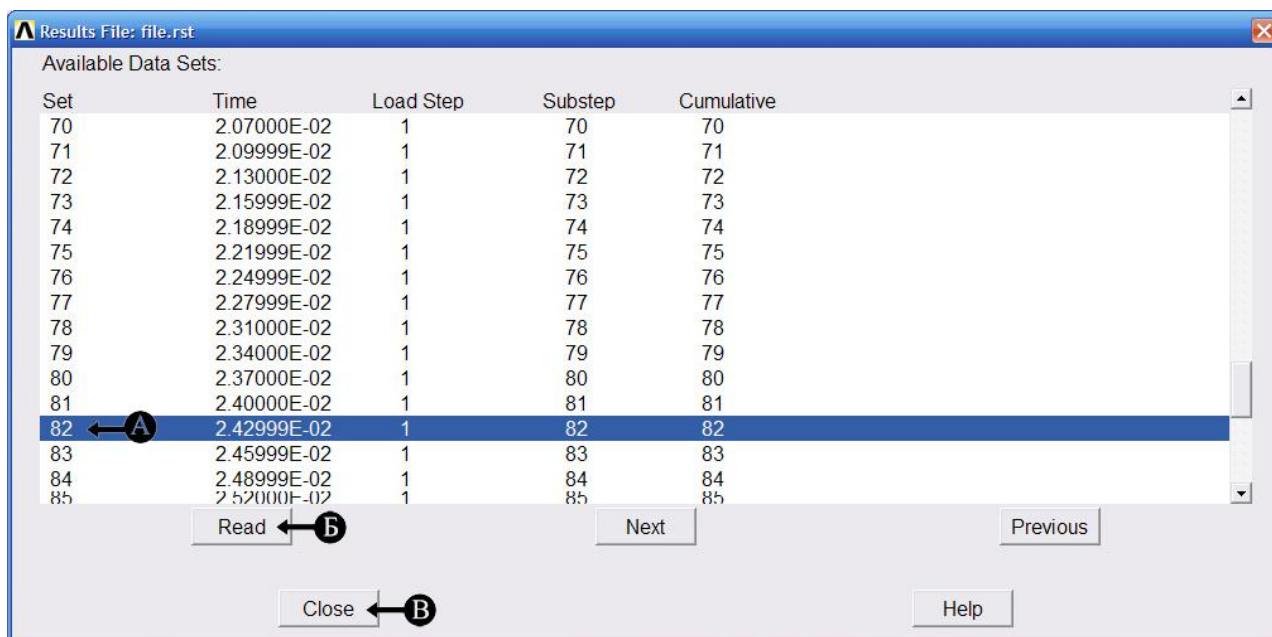


Рис. 3.55. Выбор определенного этапа деформирования заготовки

### 3.24. Просмотр контуров деформированной заготовки

Просмотрим контуры деформируемой заготовки по параметру von Misses stress:

---

**Ansys main menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu**

---

Откроется окно Contour Nodal Solution Data (рис. 3.56).

1. Выберите Nodal Solution → Stress → von Misses stress [A];
2. Нажмите Ok [Б].

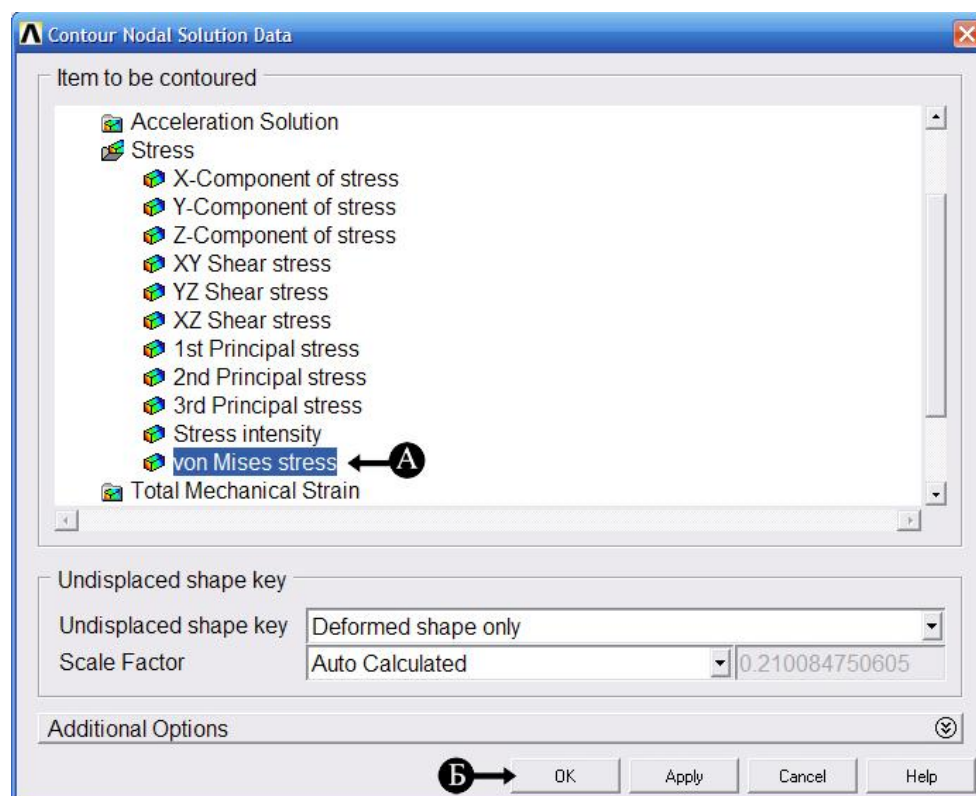


Рис. 3.56. Выбор вывода контуров узловых данных по параметру von Misses stress

### 3.25. Изменение вида масштаба отображения модели на экране

Изменим представление деформированной заготовки на экране на истинный вид:

---

**Ansys Utility menu → PlotCtrls → Style → Displacement Scaling**

---

Откроется окно Displacement Display Scaling (рис. 3.57):

1. Выберите 1.0 (true scale) [A];
2. Нажмите Ok [Б].

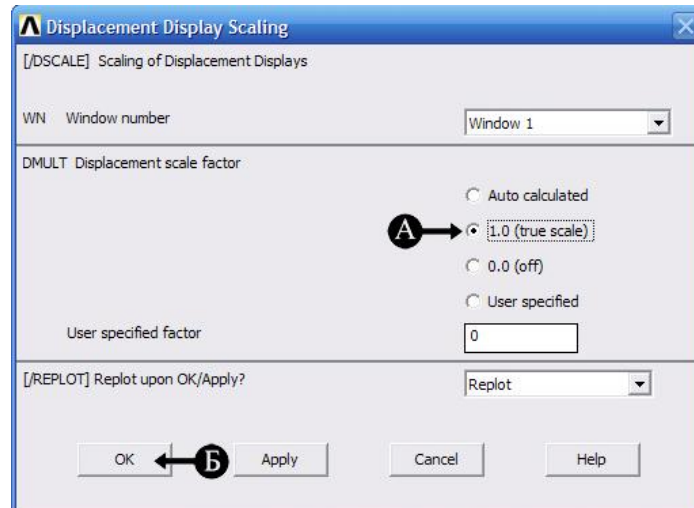


Рис. 3.57. Изменение отображение масштаба модели на экране

В результате на экране должна получиться следующая картина (рис. 3.58).

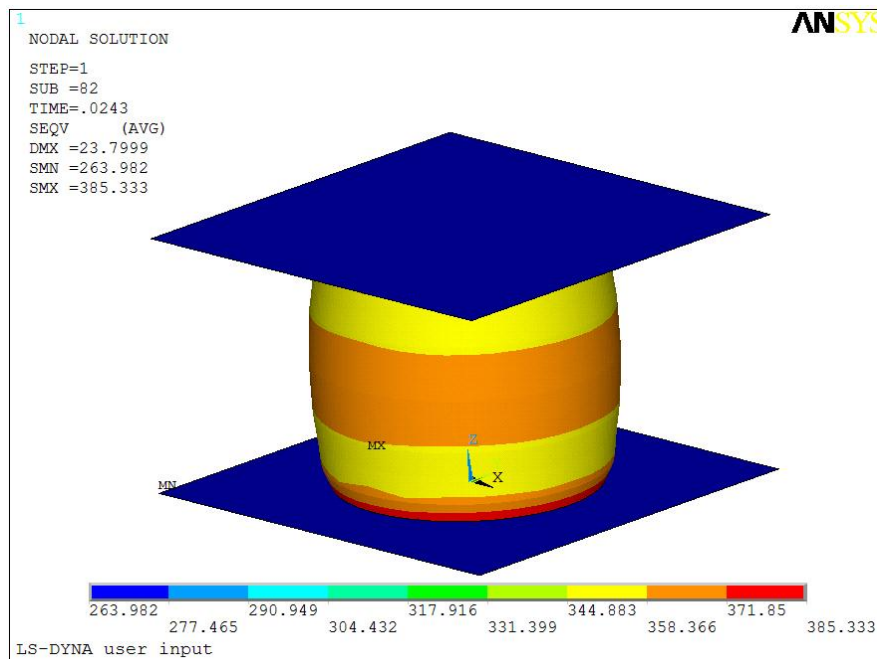


Рис. 3.58. Контуры напряжений (von Misses stress) на модели для шага 84

### ***3.26. Сохранение полученных графических результатов***

Сохраним изображение картинки на экране:

---

**Ansys Utility menu → PlotCtrls → Hard Copy → To File**

---

Откроется окно Graphics Hard Copy (рис. 3.59).

1. Выберите формат сохраняемого изображения [A];
2. Нажмите Ok [B].

### ***3.27. Просмотр других контуров на заготовке***

В окне Contour Nodal Solution Data можно выбрать любые другие контуры модели. Например, деформации по осям X, Y, Z.

Посмотрим контуры деформированной заготовки по полной деформации вдоль оси X.

---

**Ansys main menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu**

---

Откроется окно Contour Nodal Solution Data (рис. 3.60).

1. Выберите Nodal Solution → Total Mechanical Strain → X-Component of total mechanical strain [A];
2. Нажмите Ok [B].

В результате на экране должна получиться следующая картина (рис. 3.61).

В ряде случаев, например, как в нашем, интересно посмотреть деформации по сечению модели.

### ***3.28. Определение рабочей плоскости для сечения модели***

Определим установки рабочей плоскости (Workplane).

---

## Ansys Utility menu → Workplane → Offset WP by Increments

---

Откроется окно Offset WP (рис. 3.62).

1. Нажмите на кнопку поворота системы координат вдоль оси X [A] – 3 раза. Каждое нажатие обеспечивает поворот на  $30^{\circ}$ . Таким образом, общий угол разворота будет соответствовать  $90^{\circ}$ ;
2. Нажмите Ok [Б].



Рис. 3.59. Сохранение изображения модели

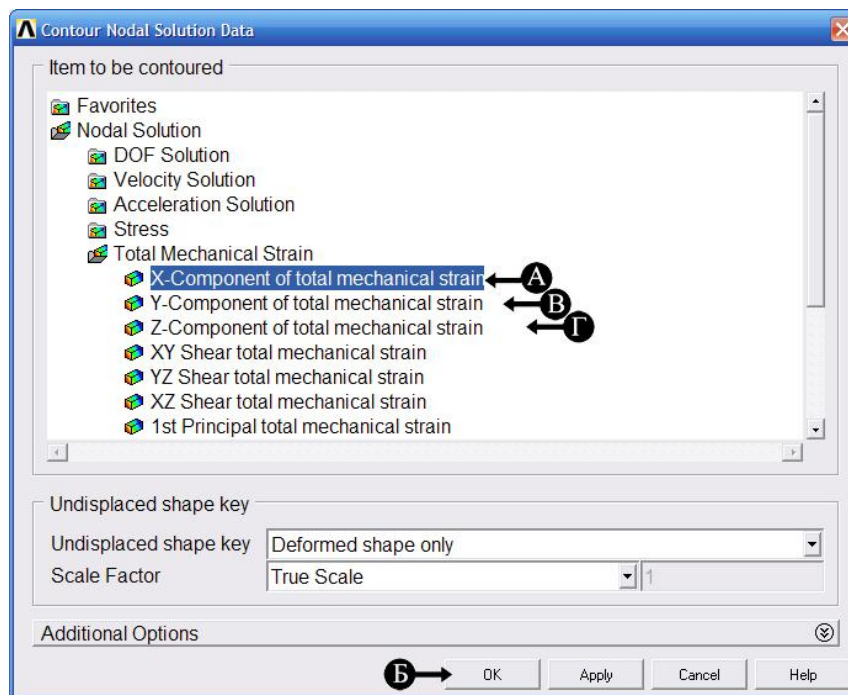


Рис. 3.60. Выбор вывода контуров узловых данных по параметру X-total mechanical strain (полные деформации по оси X)

### 3.29. Установка параметров для сечения модели

Установим необходимые параметры для сечения модели рабочей плоскостью:

---

## Ansys Utility menu → PlotCtrls → Style → Hidden Line Options

---

Откроется окно Hidden Line Options (рис. 3.63).

1. В Type of Plot выберите опцию Q-Slice Z-buffer [A];
2. Нажмите Ok [Б].

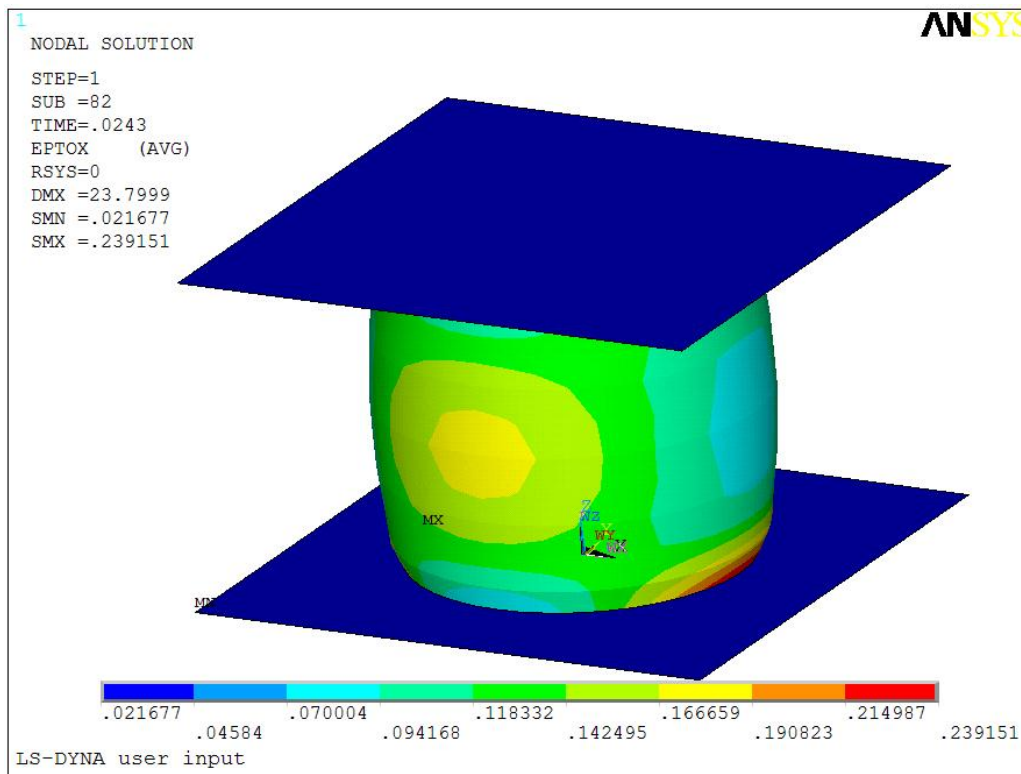


Рис. 3.61. Контуры деформации по оси X на модели для шага 84

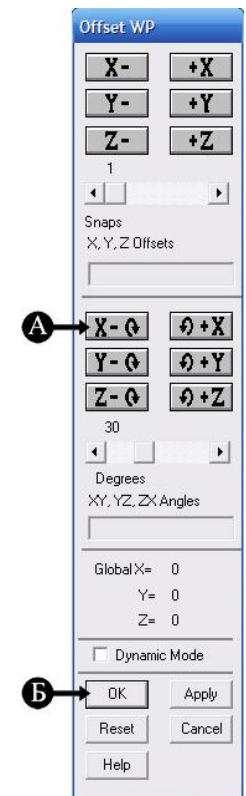


Рис. 3.62. Установка положения рабочей плоскости

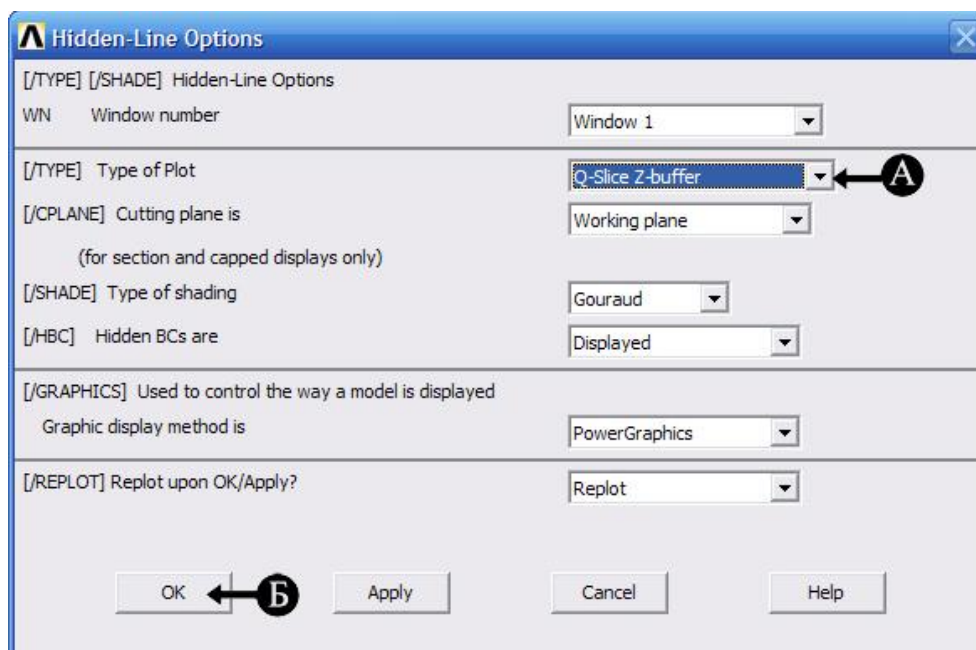


Рис. 3.63. Установка параметров для сечения модели

В результате должно получиться изображение контурных линий по сечению модели (рис. 3.64).

Для отображения контуров по компонентам Y и Z необходимо выбрать соответствующие позиции на панели Contour Nodal Solution Data.

### ***3.30. Просмотр контуров по сечению заготовки по полным деформациям вдоль оси Y***

Просмотрим деформации по сечению заготовки вдоль оси Y:

---

**Ansys main menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu**

---

Откроется окно Contour Nodal Solution Data (рис. 3.60).

1. Выберите Nodal Solution → Total Mechanical Strain → Y-Component of total mechanical strain [B];
2. Нажмите Ok [B].

Должно получиться изображение контурных линий по сечению модели (рис. 3.65).

### ***3.31. Просмотр контуров по сечению заготовки по полным деформациям вдоль оси Z***

Просмотрим деформации по сечению заготовки по деформациям вдоль оси Z.

---

**Ansys main menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu**

---

Откроется окно Contour Nodal Solution Data (рис. 3.60).

1. Выберите Nodal Solution → Total Mechanical Strain → Z-Component of total mechanical strain [Г];



2. Нажмите Ok [B].

Должно получиться изображение контурных линий по сечению модели (рис. 3.66).

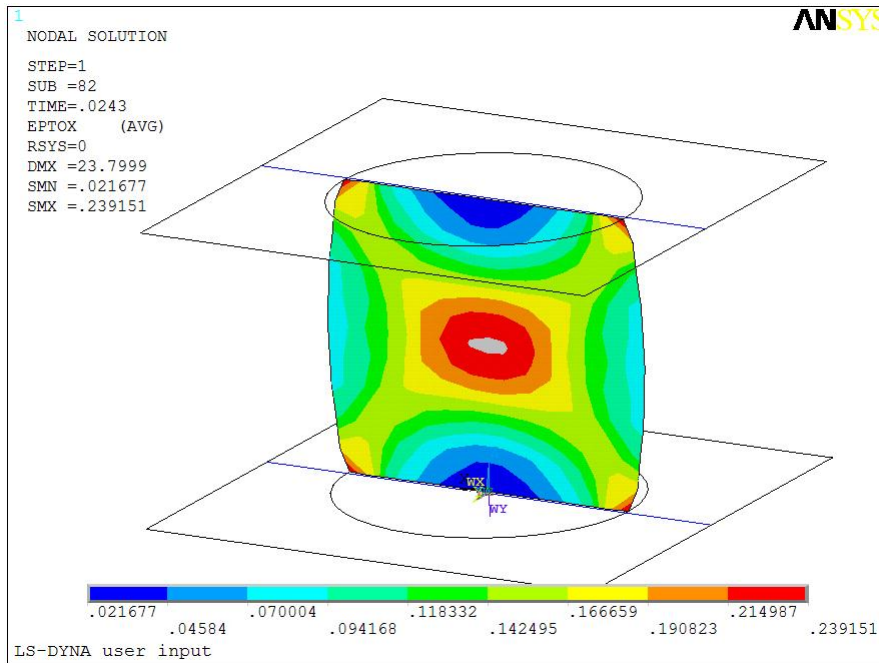


Рис. 3.64. Контурные деформации по компоненте X по сечению модели для шага 84

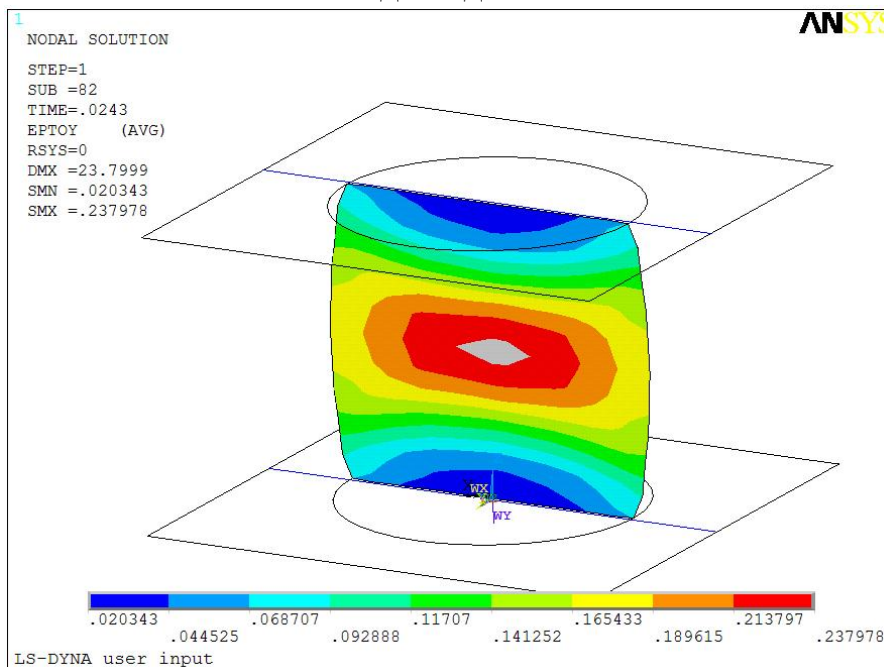


Рис. 3.65. Контурные деформации по компоненте Y по сечению модели для шага 84

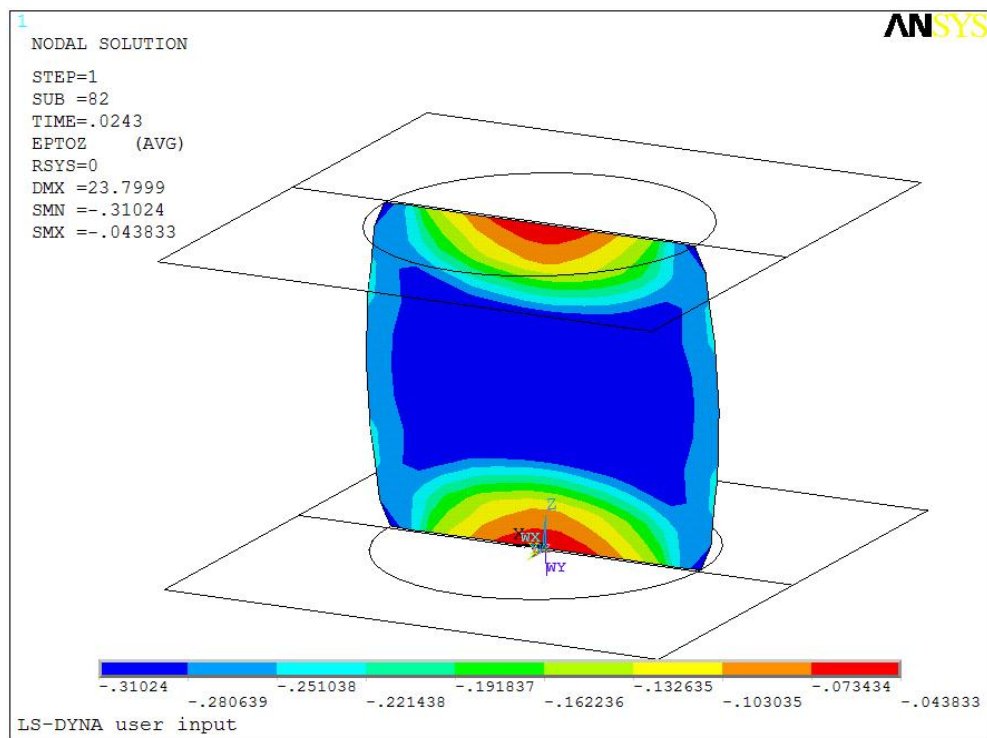


Рис. 3.66. Контуры деформации по компоненте Z по сечению модели для шага 84

### 3.32. Загрузка данных в POST26 для построения графиков в зависимости от времени

Кроме построения контур диаграмм для конкретного этапа расчета постпроцессор Ansys позволяет выводить графики зависимостей различных параметров от времени. Для этого используется Постпроцессор временной истории (POST26 – TimeHist Postproc).

Загрузим данные в POST26:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc**

---

Откроется окно Time History Variables (рис. 3.67).

1. Нажмите File → Open Results [A];

Появится окно (рис. 3.68) для выбора сохраненного файла проведенного расчета.

2. Выберите файл file.his [Б]. **Заметьте:** расширение файла должно

иметь расширение *his* (файл истории);

3. Нажмите открыть [В];

Появится окно выбора файла исходной базы данных (рис. 3.69).

4. Выберите файл с расширением \*db [Г];

5. Нажмите открыть [Д].

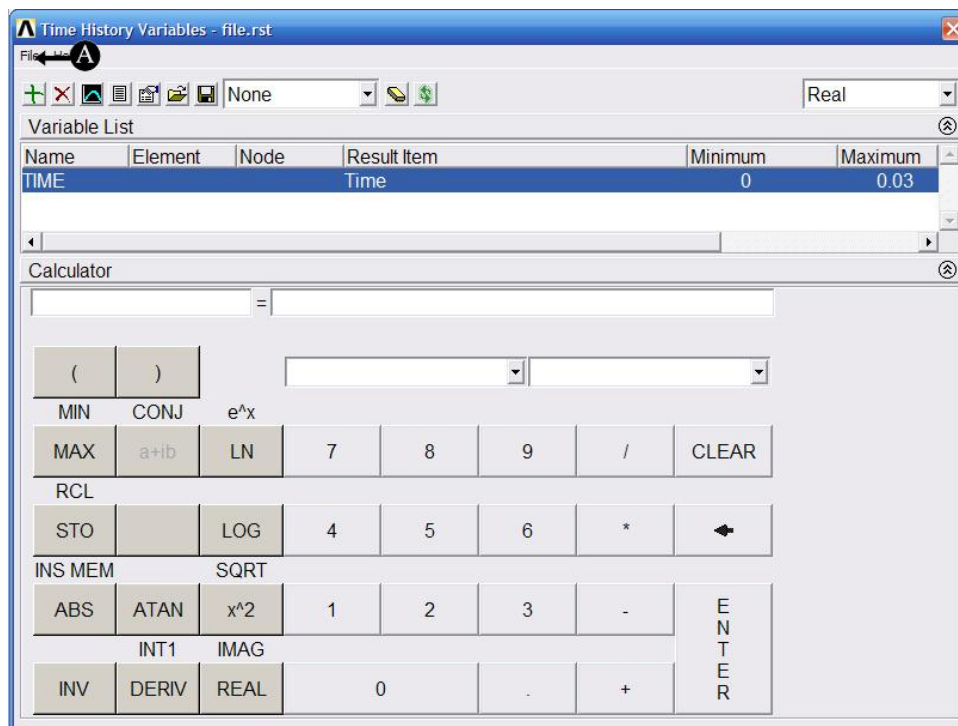


Рис. 3.67. Окно Time History Variables для построения графиков различных значений по времени

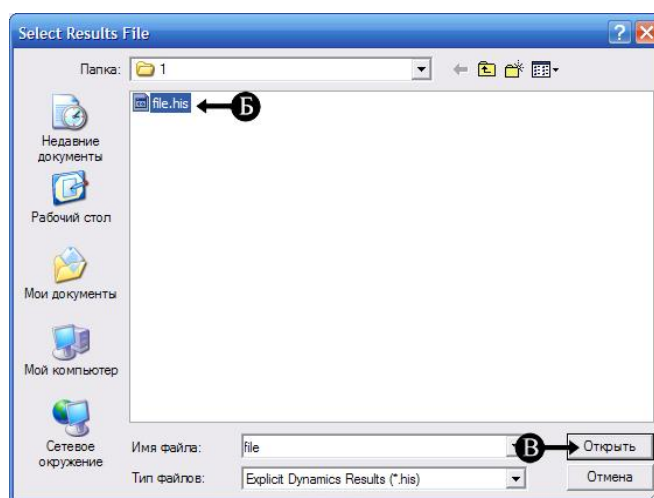


Рис. 3.68. Выбор файла с сохраненными данными временной истории

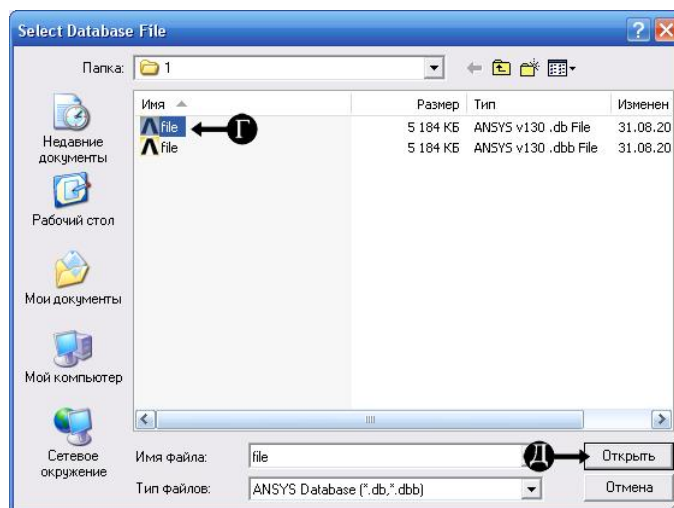


Рис. 3.69. Выбор файла исходной базы данных

### 3.33. Чтение файла с сохраненными данными по усилиям

Проанализируем усилие, с которым подвижная верхняя плоскость давит на цилиндрическую заготовку при осадке. Для этого прочитаем файл с сохраненными данными по усилиям:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Read LSDYNA Data  
→ RCFORC file**

---

Откроется окно Read data from the RCFORC file (рис. 3.70).

1. Установите параметр Read data for contact number... значение 2 [А], что соответствует второму контактному определению (контакт заготовки с верхней плоскостью);
2. Нажмите Ok [Б].

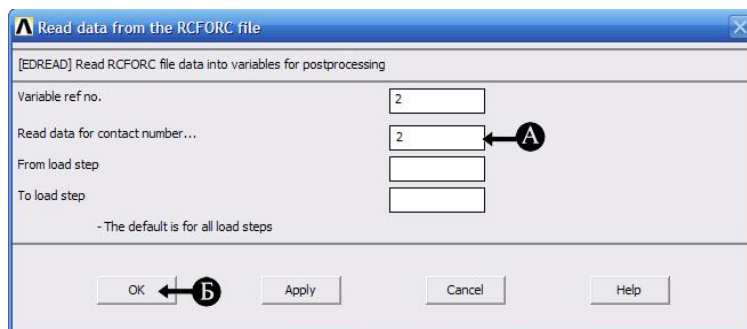


Рис. 3.70. Окно данных для параметра усилия

### 3.34. Построение графика зависимости усилия от времени

Заново откроем окно Time History Variables\*:

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Variable Viewer**

Откроется окно Time History Variables (рис. 3.71).

1. Выберем направление действия усилия – Z FORCE [A];
2. Нажать на кнопку построения графика [B];
3. Закрывать окно [B].

Должен появиться график зависимости усилия по оси Z от времени (рис. 3.72). Этот график характеризует усилие, с которым подвижная верхняя плоскость давит на цилиндрическую заготовку при осадке.

\*- если оно открыто, то его необходимо перед этим закрыть

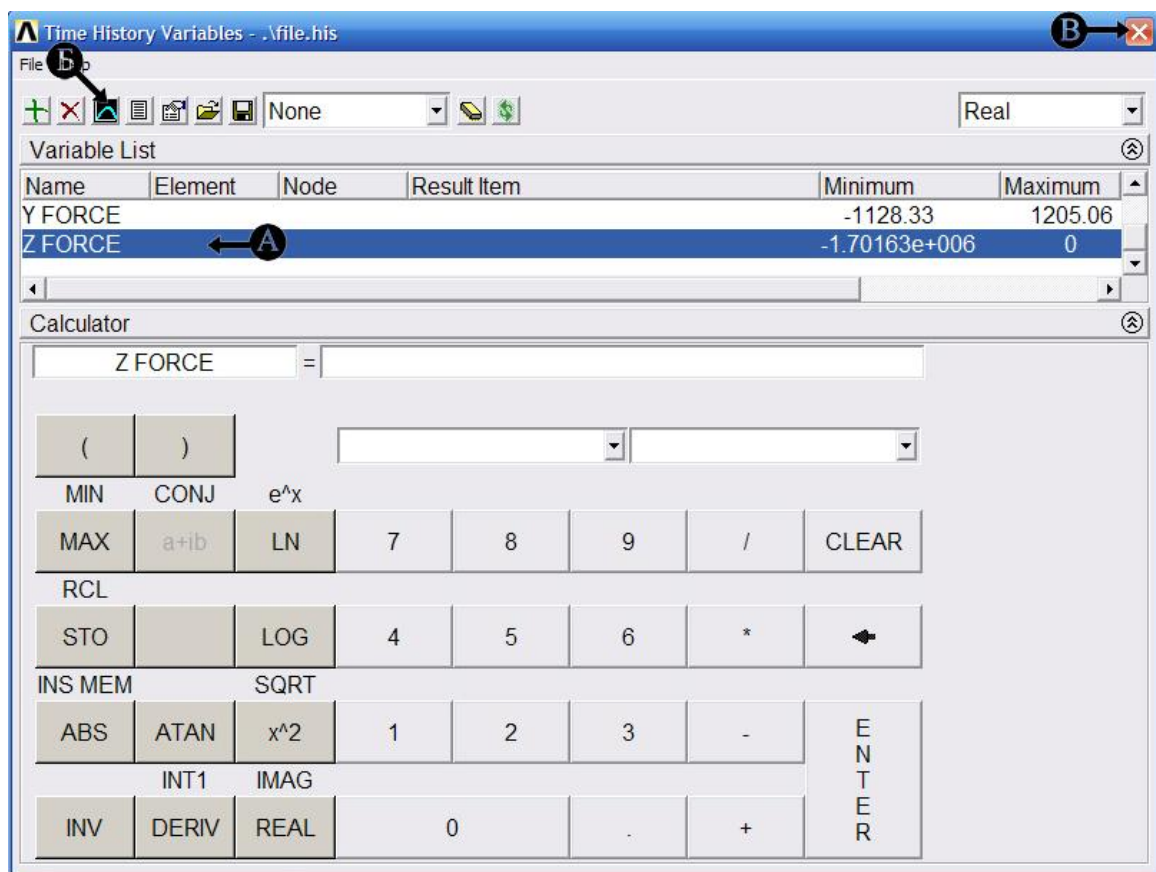


Рис. 3.71. Окно Time History Variables с доступным выбором параметров усилия

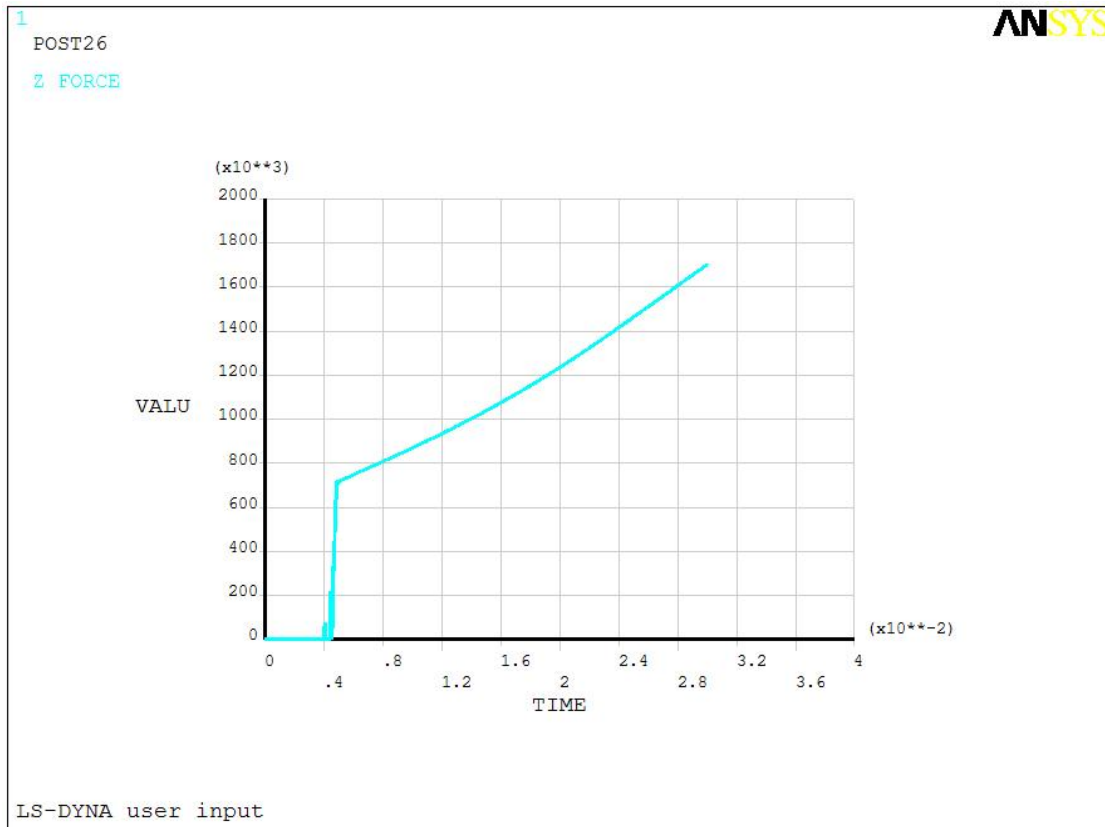


Рис. 3.72. График зависимости усилия по оси Z от времени

### 3.35. Чтение файла с сохраненными данными по энергиям

Проанализируем внутреннюю энергию деформирования заготовки при осадке. Для этого прочитаем файл с сохраненными данными по энергии:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Read LSDYNA Data  
→ MATSUM file**

---

Откроется окно Read data from the MATSUM file (рис. 3.73).

1. Установите параметр Read data for part number... значение 1 [A], что соответствует 1-ой части (part), которой является заготовка;
2. Нажмите Ok [B].

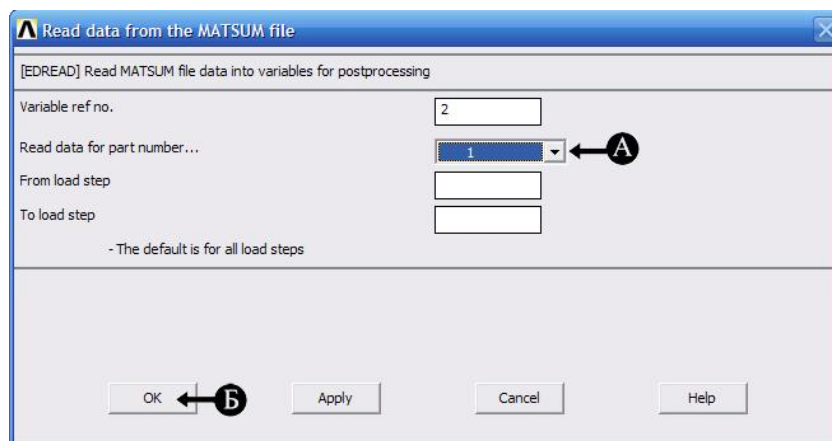


Рис. 3.73. Окно данных для параметра энергии

### 3.36. Построение графика зависимости внутренней энергии от времени

Откроем окно Time History Variables:

---

**Ansys main menu → TimeHist Postproc → Variable Viewer**

---

Откроется окно Time History Variables (рис. 3.74).

1. Выберем внутреннюю энергию деформирования заготовки – INTNENE [A];
2. Нажать на кнопку построения графика [Б];
3. Закрыть окно [В].

Должен появиться график зависимости внутренней энергии от времени (рис. 3.75).

### 3.37. Сравнение результатов моделирования и теории

Теоретическая оценка усилия деформирования [15]:

$$P_T = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \left( \sigma_s + \frac{\tau_K \cdot D_2}{3 \cdot H_2} \right) = \frac{\pi \cdot 69,3^2}{4} \left( 250 + \frac{144 \cdot 69,3}{3 \cdot 60} \right) = 1,15 \text{ МН.}$$

Теоретическая оценка работы деформирования:

$$A_T = \sigma_s \cdot \Delta h \cdot \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} = 250 \cdot 20 \cdot \pi \cdot \frac{60^2}{4} = 18,8 \text{ МДж.}$$

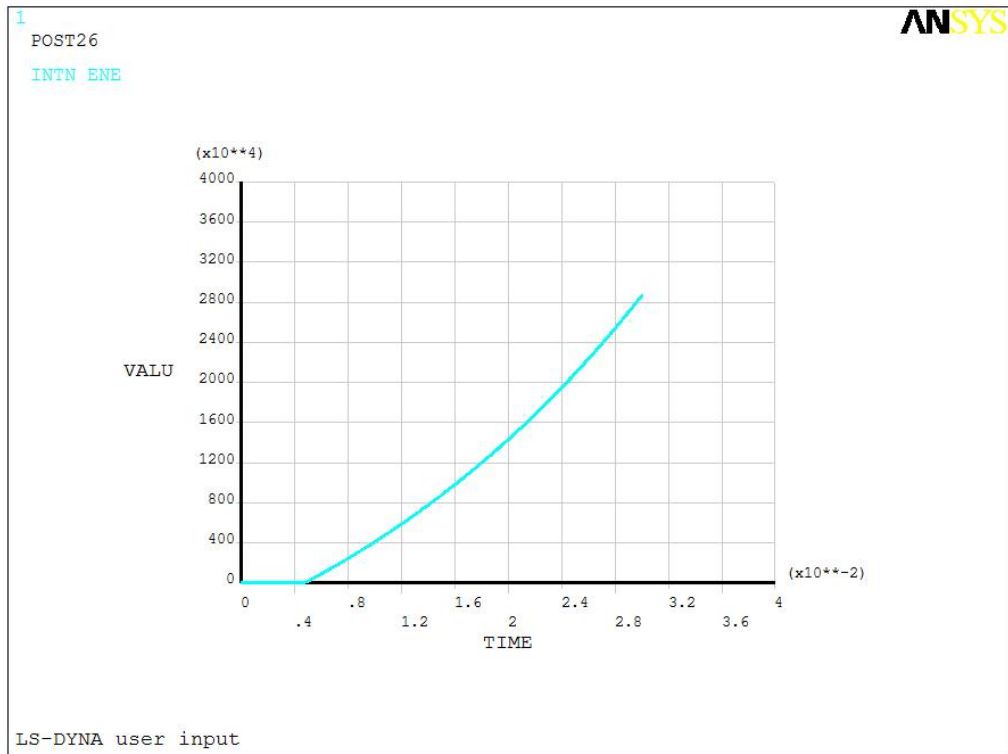


Рис. 3.75. График зависимости усилия по оси Z от времени

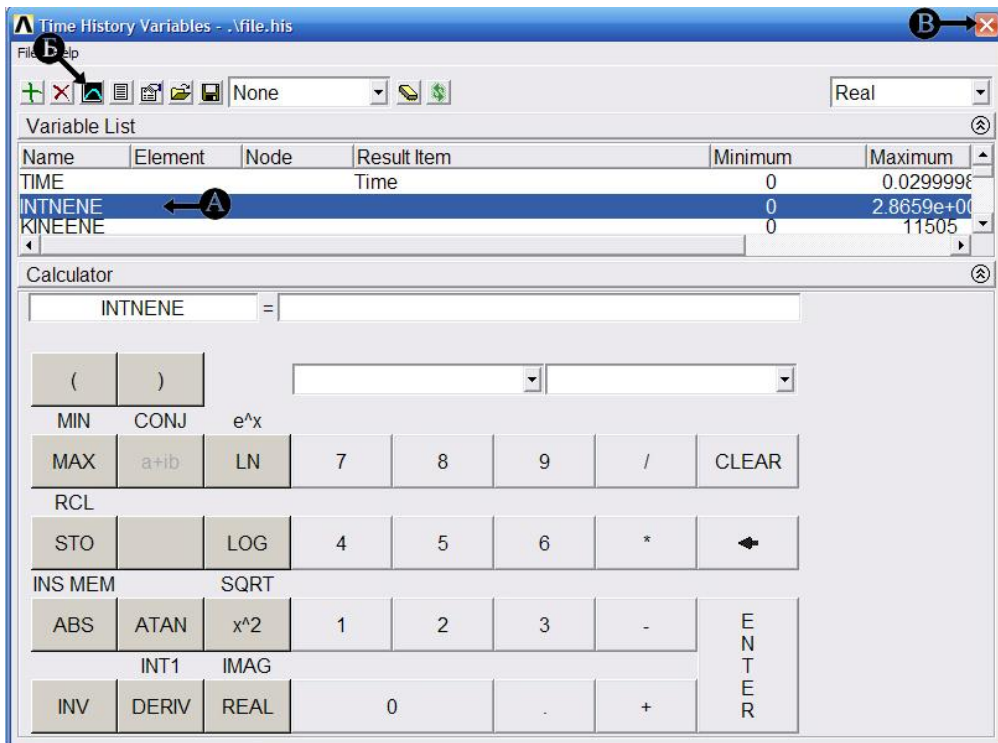


Рис. 3.74. Окно Time History Variables с доступным выбором параметров энергии



Результаты моделирования для усилия и работы при деформировании цилиндрической заготовки при  $\Delta h=20$  мм (соответствует времени  $2,42e-2$  сек., 84 шаг) равно следующим значениям (рис. 3.76):

$$P_{\text{мод}} = 1,42 \text{ МН};$$

$$A_{\text{мод}} = 19,8 \text{ МДж}.$$

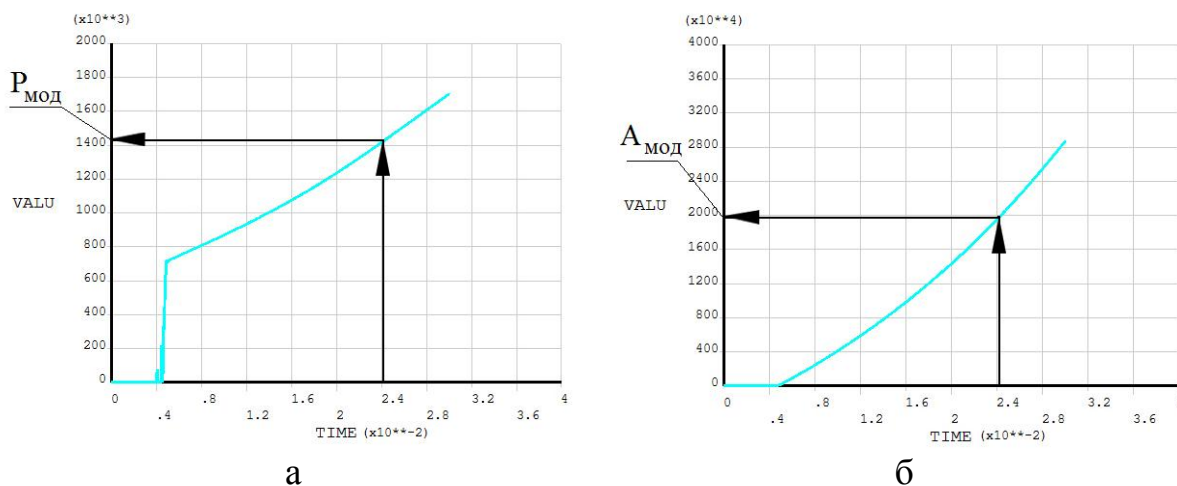


Рис. 3.76. Определение величины усилия (а) и внутренней энергии (б) при  $\Delta h=20$  мм (соответствует времени  $2,42e-2$  сек.)

В таблице 3.1 приведено сравнение результатов теории и моделирования и величины погрешностей

### Сравнение результатов теории и моделирования

Таблица 3.1.

	Теория	Моделирование	Погрешность, %
Усилие, МН	1,15	1,42	19
Энергия, МДж	18,8	19,8	5

Различие между результатами теории и моделирования (таблица 3.1) в первую очередь связаны с допущениями принятыми в теории осадки (не учитывается появление бочкообразности, неравномерной деформации по сечению образца и др.) и в нашем случае слишком крупной сетки. Различие результатов между теорией и практикой в пределах (20-25)% в ОМД считается допустимыми.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ**

1. От чего зависит критический шаг в явном методе анализа?
2. Запустите программу ANSYS и ответьте на следующие вопросы:
  - как перейти к проведению динамического анализа в программе ANSYS/LS-DYNA?
  - для чего предназначены модули меню Ansys Main Menu - Preprocessor, Solution, General Postproc?
  - для чего предназначены пункты модуля Preprocessor – Element Type, Real Constants, Material Props?
  - для чего предназначено меню Ansys Utility Menu?
3. Как определяется согласованная система единиц измерения в ANSYS/LS-DYNA?
4. Перечислите три основных этапа моделирования?
5. Перечислите основные отличия элементных формулировок для типа элемента Shell 163?
6. Какие основные параметры характерны для большинства рассматриваемых моделей материала?
7. Как определяется модуль пластичности для билинейной модели материала?
8. С помощью каких пунктов модуля Preprocessor проводят создание геометрической модели и конечно-элементной сетки?
9. Какие основные действия необходимы для нанесения конечно-элементной сетки при использовании меню Meshtool?
10. Что такое часть (Part)?
11. Как определяется контакт и основные параметры контакта в программе ANSYS/LS-DYNA?
12. Перечислите основные контактные типы и опции контакта в программе ANSYS/LS-DYNA?
13. Как задаются нагрузки в программе ANSYS/LS-DYNA?

14. Для чего необходимо определение параметров контроля Hour-glass?

15. Укажите отличие постпроцессоров POST1 и POST26?

16. При выполнении моделирования процесса осадки цилиндрической заготовки ответьте на следующие вопросы:

- почему используется два типа элемента – shell и solid?
- почему используется билинейная модель материала, а не упругая?
- можно ли было использовать пластическую кинематическую в степенном виде модель материала? Какие бы в этом случае потребовались параметры моделей материала? Какая модель материала наиболее близка к реальной модели?
- как можно было бы еще создать геометрическую модель процесса осадки?
- почему геометрические модели не должны соприкасаться друг с другом?
- каким параметром (или какими параметрами) сеточного меню Meshtool можно было бы уменьшить размер конечных элементов модели?
- как представить на экране геометрическую модель в виде точек, линий, плоскостей?
- перечислите какие части (Part) были созданы в меню определения частей?
- почему данные скорости при определении массива (рис. 3.43) вводятся в отрицательных величинах?
- что означает метка “RBVZ” при определении параметров нагрузки?
- для чего создаются выходные файлы базы ASCII (material energy, resultant force и др.)?
- какие параметры можно контролировать при решении задачи в выходном окне решения LS-DYNA?
- какие выходные данные можно получить в основном постпроцессоре POST1?

- для чего необходимо представление деформированной заготовки в истинном виде?
- какие выходные данные можно получить во временном пост-процессоре POST26?

17. Попробуйте изменить входные параметры процесса и обоснуйте полученные результаты:

- характеристики материала  $\sigma_T = 350$  МПа,  $\sigma_B = 700$  МПа;  $\rho = 7,85e-9$ ;  $\mu = 0,3$ ;
- задайте полностью интегрированную элементную формулировку (опция Full int S/R, рис. 2.6);
- уменьшите величину разбиения линий модели в 2 раза;
- увеличьте величину разбиения линий модели в 2 раза, проконтролируйте получившиеся количество элементов;
- увеличьте коэффициент трения до 0,5;
- уменьшите коэффициент трения до нуля;
- увеличьте исходную скорость движения верхней плоскости в 2 раза;
- увеличьте временной шаг в 20 раз, сравните графики внутренней энергии и усилия.

18. Попробуйте построить модель процесса со следующими изменениями:

- вместо цилиндра используйте трубную заготовку со стенкой 10 мм;
- вместо прямоугольных пластин используйте круглые с радиусом 50 мм;
- задайте  $\frac{1}{2}$  ( $\frac{1}{4}$ ) части исходной геометрии, наложив на плоскости симметрии соответствующие ограничения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии были изложены основы работы с программой ANSYS/LS-DYNA с акцентом на моделирование процессов обработки давлением. Приведены типовые модели материалов, типы элементов, виды нагрузений характерные для задач обработки металлов давлением. Приведен подробный пошаговый пример моделирования процесса осадки цилиндрической заготовки.

Работа выполнена в ОАО «Ульяновский НИАТ» и в Ульяновском государственном университете на кафедре проектирования и сервиса автомобилей.

**ОАО «Ульяновский НИАТ»** - одно из ведущих предприятий России, которое на протяжении более 30 лет разрабатывает и производит профилегибочное оборудование и специализируется на разработке и внедрении технологий, используя уникальные методы деформирования листового материала (метод стесненного изгиба, метод интенсивного деформирования).

Начиная с 2010 г. на предприятии, при разработке новых технологий формообразования и рубки листового материала, используется коммерческая версия программы **LS-DYNA**. В программе **LS-DYNA** были проанализированы и оптимизированы несколько десятков технологических схем формообразования и рубки гнутых профилей. Кроме того, в программе проводятся различные научные исследования по совершенствованию применяемых методов формообразования [16].

С помощью программы **LS-DYNA** были разработаны:

- технологические схемы для изготовления профилей стрингер и шпангоут фюзеляжа самолета МС-21;
- режимы формообразования для изготовления профилей с продольной кривизной для сборных металлических гофрированных конструкций;

- процессы редуцирования круглой исходной заготовки в профиль сложной формы (профиль для опалубки зданий, профиль синхронизатора сидения автомобиля);

- процессы формообразования и рубки различных профилей для строительства и автомобилестроения (всего более 40 технологических схем).

Комплекс программ **ANSYS** используется также в **Ульяновском государственном университете на кафедре проектирования и сервиса автомобилей**. Основная научная работа кафедры связана с исследованиями напряженно-деформированного состояния деталей и узлов конструкций автомобилей и других транспортных средств.

На кафедре комплекс программ **ANSYS** может использоваться в следующих направлениях:

- анализ прочности и кинематики транспортных средств;
- расчет и оптимизация отдельных элементов конструкции транспортных средств;
- расчет подвески транспортных средств;
- анализ повреждений в результате столкновений (краш-анализ), оценка безопасности пассажиров;
- расчет процессов гидродинамики и нестационарной нелинейной динамики;
- анализ процессов теплопередачи при нагреве.

Все Ваши замечания и пожелания можно отправлять на электронный адрес автора: [fzbm@mail.ru](mailto:fzbm@mail.ru)

**С наилучшими пожеланиями!**

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Электрон. текстовые и граф. дан.]. М.: Разработки программистов МИСиС. Режим доступа: [http://gnut1.narod.ru/0\\_Roll/R\\_Common/Lit\\_Obz.htm](http://gnut1.narod.ru/0_Roll/R_Common/Lit_Obz.htm). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 2 Сидоров А. Настоящее и будущее моделирования процессов обработки металлов давлением. [Электрон. текстовые и граф. дан.] // САПР и графика. 2007. №10. Режим доступа: [http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_sapr1007.pdf](http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_sapr1007.pdf). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 3 Белов М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД. // Пластическая деформация сталей и сплавов. - М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 1996. - С. 224-227.
- 4 Дубинский С. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0. [Электрон. текстовые и граф. дан.] // САПР и графика. 2004. №03. Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7051&iid=288>. Загл. с экрана. Яз. рус.
- 5 ANSYS/LS-DYNA User`s Guide for Release 8.1
- 6 Машиностроение. Каталог 2010-2011. Группа компаний CSoft
- 7 Oasys LS-DYNA Environment: User Guide (Version 8.1)
- 8 LS-DYNA Keyword user`s manual. July 2006. Version 971
- 9 LS-Dyna. Единицы измерения М.: ProCAE. [Электрон. текстовые и граф. дан.]. Режим доступа: <http://www.procae.ru/articles/ls-dyna/46-ls-dyna-units.html>. Загл. с экрана. Яз. рус.

- 10 Мощь нелинейных возможностей. Ansys Solution 2000, Volume 2, Number 1
- 11 Басок К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
- 12 Твердотельное моделирование и построение сетки в Ansys Версия 5.3. Под редакцией Б.Г.Рубцова и др. г. Снежинск. 1998 г.
- 13 Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. Bradley N. Maker, Xinhai Zhu, Livermore Software Technology Corporation, April, 2000
- 14 Моделирование и расчеты в программе Ansys [Электрон. текстовые и граф. дан.]. М.: Дистанционное обучение по специальности “Инженерная графика”. Режим доступа: <http://distance.net.ua/Russia/ANSYS/ansys.htm>. Загл. с экрана. Яз. рус.
- 15 Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 209 с.
- 16 Применение программы математического моделирования LS-DYNA для разработки оптимальных технологических процессов [Электрон. текстовые и граф. дан.]. М.: УлНИИТ. Режим доступа: [http://ulniat.ru/upload/iblock/64e/primenenie\\_lsdyna.doc](http://ulniat.ru/upload/iblock/64e/primenenie_lsdyna.doc). Загл. с экрана. Яз. рус.



Учебное издание

*Илюшкин Максим Валерьевич*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
В ПРОГРАММЕ ANSYS/LS-DYNA  
(осадка цилиндрической заготовки)**

Учебно-методическое пособие

Директор Издательского центра Т.В. Филиппова  
Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 8.05.2013. Формат 60x84/16  
Усл. печ. л. 6,6. Уч.-изд. л. 5,6.  
Тираж 100 экз. Заказ №56/45

Оригинал-макет подготовлен и тираж отпечатан в Издательском центре  
Ульяновского государственного университета  
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42