

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**П. В. Бондарчук**

## **Прочность пневмо- и гидромашин**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2013

Автор: **Бондарчук Петр Владимирович**

Рецензент: Зав. каф. ОКМ СГАУ, д.т.н. В.Б. Балякин

Редакторская обработка: П.В. Бондарчук

Компьютерная верстка: П.В. Бондарчук

Доверстка: П.В. Бондарчук

**Бондарчук П. В. Прочность пневмо-и гидромашин** [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / П. В. Бондарчук; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (11 Мбайт). - Самара, 2013.- 1 эл. опт. диск (DVD-ROM)

Прочность пневмо-и гидромашин обеспечивает студента минимумом знаний, необходимым для проведения расчетов на прочность. Описываются: модель в прочностном расчете, дается понятие о напряжениях и деформациях, конструкционной прочности материалов, теории предельных состояний, методах испытаний и оценке прочностной надежности. Даются основные сведения об основах теории колебаний, описываются случаи возбуждения колебаний в ДЛА и борьба с ними. Рассмотрены основные сведения о программе конечно-элементного моделирования Ansys и подготовке в нем модели для расчета на прочность. Даются сведения о основных видах анализа: статическом, динамическом, модальном, гармоническом, спектральном, устойчивости, тепловом. Приводятся сведения о используемых нелинейностях модели. Рассмотрены основы языка параметрического моделирования APDL.

Учебное пособие предназначено для факультета ДЛА рекомендовано для обучения специалистов по специальности 150802.65 “Гидравлические машины гидроприводы и гидро пневмоавтоматика” (ГОС-2) по направлению подготовки 150800.65 “Гидравлическая вакуумная и компрессорная техника” по дисциплине “Прочность пневмо и гидромашин” в 9 семестре и магистров по направлению 160700.68 “Двигатели летательных аппаратов” по программе 160700.1.68 “Мехатронные пневмо гидравлические агрегаты и системы”(ГОС-3) по дисциплине “Прочность пневмо и гидромашин” в 9 семестре.

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

## Содержание

1 Введение. Задачи курса	4
2 Модель в прочностном расчете	8
3 Понятие о напряжениях и деформациях	14
4 Конструкционная прочность материалов. Кратковременные прочностные и конструкционные характеристики	17
5 Теория предельных напряженных состояний	28
6 Методы испытаний и оценки прочностной надежности	33
7 Теория колебаний	41
7.1 Свободные колебания	44
7.2 Вынужденные колебания	51
7.3 Важнейшие случаи возбуждения колебаний в ДЛА	56
7.4 Периодическая и полигармоническая сила, спектральное представление колебаний	60
7.5 Основные направления борьбы с опасной вибрацией ДЛА	65
8 Основные сведения о программе конечно-элементного анализа ANSYS	75
8.1 Интерфейс пользователя	76
8.2 Файловая система ANSYS. Основные приемы ввода-вывода	81
8.3 Препроцессорная подготовка	84
8.4 Задание материала	87
8.5 Генерация модели	92
8.6 Построение сетки	101
8.7 Приложение нагрузок	102
8.8 Получение решения	121
9 Прочностной статический анализ	124
10 Прочностной динамический анализ	130
11 Модальный анализ	130
12 Отклик на гармоническое воздействие	136
13 Спектральный анализ	146
14 Анализ устойчивости конструкций	154
15 Расчет переходных динамических процессов	158
16 Тепловой анализ	169
17 Постпроцессорная обработка	170
18 Язык параметрического программирования APDL	172
19 Использование СК и рабочей плоскости (WP)	176
20 Определение нелинейных задач МДТТ	182
Заключение	194
Список рекомендуемой литературы	195

## 1 Введение. Задачи курса

Предмет прочность пневмо и гидромашин – подраздел науки о прочности, жесткости и надежности элементов машин. Университет, несмотря на название, занимается не только фундаментальными исследованиями, но и прикладной деятельностью, в том числе и проектированием двигателей ЛА и его агрегатов. Проблема обеспечения прочности и ресурса деталей агрегатов авиадвигателей и их элементов в последнее время приобретает особую остроту, поскольку режим работы двигателя и его элементов интенсифицируется с целью улучшения характеристик по экономичности и массе. Это приводит к повышению стоимости двигателей на 30% за каждое пятилетие. Большой ресурс и повышенная надежность авиадвигателей, повышают безопасность эксплуатации и обеспечивают экономию за счет уменьшения потребного числа двигателей для обеспечения парка самолетов, уменьшения количества и стоимости ремонтов, уменьшения времени простоев самолетов и затрат на замену отработавших ресурс двигателей.

Проблема обеспечения надёжности и ресурса неразрывно связана с конструированием, доводкой, производством и эксплуатацией техники. Цитируя академика, генерального конструктора Н.Д.Кузнецова: **"Надёжность и ресурс закладываются на этапе проектирования, обеспечиваются в производстве, достигаются при доводке, совершенствуются и реализуются в эксплуатации"**. Недостаточная надёжность конструкции приводит к огромным затратам на ремонт, перебоям в эксплуатации, а применительно к авиационным ГТД может привести и к человеческим жертвам, что не поддается экономическим оценкам.

Благодаря верифицированным методикам работы в современных расчетных комплексах у конструктора есть возможность подтверждения прочности и ресурса на этапе проектирования. Итак, задачи курса:

1. Изучение характеристик материалов и теорий их разрушения;

2. Изучения основ теории колебаний;
3. Изучение универсального расчетного комплекса Ansys и его использование для построения расчетных балочных, оболочечных и твердотельных моделей и их анализа. Проведение расчетов на статическую прочность, устойчивость, колебания, динамическую прочность;
4. Формирование навыков по практическому применению расчетного комплекса для проектирования деталей, узлов, агрегатов и соединительных трубопроводов, с применением оптимизации.

Курс состоит из ряда лекций, лабораторных и практических работ. В качестве базовой программы для выполнения расчетов на прочность будем использовать Ansys. При подготовке геометрических моделей будем пользоваться пакетом SolidWorks.

#### *Литература основная*

1. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. В.П. Данильченко.
2. Надежность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов: курс лекций с решением примеров. Никитин О.Ф.

#### *Литература дополнительная*

3. Ansys для инженеров. Чигарев А.В.
4. Колебания в двигателях летательных аппаратов. Хронин Д.В.
5. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. Лозицкий Л.П.
6. Расчет на прочность авиационных ГТД. Справочник под редакцией Биргера И.А.

#### *Электронные источники и интернет ресурсы*

Ansys.com – вебинары и дополнительные материалы;

<http://www.cadfem-cis.ru/> - материалы по применению Ansys для решения конкретных задач, журнал Ansys Solutions

ciam.ru – сайт ЦИАМ

dwg.ru – форум с ответами специалистов по вопросам прочностного проектирования.

### *Термины и определения*

Напомним терминологию известную из курсов сопромата и деталей машин.

**Прочность**—это способность конструкции выдерживать заданную нагрузку, не разрушаясь.

**Жесткость**— способность конструкции сопротивляется воздействию сил, получая лишь упругие деформации.

**Деформирование**— свойство конструкции изменять свои геометрические размеры и форму под действием внешних сил.

**Устойчивость**— свойство конструкции сохранять при действии внешних сил заданную форму.

**Надежность** – свойство конструкции выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в определенных нормативных пределах в течение требуемого промежутка времени.

**Ресурс** – допустимый срок службы изделия, время или (и) количество циклов работы в составе узла по заданному типовому циклу, гарантированное разработчиком и изготовителем детали в отношении способности выполнять свои функции в составе узла.

**Отказ** – нарушение работоспособности конструкции.

**Прочностная надежность конструкции** - отсутствие отказов, связанных с разрушением или недопустимыми деформациями элементов конструкции.

**Критическое состояние** – момент исчерпания деталью способности выполнять свои функции в составе узла или изделия. Деталь сохраняет прочность, если не выходит на критическое состояние ни по одному из параметров.

**Запас прочности** по данному параметру - отношение его значения в критическом состоянии к полученному расчётом максимальному его значению в эксплуатации.

**Долговечность детали** – расчётное или экспериментально определённое время работы или число эксплуатационных типовых циклов до достижения критического состояния;

**Расчет на прочность** предполагает решение практической задачи до получения числового результата. При его проведении необходимо прибегать к упрощающим гипотезам – предположениям, и ограничениям (лунное притяжение при расчете плотин).

## 2 Модель в прочностном расчете

Реальный объект всегда представляется в виде модели. **Модель объекта** - абстрактный образ объекта, отражающий в необходимой мере определённый объём его реальных свойств.

В модели присутствуют: модель материала, модель геометрии реального объекта, модель нагружения и модель разрушения. Схема расчетной модели представлена на рисунке 1.

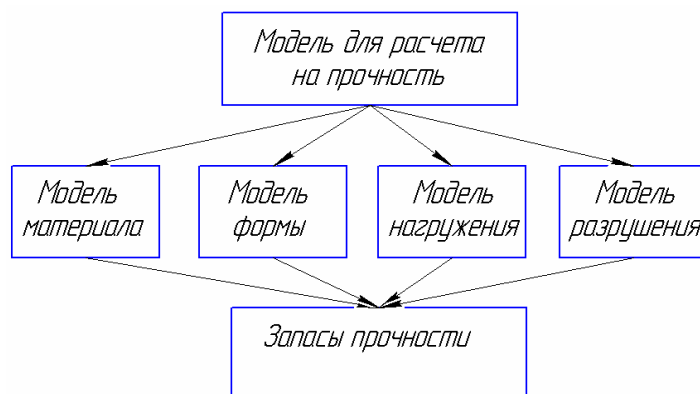


Рисунок 1 – Структура расчетной модели

**Физическая модель объекта** – математическая модель объекта, включающая в себя кроме геометрии также и определённые соотношения, регламентирующие происходящие в ней физические процессы, таким образом, чтобы они в необходимой степени отражали те или иные физические процессы происходящие как внутри объекта, так и при взаимодействии объекта с его окружением при его работе, и позволяли получить требуемые физические параметры отклика объекта на определённые внешние воздействия.

**Конечно-элементная модель** - физическая модель объекта, позволяющая посредством его дискретизации обеспечить получение отклика объекта на внешние воздействия, а также точек неустойчивости путём численного решения известных уравнений механики сплошной среды, при заданных её свойствах и граничных условиях. Уравнения механики различных сплошных сред, формально, для численного решения практически



аналогичны и, в различных частных видах, описывают и электромагнитные поля, и процессы теплопередачи, и течения газов и жидкостей, и движение и деформацию твёрдого тела. (в наиболее общем виде это либо известные уравнения Навье – Стокса для гидродинамики, либо уравнения Ламэ для твёрдого тела, либо уравнения Максвелла для электромагнитного поля) Именно поэтому конечно-элементное моделирование стало одним из наиболее универсальных средств в решении различных физических и инженерных задач.

**Модель материала** - потребный объём свойств в модели *необходимый для анализа НДС и для анализа прочности*. Может включать в себя кратковременные свойства, температурные зависимости, кривые деформирования (мультилинейная, билинейная), кривые циклического деформирования, «жаропрочность», ползучесть и «длительная прочность», малоцикловая выносливость, кривые малоциклового усталости в напряжениях и в полных деформациях, асимметрия цикла, высокочастотная выносливость, кривые выносливости фактора, контактная выносливость, влияние температурно–временного фактора без нагрузки на характеристики материалов, (стали, титановые сплавы, стареющие никелевые сплавы, термостабильные материалы в условиях длительной выдержки при повышенных температурах), влияние среды, жаростойкость, коррозия, коррозия под напряжением, коррозия в присутствии электролитов и совместимость материалов, наводораживание, влияние «жестких» излучений.

**Модель формы или геометрическая модель объекта** – математическая модель точно, или с теми или иными допущениями, отражающая только геометрические параметры объекта. Для разных видов КЭ моделями могут быть линии (балочные элементы), поверхности (оболочечные и осесимметричные элементы) и твердые тела (объемные элементы). Основными моделями формы в моделях прочности, как известно из сопромата, являются: брус, оболочка и твердое тело (массивы).

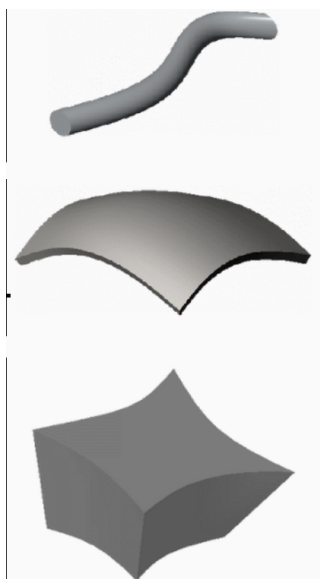


Рисунок 2 - Основные модели формы:  
а) стержень, б) оболочка, в) массив (твердое тело)

**Модель нагружения** - представляет совокупность действующих на модель нагрузок и граничных условий и их изменение во времени. Силы и перемещения во всех КЭ пакетах существуют под общим названием «нагрузки» (к примеру, задание перемещений вполне логично квалифицируется как жёсткое нагружение и не суть важно нулевые они или нет). Также используются инерционные, тепловые, электромагнитные и другие нагрузки. Иногда, для создания картины нагружения требуется создание громоздких моделей, включающих исследуемую деталь и окружение. Модель нагружения содержат схематизацию внешних нагрузок по величине, характеру распределения (сосредоточенная или распределенная сила или момент), а также воздействию внешних полей и сред.

Внешние силы, действующие на элемент конструкции, подразделяются на 3 группы: 1) сосредоточенные силы, 2) распределенные силы, 3) объемные или массовые силы. Сосредоточенные силы — силы, действующие на небольших участках поверхности детали (например давление шарика шарикоподшипника на вал, давление колеса на рельсы и т.п.) Распределенные силы приложены значительным участкам поверхности (например давление пара в паропроводе, трубопроводе, котле, давление

воздуха на крыло самолета и т.д. Объемные или массовые силы приложены каждой частице материала (например силы тяжести, силы инерции).

**Модель разрушения** - виды разрушения или потери функциональных свойств конструкции. Критериями критического состояния могут быть: потеря несущей способности, превышение критического напряжения или деформации, образование усталостной трещины, превышение критического уровня коэффициента интенсивности напряжения, превышение допустимых перемещений. Различные критерии разрушения существуют для следующих видов анализа: анализ запаса по разрушающей статической нагрузке, анализ запаса по местным напряжениям, анализ запаса устойчивости, анализ запаса долговечности, анализ запаса выносливости, многокомпонентное нагружение, анализ запаса долговечности, коэффициент интенсивности напряжения при анализе трещин и тд.

Модели разрушения представляют собой уравнения, связывающие параметры работоспособности элемента конструкции в момент разрушения с параметрами, обеспечивающими прочность. Эти уравнения (условия) называют условиями прочности. Обычно рассматриваются в зависимости от условий нагружения четыре модели разрушения:

- статического разрушения;
- длительно статического разрушения;
- малоциклового статического разрушения;
- усталостного разрушения.

При малом числе циклов ( $N < 10^2$ ) развиваются значительные пластические деформации (статическое разрушение), при большом числе циклов ( $N > 10^5$ ) пластические деформации отсутствуют (усталостное разрушение). В промежуточной области ( $10^2 < N < 10^5$ ) разрушение носит смешанный характер (малоцикловое разрушение). Если на элемент конструкции действует высокая температура (для алюминиевых сплавов выше  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , для стальных и титановых сплавов выше  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , для

жаропрочных сплавов свыше 600 С°), но в этом случае рассматривается так называемая длительная прочность материала.

**Качество КЭМ** или, по её составляющим: качество общей постановки задачи, качество сети КЭ, качество модели материала, качество задания граничных условий – важнейший вопрос как степени доверия анализу, так и времени его выполнения. Поэтому отработка общего подхода к моделированию структуры и материала, критериев использования тех или иных типов КЭ, оптимальной густоты сети, должна быть проведена на тестовых задачах по обсчёту экспериментальных данных. Точность решения задач может ограничиваться возможностями вычислительной техники и временем счёта. Необходим здравый подход, чтобы найти способы уложиться, как в ресурсные ограничения, так и в требуемые временные рамки.

При анализе также необходимо учитывать влияние технологии, допустимые дефекты в заготовках и сварочных швах, микро и макроструктуру, остаточные напряжения первого, второго и третьего рода, нагартовку, поверхностный наклёп, растравливание, наводораживание, альфирование поверхностного слоя на титановых сплавах, влияние защитных покрытий, технологические методы повышения прочностных характеристик материалов и конструкций (конструкционное упрочнение – создание в конструкции напряжённого состояния, компенсирующего рабочее - поверхностное упрочнение ППД, ТМУ, вибро-ЭХО, поверхностная закалка, виброшлифовании т.д.), повышающие сопротивление усталости.

*Практически всеми вопросами, которые просто перечислены и коротко разъяснены выше и приходится по крупному заниматься специалисту по прочности. Если на каждом из этих вопросов остановиться поподробнее, то каждый из них может быть предметом очень пристального изучения и требует серьёзной работы с имеющейся в литературе и в отчётах предприятий информацией. В конечном счёте результаты анализа всей информации, имеющейся на предприятии,*

*собранные в единую систему и являются тем опытом, на базе которого строится процесс проектирования и доводки двигателя. Именно этот опыт, наряду с владением современным инструментарием и определяет в конечном счёте качество и квалификацию специалиста.*

### 3 Понятие о напряжениях и деформациях

Напряжения будем рассматривать в прямоугольной системе координат  $OXYZ$ . Пусть твердое тело произвольной формы находится в равновесии под действием поверхностных и объемных сил. Выберем в теле некоторую произвольную точку  $A$  с координатами  $x, y, z$ . Рассечем тело произвольной плоскостью, проходящей через точку  $A(x, y, z)$ , на две части и одну из них отбросим (рисунок 1). Угловое положение плоскости сечения в пространстве будем определять направлением вектора нормали  $\vec{V}$ .

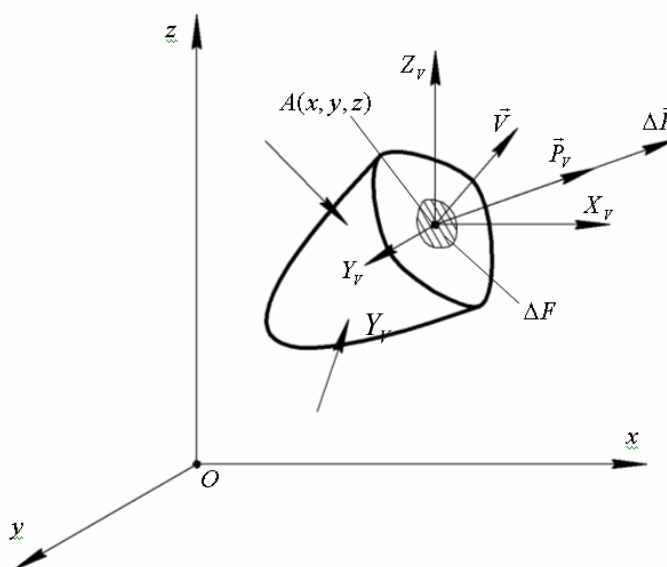


Рисунок 1 – Полное напряжение  $\vec{P}_V$  в точке  $A$  на площадке  $\Delta F$  с нормалью  $\vec{V}$

На поверхности сечения будут действовать поверхностные силы. Выделим в окрестности точки  $A(x, y, z)$  сечения площадку площадью  $\Delta F$ . На

этой площадке будет действовать поверхностная сила  $\Delta \vec{P}$ . Отношение  $\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta F}$

называется средним напряжением на площадке  $\Delta F$ . Предел отношения  $\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta F}$

при  $\Delta F \rightarrow 0$  называется полным напряжением в точке  $A$  на площадке с

нормалью  $\vec{V}$ . Обозначим его как  $\vec{P}_V$ . Таким образом, 
$$\vec{P}_V = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta F}.$$

В общем случае полное напряжение  $\vec{P}_V$  не совпадает с направлением нормали  $\vec{V}$ . Поэтому кроме величины полного напряжения, необходимо знать его направление в пространстве. Удобнее вместо полного напряжения рассматривать его составляющие по координатным осям  $X_V$ ,  $Y_V$  и  $Z_V$ .

Проекцию полного напряжения на нормаль будем обозначать  $\sigma_V$  и называть нормальным напряжением в точке  $A(x, y, z)$  на площадке  $\Delta F$ . Проекцию полного напряжения на площадку  $\Delta F$  будем обозначать  $\tau_V$  и называть касательным напряжением в точке  $A(x, y, z)$  на этой площадке.

Выделим на площадке  $\Delta F$  два взаимно перпендикулярных направления  $\vec{\eta}$  и  $\vec{\xi}$  (рисунок 2).

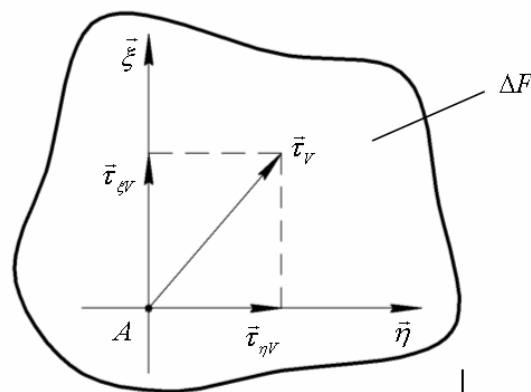


Рисунок 2 – Касательные напряжения на площадке  $\Delta F$

Проекции касательного напряжения  $\tau_V$  на эти направления будем обозначать  $\tau_{\eta V}$  и  $\tau_{\xi V}$ . В сечениях, нормальных координатным осям нижние индексы  $V$ ,  $\eta$  и  $\xi$  у напряжений будем заменять индексами соответствующих координатных осей. Например, на площадке, нормальной оси  $x$  будут действовать нормальное  $\sigma_x$  и касательные  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{zx}$  напряжения (первый нижний индекс обозначает направление действия касательных напряжений, а второй – нормаль к площадке, на которой они действуют). Для напряжений принято следующее правило знаков. Нормальное напряжение

считается положительным, если оно вызывает растяжение. В этом случае нормальное напряжение совпадает с направлением внешней нормали к площадке, на которой оно действует. На площадке с положительно направленной внешней нормалью касательное напряжение считается положительным, если его направление совпадает с направлением соответствующей координатной оси. На площадке с отрицательно направленной внешней нормалью касательное напряжение считается положительным если его направление противоположно направлению соответствующей координатной оси. На рисунке 3 изображены положительные нормальные и касательные напряжения.

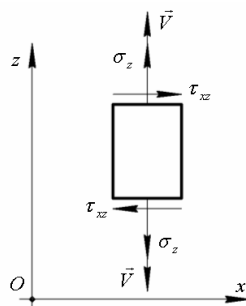


Рисунок 3 – Площадки с положительными нормальными и касательными напряжениями

Параллелепипед с напряжениями действующими на сторонах показан на рисунке 4.

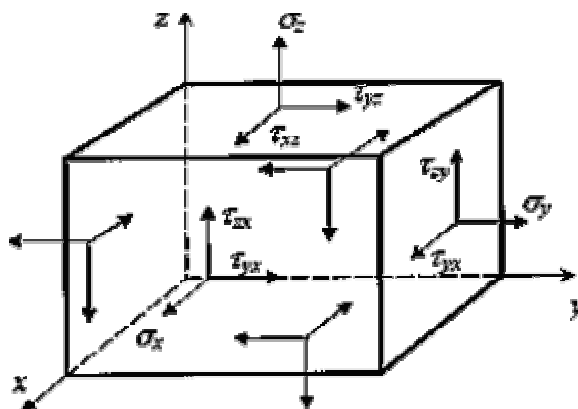


Рисунок 4 – Параллелепипед с действующими на сторонах напряжениями



#### 4 Конструкционная прочность материалов. Кратковременные прочностные и конструкционные характеристики.

Важным аспектом обеспечения прочности деталей является правильный выбор и обеспечение высоких характеристик применяемых материалов.

Под **конструкционной прочностью материалов** подразумевается его прочность в реальных условиях нагружения, с учетом геометрических, металлургических и технологических факторов. Работоспособность конструкции зависит не только от механических и физических характеристик, но и от всего комплекса свойств применяемого материала, с учетом сложных условий нагружения, технологии изготовления, особенностей работы детали и стабильности свойств в течение всего ресурса. При выборе материалов важно правильно оценить условия работы детали и применить материал наиболее полно соответствующий условиям нагружения.

Оценку прочностных и эксплуатационных характеристик материалов проводят на основе изучения их механических (прочностных), физических и технологических характеристик. Они определяются путем различных механических испытаний образцов, изготовленных из исследуемых материалов. Вид образцов для испытаний на растяжение, изготовленных показан на рисунке 1.

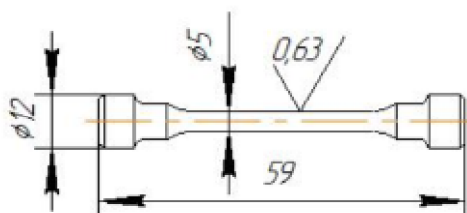


Рисунок 1 - Круглый образец для испытаний на растяжение

Следует отметить, что механические характеристики материалов в связи с колебаниями технологии изготовления, термообработки, химического состава и др. могут иметь статистический разброс значений. Поэтому

изучение механических характеристик должно проводиться на группе образцов, а результаты их испытаний должны подвергаться **статистической обработке**.

Механические характеристики условно можно разделить на **кратковременные (не зависящие от времени)** или проводимые при кратковременных испытаниях и **длительные (зависящие от времени нагружения)**.

Изучение механических характеристик материала начинается с определения диаграммы растяжения. Это наиболее простое испытание на одноосное растяжение до разрушения, при котором к образцу прикладывается растягивающая нагрузка и регистрируется зависимость удлинения образца от величины приложенной нагрузки. В результате испытаний образцов на испытательной машине получают зависимость  $\delta=F(P)$ , где  $\delta$  - взаимное перемещение захватов испытательной машины,  $P$  – усилие прикладываемое к образцу. Зависимость  $\delta=F(P)$  называется машинной диаграммой, потому, что величина  $\delta$  больше удлинения рабочей части образца из-за того, что в ней участвуют деформации захватов и нагруженных элементов испытательной машины.

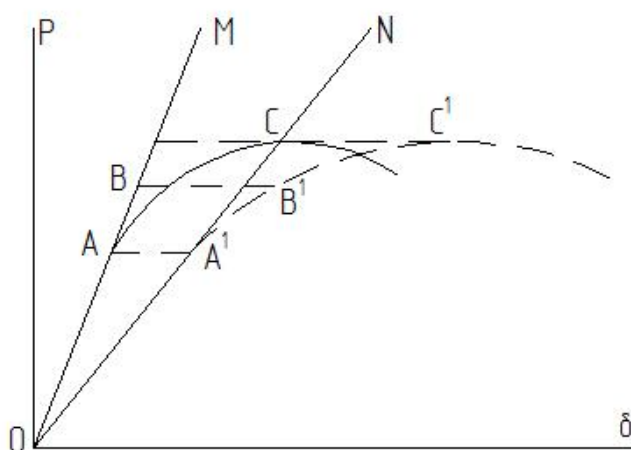


Рисунок 2 - Схема корректирования машинной диаграммы.  $OA^1B^1C^1$  – записанная машинная диаграмма,  $OABC$  - корректированная диаграмма

Из точки «О» (см. рисунок 2) Строят две линии:  $ON$  и  $OM$ . Линия  $ON$  является продолжением начального прямолинейного участка или

касательной в начале координат к машинной диаграмме  $OA^1B^1C^1$ . Наклон линии  $ON$  к оси  $\delta$  меньше чем линии  $OM$ , так как он определяется не только деформациями образца, но и деформациями нагруженных элементов испытательной машины. Линия  $OM$  строится по уравнению:

$$P = \frac{\delta E F_0}{l_0},$$

где  $l_0$  – начальная длина рабочей части образца;

$E$  – модуль упругости материала образца;

$F_0$  – площадь поперечного сечения образца.

Корректированная диаграмма  $OABC$  строится горизонтальным смещением точек машинной диаграммы  $OA^1B^1C^1$  влево на величину между лучами  $ON$  и  $OM$ . По корректированной машинной диаграмме  $OABC$  на основании формул:  $\sigma = \frac{P}{F_0}$  и  $\varepsilon = \frac{\delta}{l_0}$  строится условная диаграмма растяжения материала. Пример диаграммы растяжения приведен на рисунке 3. Диаграммы растяжения материалов определяют при комнатной температуре и рабочих температурах детали. Напряжения -  $\sigma$  на диаграмме растяжения являются условными, потому что в процессе нагружения площадь образца уменьшается, что не учитывается при их определении. Однако в области малых деформаций эта погрешность не велика, так как в этой области уменьшение площади не велико.

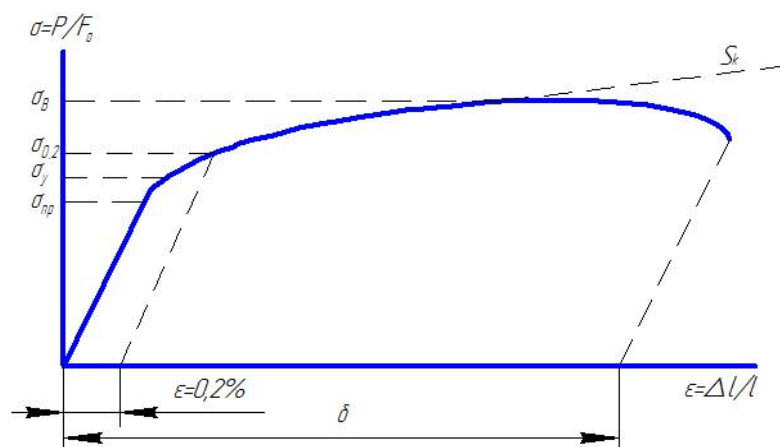


Рисунок 3 - Типичная диаграмма растяжения металлов

По диаграмме растяжения определяют:

1. **Предел прочности** материала (предел временного сопротивления

разрыву):  $\sigma_b$  - условное напряжение, соответствующее максимуму растягивающей силы Р. Предел прочности материала -  $\sigma_b$  - один из важнейших параметров прочности, показывающий способность материала выдерживать внешние кратковременные нагрузки или длительные нагрузки, действующие при низких температурах.

При оценках прочности деталей работающих на срез и кручение используют характеристику сопротивления срезу -  $\tau_b$  - это условное касательное напряжение, получаемое делением максимальной величины нагрузки при срезе на первоначальную площадь поперечного сечения образца. Приблизительно можно считать, что предел прочности при сдвиге равен:  $\tau_b = (0.5... 0.7) \sigma_b$ .

2. **Предел текучести:**  $\sigma_{0.2}$  - условное напряжение, при котором образец получает остаточную деформацию  $\varepsilon=0.2\%$  от первоначальной длины.

Соотношение предела прочности и предела текучести для различных классов металлов составляет примерно:

$\sigma_{0.2}=0.5\sigma_b$  - для нетермообработанных сталей и сплавов,

$\sigma_{0.2}=0.8\sigma_b$  - для термообработанных сталей и сплавов,

$\sigma_{0.2}=0.9\sigma_b$  - для титановых сплавов.

3. **Предел упругости:**  $\sigma_y$  ( $\sigma_{0.01}$ ) - условное напряжение, определяющее область упругих деформаций, при котором образец получает остаточную деформацию  $\varepsilon=0.01\%$  от первоначальной длины.

4. **Предел пропорциональности:**  $\sigma_{np}$  ( $\sigma_{0.001}$ ) – условное наибольшее напряжение, при котором зависимость между напряжениями и деформациями практически линейна, при котором образец получает остаточную деформацию  $\varepsilon=0.001\%$  от первоначальной длины.

5. **Коэффициент Пуассона:**  $\mu$  - отношение относительного поперечного сужения к относительному продольному удлинению. При упругом деформировании для всех металлов принимают величину  $\mu=0,3$ , при пластическом -  $\mu=0,5$ .

6. **Модуль упругости** (модуль Юнга):  $E = \sigma/\varepsilon_{np}$  - коэффициент пропорциональности в зависимости  $\sigma=E \varepsilon$  которая приближенно описывает поведение материала в области  $0 < \sigma < \sigma_{0.001}$ .

7. **Модуль сдвига**:  $G$  - отношение касательного напряжения при сдвиге к соответствующему углу сдвига в области пропорциональной зависимости  $\tau = G\gamma$  ( $G = \tau/\gamma$ ), (рисунок 4). Между величинами  $E$  и  $G$  существует связь:  $G = E/2(1+\mu)$ .

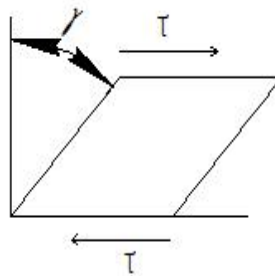


Рисунок 4 – Сдвиг площадки

Наиболее простыми примерами, показывающими влияние модулей упругости на деформативность деталей, являются примеры растяжения изгиба и кручения стержней см. рисунок 5.

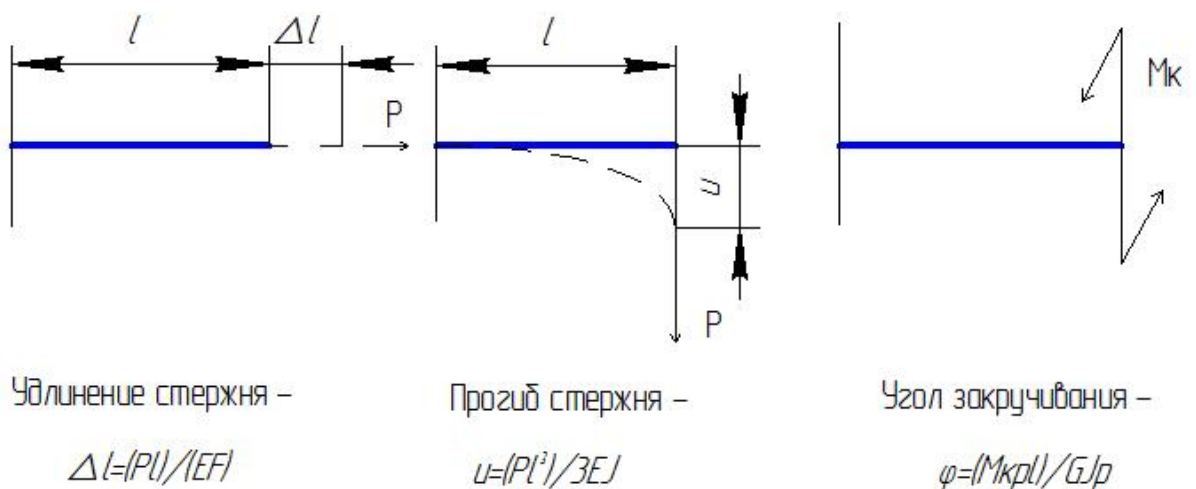


Рисунок 5 - Примеры растяжения изгиба и кручения стержней.

Деформации одной конструкции, при ее изготовлении из разных

материалов под действием одинаковой внешней нагрузки будут различны. Отличия деформаций пропорциональны отношению модулей упругости материалов.

Величины модулей упругости для основных материалов с изотропной структурой, применяемых в авиационном двигателестроении, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - величины модулей упругости основных типов материалов

Материал	Модуль упругости, МПа
- магниевые сплавы	$(0.4... 0.5) \times 10^5$
- алюминиевые сплавы	$(0.68... 0.75) \times 10^5$
- титановые сплавы	$(1.0... 1.2) \times 10^5$
- бронзы	$(1.2... 1.4) \times 10^5$
- стали и сплавы на основе никеля с равноосной мелкозернистой структурой	$(1.8... 2.2) \times 10^5$

Определение модуля упругости по диаграмме растяжения требует большой точности измерений и специальных образцов с большой рабочей частью. Поэтому для определения модуля упругости часто используют динамический метод, основанный на известных соотношениях между частотой колебаний стержней простейшей формы (как правило, круглых стержней постоянного сечения) и модулем упругости. Модуль упругости можно определить по первой форме продольных колебаний:

$$E = 4l^2 \rho f_p^2$$

или первой формы поперечных колебаний:

$$E = \frac{4\rho S}{I} \left( \frac{\pi l^2}{4,730^2} f_p \right)^2,$$

где  $\rho$  - плотность материала;

$l$  – длина стержня;

$S$  – площадь поперечного сечения;

$I$  – момент инерции поперечного сечения;

$f_p$  – резонансная частота первой формы колебаний.

Резонансная частота первой формы колебаний -  $f_p$  связана с собственной частотой колебаний стержня  $f_c$  известным соотношением:

$$f_p = f_c \left(1 - \frac{\delta^2}{8\pi^2}\right),$$

$\delta$  - логарифмический декремент колебаний.

Для уменьшения погрешности определения собственных частот колебаний, связанной с условиями закрепления стержня его подвешивают на тонких нитях в местах узловых точек, которые при первой форме поперечных колебаний расположены на расстоянии  $0,224l$  от концов стержня.

8. **Относительное удлинение при разрыве** определяется как:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100 \%,$$

где  $l_0$  - начальная длина образца;

$l_k$  - длина образца при разрыве.

9. **Относительное сужение при разрыве:**  $\phi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%$ ,

где  $F_0$  - начальная площадь поперечного сечения,

$F_k$  - площадь поперечного сечения в месте разрыва (в шейке образца).

Если разрушение образца происходит с образованием шейки, то при разрушении площадь его поперечного сечения уменьшается. Поэтому часто определяют величину истинного сопротивления разрыву:  $S_k = P/F_k$ .

Между величинами  $S_k$  и  $\sigma_\epsilon$  можно установить связь исходя из условия  $P = \sigma_\epsilon F_0 = S_k F_k$ . Откуда  $\sigma_\epsilon = S_k (F_k/F_0) = S_k(1-\phi)$  или  $S_k = \sigma_\epsilon/(1-\phi)$ .

Т.к. при образовании шейки остаточная деформация по длине образца распределяется неравномерно, то определяют истинное удлинение при разрыве:

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon),$$

где  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  - условная остаточная деформация.

Т.к. существует связь  $1 + \varepsilon = 1 / (1 - \phi)$ , то для определения истинного удлинения

при разрыве часто используют формулу:  $e = \ln \frac{1}{1 - \phi}$ .

Истинные характеристики сопротивления разрыву  $S_k$  и остаточной деформации при разрыве “ $e$ ” играют достаточно важную роль в оценках надежности и прочности. Так по величине  $S_k$  судят о сопротивлении материала пластическому разрушению путем сдвига, т.е. вязкому, замедленному разрушению. Величина “ $e$ ” определяет сопротивление материала повторно-статическому, малоцикловому нагружению.

На величины прочности и пластичности  $S_k$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $e$  влияют температура испытания, скорость нагружения, термообработка, структура материала. С увеличением температуры величины  $S_k$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0.2}$  уменьшаются, а величины  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $e$ , как правило, увеличиваются. Следует иметь в виду, что для жаропрочных никелевых сплавов в интервале температур  $t = 700 \dots 900^\circ\text{C}$  наблюдается провал пластичности (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты испытаний литых образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС30 с равноосной структуры

$t, ^\circ\text{C}$	20	600	700	750	800	850	900	950	1000
$\delta, \%$	4,0...9,2	6,8...9,6	4,8...5,6	3,6...4,8	2,4...3,0	3,2...4,0	3,2...3,6	4,0...4,8	7,2...8,8
$\phi, \%$	6,3...10,1	6,6...9,4	4,8...8,6	8,1...8,2	5,8...7,4	5,8...5,9	4,3	4,3...7,0	7,8...8,4

Снижение характеристик пластичности жаропрочных никелевых сплавов при температурах  $t = 700 \dots 900^\circ\text{C}$  требует повышенного внимания к их надежности и работоспособности в этом интервале температур.

Соответственно при понижении температуры растут величины  $S_k$ ,  $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0.2}$  и уменьшаются  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $e$ , т.е. материал в этом случае упрочняется, а пластичность его снижается.



Аналогичное явление упрочнения происходит при повышении скорости деформирования. Поэтому стандартные испытания на растяжение проводят при низких и близких между собой скоростях нагружения  $V=3...100$  м/мин, где чувствительность материала к скорости деформирования невелика. При быстром нагружении, например при пробивании корпуса двигателя оборвавшейся лопаткой, летящей со скоростью  $V=450... 500$  м/сек - величина предела прочности увеличивается и составляет  $(\sigma_b)_{y0} \approx 1.3(\sigma_b)_{cm}$ .

При закалке или старении материала происходит его упрочнение, и, соответственно, увеличиваются характеристики прочности  $S_k$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$  и уменьшаются характеристики пластичности -  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $e$ . При отжиге или отпуске материала происходит обратное явление. Т.е. кратковременные характеристики материала зависят от режима термообработки. Материалы деталей, изготавливаемых методом литья, имеют, как правило, меньшую пластичность, чем материалы деталей, изготавливаемых штамповкой.

Для поликристаллических материалов с изотропной равноосной структурой с уменьшением размера кристаллов (зерна) характеристики пластичности увеличиваются. Поэтому при выборе и отработке режимов термообработки необходимо стремиться к однородной (равнозернистой) и мелкозернистой структуре.

### **Контроль характеристик материала в производстве**

При изготовлении особо ответственных деталей ГТД (детали первой группы контроля), таких как рабочие и сопловые лопатки турбины, диски рабочих колес компрессора и турбины, силовые корпуса и др, как правило, для каждой заготовки, контролируются величины прочностных характеристик материала деталей:  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ . Контроль прочностных характеристик материала может осуществляться прямым измерением на образцах свидетелях, отлитых совместно с деталью или вырезанных из специальных мест в заготовках деталей (при заготовках, изготовленных методом штамповки).

Для менее ответственных деталей или для деталей первой группы контроля, серийное изготовление которых хорошо налажено и не допускает отклонений по прочностным свойствам материала, для контроля состояния материала используются неразрушающие методы контроля твердости, которые проводят путем вдавливания в материал детали стального шарика (метод Бринеля) или алмазного конуса (метод Роквелла).

**Твердость по Бринелю** используется для контроля состояния относительно «мягких» материалов – магниевых, алюминиевых, медных, титановых и никелевых сплавов, а также незакаленных конструкционных сталей без поверхностного упрочнения и наклепа. Твердость по Бринелю определяется как:

$$HB = \frac{P}{F_{\text{ш}}} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $P$  - усилие вдавливания;

$D$  - диаметр шарика;

$d$  - диаметр отпечатка;

$F_{\text{ш}}$  - площадь шаровой поверхности отпечатка.

Размерность величины твердости по Бринелю – HB – кгс/мм<sup>2</sup> или кгс/см<sup>2</sup>. Для испытаний на твердость по Бринелю обычно используют стальные шарики диаметром Ø2,5мм, Ø5мм или Ø10мм при усилиях вдавливания соответственно 700, 1500 и 3000кгс.

Для конструкционных сталей без поверхностного упрочнения и наклепа между твердостью по Бринелю и пределом прочности существует связь:  $\sigma_s = (0.33 - 0.36) HB$ . Для остальных материалов надежной корреляции между твердостью по Бринелю и пределом прочности экспериментально не обнаружено.

**Твердость по Роквеллу** используется для контроля твердых материалов – закаленных сталей и сталей с поверхностным упрочнением, наклепом, а также с цементированной или азотированной поверхностью.

Твердость по Роквеллу определяется на специальном унифицированном приборе путем вдавливания в поверхность детали алмазного конуса с нормированными размерами и выражается отвлеченным числом:

$$HR_c = k - \frac{H - h}{i},$$

где индекс  $c$  - указывает шкалу прибора;

$h$  - глубина вдавливания алмазного конуса по действием предварительной нагрузки в 10кгс;

$H$  - окончательная глубина вдавливания под действием нагрузки в 150кгс;

$k$  - коэффициент, для шкалы "С" -  $k=100$ ;

$i$  - цена деления шкалы прибора, для шкалы "С" -  $i=0.002$ .

Все контролируемые характеристики свойств материала должны быть не ниже границ по техническим условиям (ТУ) на приемку детали, по которым оцениваются запасы прочности в деталях.

Минимальный уровень свойств по ТУ - [ $S_{my}$ ] должен быть оптимальным и определяться на основе статистического анализа результатов испытаний образцов свидетелей или образцов вырезанных из заготовок деталей. Если уровень свойств материала завышен, это может привести к неоправданно завышенному количеству забракованных деталей, если занижен, то к завышению веса конструкции и ее удорожанию.

## 5 Теория предельных напряженных состояний

Разрушение детали как твердого тела представляет собой процесс его разделения на части под действием внешних нагрузок. Разрушение под действием статической нагрузки может происходить с накоплением значительных пластических деформаций и без пластических деформаций. В зависимости от степени пластических деформаций принято различать два основных вида разрушения: вязкое и хрупкое. По проблеме разрушения имеется большое количество работ, в которых вязкое и хрупкое разрушение рассмотрены как на атомном и микроструктурном уровне, так и в макромасштабе. Инженерная теория разрушения в основном рассматривает разрушение макротел и ее цель заключается в предотвращении разрушения деталей при работе.

С этой точки зрения вязкое разрушение - это разрушение, которое наступает после значительной пластической деформации. Поэтому такое разрушение можно заметить и предотвратить на ранней стадии. Хрупкое разрушение происходит лавинообразно (для хрупкого разрушения характерна высокая скорость развития трещин  $\approx 0,4...0,5$  от скорости распространения звука в материале) без заметных пластических деформаций. Следует отметить, что большинству реальных материалов свойственно смешанный тип разрушения (одновременно вязкое и хрупкое). Разделение на чисто вязкое и чисто хрупкое разрушение условно и оценивается по преобладанию того или иного вида.

Важным в обеспечении надежности является выбор таких материалов и создание таких конструкций, разрушение которых происходило бы замедленно и его можно было бы обнаружить на ранних стадиях при регламентных осмотрах двигателя в процессе его эксплуатации

Основное различие между вязким и хрупким разрушениями заключается в энергоемкости:

- распространение вязкой трещины происходит за счет значительной энергии, подводимой извне,
- распространение хрупкой трещины происходит за счет высвобождения накопленной в системе упругой энергии, поэтому для развития хрупкой трещины не требуется подвод энергии извне.

Поэтому с точки зрения надежности (хрупкое разрушение происходит быстро, вязкое разрушения - замедленно и поэтому его можно обнаружить на ранней стадии развития) в рабочих условиях материал и конструкция детали не должны обладать склонностью к хрупкому разрушению.

Критерием прочности стержней при одноосном напряженном состоянии является предел прочности материала, который определяется по диаграмме растяжения. При плоском или объемном напряженном состоянии для оценки критериев разрушения используют различные теории прочности, которые подробно рассматривают в курсе сопротивления материалов:

- теория наибольших нормальных напряжений;
- теория наибольших линейных деформаций;
- теория наибольших касательных напряжений;
- энергетическая теория формоизменения и др.

В настоящее время наибольшее распространение получила теория Мора для материалов различно сопротивляющихся растяжению и сжатию. В соответствии с теорией Мора за критерий разрушения принимается равенство:  $\sigma_b = \sigma_1 - k\sigma_3$ ,

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные напряжения (см. рисунок 1),  $\sigma_b$  – предел прочности материала,  $k = \frac{[\sigma_b]_{раст}}{[\sigma_b]_{сж}}$ ,  $[\sigma_b]_{раст}$ ,  $[\sigma_b]_{сж}$  – пределы прочности при растяжении и сжатии.

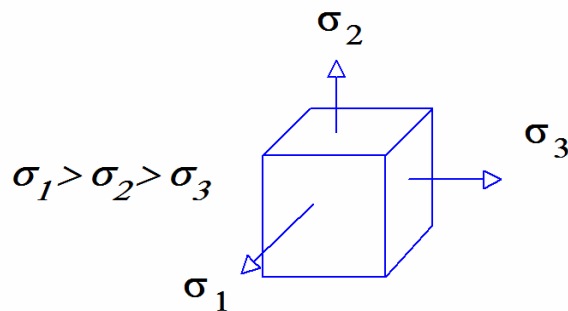


Рисунок 1 – главные напряжения на площадке

Если принять, что пределы прочности на растяжение и сжатие равны, т.е. величина  $k=1$ , то теория разрушения Мора совпадает с теорией наибольших касательных напряжений.

Установлено, что один и тот же материал в зависимости от скорости нагружения, температуры испытания, вида напряженного состояния может иметь и хрупкое и вязкое разрушение. При не одноосном напряженном состоянии степень пластической деформации при разрушении зависит от жесткости напряженного состояния. Пластичный при испытании на простое растяжение материал в конструкции может дать хрупкий излом, если характер напряженного состояния конструкции (жесткость напряженного состояния) такой, что пластические деформации, протекающие вследствие сдвига, затруднены.

Жесткость напряженного состояния часто характеризуют отношением:

$$\gamma_p = \frac{\sigma_1}{\sigma_i},$$

где  $\sigma_1$  - максимальное главное напряжение;

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \text{интенсивность напряжений.}$$

Условный предел текучести при не одноосном напряженном состоянии может быть связан с жесткостью напряженного состояния и пределом текучести при простом растяжении зависимостью:

$$\sigma_{02} = \gamma_p [\sigma_{02}]^{\text{раст}}, \quad (1)$$

где  $[\sigma_{02}]^{\text{раст}}$  - предел текучести при простом растяжении образца.

При  $\gamma_p = [\sigma_b]^{раст} / [\sigma_{02}]^{раст}$  из (1) получим, что  $\sigma_{02} = [\sigma_b]^{раст}$ . (2)

В соответствие с (2), при напряженном состоянии с жесткостью  $\gamma_p = [\sigma_b]^{раст} / [\sigma_{02}]^{раст}$  разрушение произойдет хрупко, без больших пластических деформаций. При равномерном трехосном напряженном состоянии  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , соответственно  $\gamma_p = \infty$ , поэтому любой материал должен разрушаться хрупко.

Объемное или плоское напряженное состояние в конструкции может быть вызвано механическими напряжениями, концентраторами напряжений как конструктивными, так и связанным и с наличием дефектов и трещин в материале, остаточными технологическими напряжениями после холодной обработки и в местах сварки или температурными напряжениями при неравномерном нагреве детали. Для снятия остаточных технологических напряжений в деталях применяют термообработку - отпуск.

Различный характер разрушения деталей (вязкий или хрупкий) из одного и того же материала может быть объяснен двумя различными параметрами, определяющими прочность материала: сопротивлением отрыву, определяющим хрупкое разрушение и сопротивлением сдвигу, определяющим вязкое разрушение. Характеристика сопротивления отрыву не зависит от условий испытания (температуры, скорости нагружения, вида напряженного состояния и т.д.). Сопротивление сдвигу зависит от условий испытания: скорости нагружения, температуры и др.

В 1936г Н.Н.Давиденков (1879-1962гг, акад. АН УССР с 1939г) для оценки характера разрушения предложил схему, учитывающую двойственный характер прочности. По этой схеме, показанной на рисунке 2, на диаграмму растяжения наносятся две характеристики прочности материала - сопротивление отрыву и сопротивление сдвигу. Если диаграмма растяжения (зависимость  $S=S(\epsilon)$ ) первоначально пересекает характеристику сопротивления сдвигу -  $S_k$ , то разрушение детали будет вязкое, если характеристику сопротивления отрыву -  $S_t$ , то хрупкое.

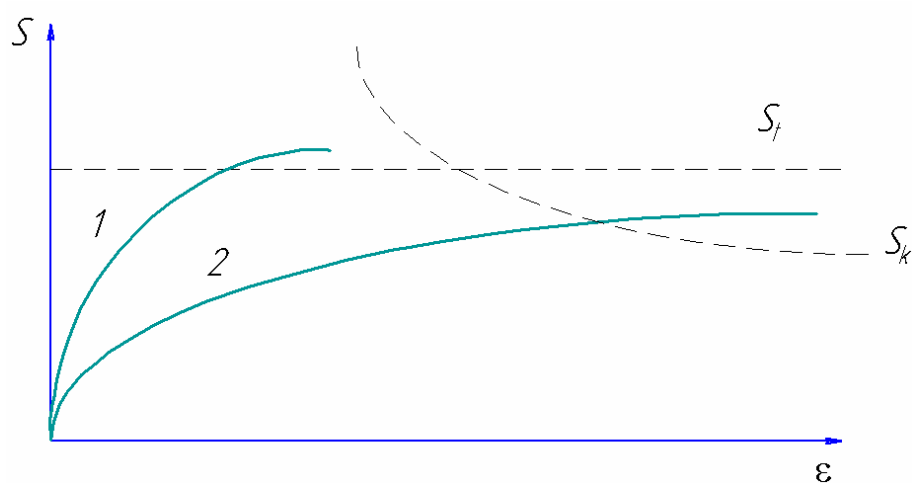


Рисунок 2 - Схема вязкого и хрупкого разрушений

Схема вязкого и хрупкого разрушений, показанная на рисунке 2, более отвечает современным представлениям, если под напряженностью детали и характеристиками сопротивления отрыву и сдвигу понимать не их средние, а локальные значения в местах концентрации напряжений.



## **6 Методы испытаний и оценки прочностной надежности**

Не менее важным, чем конструкторское и технологическое обеспечение является экспериментальное подтверждение наличия высоких характеристик надежности и ресурса.

После завершения доводки надежность и соответствие условиям технического задания проверяется комплексом сертификационных испытаний, который состоит из “специальных” и “ресурсных” испытаний в составе двигателя.

**Специальные испытания двигателя** предназначены для подтверждения соответствия параметров работы и надежности функционирования систем условиям ТЗ, прочностной надежности, надежности конструкции при работе в штатных и экстремальных условиях. Объем специальных испытаний двигателей, эксплуатируемых в настоящее время в России, оговаривается нормами летной годности двигателей воздушных судов - “Авиационные правила, часть 33”. “Прочностная” часть специальных испытаний включает проверку вибрационного состояния узлов и двигателя, деформативности и статической прочности корпусов и роторов, температурного состояния деталей, осевых сил на подшипники и др. “Специальные” испытания проводят в лабораторных условиях, на стендах разработчика двигателя, в термобарокамере ЦИАМ, на летающей лаборатории, при летных испытаниях.

При планировании специальных испытаний рекомендуется их объединение в группы, которые выполняются за один запуск или одну постановку двигателя на стенд.

Завершающей стадией сертификационных испытаний являются ресурсные испытания двигателя, его основных деталей и узлов. Ресурсные испытания проводят после успешного завершения специальных испытаний.

**Ресурсные испытания** обеспечивают экспериментальное подтверждение надежности, эффективности конструктивных и технологических

мероприятий, внедряемых в конструкцию основных деталей и двигателя в целом. Ресурсные испытания двигателя проводят, как правило, по эксплуатационной программе длительных испытаний (ДИ) или по программе ускоренных эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ). ЭЦИ представляют собой моделированные по времени эксплуатационные испытания, эквивалентные по исчерпанию долговечности основных элементов заданному ресурсу.

Для двигателей “большого” ресурса основным видом ресурсных испытаний являются ускоренные ЭЦИ, которые позволяют сократить время и средства на доводку и подтверждение большого ресурса. Сокращение времени испытания при ЭЦИ достигается за счет эквивалентного приведения, на основе гипотез суммирования повреждений, менее нагруженных режимов работы двигателя к более нагруженным. Планирование программ ресурсных испытаний ведется на основе типового полетного цикла (ТПЦ), который включает в себя основные режимы работы и последовательность их выполнения при эксплуатации двигателя в составе самолета. ТПЦ формируется по результатам анализа и статистической обработки условий эксплуатации. Программы ЭЦИ строятся по принципу ускоренного исчерпания ресурса основными деталями и узлами двигателя на основе анализа закономерностей между нагрузкой и долговечностью по каждому виду нагружения или при комплексном воздействии различных видов нагрузок и гипотез суммирования повреждений.

ГТД представляет собой систему взаимосвязанных деталей и узлов с различными условиями нагружения и закономерностями исчерпания долговечности. Поэтому при проведении ЭЦИ двигателя в целом необходимо воспроизведение всего спектра эксплуатационных нагрузок. При проведении ЭЦИ отдельных деталей достаточно воспроизведение основных эксплуатационных факторов, определяющих ресурс испытываемой детали.

Ресурсные испытания наиболее целесообразно проводить для двигателей (или его основных деталей) потенциально имеющих заданный ресурс и

проверенных специальными расчетами и испытаниями на отсутствие критических состояний при крайних сочетаниях нагрузок. Специальные испытания не входят в программу ресурсных испытаний и служат для проверки надежности независимо от ресурса.

### *Планирование ресурсных испытаний основных деталей двигателя*

Большинство деталей ГТД работают в условиях многокомпонентного нагружения. На них действуют длительные статические нагрузки при работе на стационарных режимах, малоцикловые - связанные с запусками, остановами и изменениями работы в процессе полета и высокочастотные - вызываемые рабочими процессами в двигателе.

Для одних деталей определяющим работоспособность является весь комплекс многокомпонентного нагружения, для других преобладающими являются отдельные составляющие нагружения. Характер повреждения детали, определяющий исчерпание ее работоспособности связан с преобладающей нагрузкой.

Планирование ресурсных испытаний деталей начинается с анализа условий их нагруженности в работе и выделении основных факторов, определяющих их работоспособность. Этот анализ проводится по результатам расчетов на прочность, экспериментального определения нагруженности деталей при специальных испытаниях двигателя (при динамическом и статическом тензометрировании, замеры сил, давления воздуха, газа, топлива, масла и др.), оценки состояния и поврежденности детали после наработки и дефектов, проявившихся при доводке или в эксплуатации. Признаками нагрузок, определяющих ресурс, является уровень и характер эксплуатационной напряженности, наличие специфических изменений состояния или характерных дефектов.

По характеру воздействия виды нагружения можно разделить на группы. Каждому виду нагружения соответствует свой вид повреждения или разрушения.

Статические нагрузки при повышенных температурах вызывают накопление необратимых пластических деформаций, изменений микроструктуры материала и др. Малоцикловые термоциклические нагрузки могут вызывать поверхностное растрескивание деталей горячей части двигателя. Малоцикловые механические и вибрационные нагрузки, как правило, вызывают появление усталостных трещин. В контактирующих узлах (подшипниках, шестернях, шлицевых, замковых и фланцевых соединениях, уплотнениях и т.д.) могут проявляться поверхностные дефекты в виде шелушения, питтингов, следов фреттинг–коррозии.

При анализе причин проявления дефектов следует иметь в виду, что часто проявление дефекта может быть связано не с недостатком конструкционной прочности рассматриваемой детали, а с изменением условий ее работы вызванным изменением состояния рядом стоящих элементов двигателя. Так, ослабление затяжки болтов, может привести к увеличению дисбаланса ротора и, как следствие, к повышенной вибронегруженности и дефектам элементов обвязки двигателя. Закоксованность форсунок камеры сгорания или повышенная окружная неравномерность поля давлений или температур могут привести к повышенному вибрационному нагружению лопаток и дисков компрессора или турбины и, как следствие, к их усталостным дефектам. Иногда причиной дефекта может служить некачественное изготовление.

Совершенствование технологии изготовления и контроля на всех стадиях изготовления позволяют устранить случаи проявления подобных дефектов. Анализ дефектов требует всестороннего и досконального исследования причин их возникновения. Дефекты производственного характера должны быть исключены из рассмотрения и анализа условий нагруженности и работоспособности деталей двигателя.

Выявление основных повреждающих факторов, определяющих работоспособность деталей, позволяет квалифицированно планировать их ресурсные испытания. В процессе испытания деталь должна нагружаться в

соответствии с теми режимами работы двигателя, которые преимущественно определяют исчерпание ее ресурса в эксплуатации. На ресурсные испытания должны ставиться детали, изготовленные по штатной технологии и прошедшие тщательный контроль на отсутствие в них производственных дефектов и отклонений.

В зависимости от характера определяющих и воспроизводимых нагрузок ресурсные испытания деталей условно можно разделить на:

- эквивалентные по длительной прочности;
- циклические и термоциклические;
- резонансные и эквивалентно-резонансные;
- эквивалентные по износу и контактной усталости;
- совмещенные по нескольким повреждающим факторам.

### ***Ресурсные испытания деталей, эквивалентных по исчерпанию их длительной прочности***

Испытаниям по проверке длительной прочности, как правило, подвергаются высоконагруженные детали “горячей” части двигателя): лопатки и диски турбины и последних ступеней компрессора, нагруженные элементы основной и форсажной камер сгорания, корпуса, опоры и т.д. - детали, тепловое и напряженное состояние которых таково, что активно проявляются эффекты исчерпания длительной прочности. Подобными испытаниями проверяются также жаростойкость, коррозионная и эрозионная стойкость покрытий и деталей.

Суммарная продолжительность испытания определяется равенством величин накопленных повреждений за испытание и проверяемый ресурс в эксплуатации:

$$N_{исп.} = K_{\tau} N_{экспл.}$$

где  $K_{\tau}$  - нормируемый коэффициент запаса;

***Писп*** и ***Пэкспл*** - величины накопленных повреждений при испытании и в эксплуатации за проверяемый ресурс.

Величины накопленного повреждения ***Писп*** и ***Пэкспл*** определяются в зависимости от цели испытаний, по критериям исчерпания длительной прочности, жаростойкости или эрозионной стойкости. Время наработки на максимальном режиме испытания определяется как:

$$\tau_{исп} = \tau_{р..исп} K_{\tau} П_{экспл} ,$$

где  $\tau_{р..исп}$  - время до разрушения детали при непрерывной работе на режиме испытания.

Испытания проводятся этапами при работе двигателя на максимальном режиме. Продолжительность одного этапа назначается из условия удобства проведения испытания, возможностей двигателя и стенда. Типичная циклограмма проведения одного этапа испытания отдельных деталей показана на рисунке 1.

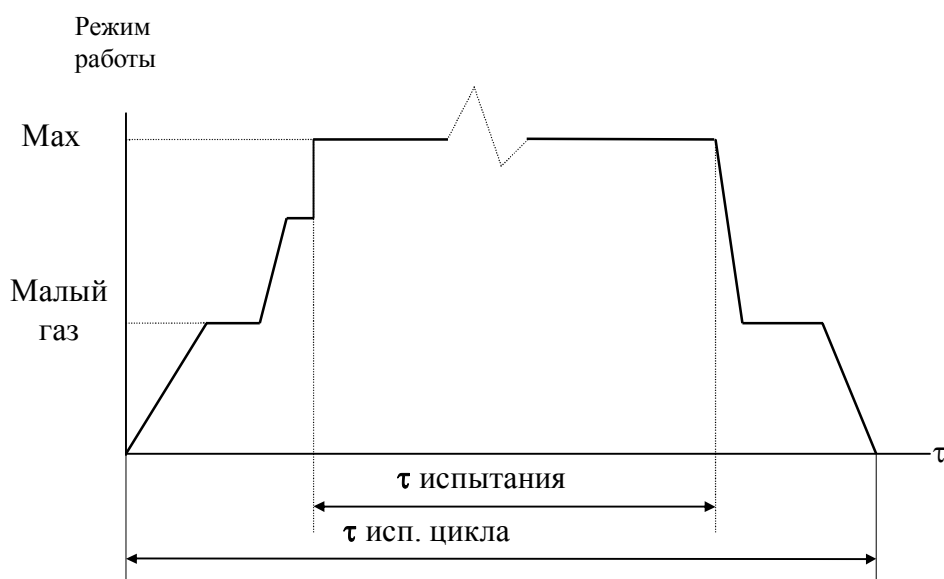


Рисунок 1 - Типичная циклограмма этапа длительных статических испытаний деталей

### ***Циклические и эквивалентно–циклические испытания***

Циклическим испытаниям подвергаются, как правило, высоконагруженные детали, истощение ресурса которых определяется циклическими режимами нагружения: диски компрессора и турбины, охлаждаемые лопатки турбины, некоторые силовые корпуса и т.д. Испытания проводятся как на специальных стендах, так и в составе двигателя.

Циклические испытания выполняются, как правило, последовательным выполнением циклов вида: *запуск ⇒ выход на максимальный режим ⇒ работа на максимальном режиме ⇒ останов двигателя* (цикл типа 1) или: *малый газ ⇒ выход на максимальный режим ⇒ работа на максимальном режиме ⇒ уход на малый газ ⇒ работа на малом газу* и т.д.,

### ***Резонансные испытания***

Резонансным испытаниям подвергаются детали, работоспособность которых определяется способностью сопротивляться вибрационным нагрузкам, возникающих в процессе нормальной работы двигателя. Работоспособность деталей в условиях повышенных вибрационных нагрузок, возникающих при нештатной работе двигателя (помпаж, автоколебания, вибрационное горение в основной и форсажной камере сгорания, пульсирующая подача топлива, отказы в системе регулирования и др.) проверяется специальными испытаниями.

Природа вибрационных нагрузок, возникающих при работе двигателя, может носить газодинамический и механический характер.

Газодинамическое возбуждение обусловлено окружной неравномерностью полей давления в газоздушном тракте двигателя. Вызывает, как правило, кратные роторные гармоники в деталях проточной части и рабочих колесах компрессора и турбины. Механическое возбуждение вызывается недостаточной уравновешенностью роторов, критическими частотами вращения роторов, зубчатыми зацеплениями, подшипниками и др.

Подвержены механическому возбуждению в основном агрегаты и трубопроводы внутренней и внешней обвязки.

Резонансные испытания деталей проводят, как правило, в составе двигателя. Вибрационные нагрузки в деталях не зависимо от источника возбуждения имеют наибольшую интенсивность при резонансных колебаниях. Поэтому резонансные испытания проводят на тех режимах работы двигателя, на которых проявляются резонансные колебания испытываемой детали по всем проявившимся формам колебаний. Нарботка на каждом резонансном режиме работы должна обеспечивать выполнение не менее  $2 \cdot 10^7$  циклов колебаний испытываемой детали.

При резонансных испытаниях деталей статора режим испытаний может задаваться по показаниям тензо- или вибродатчиков, установленных на испытываемую деталь или в штатных местах контроля вибраций двигателя. При испытаниях роторных деталей - по результатам расчетов или предварительно проведенного тензометрирования.



## 7 Теория колебаний

Колебания — это процесс поочередного возрастания и убывания во времени значений какой-либо величины. К колебательным, относятся также импульсные процессы, характеризующиеся однократным переходом от возрастания к убыванию. Термин «вибрация» является синонимом термина «колебания».

Колебания совершаются в какой-либо физической среде. Соответственно различают механические, акустические, электрические и т. п. колебания. Физическая сущность этих колебаний сугубо различна, однако основные законы колебаний во всех случаях одинаковы. Поэтому изучение колебаний выделено в отдельную физическую дисциплину - теорию колебаний. Фактически, анализируются колебания не реальной системы, а некоторой описывающей ее схемы, число степеней свободы, которой существенно зависит от задачи исследований. Основные понятия о колебаниях дает анализ простейшей колебательной системы с одной степенью свободы.

Все колебательные системы принято разделять на линейные и нелинейные. Колебания в линейных системах описываются линейными дифференциальными уравнениями, в нелинейных - нелинейными. Важное значение имеет овладение прежде всего методами анализа колебаний линейных систем.

По характеру взаимодействия колебательной системы с внешней средой различают четыре типа колебательных явлений:

1. Свободные колебания, происходящие без переменного внешнего воздействия и поступления энергии извне;
2. Вынужденные колебания, вызванные и поддерживаемые силовым и (или) кинематическим возбуждением;
3. Параметрические колебания, вызванные и поддерживаемые параметрическим возбуждением, т. е. изменением во времени одного или

нескольких параметров системы (жесткости, сопротивления и т. п.), не зависящих от состояния системы;

4. Автоколебания, возникающие в результате самовозбуждения, т.е. возбуждения системы поступлением энергии от неколебательного источника, которое регулируется движением самой системы.

По виду деформаций деталей при колебаниях различают продольные, изгибные, крутильные и сложные виды колебаний. Большинство деталей авиадвигателей испытывает изгибные колебания.

По форме траектории движения колеблющейся материальной точки различают линейные и угловые (вращательные, крутильные) колебания. Линейные колебания могут быть прямолинейными (по прямой линии), плоскими (в плоскости) и объемными (в некотором замкнутом объеме пространства).

Колебания материальной точки описываются законом движения и параметрами этого закона. Закон движения определяет форму колебаний во времени. Простейшей формой колебаний являются гармонические колебания, изучение которых играет огромную роль в освоении теории колебаний.

Гармонические колебания описываются формулой:

$$x = A \cos(\omega \cdot t - \alpha) = A \cos(2 \cdot \pi \cdot f - \alpha) \quad (1)$$

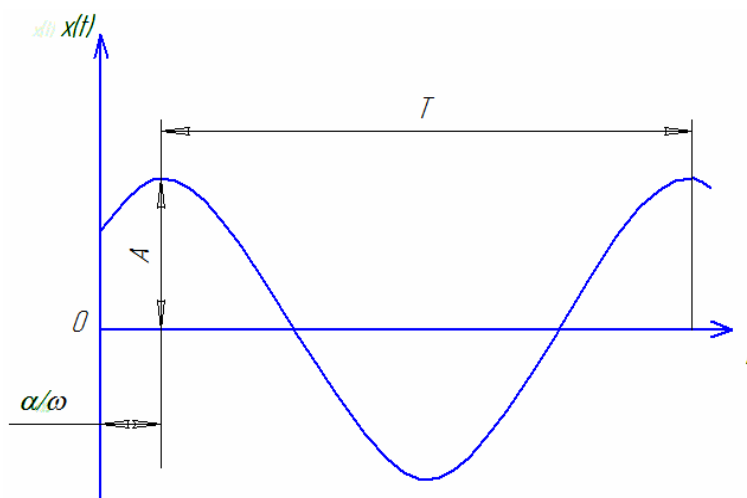


Рисунок 1 – Гармонические колебания

Они характеризуются тремя параметрами: амплитудой, частотой и начальной фазой колебаний. Амплитуда колебаний  $A$  характеризует наибольшее отклонение точки от начального положения (положения покоя). Полный цикл колебаний совершается за время  $T$ , называемое периодом колебаний. По периоду колебаний определяется частота колебаний  $f$ , равная числу полных колебаний (циклов) в единицу времени. Угловая частота  $\omega$  есть производная по времени  $t$  от фазы  $\omega \cdot t - \alpha$  гармонических колебаний и равна числу полных колебаний за  $2\pi$  секунд.

Установим связи между этими параметрами. Из уравнения (1) и рисунка 1 ясно, что за один цикл колебаний фаза изменяется на  $2\cdot\pi$  рад, после чего кривая повторяется. Из отношения  $\omega \cdot T = 2\cdot\pi$  определяется период колебаний и частоты:

$$T = 2\cdot\pi/\omega; \quad f = 1/T; \quad \omega = 2\cdot\pi \cdot f = 2\cdot\pi/T \quad (2)$$

Единица измерения периода — секунда (с), частоты колебаний — Герц (Гц). Угловая частота измеряется в радианах в секунду (рад/с). Она не имеет особого физического смысла, а просто удобна для математических выкладок (упрощает запись формул) и векторной интерпретации колебаний.

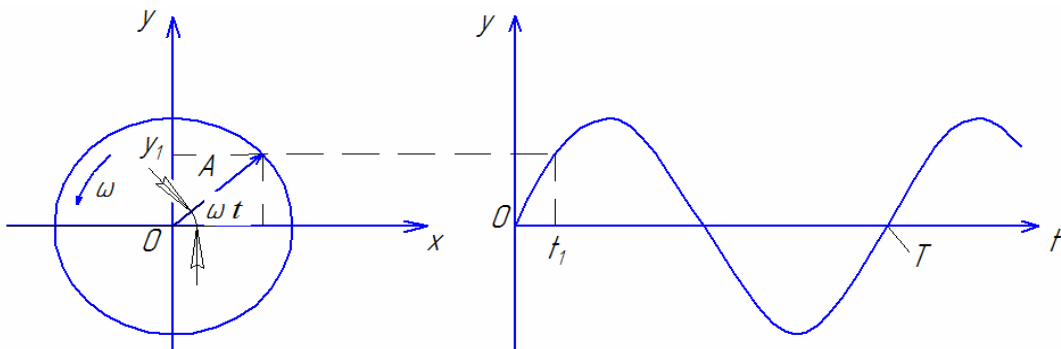


Рисунок 2 – Векторная интерпретация колебаний

Гармонические колебания можно изобразить на векторной диаграмме с помощью вектора  $A$ , вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . При отсчете времени от момента, когда вектор совпадал с осью  $Ox$ , проекции вектора на координатные оси равны:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t); \quad y = A \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Эти проекции изображают прямолинейное движение по соответствующим осям.

Начальный фазовый угол  $\alpha$  определяет положение колеблющейся точки в начальный (отсчетный) момент времени, выбор которого обычно произволен.

Вибрация характеризуется тремя связанными между собой колебательными величинами: виброперемещением  $s(t)$ , виброскоростью  $v(t)$  и виброускорением  $w(t)$ . В случае гармонической вибрации:

$$s = S \sin \omega t; \quad v = ds/dt = \omega S \cos \omega t = \omega \cos \omega t;$$

$$w = \frac{d^2 s}{dt^2} = -\omega^2 S \sin \omega t = -W \sin \omega t$$

Соответственно различают три амплитуды: амплитуду виброперемещения  $S$ , амплитуду виброскорости  $V$  и амплитуду виброускорения  $W$ . Они связаны между собой соотношениями:

$$V = \omega S;$$

$$W = \omega^2 S = \omega V. \quad (3)$$

Виброперемещение измеряется в метрах (м), виброскорость — в метрах в секунду (м/с), виброускорение — в метрах на секунду в квадрате (м/с<sup>2</sup>).

### 7.1 Свободные колебания

Простейшая колебательная система (рисунок 3) включает инерционный элемент (массу  $m$ ), упругий элемент (пружину с коэффициентом жесткости  $C$ ) и диссипативный элемент (демпфер с коэффициентом неупругого сопротивления  $b$ ). Масса предполагается сосредоточенной в точке  $O$ , а пружина и демпфер — невесомыми. Колебания возможны только в вертикальном направлении.

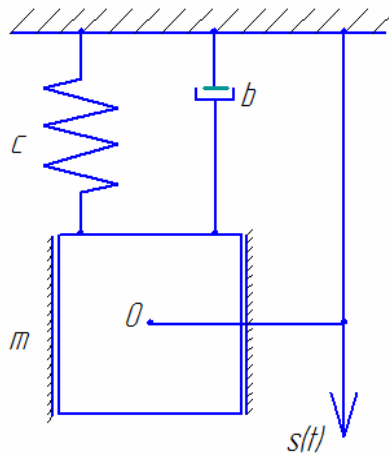


Рисунок 3 – Колебательная система с одной степенью свободы

Эта система обладает одной степенью свободы, положение массы в любой момент времени определяется одной координатой  $s$ . Рассматриваются малые колебания около положения статического равновесия, в пределах которых упругое сопротивление пружины пропорционально перемещению, а неупругое сопротивление демпфера пропорционально скорости движения.

Свободные (собственные) колебания системы возбуждаются одноразовым внешним воздействием — «толчком», задающим массе начальную скорость  $v_0$  либо начальным перемещением массы  $s_0$ . При этом в систему вносится извне в начальный момент времени соответственно кинетическая и (или) потенциальная энергия колебаний.

При отсутствии активной внешней силы характер колебаний определяется только внутренними силами реакции, зависящими от параметров системы. При отклонении системы от состояния равновесия пружина создает восстанавливающую силу  $P_y$ , направленную противоположно этому отклонению. Коэффициент жесткости упругого элемента  $C$  определяется как взятая с противоположным знаком производная зависимости восстанавливающей силы от перемещения, измеряется в Н/м. В рассматриваемой линейной системе пружина подчиняется закону Гука и  $C = const$ . Тогда  $P_y = -c \cdot s$ .

Соответственно демпфер создает направленную против скорости движения диссипативную силу  $P_D$ , вызывающую рассеяние механической энергии системы. Коэффициент сопротивления демпфера  $b$  определяется как взятое с противоположным знаком отношение диссипативной силы к скорости колебаний, измеряется в Н·с/м. При линейном демпфировании  $b = const$  и диссипативная сила определяется формулой Фогта:

$$P_D = -b\dot{s}$$

Дифференциальное уравнение колебаний составляется непосредственно на основе законов Ньютона или вытекающих из них принципов механики, рассматриваемых в курсе «Теоретическая механика». Наиболее общими являются уравнения Лагранжа II рода.

Однако чаще всего уравнения составляют на основе принципа Даламбера, согласно которому сумма всех действующих на систему активных сил, реакций связей и ее инерционной силы  $P_{II}$  равна нулю. В общем случае на массу действует активная сила  $P_a$ , восстанавливающая  $P_y$  и диссипативная  $P_D$  силы реакций. Даламберова сила инерции направлена против ускорения и определяет силу сопротивления движению тела:

$$P_u = -m\ddot{s}$$

Условно считается, что она также приложена к телу. Это позволяет свести уравнения динамики к статическим уравнениям равновесия сил:

$$P_a + P_u + P_D + P_y = 0. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае свободных колебаний активной силы нет ( $P_a = 0$ ) и уравнение равновесия принимает вид:

$$m\ddot{s} + b\dot{s} + cs = 0 \quad (5)$$

Разделив все члены этого уравнения на  $m$ , получим обычную форму однородного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega_0^2 s = 0 \quad (6)$$

В уравнении (6)

$$\delta = b / 2m ; \quad (7)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{c/m} \quad (8)$$

Величины  $\delta$  и  $\omega_0$  определяются только параметрами системы и называются соответственно коэффициентом демпфирования и собственной угловой частотой недемпфированных колебаний системы, с какой система будет колебаться при отсутствии демпфирования (при  $\delta = 0$ ).

Решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (6) принимаем в форме  $s = e^{rt}$ . Подставляя его в уравнение (6), получаем характеристическое уравнение:

$$r^2 + 2\delta r + \omega_0^2 = 0$$

Корни характеристического уравнения запишем в виде:

$$r_{1,2} = -\delta \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Поскольку колебательный процесс реализуется при  $\omega_0 > \delta$ . Тогда решение уравнения колебаний (6) представится суммой решений  $e^{\pm j\omega t}$  с постоянными коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$ , зависящими от начальных условий:

$$s = e^{-\delta t} (C_1 e^{j\omega t} + C_2 e^{-j\omega t}). \quad (9)$$

Здесь

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (10)$$

Величина  $\omega_d$  называется собственной угловой частотой демпфированных колебаний.

Выразим полученное решение в тригонометрической форме с помощью формул Эйлера для комплексных чисел:

$$e^{\pm j\omega t} = \cos \omega t \pm j \sin \omega t.$$

Обозначив  $A = (C_1 + C_2)$ ,  $B = j(C_1 - C_2)$ , получим

$$s = e^{-\delta t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t). \quad (11)$$

Решению (11) можно придать более компактную форму, заменив  $A$  и  $B$  через новые константы  $S$  и  $\alpha$  подстановками  $A = S \cdot \cos(\alpha)$  и  $B = S \cdot \sin(\alpha)$

$$s = Se^{-\delta t} \cos(\omega_d t - \alpha). \quad (12)$$

Определим константы  $S$  и  $\alpha$  из начальных условий.

Пусть в начальный момент колебаний системе заданы начальное смещение массы  $s_0$  и начальная скорость  $v_0$ . Подставляя эти значения в уравнение (12) и в производную этого уравнения при  $t = 0$ , получаем

$$S \cos \alpha = S_0; -\delta s_0 + \omega_d S \sin \alpha = v_0,$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} S &= \sqrt{s_0^2 + \frac{(\delta s_0 + v_0)^2}{\omega_d^2}}; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{\delta s_0 + v_0}{\omega_d s_0}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подставляя выражения (13) в уравнение (12), получаем общее решение для свободных колебаний при произвольных начальных условиях:

$$s = e^{-\delta t} \sqrt{s_0^2 + \frac{(\delta s_0 + v_0)^2}{\omega_d^2}} \cos\left(\omega_d t - \operatorname{arctg} \frac{\delta s_0 + v_0}{\omega_d s_0}\right) \quad (14)$$

Например, если задано только начальное перемещение ( $v_0 = 0$ ), из (14) имеем

$$s = s_0 \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\delta t} \cos\left(\omega_d t - \operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega_0}\right) = s_0 \cos \omega_d t \quad (15)$$

Если задана только начальная скорость при  $s_0 = 0$  (приложен импульс силы  $J$ ), то

$$\begin{aligned} s &= e^{-\delta t} \frac{v_0}{\omega_d} \sin \omega_d t, \\ v_0 &= \frac{J}{m}. \end{aligned} \quad (16)$$

Согласно решению (14) масса совершает свободные затухающие колебания (рисунок 4). При слабом демпфировании (малом значении  $\delta$ ) соседние циклы мало отличаются друг от друга и колебания напоминают



гармонические. Поэтому такие колебания обычно называют «затухающей синусоидой», употребляя термины «амплитуда», «период». Строго говоря, колебания (14) непериодические, с изменяющейся от цикла к циклу величиной максимального отклонения  $S_i$  (амплитудой). Мы также будем пользоваться этими терминами, понимая их условность.

Интервал времени между двумя максимальными отклонениями  $T_d$  называют периодом демпфированных колебаний, частоту

$$f_d = 1/T_d = \omega_d / 2\pi$$

- собственной частотой демпфированных колебаний. Собственная частота колебаний  $f_d$  определяется только параметрами системы ( $m, c, \delta$ ) и не зависит от условий возбуждения колебаний.

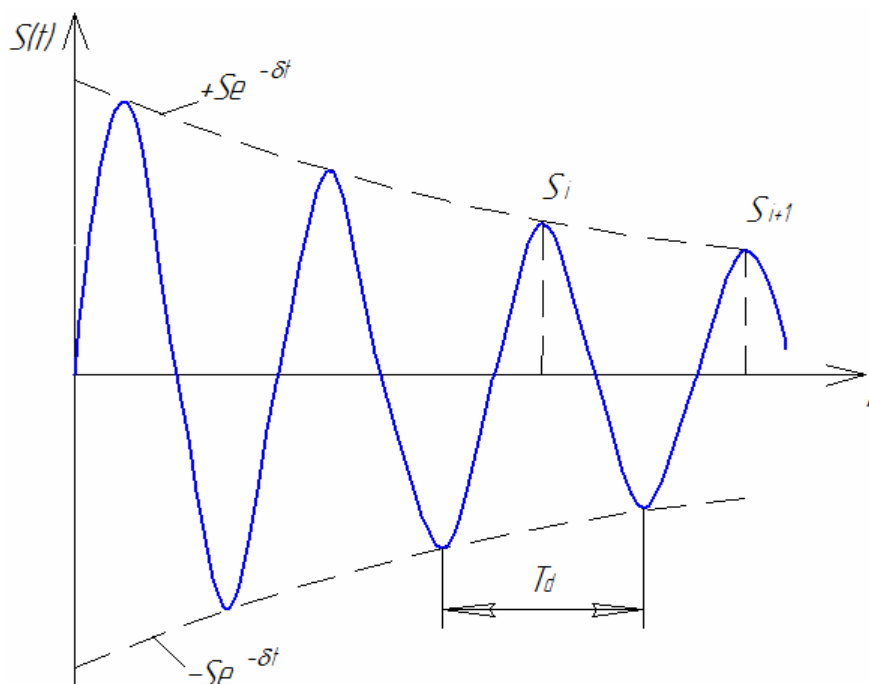


Рисунок 4 - Свободные затухающие колебания

Коэффициент демпфирования  $\delta$  характеризует степень демпфирования системы. Кривые  $\pm Se^{\pm\delta t}$  (рис. 5) называют огибающими свободных затухающих колебаний. В момент времени  $\tau = 1/\delta$  огибающая  $Se^{-\delta t} = S/e$ ,

т. е. за время  $\tau$  амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз. Следовательно, коэффициент  $\delta$  характеризует скорость затухания свободных колебаний. Чем больше демпфирование (чем больше  $\delta$ ), тем быстрее затухают свободные

колебания. При критическом значении коэффициента демпфирования  $\delta_{кр} = \omega_0$  система перестает быть колебательной, т. е. она теряет способность совершать свободные колебания. В другом предельном случае при  $\delta = 0$  колебания становятся гармоническими с постоянной амплитудой  $S$ , определяемой решением (13), и частотой  $f_0$ .

Более удобна безразмерная характеристика затухания. Составим отношение двух последовательных амплитуд:

$$S_i / S_{i+1} = S e^{-\delta t_i} / S e^{-\delta(t_i+T_d)} = e^{\delta T_d}$$

Натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд

$$\Lambda = \ln \frac{S_i}{S_{i+1}} = \delta T_d \quad (17)$$

называют, логарифмическим декрементом колебаний.

Вычислим число колебаний за время  $\tau = 1/\delta$ :

$$n = f_d \tau = \omega_d / T_d = 1/\delta T_d = 1/\Lambda.$$

Следовательно, логарифмический декремент характеризует число колебаний до уменьшения амплитуды в  $e$  раз.

Оценим степень влияния затухания на собственную частоту колебаний.

Запишем формулу (10) в виде:

$$\omega_d / \omega_0 = \sqrt{1 - (\delta / \omega_0)^2} = \sqrt{1 - \beta^2}.$$

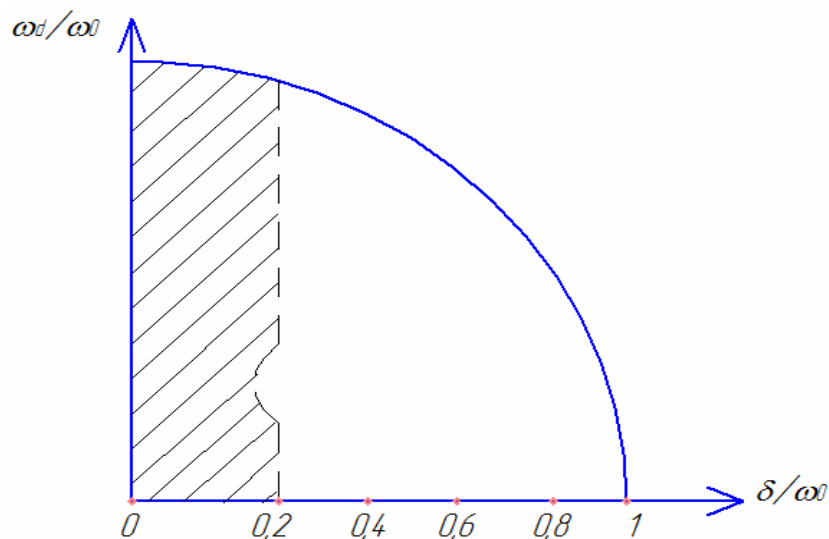


Рисунок 5 - Влияние затухания на собственную частоту колебаний

Это уравнение окружности (рисунок 5). Величина  $\beta = \delta/\omega_0$  называется относительным демпфированием. При критическом коэффициенте демпфирования  $\beta_k = \delta_{кр}/\omega_0 = 1$  частота колебаний равна нулю. В авиационных конструкциях величина относительного демпфирования обычно составляет  $\beta \leq 0,2$ , (заштрихованная зона на рисунке 4), что незначительно снижает собственную частоту (менее чем на 2 %). Таким влиянием демпфирования часто пренебрегают, принимая  $\omega_d = \omega_0$ .

## 7.2 Вынужденные колебания

Рассмотрим колебания при непрерывном воздействии активных внешних сил (при свободных колебаниях действует импульс силы лишь в мгновение начала колебаний или задается начальное смещение массы). Активные внешние силы, являющиеся заданными функциями времени  $P(t)$ , называются вынуждающими, а вызываемые ими колебания — вынужденными. Свободные колебания характеризуются собственной частотой и декрементом колебаний, которые определяются лишь физическими свойствами колебательной системы. Вынужденные колебания определяются физическими свойствами системы и параметрами вынуждающей силы, характеризующими ее интенсивность и частоту.

Пусть на массу  $m$  (см. рисунок 3) действует гармоническая сила  $p(t) = P \cdot \sin(\omega t)$ . Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний отличается от уравнения, свободных колебаний (5) наличием правой части (активной силы):

$$m\ddot{s} + b\dot{s} + cs = P \sin \omega t \quad (19)$$

или

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega_0^2 s = \frac{P}{c} \sin \omega t. \quad (20)$$

Общее решение этого уравнения, как известно из теории дифференциальных уравнений, представляется суммой рассмотренного выше общего решения (12) однородного уравнения (5), которое обозначим  $S_{cb}(t)$ , и частного решения  $S_{вын}(t)$  неоднородного уравнения (20):

$$s(t) = s_{cb}(t) + s_{вын}(t).$$

Решение однородного уравнения описывает затухающие со временем свободные колебания (14), которые обычно не представляют практического интереса. Решение неоднородного уравнения описывает вынужденные колебания. Его можно получить, воспользовавшись методом наложения реакций на действие элементарных импульсов сил, либо методом записи и решения уравнения (20) в комплексной форме, либо методом вариации произвольных постоянных.

В частном случае гармонической силы вынужденные колебания логично представить в форме гармонического колебания с частотой вынуждающей силы  $\omega$ :

$$s_{вын}(t) = S_{вын} \sin(\omega t - \varphi), \quad (21)$$

где  $S_{вын}$  и  $\varphi$  — постоянные, которые надо подобрать так, чтобы они удовлетворяли уравнению (20), превращая его в тождество.

Вычислим первую и вторую производные решения (21):

$$\begin{aligned} \dot{s}_{вын}(t) &= \omega S_{вын} \cos(\omega t - \varphi); \\ \ddot{s}_{вын}(t) &= -\omega^2 S_{вын} \sin(\omega t - \varphi). \end{aligned}$$

Подставим их в уравнение (20), обозначив:

$$\begin{aligned} \Psi &= \omega t - \varphi, \\ \omega t &= \Psi + \varphi : \end{aligned}$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2) S_{вын} \sin \Psi + 2\delta\omega S_{вын} \cos \Psi = \frac{P}{m} (\sin \Psi \cos \varphi + \cos \Psi \sin \varphi).$$

Чтобы это равенство выполнялось в любой момент времени, коэффициенты при синусах и косинусах в левой и правой частях должны быть порознь равны друг другу:

$$(\omega_0^2 - \omega^2)S_{\text{вын}} = \frac{P}{m} \cos \varphi;$$

$$2\delta\omega S_{\text{вын}} = \frac{P}{m} \sin \varphi.$$

Возводя эти уравнения в квадрат и складывая, получаем искомую амплитуду вынужденных колебаний  $S_{\text{вын}}$ , а деля их почленно друг на друга, находим сдвиг фазы  $\varphi$  вынужденных виброперемещений относительно фазы вынуждающей силы:

$$S_{\text{вын}} = \frac{P}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\delta\omega)^2}} = \frac{P}{c} \frac{1}{\sqrt{(1 + \gamma^2)^2 - (\gamma/Q)^2}}; \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{\gamma/Q}{1 - \gamma^2}. \quad (23)$$

Здесь учтено, что согласно формуле (8)  $m\omega_0^2 = c$ .

Из формул (22) и (23) видно, что амплитуда и фаза вынужденных колебаний зависят от двух безразмерных параметров: частотного отношения  $\gamma = \omega/\omega_0$  и параметра  $Q$ , называемого добротностью системы:

$$Q = \omega_0 / 2\delta. \quad (24)$$

Таким образом, полное решение уравнения (20) имеет вид

$$s(t) = S_{\text{св}} e^{-\delta t} \sin(\omega_d t - \alpha) + \frac{P}{c} \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}} \sin(\omega t - \varphi).$$

Свободные колебания с частотой  $\omega_d$  быстро затухают и в установившемся режиме происходят только вынужденные колебания с частотой  $\omega$ . Поэтому в дальнейшем при рассмотрении установившихся колебаний индекс при амплитуде вынужденных колебаний опускается.

В формуле (22) отношение  $S_{\text{ст}} = P/C$  представляет собой такое перемещение, которое получила бы масса  $m$ , если бы к ней статически была приложена сила  $P$ . Отношение

$$\chi = \frac{S}{S_{\text{ст}}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}}. \quad (26)$$

называется коэффициентом динамичности. Он показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний больше статического перемещения, вызванного максимальным значением вынуждающей силы.

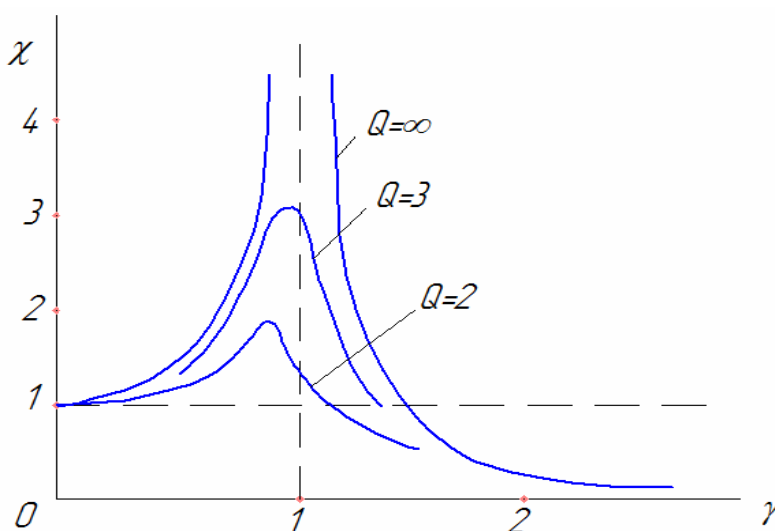


Рисунок 6 – Коэффициенты динамичности

Зависимость  $\chi$  от частоты вынуждающей силы  $\omega$  при разных значениях добротностей образует семейство резонансных кривых (рисунок 6). При совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой системы ( $\gamma=1$ ) наступает резонанс колебаний, характеризующийся резким увеличением амплитуд и достижением максимума коэффициента динамичности и амплитудно-частотной характеристики  $H(\omega)$ . Под последней понимается зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты гармонического возбуждения с постоянной амплитудой:

$$H(\omega) = S/P = \chi/c.$$

Частота, при которой осуществляется резонанс, называется резонансной  $\omega_{рез}$ .

*1 При рассмотрении вибросмещений, виброскоростей и виброускорений максимумы амплитудно-частотной характеристики и коэффициента динамичности при несколько отличающихся частотных отношениях  $\gamma$ ; также несколько различаются и величины максимумов. Но при добротностях  $Q \geq 3$ , что характерно для авиационных конструкций,*

эти различия несущественны. При рассмотрении любой колебательной величины ( $s$ ,  $v$  или  $w$ ) за условие резонанса принимается  $\omega_{рез} = \omega_0$ . Принимается также  $Q = \chi_{max}$ .

В механике добротность системы можно рассматривать как числовую характеристику ее чувствительности (восприимчивости) к динамическим нагрузкам, равную степени усиления колебаний при резонансе:

$$Q = \frac{S_{рез}}{S_{ст}} = \chi_{рез}, \quad (27)$$

что следует из формулы (26) при  $\gamma = 1$ .

Связь добротности с коэффициентом демпфирования и декрементом колебаний определяется соотношением

$$Q = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_d^2 + \delta^2}{\delta^2}} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta T_d}\right)^2} = \frac{\pi}{\Lambda} \sqrt{1 + \left(\frac{\Lambda}{2\pi}\right)^2}. \quad (28)$$

При  $Q > 3$  ( $\Lambda < 1$ ), т. е. для авиационных конструкций, принимают

$$Q = \pi/\Lambda. \quad (29)$$

Как и декремент колебаний, добротность является безразмерной характеристикой демпфирования. В инженерной деятельности более предпочтителен параметр  $Q$ . Он выражается обычно в целых числах, позволяет упростить формулы (22) и (23), а главное — легко интерпретируется: добротность есть коэффициент усиления колебаний при резонансе. Декремент же выражается дробными числами, которые сложнее интерпретируются: для оценки чувствительности системы к колебательным нагрузкам необходимо выполнить операцию деления (29), т. е. вычислить значение добротности.

Как видно из рисунка 6, демпфирование существенно влияет на амплитуду колебаний лишь вблизи резонанса, что используется для уменьшения резонансных колебаний.

Угол сдвига фаз (23) между силой и перемещением массы возрастает с увеличением  $\gamma$  от 0 до  $\pi$ . При резонансе  $\varphi = \pi/2$  при любом демпфировании.

Характеристики демпфирования колебаний:

№ п/п	Материалы, конструкции	Декремент А	Добротность Q (округленно)
1	Кварцевая пластинка	10-4...10-5	3·10 <sup>4</sup> ...3·10 <sup>5</sup>
2	Сталь, латунь, никель	0,005...0,015	200...600
3	Алюминиевые сплавы	0,003...0,0065	500...1000
4	Титановые сплавы	0,0008...0,003	1000...4000
5	Медь, чугун	0,1...0,15	20...30
6	Композитные полимерные материалы	0,016...0,046	70...200
7	Дерево	0,07...0,15	20...40
8	Бетон, железобетон	0,13	25
9	Камертон	0,001	3000
10	Стальные конструкции	0,08...0,09	35...40
11	Композитные полимерные конструкции	0,04...0,06	50...80
12	Электрический контур	0,02...0,05	60...160
13	Акустические системы	0,1	30
14	Деревянные конструкции	0,15...0,18	18...20
15	Железобетонные конструкции	0,25	12
16	Кирпичная кладка	0,12	25
17	Лопатка ГТД вне потока	0,01...0,03	100...300
18	Лопатка ГТД в потоке	0,04...0,12	25...75
19	Ротор ГТД	0,1...0,3	10...30
20	Роторы ГТД на упругодемпферных опорах (УДО)	1...3	1...3
21	Виброизоляторы с оптимальным демпфированием	1,25	2,5
22	Демпферы измерительных приборов (оптимальные)	4,4	0,71

### 7.3 Важнейшие случаи возбуждения колебаний в ДЛА

Виды возбуждения колебаний различают по характеру приложения внешних нагрузок и по характеру изменения их во времени.

По характеру приложения различают силовое и кинематическое возбуждение. При силовом возбуждении задаются внешняя вынуждающая сила и точка приложения ее к системе. Обычно исследуется случай приложения силы к инерционному элементу, к нему же сводятся случаи приложения силы к другим точкам системы. При кинематическом возбуждении каким-либо точкам системы задаются движения, не зависящие от состояния системы. Обычно исследуется случай задания закона переносного движения основания (или точки подвеса) системы в



инерциальной системе координат, которой во многих инженерных задачах может служить Земля. К нему же сводятся случаи задания перемещения других точек. Хотя кинематическое и силовое возбуждения могут быть выражены преобразованием координат одно через другое, для практических целей полезно рассмотреть их отдельно.

По характеру изменения во времени различают периодические и непериодические нагрузки. Важным в технике классом непериодических нагрузок являются полигармонические, представляющие собой сумму двух или более гармонических, нагрузок от различных источников. В специальной литературе используется более подробная классификация нагрузок и колебаний.

### ***Кинематическое возбуждение***

#### ***Относительное движение несилowych элементов двигателей***

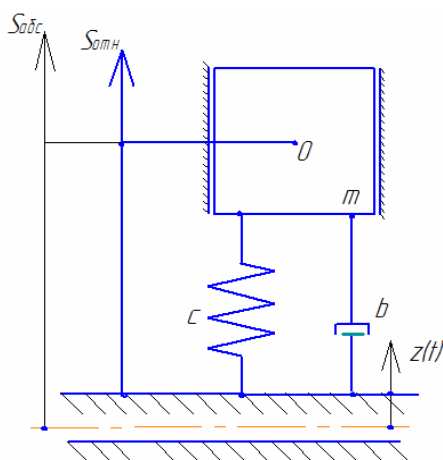


Рисунок 7 – Кинематическое возбуждение системы

Кинематическое возбуждение характерно для многих несилowych элементов двигателей (агрегаты и приборы, трубопроводы, оболочки и пластины), возбуждаемых вибрацией силового корпуса, к которому они прикреплены. Расчетная схема для случая включения демпфера параллельно упругому элементу изображена на рисунке 7, где  $z(t)$  — виброперемещение основания возбуждаемой системы (виброперемещение корпуса двигателя). В отличие от рассмотренного силового

гармонического возбуждения, здесь, кроме движения массы в абсолютных координатах с осью  $S_{abc}$ , представляет интерес относительное движение с осью  $S_{отн}$ . Оно характеризует напряженность упругого элемента и работу демпфера.

Уравнение движения в абсолютных координатах имеет вид:

$$m\ddot{s}_{abc} + b(\dot{s}_{abc} - \dot{z}) + c(s_{abc} - z) = 0$$

или

$$m\ddot{s}_{abc} + b\dot{s}_{abc} + cs_{abc} = b\dot{z} + cz. \quad (31)$$

При гармоническом возбуждении  $Z = Z \sin(\omega t)$  правая часть уравнения (51) представляется в форме:

$$b\dot{z} + cz = bZ\omega \cos \omega t + cZ \sin \omega t = Z\sqrt{c^2 + b^2\omega^2} \sin(\omega t - \alpha).$$

Ее можно рассматривать как силу  $P(t)$  с амплитудой:

$$P = Z\sqrt{c^2 + b^2\omega^2} = cZ\sqrt{1 + \left(\frac{b\omega}{c}\right)^2} = cZ\sqrt{1 + (\gamma/Q)^2}. \quad (32)$$

При этом решение уравнения (31) сводится к решению уравнения (19). Сила  $P(t)$  эквивалентна, в смысле воздействия на массу, заданному движению  $z(t)$  основания системы. Если рассматривать вынужденные колебания массы в относительных координатах, т. е. с точки зрения наблюдателя, связанного с основанием системы, то они происходят под действием именно такой силы. Следовательно, кинематическое возбуждение может быть сведено к силовому.

Интересующее нас частное решение уравнения (31) с учетом выражения (21) имеет вид:

$$s_{abc} = S_{abc} \sin(\omega t - \alpha - \varphi),$$

Где амплитуда определяется по формуле (22) с учетом соотношения (32)

$$S_{abc} = Z \frac{\sqrt{1 + (\gamma/Q)^2}}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}}, \quad (33)$$

а фаза определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\gamma^3 / Q}{1 + \gamma^2 + (\gamma / Q)^2}.$$

Уравнение относительного движения получим из исходного уравнения с учетом того, что  $S_{\text{отн}} = S_{\text{abs}} - z$ . Тогда:

$$m(\ddot{s}_{\text{отн}} + \ddot{z}) + b\dot{s}_{\text{отн}} + cs_{\text{отн}} = 0.$$

или

$$m\ddot{s}_{\text{отн}} + b\dot{s}_{\text{отн}} + cs_{\text{отн}} = -m\ddot{z}. \quad (34)$$

При гармоническом возбуждении правая часть уравнения (34) приводится к виду  $p(t) = -m\ddot{z} = mZ\omega^2 \sin \omega t$ , а само уравнение — к виду

$$\ddot{s}_{\text{отн}} + 2\delta\dot{s}_{\text{отн}} + \omega_0^2 s_{\text{отн}} = \omega^2 Z \sin \omega t$$

Частное решение этого уравнения определяется выражением (21), в котором амплитуда вычисляется по формуле (22) с учетом амплитудного значения правой части уравнения (34):

$$S_{\text{отн}} = \frac{mZ\omega^2}{c} \chi = Z \frac{\gamma^2}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}}, \quad (35)$$

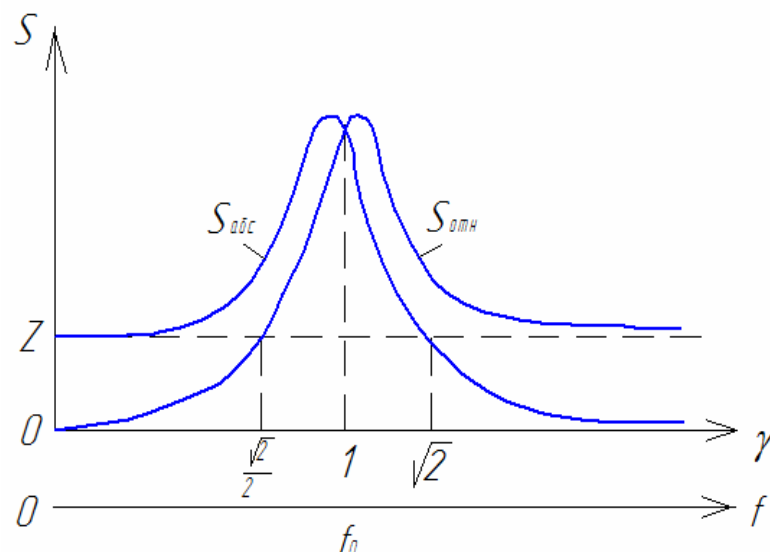


Рисунок 8 - Резонансные кривые при кинематическом возбуждении

сдвиг фаз между перемещениями основания и массы определяется

формулой (23).

На рисунке 8 изображены резонансные кривые, построенные по выражениям (33) и (35). Амплитуда  $S_{abc}$  колебаний массы после прохождения резонанса уменьшается, стремясь при  $f \rightarrow \infty$  к нулю. Это свойство используется для виброизоляции колебаний. Амплитуда относительного движения после прохождения резонанса стремится к значению амплитуды основания. Это используется для построения виброизмерительных приборов, называемых инерционными.

При резонансе амплитуда колебаний массы увеличивается приблизительно в  $Q$  раз:  $(S_{acc})_{рез} = Z\sqrt{Q^2+1} \approx ZQ$ , а амплитуда относительного движения — точно в  $Q$  раз:  $(S_{отн})_{рез} = Z \cdot Q$ . Амплитуды относительного движения определяют напряжения в несилевых элементах двигателей.

#### 7.4 Периодическая и полигармоническая сила, спектральное представление колебаний

Выше были рассмотрены различные случаи гармонического возбуждения колебаний. В действительности вынуждающая сила имеет сложный частотный состав, все более усложняющийся с развитием ГТД. Для авиадвигателей более характерна периодическая вынуждающая сила, чем гармоническая. Отдельные источники вибрации генерируют именно периодические силы. При возмущении системы периодической силой  $P(t)$  уравнение движения имеет обычную форму:

$$m\ddot{s} + b\dot{s} + cs = p(t) . \quad (36)$$

Для его решения периодическую силу с периодом  $T = 2\pi/\omega_i$  разложим в ряд Фурье. При отсутствии постоянной составляющей получим:

$$p(t) = \sum_{i=1}^n P_i \sin(i\omega_i t - \alpha_i) = \sum_{i=1}^n P_i(t), i=1, 2, 3... \quad (37)$$

1 Условия Дирихле для физических нагрузок всегда выполняются.

Каждое слагаемое правой части представляет собой гармоническую силу с амплитудой  $P_i$  и угловой частотой  $\omega_i$ .

Благодаря линейности рассматриваемой колебательной системы решение для этого случая возбуждения можно получить достаточно просто методом суперпозиции (наложения) колебаний. Согласно принципу суперпозиции частное решение  $S(t)$  уравнения (36) представляет собой сумму частных решений  $S_i(t)$  уравнений, в правой части которых стоят составляющие силы  $P_i(t)$  (37):

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t). \quad (38)$$

Т. е. суммарные колебания под действием периодической силы  $p(t)$  равны сумме колебаний, возбуждаемых каждой составляющей этой силы в отдельности.

Следовательно, уравнение (36) можно заменить системой

$$m\ddot{s}_i + b\dot{s}_i + cs_i = P_i \sin(i\omega_1 t - \alpha_i). \quad (39)$$

Решение каждого из них в установившемся режиме было получено выше:

$$s_i(t) = S_i \sin(i\omega_1 t - \alpha_i - \varphi_i), \quad (40)$$

где 
$$S_i = \frac{P_i}{c} \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma_i^2)^2 + (\gamma_i/Q)^2}}.$$

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{(\gamma_i/Q)}{1-\gamma_i^2},$$

здесь 
$$\gamma_i = \frac{i\omega_1}{\omega_0}.$$

Подставляя в систему уравнений (39) решения (40), получим искомое решение в развернутом виде:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{c\sqrt{(1-\gamma_i^2)^2 + (\gamma_i/Q)^2}} \sin(i\omega_1 t - \alpha_i - \varphi_i). \quad (41)$$

Полигармоническое возбуждение также характерно для

авиадвигателей. Оно возникает при одновременном действии нескольких источников, каждый из которых генерирует периодическую силу.

Полигармоническая сила может быть представлена суммой гармонических составляющих, представляющих собой сумму составляющих всех периодических сил (37) при разложении их в соответствующие ряды Фурье:

$$p(t) = \sum_{i=1}^n P_i \sin(\omega_i t - \alpha_i). \quad (42)$$

Выражения (37) и (42) отличаются друг от друга следующим. При разложении периодической функции (37) частоты составляющих  $\omega_i$  кратны основной частоте, определяемой периодом функции  $T$ . Функция (42) в общем случае непериодическая вследствие произвольного соотношения частот  $\omega_i$ , хотя и является суммой периодических функций. Полигармоническая сила, каждое значение которой приближенно повторяется через некоторый постоянный интервал времени, называется почти периодической.

Уравнение движения при полигармоническом возбуждении совпадает с уравнением (36), а решение его аналогично решению (41) при  $\gamma_1 = \omega_i / \omega_0$ :

$$s(t) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{c \sqrt{(1 - \gamma_i^2)^2 + (\gamma_i / Q)^2}} \sin(\omega_i t - \alpha_i - \varphi_i). \quad (43)$$

Полигармоническая сила возбуждает полигармонические колебания с теми же частотами  $\omega_i$ . В частности, почти периодическая сила возбуждает почти периодические колебания, значения которых приближенно повторяются через такой же постоянный интервал времени.

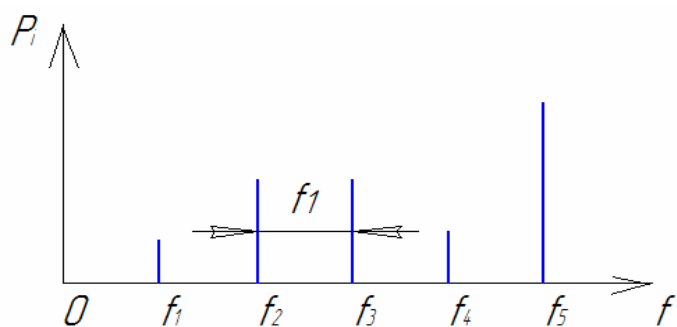


Рисунок 9 - Спектр периодического процесса

До сих пор мы рассматривали временные формы колебаний, т. е. законы изменения силы или положения колеблющейся точки во времени. При рассмотрении установившихся процессов, представляемых суммой гармонических составляющих, часто достаточно знать лишь амплитуды и частоты составляющих. Они изображаются на плоскости «амплитуда - частота» в виде отрезков прямых (рисунок 9). Ордината пропорциональна амплитуде, абсцисса определяет частоту. Такие совокупности амплитуд гармонических составляющих колебаний, расположенных в порядке возрастания частот, называются амплитудными спектрами. В дальнейшем амплитудный спектр называется просто спектром. Синусоида в спектральной форме изображается одним отрезком на соответствующей частоте, периодический процесс с  $n$  составляющими разложения Фурье—совокупностью  $n$  отрезков, расположенных эквидистантно (с интервалом  $f_i$ ).

Полигармонический процесс изображается также  $n$  отрезками, но расположенными не эквидистантно, а в соответствии с фактическим набором частот составляющих, в общем случае произвольными отношениями (рисунок 10). Эти спектры дискретные, поскольку частоты гармонических составляющих колебаний образуют дискретное множество.

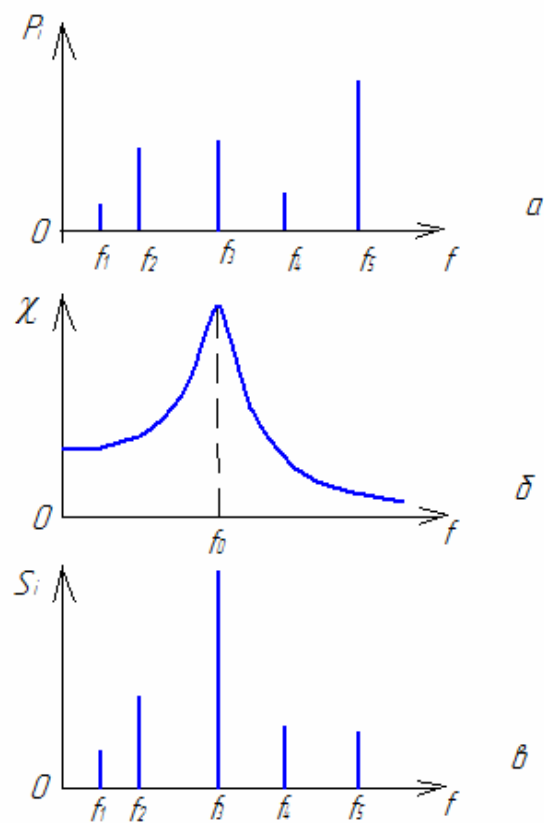


Рисунок 10 - К определению реакции системы на полигармоническое возбуждение

В спектральной форме легко иллюстрируется связь частот и амплитуд вынуждающих сил и вызванных ими колебаний (реакций). В линейной системе каждая гармоническая составляющая силы возбуждает колебания с той же частотой, а амплитуда колебаний пропорциональна амплитуде силы, умноженной на соответствующее значение коэффициента динамичности (рисунок 8):

$$S_i = (P/c)\chi(f_i).$$

В спектре колебаний присутствуют все частоты гармонических составляющих возбуждения, изменяется лишь по сравнению со спектром сил соотношение амплитуд. Колебательная система обладает свойством избирательности: она чувствительна к составляющим, близким к ее собственной частоте (см. частоту  $f_3$  на рис. 8), и слабо реагирует на составляющие с частотами, значительно отличающимися от собственной (см. частоту  $f_5$ ).



## ***7.5 Основные направления борьбы с опасной вибрацией ДЛА***

Вибрация ДЛА относится к вредным явлениям, хотя в других областях техники она может быть полезной (вибро- транспортеры и т. п.). Борьба с вибрацией осуществляется лишь в случае ее опасности, оцениваемой по некоторым критериям. Опасными могут быть как сами механические колебания, так и вызванные ими динамические напряжения в деталях. При создании и вибрационной доводке двигателей стремятся снизить интенсивность вибрации до приемлемых значений.

Двигатель является генератором вибрации различного физического происхождения. Известен весьма широкий круг явлений, способных возбудить собственную вибрацию ГТД: массовый и аэродинамический дисбаланс роторов; воздушных винтов и других вращающихся узлов; неоднородность газоздушного потока, обтекающего лопаточные узлы (воздушные винты, лопаточные решетки компрессоров и турбин); импульсная нагрузка, возникающая при работе подшипников качения и зубчатых передач; неустойчивое горение в форсажных и основных камерах сгорания, помпаж и др. Для борьбы с вибрацией прежде всего необходимо определить ее источник и физическую природу, а также оценить степень ее опасности.

### ***Поиск источника и причины вибрации***

Этот этап является наиболее сложным, особенно на стадии установления причины появления опасной вибрации. На него приходится до 70...95% времени, затрачиваемого на устранение дефектов.

Вибрацию классифицируют по физической природе или по ее узлу-источнику. Так, различают роторную вибрацию, винтовую, вентиляторную, зубцовую и т. д. Классификация по конструктивным узлам ДЛА позволяет непосредственно связать вибрацию с ее источником и создает возможность прогнозирования частотной структуры и характера вибрации

ДЛА с учетом их конструкции и особенностей работы. По этой же причине порядок гармоники вибрации  $k$  определяется по отношению частоты вибрации  $f$  к частоте вращения ее узла-источника  $f_{вр}$ :  $k = f / f_{вр}$ . Исходной информацией при оценке интенсивности вибрации являются спектрограммы, а также условия их получения (режим работы двигателя, места установки датчиков, характеристики анализирующей аппаратуры) и данные о двигателе. Способы получения спектрограмм рассмотрены в методических указаниях. Вибрация идентифицируется, т. е. устанавливается ее происхождение методом сравнения экспериментальных частот  $f^*$  и расчетных  $f$  с учетом свойства локализации вибрации вблизи ее источника. Расчетные значения частот вынужденных колебаний двигателя вычисляются на основе на-

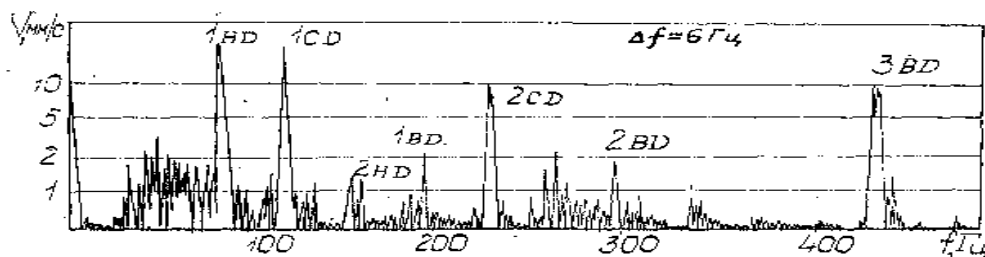


Рисунок 11 - Спектрограмма роторной вибрации трехвального ТРДД

личия жесткой функциональной связи между частотами вращения узлов-источников и частотами генерируемой ими вибрации:  $f = k \cdot f_{вр}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Если порядок гармоники  $k$  близок к ожидаемому расчетному значению, то за источник вибрации принимается соответствующий узел двигателя.

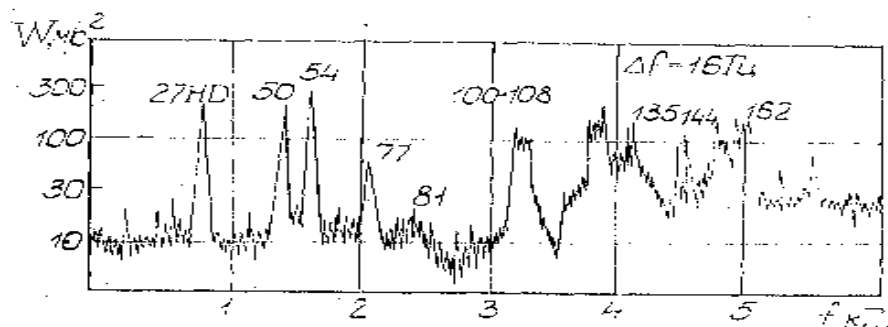


Рисунок 12 - Спектрограмма аэродинамической вибрации ТРДД:  $z_1 = 27$ ,

$$z_2 = 50, z_3 = 77$$

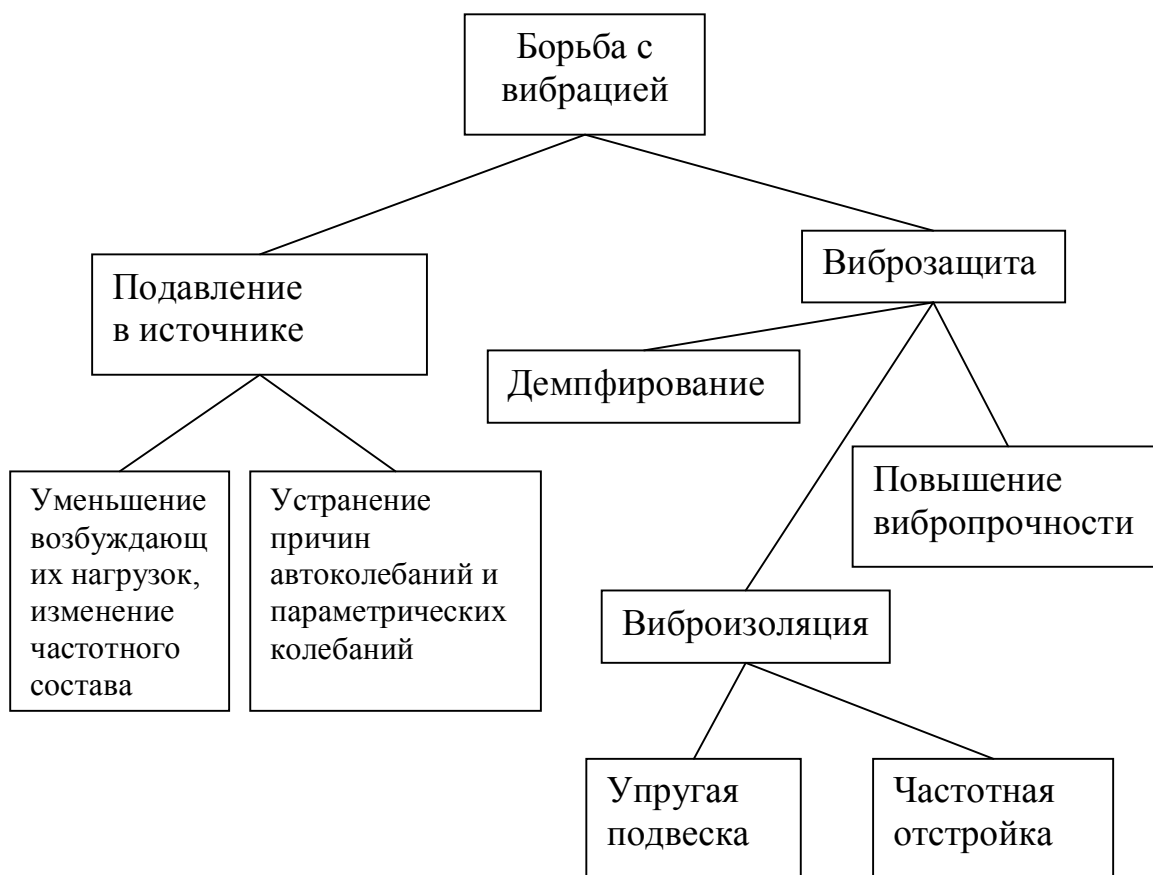


Рисунок 13 - Классификация методов борьбы с вибрацией

### ***Подавление вибрации в источнике***

Методы подавления вибрации определяются физическими причинами ее возбуждения. Например, роторная вибрация снижается путем уменьшения массовой неуравновешенности ротора в рабочих условиях: повышением точности балансировки при сборке, подбалансировкой ротора на стенде и т. п. Аэродинамическая вибрация возбуждается несколькими разнесенными в пространстве источниками - статорными лопатками каждой ступени. Поэтому возможно воздействие как на величину силы, генерируемой отдельной лопаткой, так и на распределение этих сил в пространстве и времени. Величина возбуждающих сил на лопатках определяется параметрами поля кромочных следов за рабочими лопатками и осевым расстоянием между рабочими и статорными лопатками. Аэродинамическое облагораживание

профилей рабочих лопаток позволяет снизить интенсивность возмущений за ними (уменьшить неравномерность полей скоростей и давлений), что уменьшает амплитуды  $F$  импульсов сил на лопатках. Увеличение осевого расстояния до 2...3 хорд рабочей лопатки уменьшает амплитуды  $F$  импульсов сил на статорных лопатках и увеличивает их длительность  $\tau$ , что согласно формуле (35) и уменьшает амплитуды вибрации  $S_{kz}$  с частотами  $k_z f_{вр}$ .

При наклоне статорных лопаток в окружном направлении (до  $20^\circ$ ) кромочный след, воздействует на статорную лопатку не сразу по всей ее длине, а постепенно от корня до периферии (или наоборот). Возникающие на лопатках импульсы сил смещаются во времени по радиусу лопатки, и интегральный импульс имеет меньшую амплитуду  $F$  и большую длительность  $\tau$ , что уменьшает амплитуды вибрации  $S_{kz}$ , как и при увеличении осевого зазора. Однако в обоих случаях усложняется конструкция двигателя.

Выполнение статорных лопаток с переменным по окружности шагом (разношагица) вызывает времяимпульсную модуляцию. Импульсы сил на лопатках будут модулированы функцией, определяемой разложением в ряд Фурье отклонений шагов от номинальных положений. Согласно рис. 25 при этом уменьшатся амплитуды силы  $P_{kz}$  и вибрации  $S_{kz}$ , но появится непрерывный ряд гармоник с частотами  $f_{вр}$ , которые могут вызвать резонансные колебания элементов.

Время-импульсная модуляция с аналогичными спектрами получается и при неравномерном расположении по окружности стоек опор ротора, окон перепуска и отбора воздуха и других конструктивных элементов в газоздушном тракте двигателя. При этом в ряду гармоник  $k f_{вр}$  более сильными будут модуляционные гармоники  $k_{zл} f_{вр} \pm j_{zст} f_{вр}$ , где  $z_{л}$  и  $z_{ст}$  — соответственно число рабочих лопаток и число стоек, окон;  $k, j = 0, 1, 2, 3, \dots$ .

При равном или кратном отношении чисел рабочих и статорных

лопаток на последних одновременно появляются импульсы сил от кромочных следов. Устранение этой кратности смещает во времени действие импульсов, что уменьшает амплитуды  $S_{kz}$ . Необходимо также устранять причины кинематического возбуждения колебаний конструктивных элементов, например, лопаток компрессора редуктором, а также причины автоколебаний лопаток. В последнем случае эффективно увеличение жесткости пера лопаток, введение повышенного разброса собственных частот лопаток (до 8%) со случайным распределением их в колесе, применение бандажных и антивибрационных полок, специальное профилирование вентиляторных лопаток (саблевидные, широкохордные и др.) с целью повышения устойчивости их к автоколебаниям.

### ***Демпфирование и повышение вибропрочности***

Другое главное направление борьбы с вибрацией заключается в уменьшении восприимчивости деталей и узлов к возбуждающим нагрузкам, в основном - в снижении напряжений при заданных нагрузках. Для этого необходимо уменьшать амплитуду колебаний при заданной вынуждающей силе.

Из выражения (22) и рисунка 5 видны три пути решения этой задачи: повышение демпфирования, повышение вибропрочности, виброизоляция. Демпфирование существенно влияет на вибрацию лишь в области резонансных частот (см. рисунок 5), но именно резонансные колебания представляют основную опасность. Демпфирование выступает как один из наиболее важных путей виброзащиты и, в определенной мере, как универсальный метод борьбы с опасной вибрацией. Полезно демпфирование и самостоятельно, и в сочетании с виброизоляцией, и в случаях возбуждения автоколебаний или параметрических колебаний. Нередко оно является практически единственно приемлемым методом борьбы с вибрацией. В современных ГТД широко применяются

упругодемпферные опоры роторов, демпферные опоры трубопроводов, разнообразные способы конструкционного демпфирования статорных и роторных лопаток. Отметим, что при увеличении демпфирования собственная частота колебаний почти не изменяется. Второй путь в виброзащите связан с повышением вибропрочности конструкций, а именно пределов их выносливости металлургическим, технологическим и конструкционным путями, а также конструкционным уменьшением восприимчивости к динамическим нагрузкам, например, путем срезки углов лопаток. Этот путь виброзащиты имеет существенные ограничения, особенно в авиационной технике, где при конструировании сразу закладываются новейшие достижения науки и техники. Виброизоляцию как третий широко распространенный путь виброзащиты изделий рассмотрим подробнее.

### ***Виброизоляция. Частотная отстройка.***

Методом виброизоляции решают две задачи: уменьшение вибрационных сил, передаваемых виброактивной машиной на основание (от двигателя к самолету), и уменьшение вибрации элементов двигателей (агрегаты и т. п.) при заданном уровне кинематического возбуждения их самим двигателем. Решение обеих задач виброизоляции заключается в пружинном подвешивании конструкций.

Вибрационная сила, передаваемая на основание изображенной на рисунке 3 системой, равна сумме упругих и диссипативных сил, возникающих в системе. Реакция основания при гармоническом возбуждении машины

$$p_{осн}(t) = c\dot{x} + b\ddot{x} = cS\sin\omega t + b\omega S\cos\omega t = P_{осн} \sin(\omega t - \varphi).$$

Амплитуда передаваемой силы с учетом выражения (22)

$$P_{осн} = \sqrt{(cS)^2 + (b\omega S)^2} = cS\sqrt{1+(\gamma/Q)^2} = P \frac{\sqrt{1+(\gamma/Q)^2}}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}}. \quad (51)$$

Эффективность упругодемпферной подвески виброактивной конструкции оценивается коэффициентом передачи динамических сил. Он определяется как отношение амплитуды передаваемой силы  $P_{осн}$  к амплитуде возбуждающей силы  $P$ :

$$\mu = \frac{P_{осн}}{P} = \frac{\sqrt{1+(\gamma/Q)^2}}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}}. \quad (52)$$

Как видно на рисунке 13, виброизоляция эффективна при частотах возбуждения  $f > \sqrt{2}f_0$ , где  $\mu < 1$ . Причем при  $\gamma > \sqrt{2}$  эффективность виброизоляции тем выше, чем меньше демпфирование в системе. Максимальная эффективность достигается при

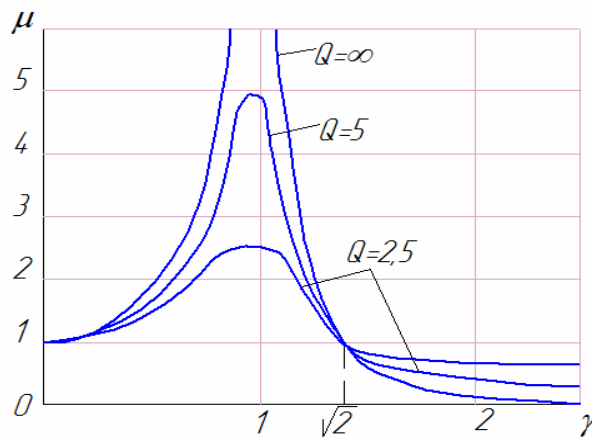


Рисунок 13 – Коэффициенты передачи

отсутствии демпфирования ( $b = 0$ ) — это случай чистой виброизоляции. Его трудно осуществить, поскольку все реальные конструкции упругих элементов обладают трением. К тому же это не оптимальный случай. При упругом подвешивании машины неизбежен проход через резонанс, где демпфирование необходимо. Поэтому все виброизолирующие устройства обладают умеренной степенью демпфирования. Другой крайний случай - жесткое закрепление ( $c = \infty, \gamma = 0$ ). При этом  $\mu = 1$  и вся вынуждающая

сила передается на основание; виброизоляция отсутствует. За практическое условие виброизоляции принимают с запасом

$$f_0 \leq f_H/2, \quad (53)$$

т. е. отстройку собственной частоты машины  $f_0$  вниз от низшей из частот вынуждающих сил  $f_H$  не менее, чем в два раза. В случае виброизоляции вибропассивных элементов при кинематическом возбуждении их расчетная схема сводится к изображенной на рисунке 6. Уравнение движения элемента записывается в виде (31), амплитуда виброперемещений элемента при гармоническом возбуждении определяется по выражению (33).

Эффективность упругодемпфирующей подвески элемента в этом случае оценивается отношением амплитуды колебаний элемента  $S_a$  к амплитуде возбуждающей вибрации  $Z$ .

Коэффициент передачи колебаний при кинематическом возбуждении:

$$\mu = \frac{S_a}{Z} = \frac{1 + (\gamma/Q)^2}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (\gamma/Q)^2}} \quad (54)$$

численно совпадает с коэффициентом передачи сил (52), поэтому практическое условие виброизоляции (53) используется и при кинематическом возбуждении. Условие (53) иногда называют правилом октавы. Отметим, что при виброизоляции, в отличие от демпфирования, существенно изменяется собственная частота системы.

Метод виброизоляции имеет два ограничения. Во-первых, абсолютное значение собственной частоты двигателя на упругой подвеске ограничено допускаемой величиной его осадки  $[\delta_{ст}]$  под собственным весом. По формуле (18)  $\delta_{ст} = g/\omega_0 \approx 250/f_0 \leq [\delta_{ст}]$ , откуда при  $f_0 = 5^\circ\text{Гц}$   $\delta_{ст} = 10$  мм, что может быть неприемлемым.

Второе ограничение обусловлено тем, что коэффициент виброизоляции на частотах, значительно превышающих собственную, существенно ниже теоретического, вычисленного по формуле (84). Это



объясняется наличием дополнительных неучтенных резонансов в системе, кроме учтенного основного. То есть, представление упругоподвешенной машины в виде системы с одной степенью свободы не вполне соответствует действительности. В этих случаях необходимы дополнительные меры по устранению нежелательных резонансов.

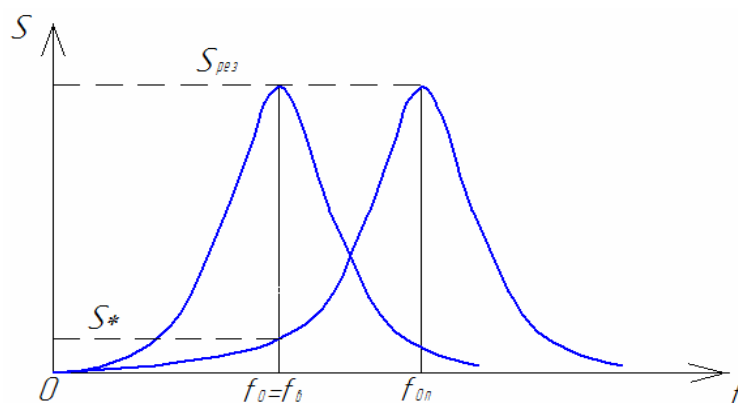


Рисунок 14 - К частотной отстройке деталей

Частотная отстройка может рассматриваться как особый случай виброизоляции в случае резонансных колебаний высокооборотных деталей ДЛА с целью уменьшения возникающих в них напряжений. Она заключается в незначительном изменении собственной частоты детали  $f_0$ , в отстройке ее вверх или вниз от резонансной частоты возбуждения, т. е. в «уходе» с резонансного режима при заданной частоте возбуждения путем изменения собственной частоты детали (рисунок 14).

*1 Октава — интервал частот с отношением высшей частоты к низшей, равным двум.*

Увеличивается число значимых источников колебаний, физическая природа их становится все более разнообразной, а степень опасности повышается. Это есть логическое следствие интенсификации рабочих процессов, снижения удельной массы, усложнения конструкции ДЛА,

ажурности деталей, В связи с увеличением мощности двигателей и необходимости диагностирования их состояния особое значение приобрели импульсные колебания, впервые рассмотренные в пособии. В методах борьбы с опасными колебаниями акцентируется внимание на возможности подавления их в источнике различными путями используя характерные особенности колебаний. Так, аэродинамическую вибрацию можно ослабить как путем уменьшения вынуждающих сил, генерируемых отдельными элементарными источниками — лопатками, так и путем разнесения этих источников в пространстве. Реализация этого перспективного направления требует глубокого изучения физических причин возбуждения импульсных колебаний.

При виброзащите методом демпфирования следует подчеркнуть неизбежность комплексных конструктивных решений. Так, если применение упругодемпферных опор роторов не вызывает особых затруднений, то демпфирование колебаний рабочих лопаток требует разработки существенно новых конструктивных решений, затрагивающих сопрягаемые детали (диски, проставки). Не полностью еще исчерпаны возможности виброизоляции и повышения вибропрочности деталей. Начинается внедрение методов вибродиагностики при отработке вибропрочности на стадии вибрационной доводки двигателей.

Для обеспечения достаточно высокой вибрационной прочности современных ДЛА необходимо грамотное экспериментальное исследование их вибросостояния и рациональное сочетание нескольких методов борьбы с вибрацией.

## 8 Основные сведения о программе конечно-элементного анализа ANSYS

### Общие сведения об МКЭ

Основная идея МКЭ заключается в аппроксимации сплошной среды (твердого тела, газового потока, магнитного поля и т.п.), обладающей бесконечно большим числом степеней свободы, совокупностью элементов простой формы, имеющих конечное число степеней свободы и взаимодействующих друг с другом лишь в отдельных точках, которые называются узловыми точками, или узлами.

Построение конечно-элементных моделей возможно двумя методами. Первый прямой метод генерации. По нему на основе построенных узлов генерируется конечно-элементная сетка. Второй метод: использование сеткогенератора. Сеткогенератор строит КЭ модель на основе модели геометрической. Геометрическая модель для балочных элементов состоит из линий, для оболочечных из поверхностей, для трехмерных из твердых тел. Все эти элементы могут одновременно присутствовать в одной расчетной модели. Сеткогенераторы есть встроенные в пакет, есть внешние, позволяющие импортировать сетку в любой расчетный пакет.

### Общие сведения о Ansys

Комплекс ANSYS включает в себя множество возможностей для применения метода конечных элементов, начиная с несложных линейных статических расчетов и вплоть до сложных, нелинейных расчетов динамических переходных процессов.

### Запуск Ansys

Производится через меню Пуск выполнением программы Ansys Launcher.

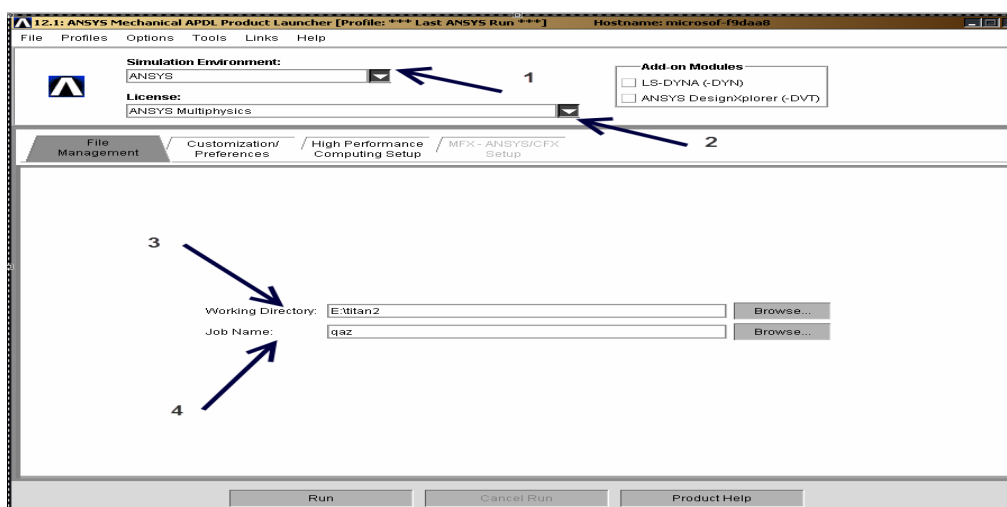


Рисунок 1 - Окно Ansys Launcher

В окне (рисунок 1) выбирается [1] тип запуска системы, по умолчанию работа в графическом интерфейсе. [2] – Выбор типа задействованной лицензии. [3] – рабочий каталог, в котором будет производиться хранение всех файлов, созданных во время работы. [4] - Имя задания jobname является идентифицирующим именем задания комплекса ANSYS. При указании имени задания (jobname) для расчета это имя jobname становится первой частью названия всех файлов, создаваемых при работе комплекса. Расширение, или суффикс, для имен этих файлов является идентификатором типа, например, таким, как .DB. Путем использования индивидуального имени задания jobname для каждого расчета можно получить гарантию избежания перезаписи всех файлов. Если имя задания jobname не указывается, все файлы получают имя FILE или file, в зависимости от операционной системы.

Запуск Ansys производится нажатием на кнопку Run.

## 8.1 Интерфейс пользователя

Существуют четыре общих метода ввода инструкций для программы, когда используются следующие возможности интерфейса:

- меню;
- панели диалога;
- линейка инструментов;
- непосредственный ввод команд.

**Меню** представляет собой перечень нескольких логически связанных процедур управления программой, которые расположены в отдельных окнах. К этим окнам, которые можно переместить или убрать с помощью мыши, доступ возможен в процессе работы. Команды программы объединены в отдельные функциональные группы для быстрого доступа в соответствующие моменты. Основные меню показаны на рисунке 1, включают в себя следующее:

**1. Меню утилит** - содержит набор часто используемых процедур, которые отображены здесь для доступа в любой момент работы программы.

**2. Главное меню** - перечисляет основные функции программы, которые группируются в располагаемые сбоку всплывающие (динамические) меню, вид которых зависит от продвижения по программе.

**3. Окно ввода** - представляет собой область для набора команд и показа контекстных сообщений-подсказок, которые появляются при каждом вызове команд из главного меню программы. Введенные ранее с клавиатуры команды вызываются нажатием кнопки «стрелка-вниз-вверх».

**4. Графическое окно** - представляет собой область для вывода такой графической информации, как конечно-элементная модель или графики результатов анализа. Размеры окна можно устанавливать, уменьшая или увеличивая по своему усмотрению. Опции окна можно установить

**PlotCtrl>Windows Control>Windows Option**

**5. Окно вывода** - фиксирует отклик программы на команды и действия пользователя. Всегда доступно при работе графического интерфейса. Любая однажды выполненная команда записывается в файл регистрации сеанса работы (с расширением log). Доступ к этому файлу возможен из окна вывода, что позволяет обратиться к списку команд в случае ошибки или записать его в виде файла для исполнения в пакетном режиме.

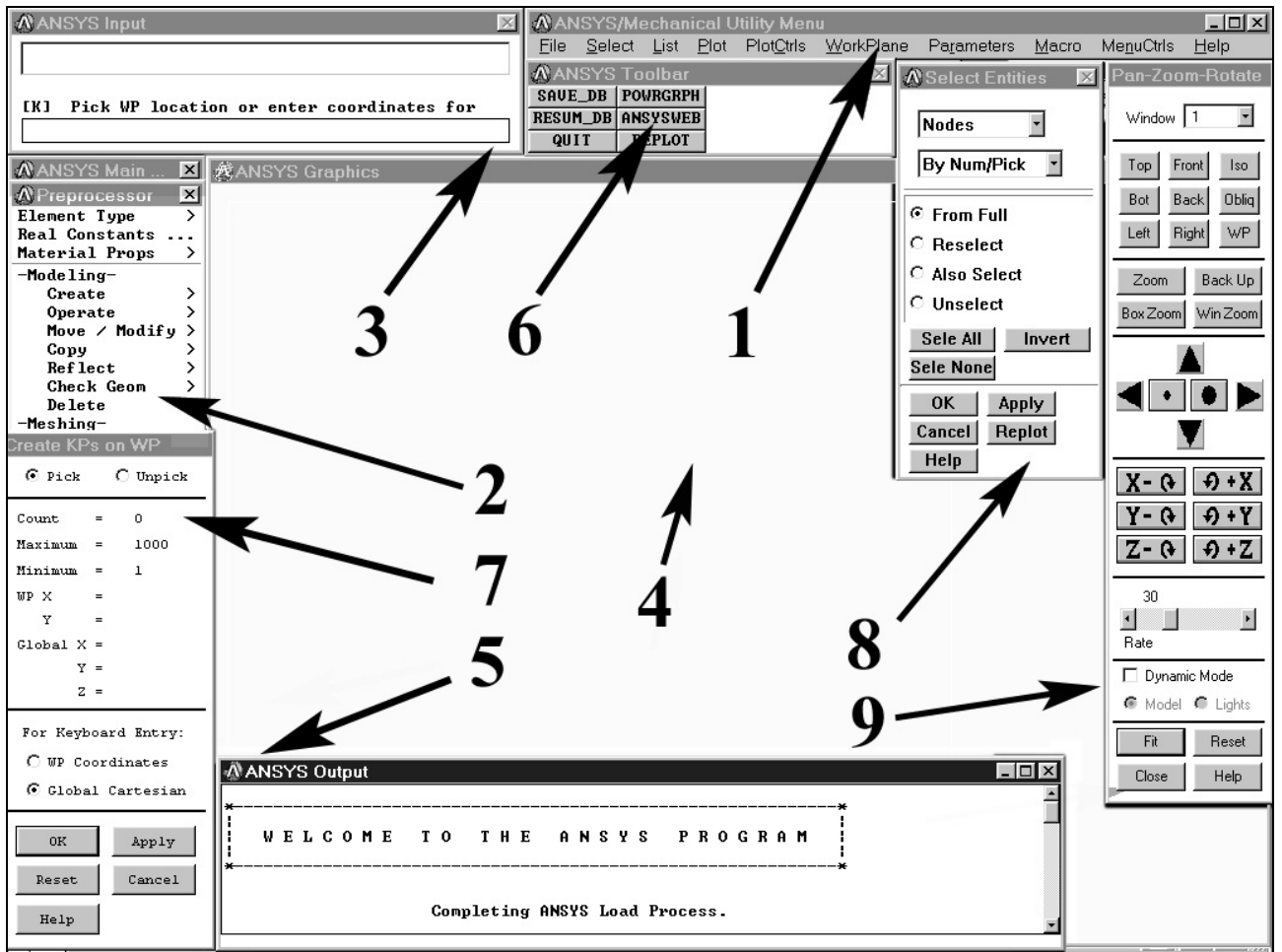


Рисунок 1 - Интерфейс пользователя

**6. Панель инструментов** - дает возможность пользователю разместить обычно используемые процедуры, например, команды или написанные пользователем подпрограммы для быстрого их запуска щелчком мыши.

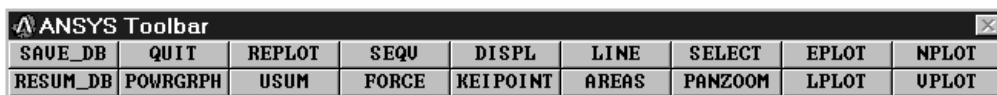


Рисунок 2 – Панель инструментов

**7,8,9. Панель диалога** - это окно, предоставляющее пользователю на выбор перечень действий для выполнения процедур и установки необходимых настроек. Такие панели подсказывают, какие данные следует вводить и какие решения принимать для определенных процедур (рисунок 3)

Панели диалога помогают пользователю управлять программой, появляясь, всякий раз, когда ему требуется ввести некоторую конкретную процедуру.

Панель инструментов позволяет пользователю создавать кнопки и иметь быстрый доступ к часто исполняемым командам.

Наиболее часто используемые панели диалога «Pick Unpick» «Pan Zoom Rotate», «Select Entities», «Offset WP».

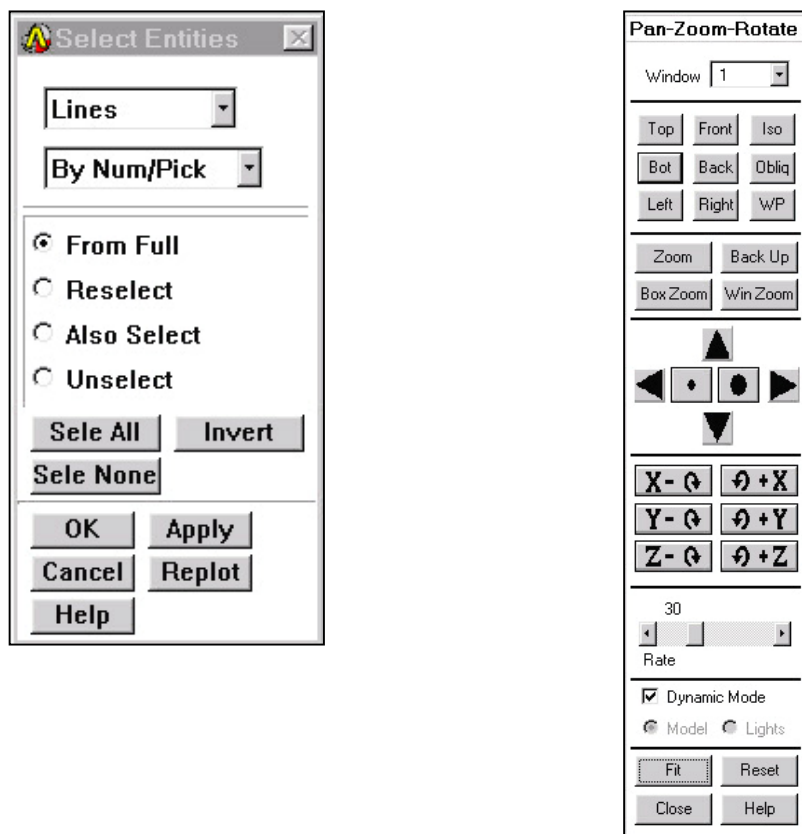


Рисунок 3 – Панели диалога

### *Панель «Pick Unpick» (7)*

Панель «**Pick Unpick**» выпадает каждый раз, когда необходимо указать мышью объект в графическом окне. Панель имеет два режима: Pick – выбор и Unpick – отмена выбора. Переключение между двумя этими режимами осуществляется также правой кнопкой мыши. Когда необходимо или возможно осуществить множественный выбор в панель добавляются опции Single – единственный выбор, Box – выбор рамкой, Circle – выбор рамкой в форме окружности, Polygon – выбор рамкой в форме произвольного

многоугольника, Loop – последовательный выбор, программа по единственному указанному объекту выбирает по контуру набор объектов имеющих общие точки. Раздел «For Keyboard Entry» в зависимости от ситуации включает в себя опцию «WP Coordinate» – ввод в СК рабочей плоскости; «Global Cartesian» - ввод в глобальной декартовой СК (независимо от положения переключателя объект будет создан в активной СК), или другие контекстно-зависимые опции ввода.

### *Панель Select Entities*

Мощным инструментом моделирования в ANSYS является диалог Select Entities – выбор набора компонентов (рисунок 1.3). После выбора ANSYS работает только с этим набором! Таким образом, даже решение можно провести только для некоторой части конечно-элементной модели. При этом контроль за адекватностью конечно-элементной модели целиком лежит на расчетчике. Тип выбираемых компонентов (узлы, вершины, ребра и т.д.) задается в верхнем выпадающем меню, способ выбора во втором, сверху выпадающем меню. Способ выбора зависит от выбираемого компонента. Типичные способы выбора:

**By Num/Pick** – по номеру (необходимо ввести в окне ввода) или указанием мышью

**Attached To** – принадлежащие (элементам, поверхностям, ребрам и т.д.)

**By Location** – по координатам (минимальному и/или максимальному значению)

**By Attributes** – по атрибутам (номеру материала, номеру уравнений и т.д.)

Установки выбора имеют следующие значения:

**From Full** – из всей модели

**Reselect** – «разпометить» текущий набор и заменить его на новый

**Also Select** – добавление к текущему набору

**Unselect**– «разпометить» компоненты из текущего набора.

**Sele All** - выбрать все



**Sele None** - отменить выбор

**Invert** - инверсия выбранного набора

### *Панель Pan Zoom Rotate*

Диалоговая панель «**Pan Zoom Rotate**» предназначена для изменения положения точки зрения в графическом окне. Эта панель вызывается из **UM>Plot Ctrl>Pan Zoom Rotate**. Кнопки со стрелками смещают точку зрения в соответствующем направлении на величину, установленную в счетчике **Rate**, кнопки со стрелкой поворота вращают точку зрения вокруг соответствующей оси на угол в градусах, установленный в счетчике **Rate**. В поле **Dynamic Mode** включается динамический режим прокрутки (панорамирования) и поворота в «реальном времени» – курсор принимает вид триады. Перемещение мыши в этом режиме по графическому окну с нажатой левой кнопкой динамически перемещает точку зрения, перемещение с нажатой правой кнопкой динамически вращает точку зрения. В верхней части расположены кнопки проекций, нажатие на кнопку активизирует соответствующую проекцию, кнопка **Fit** выводит в графическое окно все объекты, кнопка **BackUp** вызывает откат к предыдущей точке зрения.

## **8.2 Файловая система ANSYS. Основные приемы ввода-вывода**

В процессе работы программа ANSYS создает ряд вспомогательных файлов. Все они имеют одно имя <Jobname>, задаваемое пользователем, и разные расширения. Имя можно задать или изменить следующим образом: **UM> File> Change Jobname**. Основными пользовательскими файлами ANSYS, содержащими полную информацию о решаемой задаче, следует считать двоичный файл базы данных <Jobname>.db и текстовый <Jobname>.log. Последний записывается в рабочий каталог автоматически и включает в себя все команды, подававшиеся в текущем сеансе работы. В дальнейшем можно использовать его для повторения сеанса в откорректированном или неизменном виде после редактирования в любом

текстовом редакторе. Некоторые другие виды файлов ANSYS перечислены в таблице 1

Таблица 1 - Файлы ANSYS (Т - текстовые, В - бинарные).

Расширение	Тип	Назначение
CDB	Т	Данные о конечно-элементной сетке, нагрузках
IGES	Т	Данные о геометрии модели
RST	В	Результаты расчета статических задач
RTH	В	Результаты расчета температуры

Основные функции управления вводом-выводом расположены в пункте File меню утилит.

**Clear&Start New** - очистка оперативной памяти и установка начального имени задачи (Initial Jobname)

**Change jobname** - смена имени задачи

**Change title** - смена заголовка (заголовок высвечивается в нижнем углу графического окна)

**Resume jobname.db** - очистка оперативной памяти и загрузка базы данных из db - файла с установленным именем задачи

**Resume from** - очистка оперативной памяти и загрузка базы данных из db - файла с произвольным именем

**Save as jobname.db** - сохранение db - файла под заданным командой Change jobname именем

**Save as** - сохранение db - файла с указанием имени

**Write DB log File** - сохранение копии log - файла под другим именем

**Read Input From** - загрузка командного (содержащего команды APDL) файла произвольным именем и расширением.

### *Процессоры*

Все функции, выполняемые программой ANSYS, объединены в группы, которые называются процессорами. Программа имеет один препроцессор, один процессор решения, два постпроцессора и несколько вспомогательных процессоров, включая оптимизатор. Препроцессор

используется для создания конечно-элементной модели и выбора опций для выполнения процесса решения. Процессор решения (Solution) используется для приложения нагрузок и граничных условий, а затем для определения отклика модели. С помощью постпроцессора (General Postproc) пользователь обращается к результатам решения для оценки поведения расчетной модели, а также для проведения дополнительных вычислений, представляющих интерес.

### *База данных*

В программе ANSYS используется одна, центральная, база данных для всего набора сведений, относящихся к модели и результатам решения (рисунок 1.4) Сведения о модели (включая данные о геометрии твердотельной и конечно-элементной моделей, свойствах материалов и т.д.) записываются в базу данных на стадии препроцессорной подготовки. Нагрузки и результаты решения записываются процессором решения. Данные, полученные на основе результатов решения при их постпроцессорной обработке, записываются постпроцессором. Сведения, внесенные одним из процессоров, доступны, при необходимости, для других процессоров. Например, общий постпроцессор может считывать данные, относящиеся к решению и модели, а затем использовать их для постпроцессорных вычислений.

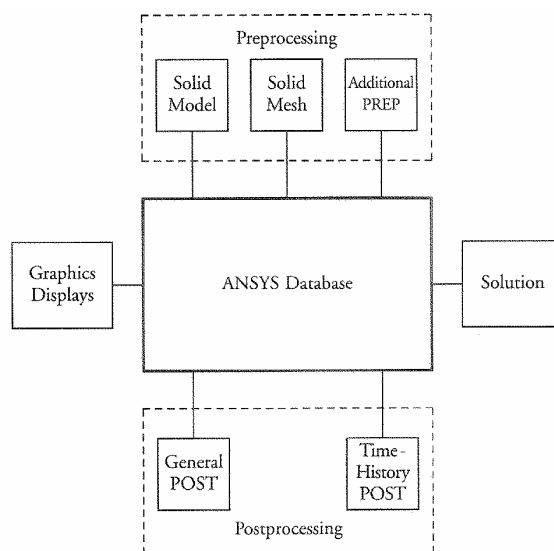


Рисунок 1 – Диаграмма связей центральной базы данных программы ANSYS

### 8.3 Препроцессорная подготовка

Типовая процедура проведения расчета в среде комплекса ANSYS сводится к трем действиям:

1. Создание модели;
2. Приложение нагрузок и получение решения;
3. Просмотр результатов.

#### *Создание модели*

Создание модели производится в препроцессоре и называется препроцессорной подготовкой. На стадии препроцессорной подготовки задаются необходимые для решения исходные данные. Пользователь выбирает типы конечных элементов и координатные системы, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения.

#### *Указание системы единиц измерения*

Комплекс ANSYS не предполагает использования единой системы единиц для расчетов. За исключением случаев выполнения расчетов магнитных полей можно использовать любую систему единиц измерения до тех пор, пока все исходные данные указываются в одной системе единиц. Единицы измерения должны быть согласованы для всех исходных данных.

#### *Задание типов конечных элементов*

Библиотека элементов комплекса ANSYS содержит свыше 150 различных типов элементов. Каждый тип элемента имеет уникальный номер и префикс, указывающий категорию типа элемента: BEAM4, PLANE77, SOLID96 и так далее. Имеются следующие категории элементов:

Таблица 1 – Категории элементов

BEAM (балки)	MESH (сетки без степеней свобод)
COMBIN (комбинированные: шарниры и тому подобные)	PIPE (трубопроводы)
CONTAC (контактные)	PLANE (элементы плоского НДС и тому подобные)
FLUID (элементы расчета потоков)	PRETS (Pretension)
HUPER (гиперупругие)	SHELL (оболочки)
INFIN (элементы с границами, заданными в бесконечности)	SOLID (элементы объемных тел)
INTER (элементы обеспечения взаимодействия сред)	SURF (элементы обеспечения поверхностных эффектов)

LINK (стержни)	TARGE (парные к контактные)
MASS (сосредоточенные массы)	USER (элементы пользователя)
MATRIX (суперэлемент и элемент с жесткостью, указываемой непосредственно)	VISCO (вязкоупругие)

Помимо прочих характеристик, тип элемента определяет следующие свойства:

- Набор степеней свобод (которые, в свою очередь, подразумевает дисциплину - МДТТ, расчеты тепловые, магнитные, электрические, форму элемента - четырехугольную, гексаэдр и так далее).

- Применение элемента для расчета двухмерных или объемных задач.

Например, элемент BEAM4 имеет шесть степеней свобод (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ) и является элементом, имеющим форму линии в трехмерном пространстве. Элемент PLANE77 имеет степень свободы - температуру (TEMP), имеет четырехугольную форму с восьмью узлами и может применяться только для расчета двухмерных задач.

Для указания типов элементов требуется применение модуля общего предпроцессора PREP7. Для такой операции используются команды семейства ET (ET, ETCHG и так далее) или их эквиваленты, вызываемые средствами GUI; подробности см. в описании отдельных команд. Тип элемента определяется его именем и элементу присваивается ссылочный номер типа.

Например, команды, показанные ниже, определяют два типа элемента. BEAM4 и SHELL63. и присваивают им номера типов, соответственно, 1 и 2.

```
ET,1,BEAM4
```

```
ET,2,SHELL63
```

Для задания типа элемента через предпроцессор используется путь MM>PP>Element type> Add/Edit/Delete.

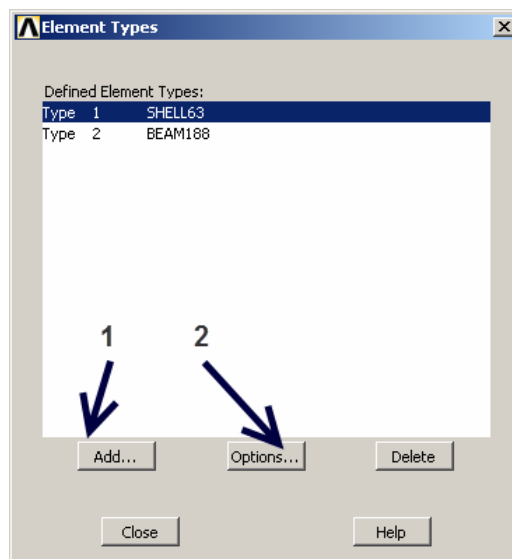


Рисунок 1 - Окно задания типов элементов

Нажатием на кнопку Add [1] (рисунок 1) производится выбор нужного элемента. Таблица связи ссылочного номера с именем элемента называется таблицей типов элементов. При создании собственно элементов сетки проводится указание соответствующего ссылочного номера при помощи команды TYPE (или, из экранного меню, Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Elem Attributes).

Кнопка [2] дает доступ к настройкам выбранного элемента. Ряд типов элементов имеют дополнительные опции (признаки), именуемые KEYOPT. Указываемые в виде KEYOPT(1), KEYOPT(2) и так далее. Например, признак KEYOPT(9) для элемента BEAM4 позволяет определять результаты в промежуточных точках каждого элемента, а признак KEYOPT(3) для элемента SHELL63 позволяет подавлять внешние формы перемещений. Указание признаков KEYOPT проводится при помощи команд ET или KEYOPT (или, из экранного меню, Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete).

### *Задание геометрических характеристик элементов*

Геометрические характеристики элементов являются свойствами, зависящими от типа элемента, в частности, от вида поперечного сечения балочных элементов. Например, в состав геометрических характеристик элемента BEAM3, двумерного балочного элемента, входят площадь поперечного сечения (AREA), момент инерции (IZZ), высота сечения (HEIGHT), коэффициент учета сдвиговых деформаций (SHEARZ), начальная деформация (ISTRN) и добавочная масса, отнесенная к единице длины (ADDMAS). Геометрические характеристики элементов указываются командами семейства **R** (**R**, **RMODIF** и так далее) или их эквивалентами, вызываемыми из меню; подробности см. в описании отдельных команд. Как и типы элементов, наборы геометрических характеристик имеют ссылочные номера, и таблица связи ссылочного номера с набором геометрических характеристик называется *таблицей геометрических характеристик*. При создании собственно элементов сетки проводится указание соответствующего ссылочного номера геометрических характеристик при помощи команды **REAL** (или, из экранного меню, **Main Menu** → **Preprocessor** → **Modeling** → **Create** → **Elements** → **Elem Attributes**).

Если при формировании модели используются элементы BEAM44, BEAM 188 или BEAM 189, можно для создания и использования поперечных сечений использовать специальные команды создания поперечных сечений (**SECTYPE**, **SECDATA** и тому подобные) или их эквиваленты, вызываемые из средств GUI. Информацию об использовании панели инструментов BeamTool для создания поперечных сечений рассмотрим на лабораторных работах.

## 8.4 Задание материала

Большинство типов элементов требуют указания свойств материалов. В зависимости от типа расчета, свойства материалов могут быть линейными или нелинейными.

Как и с типами элементов и геометрическими характеристиками, каждый набор свойств материала имеет свой ссылочный номер. Таблица связи ссылочного номера материала с набором свойств материала именуется *таблицей материалов*. В пределах одного расчета можно создавать несколько наборов свойств материалов (для обеспечения соответствия нескольким материалам, используемым в модели). Комплекс ANSYS идентифицирует каждый набор уникальным ссылочным номером.

При создании собственно элементов сетки проводится указание соответствующего ссылочного номера материала путем применения команды **MAT**.

### *Линейные свойства материалов*

Линейные свойства материала могут быть постоянными или зависящими от температуры, а также изотропными или ортотропными. Для указания постоянных свойств материала (как изотропных, так и ортотропных) применяется следующая команда:

Команда **MP**

Вызов из экранного меню:

**Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models**

Кроме того, требуется указание соответствующих признаков свойств, например, EX, EY, EZ для модуля Юнга, KXX, KYY, KZZ для коэффициента теплопроводности и так далее. Для изотропного материала необходимо указывать только значения в направлении оси X; в других направлениях по умолчанию применяется значение, указанное для направления X. Например:

MP,EX,1,2E11 ! Модуль Юнга для материала № 1 составляет 2E11

MP,DENS, 1, 7800 ! Плотность для материала № 1 составляет 7800

MP,KXX, 1, 43 ! Коэффициент теплопроводности для материала № 1 составляет 43.

Помимо значений свойств, применяемых по умолчанию для направлений Y и Z (для которых по умолчанию применяется значение, указанное для направления X), другие значения свойств материалов также

имеют значения по умолчанию, предназначенные для уменьшения количества исходной информации. Например, коэффициент Пуассона (NUXY) по умолчанию равен 0.3, модуль сдвига (GXY) по умолчанию равен  $E_X/(2(1+NUXY))$ , а коэффициент излучения (EMIS) по умолчанию равен 1.0.

### *Нелинейные свойства материалов*

Нелинейные свойства материалов обычно являются табличными данными, например, свойствами пластичности (кривыми связи напряжений с деформациями при различных законах упрочнения данными ползучести, данными гиперупругих материалов и так далее.

### *Доступ к интерфейсу*

Доступ к интерфейсу с моделями материалов обеспечивается последовательностью **Main Menu** → **Preprocessor** → **Material Props** → **Material Models**. В результате появляется диалоговая панель **Define Material Model Behavior**, исходно отображающая верхний уровень древовидной структуры, как показано на рисунке 1.

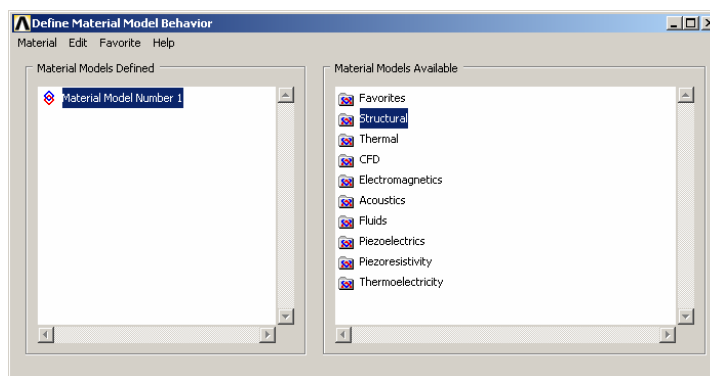


Рисунок 1 - Начальный вид диалоговой панели интерфейса с моделями материалов

### *Указание свойств поведения материала*

Расположенное справа окно **Material Models Available** содержит список категорий применяемых категорий материалов (например. Structural, или МДТТ, Thermal, или тепловой)

Если категории предшествует изображение иконки (пиктограмма), это означает, что внутри главной категории имеются категории нижнего уровня (подкатегории). После двойного щелчка на пиктограмме категории ниже нее, с отступом, появляются подкатегории, как показано на рисунке 2.



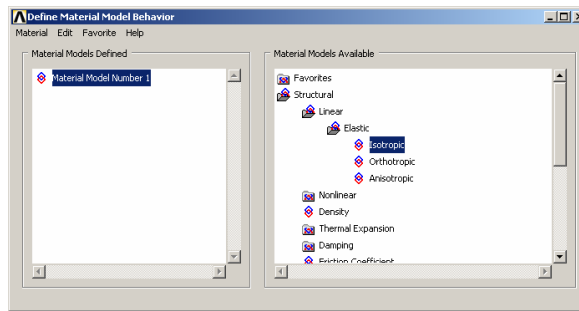


Рисунок 2 - Начальный вид диалоговой панели интерфейса с моделями материалов

Например, в категории Structural (МДТТ) имеются подкатегории Linear (линейные), Nonlinear (нелинейные) и иные. Модели разделены по категориям так, чтобы окончательно на экране имелся вертикальный список наборов свойств материалов или моделей материалов, включенных в отдельную категорию (например, в категории Mises Plasticity, или пластичности фон Мизеса имеются: Bilinear, Multilinear и Nonlinear). После выбора используемого набора свойств материала или используемой модели материала таковые выбираются двойным щелчком на данном объекте. На экране появляется диалоговая панель, которая обеспечивает помощь при указании требуемых исходных данных для указанной модели или набора свойств.

#### *Указание данных материала*

Данные, указываемые посредством диалоговой панели, имеют табличную форму, в которой вид столбцов и строк зависит от требуемых свойств материала или выбранной модели материала. Типовая форма указания данных представлена на рисунке 3.

В диалоговой панели указания данных имеются две области интерактивного взаимодействия: таблица указания данных и расположенный внизу панели набор кнопок. В зависимости от указываемых объектов свойств материала обозначения в таблице могут изменяться, а равно может изменяться число исходно появляющихся строк и столбцов. Объекты свойств материала также влияют на число строк и столбцов, которые допускается добавлять или удалять. В большинстве случаев столбцы представляют температуры, а в строках указываются значения данных (например, плотность, трактуемая как линейная изотропная характеристика или постоянные значения некоторых нелинейных моделей)

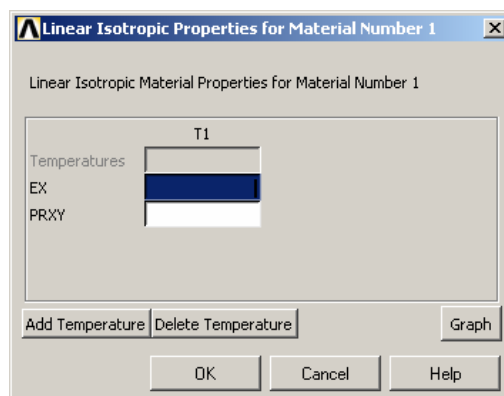


Рисунок 3 - Диалоговая панель показания данных

### *Данные, зависящие от температуры*

В исходном варианте вид таблицы настраивается для указания данных, не зависящих от температуры, в результате чего поля указания температур имеют серый цвет (недоступны). В данном случае следует принять решение об указании данных для различных температур и при необходимости можно добавить столбцы текстовых полей для данных, представляющих каждую температуру. Удаление или добавление данных, зависящих от температуры, допускается в любой момент. Предварительного указания факта зависимости данных от температур не требуется.

### *Добавление и удаление столбцов*

Для добавления столбца следует текстовый курсор поместить в любое поле существующего столбца и далее нажать кнопку **Add Temperature**. Новый столбец появится справа от существующего столбца, и оба температурных поля становятся активными. Далее указываются две температуры и, по строкам, связанные с ними данные. При необходимости можно добавлять большее число столбцов температур при помощи той же процедуры. Можно вставлять столбцы и между двумя уже существующими путем размещения текстового курсора в любом поле существующего столбца, правее которого вставляется новый столбец и дальнейшего вызова кнопки **Add Temperature**. Если число столбцов превышает ширину диалоговой панели, появляется горизонтальная линейка прокрутки. Удаление столбца для температуры проводится путем размещения текстового курсора в любом поле удаляемого столбца и вызова кнопки **Delete Temperature**.

### *Добавление и удаление строк*

Может существовать необходимость добавления новой строки констант или иных данных для указанной температуры. Строки добавляются или удаляются способом, аналогичным способу, описанному для добавления или удаления столбцов. Добавление строки проводится путем размещения текстового курсора в любом поле существующей строки и дальнейшего вызова кнопки **Add Row** (или **Add Point**). Удаление строки проводится путем

размещения текстового курсора в любом поле удаляемой строки и вызова кнопки **Delete Row** (или **Delete Point**).

### **Ввод и редактирование данных в текстовых полях**

При первом появлении диалоговой панели указания данных на экране одно из текстовых полей является активным (имеет выделение черного цвета), что означает, что в данное поле в состоянии воспринимать и отображать исходные данные. Для перевода активного состояния в другие текстовые поля можно применять клавиши с изображениями стрелок. Кроме того, вызов кнопки **Tab** позволяет переводить активное состояние в текстовые поля, расположенные справа от поля, активного в настоящий момент.

### *Кнопки действий*

- **Add Temperature** - Добавление нового столбца ввода данных справа от столбца, в котором расположен курсор текста. Если этой кнопки нет, объект, связанный с материалом, не зависит от температуры.
- **Delete Temperature** - Удаление столбца ввода данных, в котором расположен курсор текста. Если этой кнопки нет, объект, связанный с материалом, не зависит от температуры.
- **Add Row** (или **Add Point**) - Добавление новой строки ввода данных ниже строки, в которой расположен курсор текста. Если этой кнопки нет, объект, связанный с материалом, не имеет возможности добавления данных.
- **Delete Row** (или **Delete Point**) - Удаление строки ввода данных, в которой расположен курсор текста. Если этой кнопки нет, то для объекта, связанного с материалом, требуется указание подобных данных.
- **Graph** - Демонстрация введенных данных в графическом окне ANSYS Graphics. При необходимости, данные в таблице, могут быть изменены, а далее кнопку **Graph** можно вызывать до вызова кнопки **OK**.
- **OK** - Передача всех введенных данных в базу данных комплекса ANSYS и выход из текущей диалоговой панели. В окне **Material Models Defined** древовидной структуры появляется запись **Material Model Number #**, в которой # = 1 соответствует первому материалу, или номеру материала, указанному посредством диалоговой панели **Define Material ID**.
- **Cancel** - Удаление всех введенных данных и выход из текущей диалоговой панели.
- **Help** - Вызов справочной информации, необходимой по контексту для указываемых свойств материала или констант материала.

### *Запись и редактирование данных материала*

Окно **Material Models Defined** (левое окно диалоговой панели **Define Material Model Behavior**) демонстрирует протокол для каждой указанной модели материала. После вызова кнопки **OK** в диалоговой панели указания данных данная панель имеет вид иконки (пиктограммы) и записи **Material Model Number #** (первый символ # по умолчанию равен 1), что отслеживает

свойства, указанные для модели. Новая модель со своим уникальным номером вызывается последовательностью Material → New Model, и дальнейшим указанием нового номера в диалоговой панели Define Material ID. При совершении двойного щелчка на любой модели материала или свойстве (в последующих разделах древовидной структуры) появляется соответствующая диалоговая панель ввода данных, при помощи которой можно редактировать значения.

## 8.5 Генерация модели

Существуют три разных способа генерации модели: импорт модели, твердотельное моделирование и непосредственное создание модели. Каждый из методов обладает только ему присущими уникальными возможностями и преимуществами. Пользователь может выбрать любой из этих методов или использовать их комбинацию для построения расчетной модели. Непосредственная генерация модели.

При использовании этого подхода конечно-элементную модель можно построить в препроцессоре программы ANSYS, определив положение каждого узла, а также размеры, форму и связность для всех элементов сетки. В распоряжении пользователя есть большое число команд, с помощью которых удобно копировать, отображать и менять масштаб заданной системы узлов или элементов.

Узлы используются для того, чтобы определить положение элементов в пространстве, а элементы определяют связность модели. И те, и другие можно задавать наиболее удобным способом, не заботясь об эффективности решения.

Прямой способ задания узлов и элементов удобен при построении моделей балок и трубопроводов, а также небольших моделей с правильной геометрией. Однако для больших и сложных моделей рекомендуется использовать твердотельное моделирование. Программа ANSYS позволяет легко переходить от прямой генерации к твердотельному моделированию, выбирая наиболее подходящий подход для различных частей модели.

### *Твердотельное моделирование*

При выполнении исследований, следующим этапом действий после указания свойств материала является генерация конечно-элементной модели - узлов и элементов, адекватно описывающей геометрию модели. Существуют два метода создания конечно-элементной модели: посредством геометрического моделирования и посредством прямой генерации узлов и элементов. При использовании геометрического моделирования описывается геометрическая форма модели, а далее комплексу ANSYS указываются инструкции для автоматического создания сетки из узлов и элементов на основе геометрической модели. В данном случае имеется возможность определять размеры и форму элементов, создаваемых программой. При

использовании прямой генерации координаты каждого узла и последовательность узлов в элементах указывается пользователем непосредственно. В данном случае имеется возможность при необходимости проведения ряда действий, обеспечивающих дополнительные удобства, например, копирование набора существующих узлов и элементов, симметричного отражения и тому подобного.

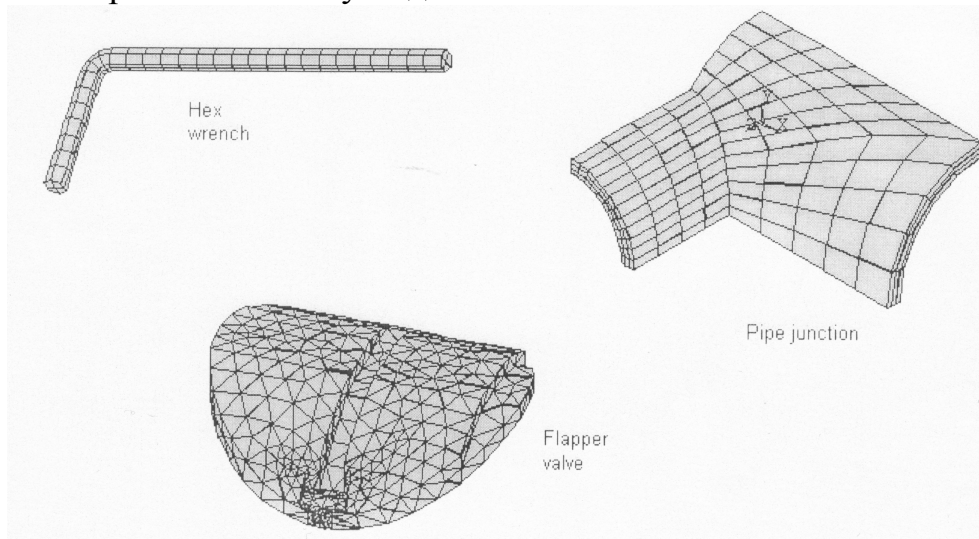


Рисунок 1 - Пример конечно-элементных моделей

Средства препроцессорного твердотельного моделирования программы ANSYS позволяют иметь дело непосредственно с геометрической моделью, не обращаясь к специфическим объектам (узлам и элементам) конечно-элементной модели. Для того чтобы облегчить генерацию модели, программа отделяет фазу задания геометрии и граничных условий от построения сетки конечных элементов. Сначала пользователь описывает геометрию (и граничные условия, если нужно) твердотельной модели. Если делать это в интерактивном режиме, то возможна удобная проверка входных данных. Программа строит сетку для получившейся модели, что определяет местоположение узлов и связность элементов.

В программе ANSYS доступны следующие два способа твердотельного моделирования: нисходящий и восходящий. В первом случае пользователь указывает только самый высокий порядок сложности объектов модели. Используемые обычно объекты (такие, как сферы и призмы, т.е. формы, которые называются геометрическими примитивами) могут быть созданы за одно обращение к меню. Например, пользователь определяет объемный примитив, а программа автоматически определяет связанные с ним поверхности, линии и ключевые точки. При восходящем моделировании пользователь строит модель, начиная с объектов самого низкого порядка. Сначала задаются ключевые точки, затем связанные с ними линии, поверхности и объемы - именно в таком порядке. Оба способа можно произвольно сочетать при создании любой модели. Независимо от используемого способа построения модели пользователь имеет возможность применять операции булевой алгебры для объединения наборов данных и за

счет этого как бы создавать “скульптуру” модели. Программа имеет полный набор таких булевых операций, как сложение, вычитание, пересечение, деление, склеивание и объединение. Булевы операции над линейными, поверхностными и объемными примитивами могут помочь существенно сэкономить время и усилия при построении сложных моделей. Другие средства твердотельного моделирования дают возможность “буксировать”, “выдавливает”, вращать, перемещать или копировать объекты модели. Дополнительные возможности включают построение дуг окружности и касательных, генерацию объемов и поверхностей с помощью операций поступательного перемещения и вращения, автоматический расчет пересечений линий и поверхностей.

### *Основные приемы твердотельного моделирования*

Твердотельное моделирование проводится в препроцессоре и подразумевает построение модели состоящей из геометрических объектов без КЭ-сетки. Этапы создания модели:

- построение расчетной схемы с отбрасыванием несущественных свойств и вводом гипотез для получения результата с приемлемой точностью, за разумное время;
- настройка рабочего поля Work Plane и систем координат;
- генерация основных геометрических объектов с использованием примитивов (линия, сплайн, круг и др.) и Булевых операций;
- задание граничных условий.

Средства геометрического моделирования находятся в препроцессоре рисунок 2 и панели Create рисунок 3.

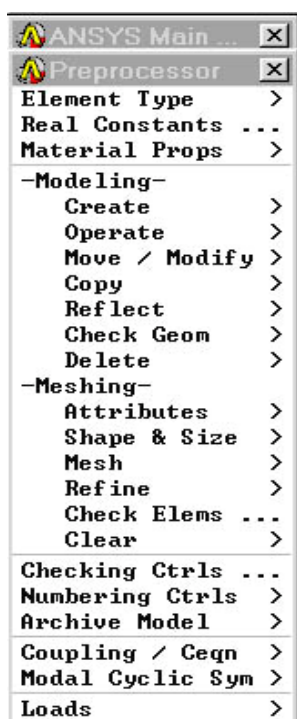


Рисунок 2 Препроцессор

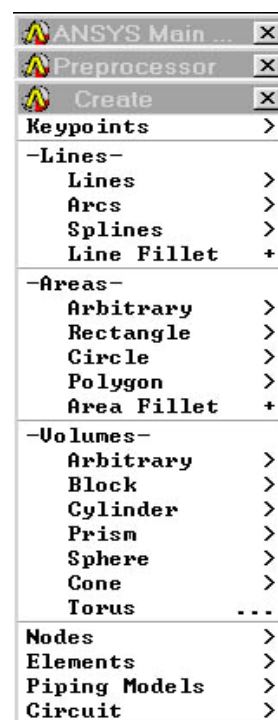


Рисунок 3 Панель Create

## Вершины (KEYPOINTS)

В программе ANSYS используются различные способы создания вершин, перечисленные ниже.

- Создать отдельные вершины -  
**MM>Preprocessor>Create>Keypoints>In Active CS** – в активной СК  
**MM>Preprocessor>Create>Keypoints>On Working Plane** – на рабочем плане  
Создать вершину на существующем ребре –  
**MM>Preprocessor>Create>Keypoints>On Line**  
**MM>Preprocessor>Create>Keypoints>On Line w/Ratio** – ребро делится по указанному соотношению
- Создать вершину между двумя существующими –

### **MM>Preprocessor>Create>Keypoints>KP between KPs**

Команда **KBETW**

- Создать вершину в центре арки –  
*MM>Preprocessor>Create>Keypoints>KP At Center*

Команда **KCENTER**

- Скопировать выбранные вершины –  
*MM>Preprocessor>Copy>Keypoints>*

Команда **KGEN**

- Отобразить выбранные вершины –  
*MM>Preprocessor>Reflect>Keypoints>*

Команда **KSMM**

- Перенести выбранные вершины в другую систему координат –  
*MM>Preprocessor>Move/Modify>Transfer Coord>Keypoints*

Команда **KTRAN**

- Создать вершины между двумя существующими –  
*MM>Preprocessor>Create>Keypoints>Fill between KPs*

Параметр **NFILL** – задает число создаваемых вершин, параметр **NP1** – начальная вершина, параметр **NP2** – конечная вершина, параметр **SPACE** – отношение отрезка от конечной вершины **NP2** до последней созданной, к отрезку от начальной вершины **NP1** до первой созданной



Рисунок 4 Создание вершин между существующими

Команда **KFILL**

- Создать вершину в узле (node)

*MM>Preprocessor>Copy>Keypoints>*

Команда **KNODE**

- Удалить вершину –

*MM>Preprocessor>Delete>Keypoints*

Команда **KDELE**

- Отрисовать вершины –

*UM>Plot>Keypoints*

Команда **KPLOT**

- Вывести список вершин –

*UM>List>Keypoints*

Команда **KLIST**

- Вывести список выбранных вершин –

*UM>List>Picked Entities>Keypoints*

Далее следует указать интересующие вершины

- Вычислить расстояние между двумя вершинами

*MM>Preprocessor>Check Geom>KP Distance*

Команда **KDIST**

- Вывести нумерацию всех вершин

*UM>PlotCtrls>Numbering>Keypoints Numbers*

### *Ребра (LINES)*

Ребра в основном используются для построения граничных контуров модели, для стержневых КЭ или когда необходимо создать поверхность по ребрам. Как уже говорилось выше, не всегда нужно создавать ребра напрямую – создавая поверхность по вершинам ANSYS сам сгенерирует нужные ребра. Диалог Line находится в панели Create препроцессора.

- Создать прямое ребро –

*MM>Preprocessor>Create>Lines>Straight Line*

Команда **L**

- Создать ребро в активной системе координат

*MM>Preprocessor>Create>Lines>In Active Coord*

Если активна цилиндрическая система координат будет создаваться дуга

- Создать арку по трем вершинам –

*MM>Preprocessor>Create>Arcs>Through 3 KPs*

Команда **LARC**

Необходимо указать начальную вершину, конечную и промежуточную

- Создать арку по двум вершинам и радиусу –

*MM>Preprocessor>Create>Arcs>By End KPs & Rad*

Команда **LARC**

Необходимо указать начальную вершину, конечную, центр кривизны и радиус

- Создать окружность –



**MM>Preprocessor>Create>Arcs>Full Circle**  
**MM>Preprocessor>Create>Arcs>By Center & Rad**  
Команда **CIRCLE**

- Создать сплайн по вершинам –  
**MM>Preprocessor>Create>Splines>Splines thru KPs**  
**MM>Preprocessor>Create>Splines>Splines thru Locs**  
Команда **BSPLIN**
- Создать ребро под углом к существующему –

***MM>Preprocessor>Create>Lines>At Angle To Lines***

Команда **LANG**

Здесь необходимо отметить ребро по отношению, к которому задается угол, и вершину, определяющую конец создаваемого ребра. Ребро, к которому под углом проводится новое ребро, по Булю пересекается с ним и в точке пересечения делится на два новых ребра. Таким образом, ребра принадлежащие поверхностям или разбитые на элементы нельзя использовать в данной операции.

- Создать ребро по нормали к существующему –

***MM>Preprocessor>Create>Lines>Normal To Line***

Команда **LANG**

Отличие от предыдущей команды в том, что не нужно задавать угол

- Создать касаемое ребро –

***MM>Preprocessor>Create>Lines>Tangent to Lines***

Команда **LTAN**

Существующие ребро по отношению, к которому создается новое ребро, будет касаться нового ребра в своей конечной точке. Необходимо указать касательную, затем точку касания, в которой обязательно должна быть вершина и вершину, в которой будет заканчиваться касаемое ребро.

- Скруглить ребра  
**MM>Preprocessor>Create>Line Fillet**

Команда **LFILLT**

Указать два пересекающихся ребра и радиус скругления. Скругляемые ребра будут обрезаны.

- Скопировать выбранные ребра  
**MM>Preprocessor>Copy>Lines**

Команда **LGEM**

Выбрать ребра, задать число копий и приращения по осям, причем приращения берутся в активной системе координат, т.е. если активна цилиндрическая СК, то копии могут быть сделаны по окружности.

- Зеркально отразить выбранные ребра

**MM>Preprocessor>Reflect>Lines**

Команда **LSYMM**

Отражаемый набор будет удален, если в поле MOVE стоит Move, и скопирован, если стоит Copied

- Поделить на заданное число отрезков  
**MM>Preprocessor>Operate>Divide>**  
Команда **LDIV**
- Соединить ребра  
**MM>Preprocessor>Operate >Add>Lines**  
Команда **LCOMB**  
Булевски складывает отрезки, которые должны иметь общую вершину
- Продлить ребро  
**MM>Preprocessor>Operate >Extend Line**  
Команда **LXTND**  
Указывается ребро, которое нужно продлить, его вершина, которая будет перенесена и расстояние, на которое нужно продлить
- Удалить с вершинами  
**MM>Preprocessor>Delete>Lines and Below**  
Команда **LDELE**
- Удалить без вершин  
**MM>Preprocessor>Delete>Lines Only**  
Команда **LDELE**
- Отрисовать  
**UM>Plot>Lines**  
Команда **LPLOT**
- Пролистать  
**UM>List>Lines**  
Команда **LLIST**
- Пролистать указанные  
**UM>List>Picked Entities>Lines**  
Команда **LLIST**
- Вывести нумерацию всех ребер  
**UM>PlotCtrl>Numbering>Lines**

### *Поверхности (AREAS)*

Поверхности нужны тогда, когда вы хотите использовать плоские конечные элементы или конечные элементы с мнимой толщиной, а также, если вы строите твердое тело по поверхностям. Поверхность в свою очередь всегда состоит из вершин и ребер. Чтобы создать поверхности вы можете использовать следующие команды –

- Создать поверхность по вершинам –

**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>Through KPs**

Команда **A**

- Создать поверхность по ребрам (определяющим ее периметр) –  
**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Lines**

Команда **AL**

- Создать поверхность «протяжкой» сечения (ребра) по «пути» (ребру) –  
**MM>Preprocessor>Operate>Extrude/Sweep>-Line-Along Lines**

Команда **ADRAG**

- Создать поверхность (поверхности) вращением ребра (ребер) вокруг оси –  
**MM>Preprocessor>Operate>Extrude/Sweep>-Line-About Axis**

Команда **AROTATE**

- Создать радиусный переход между двумя поверхностями –  
**MM>Preprocessor>Create>Area Fillet**

Команда **AFILL**

- Натянуть поверхность (кожу) на каркас –  
**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Skinning**

Команда **ASKIN**

- Создать поверхность смещением (офсетом) существующей –  
**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Offset**

Команда **AOFST**

Рисунок 1 демонстрируют работу названных команд.

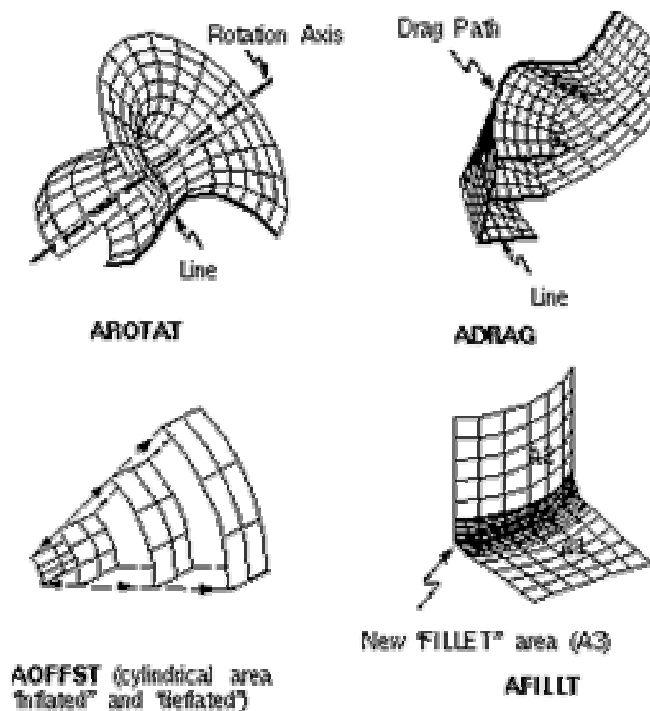


Рисунок 5 - Способы создания поверхностей в ANSYS

Существующие поверхности могут быть изменены с помощью следующих команд –

- Копировать –  
**MM>Preprocessor>Copy>Areas**

Команда **AGEN**

- Переместить  
**MM>Preprocessor>Move/Modify>Areas**

Команда **AGEN**

- Удалить с сохранением составляющих компонентов (lines,keypoints)

**MM>Preprocessor>Delete>Areas Only**

Команда **ADELE**

- Удалить вместе с составляющими компонентами

**MM>Preprocessor>Delete>Areas and Below**

Команда **ADELE**

- Зеркально отразить

**MM>Preprocessor>Reflect>Areas**

Команда **ARSYM**

- Перенести в другую систему координат –

**MM>Preprocessor> Move/Modify>Transfer Coord>Areas**

Команда **ATRAN**

Только поверхности не разбитые на КЭ и не принадлежащие твердому телу могут быть переопределены или удалены. Очистить поверхность от конечных элементов позволяет команда **ACLEAR** –  
**MM>Preprocessor>Clear>Areas**

### *Объемы (VOLUMES)*

Объемы используются для отображения трехмерных объектов и требуются только в том случае, если нужно использовать объемные КЭ. Для задания объема используется любой из следующих способов.

- Задание объема по вершинам

**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>Through KPs**

- Задание объема по поверхностям

**MM>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Areas**

- Генерация объема «выдавливанием» областей

**MM>Preprocessor>Operate-Extrude/Sweep-Areas**

>**Along Normal** - по перпендикуляру к выдавливаемой поверхности

>**By XYZ Offset** - смещением в активной системе координат

>**Along line** - вдоль заданной линии

>**About Axis** - вокруг оси (задается двумя вершинами).

«Выдавливание» геометрических объектов (вершин, линий, областей) с нанесенной на них конечно-элементной сеткой сопровождается выдавливанием и этой сетки с созданием сетки элементов более высокого порядка по пути «выдавливания». Количество слоев и атрибуты КЭ на этом пути предварительно задаются командами

**MM>Preprocessor>Operate-Extrude/Sweep>**

>**Default Attribs** - вводятся номера типа, свойств материала, геометрических параметров и СК элемента.

>**Size** - количество слоев или длина стороны элемента.

- Копирование

**MM>Preprocessor>Copy>Volumes**

- Перемещение

- **MM>Preprocessor>Move/Modify>Volumes**
  - Зеркальное отражение
    - MM>Preprocessor>Reflect>Volumes**
  - Перенос в другую систему координат
    - MM>Preprocessor>Move/Modify>Transfer Coord>Volumes**
  - Листинг
    - UM>List>Volumes**
    - UM>List>Picked Entities>Volumes**
      - Удаление
        - MM>Preprocessor>Delete>Volumes**
        - MM>Preprocessor>Delete>Volumes and Below**
- Только объемы не разбитые на КЭ могут быть переопределены или удалены. Очистить объем от конечных элементов позволяет команда **VCLEAR** –
- MM>Preprocessor>Clear>Volumes**

## 8.6 Построение сетки

После того как построена твердотельная модель, ее конечно-элементный аналог (т.е. сетка узлов и элементов) может быть создана всего лишь одним обращением к меню программы. В программе ANSYS предусмотрено четыре способа генерации сетки: использование метода экструзии, создание упорядоченной сетки, создание произвольной сетки (автоматически) и адаптивное построение.

Метод экструзии (выдавливания) используется для превращения областей двумерной сетки в трехмерные объекты, состоящие из параллелепипедов, клиновидных элементов или их комбинации. Процесс экструзии осуществляется с помощью процедур смещения из плоскости, буксировки, поступательного и вращательного перемещений.

Построение упорядоченной сетки требует предварительного разбиения модели на отдельные составные части с простой геометрией, а затем выбора таких атрибутов элемента и соответствующих команд управления качеством сетки, чтобы можно было построить конечно-элементную модель с упорядоченной сеткой. Создаваемая программой ANSYS упорядоченная сетка может состоять из шестиугольных, четырехугольных и треугольных элементов. Для получения треугольной сетки программа выделяет области модели, предназначенные для нанесения упорядоченной сетки, создает сначала четырехугольную сетку, а затем превращает ее в сетку из треугольных элементов.

В качестве дополнительного способа построения упорядоченной сетки на некоторой поверхности используется деление противоположных граничных линий этой поверхности таким образом, чтобы можно было осуществить переход от одного размера сетки к другому. Построение упорядоченной сетки переменного размера возможно только для поверхностей, ограниченных четырьмя линиями (с использованием или без использования конкатенации, т.е. операции объединения двух

последовательностей граничных линий в одну, при этом первая последовательность становится началом результирующей, а вторая - ее хвостом).

Программа ANSYS предоставляет в распоряжение пользователя генераторы произвольной сетки, с помощью которых она может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии - без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольную сетку можно строить из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов.

Адаптивное построение сетки состоит в том, что после создания твердотельной модели и задания граничных условий программа, по указанию пользователя, генерирует конечно-элементную сетку, выполняет анализ, оценивает ошибку за счет сеточной дискретизации и меняет размер сетки от решения к решению до тех пор, пока расчетная погрешность не станет меньше некоторой наперед заданной величины (или пока не будет достигнуто установленное число итераций).

Возможности программы ANSYS допускают проведение модификации конечно-элементной сетки. Например, могут быть изменены атрибуты узлов и элементов. Если модель состоит из повторяющихся областей, то можно создать сетку только для некоторой области модели, а затем сделать копию этой области.

## 8.7 Приложение нагрузок

Основной задачей расчета конструкций при помощи МКЭ является исследование поведения конструкции или ее составной части в условиях приложения разнообразных внешних воздействий. Поэтому, приложение нагрузок является очень важным этапом расчета. Программа ANSYS дает возможность приложения нагрузок разными способами. Кроме того, существенную помощь при создании нагрузок в ходе решения могут оказать опции приложения нагрузок.

### *Определения понятия нагрузки*

Понятие «нагрузки» в терминах ANSYS включают в себя граничные условия, а также внешние и внутренние усилия, как показано на рисунке 1 . Примерами нагрузок для разных типов расчетов являются:

*Прочность:* перемещения, усилия, давления, температуры (для определения термических напряжений и деформаций), инерционные силы;

*Тепловые расчеты:* температуры, удельные потоки тепла, конвекции, внутренняя генерация тепла, граничные условия в бесконечности;

*Потоки жидкостей и газов:* скорости, давления.

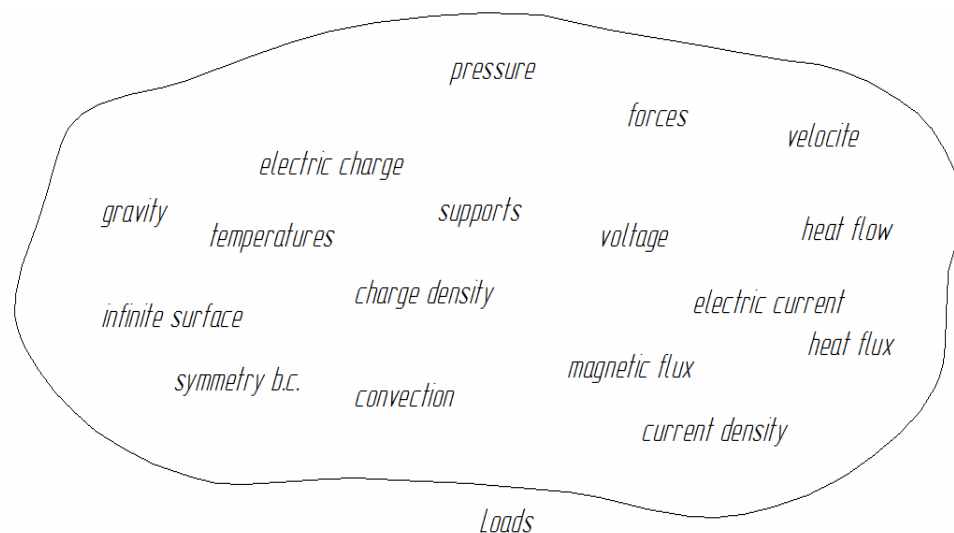


Рисунок 1 - Нагрузки, включая граничные условия и другие типы приложения воздействий

Нагрузки делятся на шесть групп: ограничения на степени свобод, усилия (сосредоточенные нагрузки), поверхностные нагрузки, объемные нагрузки, инерционные нагрузки и нагрузки связанных расчетов (многодисциплинарные задачи).

- *Ограничения на степени свобод (DOF)* устанавливаются для степени свободы заранее известное значение. Примерами подобных связей являются перемещения и граничные условия в задачах прочности, предписанные температуры в тепловых расчетах и граничные условия при расчете потоков.

- *Усилия* являются сосредоточенными нагрузками, прикладываемыми в узлах модели. Примерами являются силы и моменты в задачах прочности, удельные потоки тепла в тепловых расчетах и линии тока в магнитных расчетах.

- *Поверхностные нагрузки* являются нагрузками, распределенными по поверхности. Примерами являются давление в задачах прочности, а также конвекция и поток тепла в тепловых расчетах.

- *Объемные нагрузки* являются нагрузками, действующими в пределах всего тела. Примерами являются температуры и изменение размеров под влиянием потока частиц в задачах прочности, скорость выделения тепла в тепловых расчетах и плотность потока в расчетах магнетизма.

- *Инерционные нагрузки* создаются наличием у конструкции массы, например, при действии ускорения свободного падения, угловой скорости и углового ускорения. Таковые используются, в основном, при расчете задач прочности.

- *Нагрузки связанных расчетов* являются частными случаями одного из указанных выше типов нагрузок для исследований, применяющих результаты одного расчета в качестве нагрузок другого расчета.

### *Шаги нагрузки, промежуточные шаги и итерации решения*

*Шаг нагрузки* является набором нагрузок, для которого ищется решение. Для линейного статического расчета пользователь может использовать разные шаги нагрузок для получения разнообразных решений, например, давление (ветровую нагрузку) для первого шага нагрузок, инерционные нагрузки на втором шаге нагрузок, оба вида нагружения и измененные закрепления на третьем шаге и так далее. При расчете переходных процессов, последовательные шаги нагрузок соответствуют разным фазам истории нагружения конструкции.

Программа ANSYS использует активный набор элементов, определенный перед первым шагом нагрузки, и для выполнения последующих шагов, вне зависимости оттого, меняется ли активный набор между шагами нагрузками. Для выбора активного набора элементов, применяется следующая команда:

Команда изменения активного набора элементов **ESEL**

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → Select→Entities

На рисунке 2 показана последовательность приложения нагрузок, которая требует приложения трех шагов - увеличения нагрузки на первом шаге, постоянной нагрузки на втором и уменьшения нагрузок на третьем шаге.

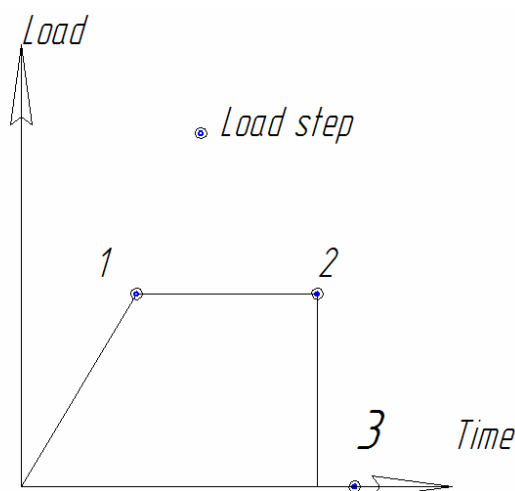


Рисунок 2 - Использование нескольких шагов нагрузки при анализе переходных процессов

*Промежуточный шаг* - промежуточный этап внутри шага нагрузки, для которого также может быть получено решение. Они могут использоваться в следующих случаях:

-при выполнении нелинейного статического (нелинейного стационарного) расчета промежуточный шаг применяется для непрерывного приложения нагрузок при получении точного решения:



-при выполнении расчета линейного или нелинейного переходного процесса промежуточный шаг применяется для удовлетворения принципам интегрирования по времени (поскольку для получения точного решения требуются минимальные шаги по времени течения процесса):

-при выполнении расчета вынужденных колебаний промежуточный шаг применяется для получения решения для нескольких частот в пределах назначенного спектра.

*Итерация* - дополнительный расчет, проводящийся в пределах промежуточного шага для получения сходимости решения. Итерация используется только в расчетах нелинейных процессов (статических и переходных), где она играет важную роль.

В качестве примера можно рассмотреть процесс получения решения для плоской (двухмерной) задачи. Для получения точного решения обычно используются два промежуточных шага (см. рисунок 3):

- на первом шаге нагрузки проводятся от 5 до 10 промежуточных шагов, каждый с одной итерацией решения;

-на втором шаге получается конечное, сошедшееся решение, с одним промежуточным шагом, для получения которого требуется от 15 до 25 итераций.

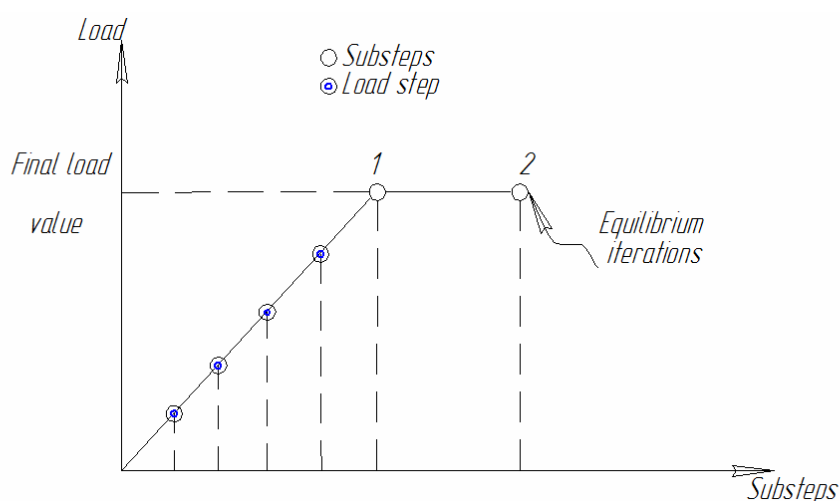


Рисунок 3 - Шаг нагрузки, промежуточный шаг и итерация

#### *Сущность времени при приложении нагрузок*

Программа ANSYS использует термин «время» как параметр приложения нагрузок при анализе всех статических или переходных процессов, вне зависимости от того, являются ли они действительно зависящими от времени. Преимущество подобного подхода заключается во введении во всех случаях нагружения независимого параметра (счетчика), устраняющего потребность в иных параметрах, зависящих от процесса нагружения. Кроме того, параметр времени всегда монотонно увеличивается, и большинство процессов также развивается с течением времени, за исключением коротких периодических процессов.

Очевидно, что при анализе переходных процессов или процессов, связанных со скоростью (ползучесть или вязкопластичность) параметр времени является хронологическим временем, определяемым в секундах, минутах или часах. Время назначается в конце каждого шага нагрузки при определении хронологии нагружения командой **TIME**. Для назначения времени используется указанная ниже команда.

Команда назначения времени **TIME**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Time/Frequenc → Time and Substps or Time -Time Step

Main Menu → Solution → Sol'n Control:Basic Tab

Main Menu → Solution → Time/Frequenc → Time and Substps or Time - Time Step

Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Time/Frequenc → Time and Substps or Time - Time Step

При выполнении расчетов процессов, не зависящих от скорости, *время* является параметром (счетчиком), идентифицирующим шаги нагрузки и промежуточные шаги. По умолчанию, программа автоматически назначает время, равное 1.0, в конце шага нагрузки № 1. время 2.0 в конце шага нагрузки № 2. и так далее. Любым промежуточным шагам в пределах шага нагрузки будет назначено соответствующее значение времени, определенное линейной интерполяцией. Присваивая собственное время в таких исследованиях, пользователь может назначать свои параметры слежения за процессом нагружения. Например, если нагрузка в 100 единиц должна прикладываться с шагом в 1 единиц}, можно присвоить шагу нагрузки время, равное 100, для синхронизации нагружения и времени приложения нагрузок.

При просмотре результатов в постпроцессоре, при создании зависимости перемещения от времени, таковая зависимость фактически является связью перемещения и нагрузки. Данная постановка полезна, например, при анализе устойчивости упругих систем с большими перемещениями, где целью расчета является исследование связи перемещений с приращением нагрузок.

Время имеет иное значение при использовании в решении метода длины дуги нагружения. В этом случае, расчетное время равно значению времени в начале шага нагрузки, к которому прибавляется длительность приложения текущего шага нагрузки (с \четом множителя для действующих нагрузок). Параметр ALLF не может монотонно увеличиваться (то есть может увеличиваться, уменьшаться или даже становиться отрицательным) и становится равным 0 в начале каждого шага нагрузки. В результате, при использовании сложной траектории нагружения, время не является счетчиком выполненных решений.

*Скачкообразное (ступенчатое) и плавное приложение нагрузок*

Если в шаге нагрузки определен более чем один промежуточный шаг, то можно провести разделение между ступенчатым или плавным приложением нагрузок:

-если нагрузка прикладывается скачком, то ее полное значение прикладывается уже на первом промежуточном шаге и далее нагрузка остается постоянной для остальных промежуточных шагов, как показано на рисунке 1.

- если нагрузка прикладывается постепенно. то увеличение ее значения происходит постепенно на каждом промежуточном шаге, а полное значение достигается в конце шага нагрузки, как показано на рисунке 4.

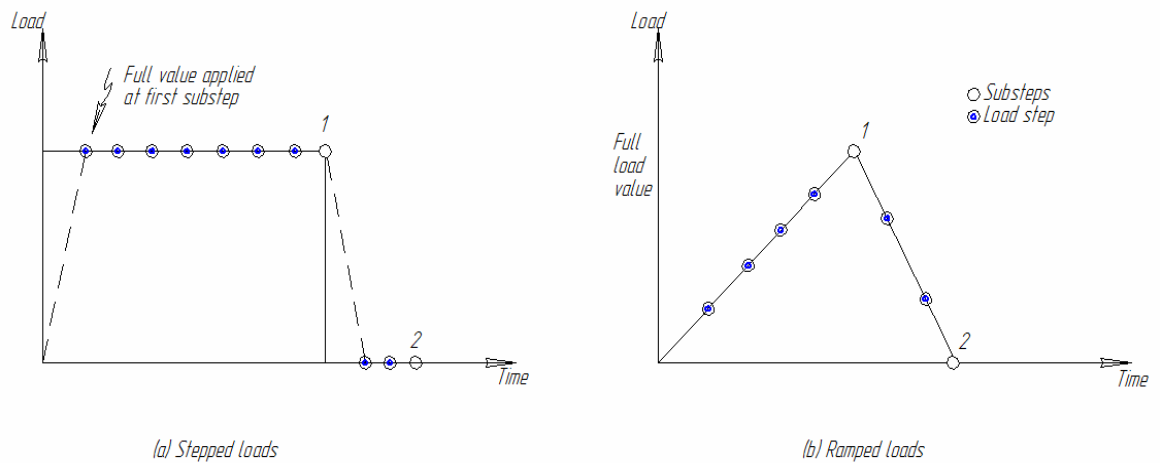


Рисунок 4 - Приложение нагрузки скачкообразное и плавное

Команда **КВС** используется для указания способа приложения нагрузки скачкообразного или плавного.

Команда **КВС** вызываемая из экранного меню последовательностью:

Main Menu → Solution → Sol'n Control:Transient Tab

Main Menu → Solution → Time/Frequenc → Freq & Substeps / Time and Substps / Time & Time Step

Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Time/Frequenc → Freq & Substeps / Time and Substps / Time & Time Step

Команда **КВС,0** определяет плавное приложение нагрузок, команда **КВС.1** скачкообразное приложение нагрузок. Значение по умолчанию зависит от типа проводимого расчета.

*Опции шага нагрузки* являются набором опций, управляющих приложением нагрузок, например, значением времени, числом промежуточных шагов, тактов, плавным или ступенчатым приложением нагрузок. Другие опции шага нагрузки включают допуски сходимости (используемые в нелинейных исследованиях), демпфирование в задачах прочности и способы сохранения результатов расчета.

## *Приложение нагрузок*

Большинство нагрузок может быть приложено к объектам геометрической модели (к точкам, линиям и поверхностям) или к объектам конечноэлементной (расчетной) модели (к узлам или элементам). Например, сосредоточенная сила может быть приложена в точке или в узле. Аналогично конвекция (или другая нагрузка на поверхности) может быть указана для линий и поверхностей или для узлов и ребер элементов. Независимо от того, как прикладываются нагрузки, в расчете участвуют нагрузки, приложенные к объектам расчетной модели. Поэтому если нагрузки приложены к геометрической модели, программа автоматически переносит таковые при вызове процедуры расчета на узлы и элементы расчетной модели.

### *Приложение нагрузок к геометрической модели*

#### *Достоинства*

- Нагрузки, приложенные к геометрической модели, не зависят от сетки конечных элементов. Это значит, что сетку можно изменять без изменения приложенных нагрузок. Это позволяет проводить изменение сетки и исследовать взаимосвязь сетки и результатов расчета без необходимости повторного приложения нагрузок.

-Геометрическая модель обычно содержит меньшее число объектов, чем расчетная модель. Поэтому приложение нагрузок к геометрической модели проще и удобнее, чем приложение нагрузок к расчетной модели, в особенности, путем использования меню и мыши.

#### *Недостатки*

-Элементы, созданные командами создания сетки, имеют элементную систему координат, совпадающую с активной системой координат. Узлы, созданные командами создания сетки, имеют узловую систему координат, совпадающую с глобальной декартовой системой координат. Поэтому геометрическая модель и расчетная модель могут иметь различные системы координат и направления нагрузок.

- Нагрузки, приложенные к геометрической модели, не всегда удобны в задачах с усечением матрицы жесткости (некоторые варианты расчета динамических свойств и суперэлементы). в которых нагрузки прикладываются в управляющих степенях свобод. Управляющие степени свобод (master DOF) создаются исключительно в узлах, а не в точках.

-Приложение граничных условий (закреплений) в точках может оказаться сложным, особенно при использовании опции расширения закреплений (данная опция позволяет приложить перемещения не только к двум точкам, но и ко всем узлам, лежащим на линии, связывающей эти две точки).

-Одновременный просмотр всех нагрузок, приложенных к геометрической модели, невозможен.

### *Примечания, относящиеся к приложению нагрузок к геометрической модели*

Как указывалось выше, нагрузки, приложенные к геометрической модели, автоматически передаются при вызове процедуры расчета узлам и элементам расчетной модели. Все нагрузки, приложенные к узлам и элементам, при этом автоматически обновляются. Удаление нагрузок, приложенных к геометрической модели, влечет за собой удаление всех соответствующих им нагрузок, приложенных к узлам и элементам.

### *Приложение нагрузок к конечно-элементной модели*

#### *Достоинства*

-При выполнении исследований с применением усечения матрицы жесткости проблем не встречается, поскольку нагрузки прикладываются в управляющих узлах;

-Необходимости в проверке действия расширения закреплений нет. Требуемые узлы выбираются пользователем, и далее на них накладываются требуемые перемещения (или закрепления).

#### *Недостатки*

- Любое изменение сетки конечных элементов приводит к удалению приложенных нагрузок и требует повторного приложения таковых;

-Приложение нагрузок при помощи меню и мыши несколько неудобно, если только действие команды приложения нагрузок не распространяется на ряд элементов или узлов;

Ряд приведенных ниже разделов содержат информацию по приложению каждой категории нагрузок связей (перемещений), сосредоточенных сил, поверхностных нагрузок, объемных нагрузок, инерции и нагрузок связных расчетов, а также по выбору опций шагов нагрузок.

### *Ограничения степеней свобод*

В таблице 1 указаны степени свободы (DOF – degrees of freedom), которые могут применяться в разных типах исследований. Любые направления степеней свобод (такие, как UX, ROTZ, AY, и так далее) определяются в узловой системе координат. Описание различных систем координат отдельно.

В таблице 2 приведены команды приложения, просмотра и удаления ограничений на степени свободы. Следует обратить внимание на то, что закрепления могут налагаться на узлы, точки, линии и поверхности.

Таблица 1 - Степени свободы, применяемые в различных видах исследования

Вид исследования	Степени свободы	Обозначение степеней свобод
Прочность	Перемещение	UX, UY, UZ
	Поворот	ROTX, ROTY, ROTZ

Ниже приведены примеры вызова из меню некоторых команд.

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → -Loads- → Apply → load type → On Nodes

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → List → Loads → DOF Constraints → On Keypoints

Вызов из крайнего меню:

Main Menu → Solution → Apply → load type → On Lines

Дополнительную информацию о командах приложения связей и способах их вызова см. ниже в описании отдельных команд.

#### *Приложение симметричных и антисимметричных граничных условий*

Для приложения симметричных или антисимметричных граничных условий к плоскости, в которой лежат узлы, применяется команда **DSYM**. Команда автоматически создает соответствующие ограничения степеней свобод. При выполнении расчетов прочности, например, симметричные граничные условия означают, что перемещения узлов из плоскости и вращение данного узла вокруг нормали к плоскости запрещены, а антисимметричные граничные условия соответствуют запрещению перемещения узла в плоскости и вращения узла вокруг осей, лежащих в плоскости. Все узлы, лежащие в указанной плоскости, переводятся в систему координат, указанную опцией *KCN* команды **DSYM**. Использование симметричных и антисимметричных граничных условий показано на рисунке 1. Команды **DL** и **DA** производят аналогичные операции для симметричных и антисимметричных граничных условий, прикладываемых на линии или поверхности.

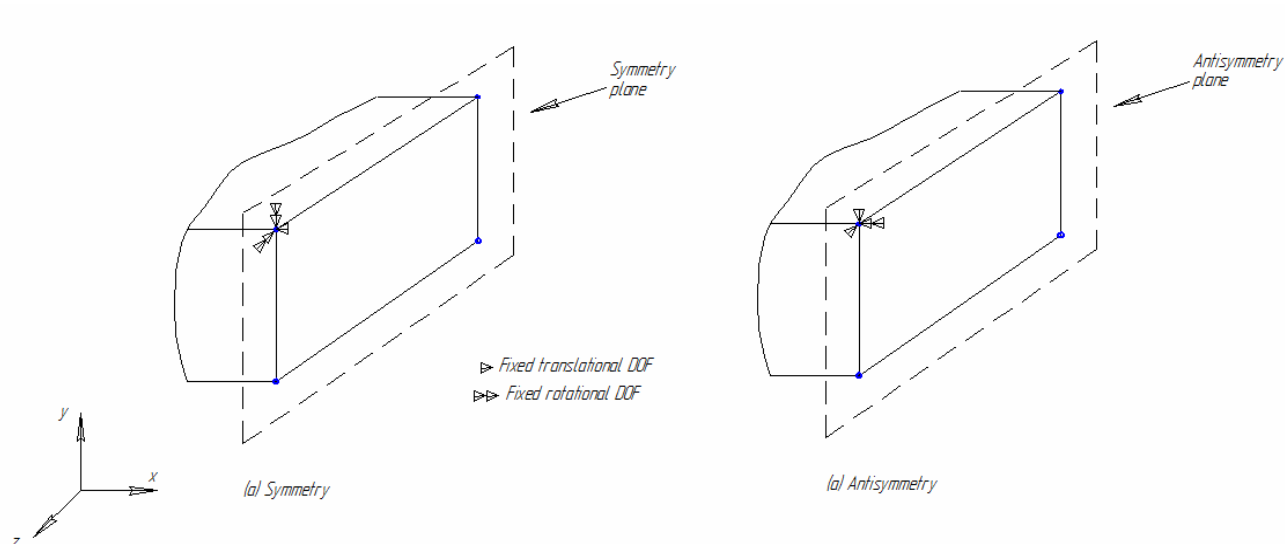


Рисунок 5 - Симметричные и антисимметричные граничные условия в задачах прочности

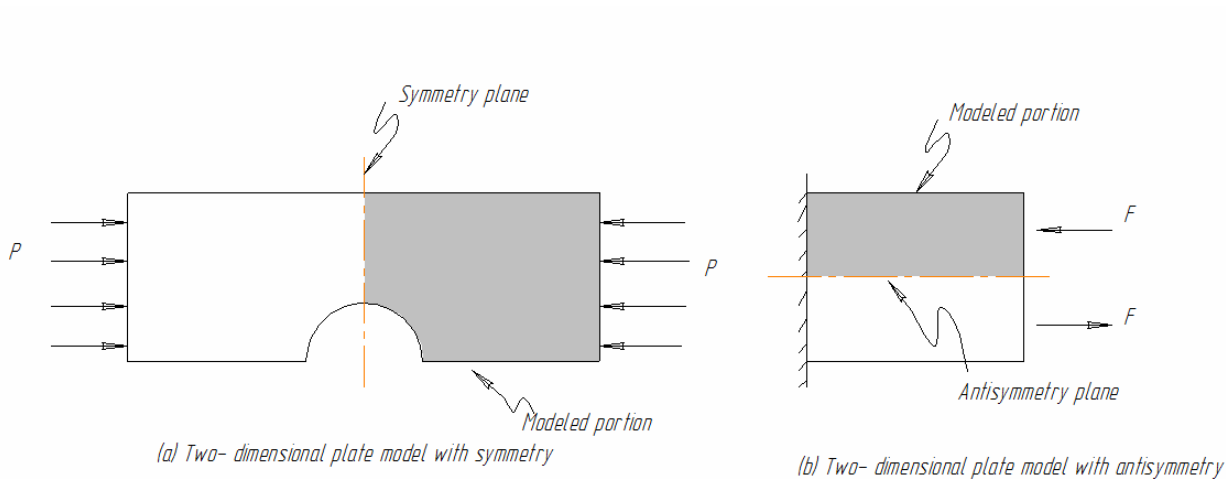


Рисунок 6 - Примеры симметричных и антисимметричных граничных условий

### Передача граничных условий

Передача граничных условий, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится следующей командой:

Команда передачи граничных условий **DTRAN**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → -Transfer to FE- → Constraints  
 Main Menu → Solution → Operate → -Transfer to FE- → Constraints

Передача всех нагрузок, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится следующей командой:

Команда передачи всех нагрузок **SBCTRAN**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → -Transfer to FE- → All Solid Main Menu → Solution → Operate → Transfer to FE → All Solid

### *Повторное указание граничных условий*

По умолчанию, если для одного и того же узла указывается новое значение степени свободы, новое значение заменяет предыдущее. Эту установку по умолчанию можно изменить, чтобы добиться добавления (или накопления) значений степеней свобод командой **DCUM** (или. из экранного меню. Main Menu → Preprocessor → Loads → Settings → - Replace vs. Add- → Constraints).

### *Масштабирование граничных условий*

Масштабирование граничных условий (степеней свобод) проводится командой **DSCALE**.

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → -Scale FE Loads- → Constraints

Main Menu → Solution → Operate → -Scale FE Loads- → Constraints

Обе команды **DSCALE** и **DCUM** действуют на степени свобод узлов, находящихся в активном наборе, и на выбранные степени свобод. По умолчанию, выбираются все -степени свобод, применяемые для существующих в расчетной модели элементов.

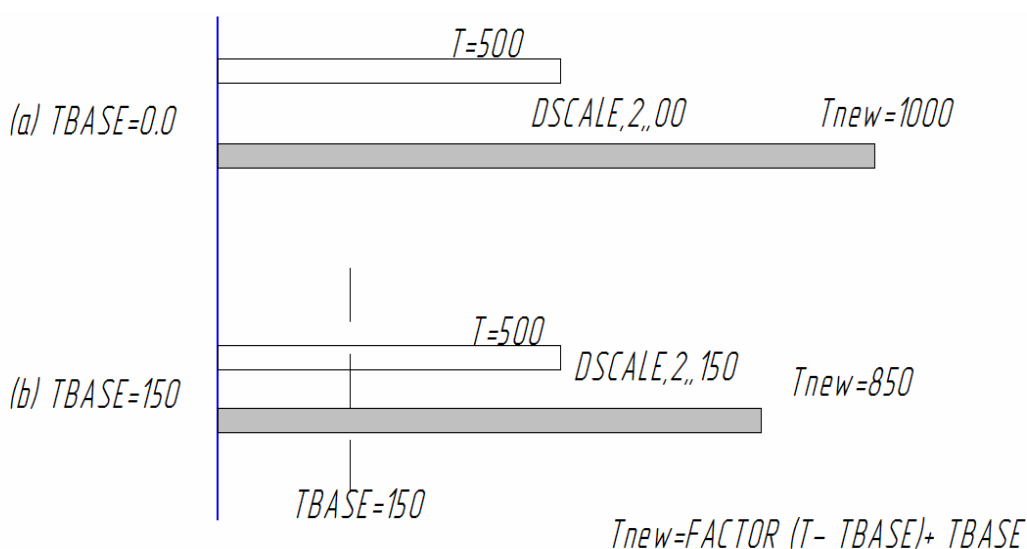


Рисунок 7 - Масштабирование температур командой **DSCALE**

*Усилия (сосредоточенные нагрузки)*



В таблице 1 показаны усилия, применяемые в каждом виде исследования и обозначения этих усилий. Направления усилий, подразумеваемые обозначениями (например, FX, MZ, CSGY и так далее) соответствуют узловой системе координат. Команды приложения, просмотра и удаления усилий перечислены в таблице 1. Следует обратить внимание, что усилия могут прикладываться как в узлах, так и в точках.

Таблица 1 - Сосредоточенные нагрузки, применяемые в различных видах исследований

Вид исследования	Усилие	Обозначение усилий
Прочность	Сила	FX, FY, FZ
	Момент	MX, MY, MZ
Тепловой	Скорость потока тепла	HEAT

Таблица 2 - Команды приложения связей (закреплений)

Тип объекта	Базовые команды	Дополнительные команды
Узлы	<b>F, FLIST, FDELE</b>	<b>FSCALE, FCUM</b>
Точки	<b>FK, FKLIST, FKDELE</b>	
Перенос усилий	<b>SBCTRAN</b>	<b>FTRAN</b>

Ниже приведены примеры вызова из меню некоторых команд.

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → -Loads-Apply → load type → On Nodes

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → List → Loads → Forces → On Keypoints

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → -Loads-Apply → load type → On Lines

Дополнительную информацию о командах приложения сосредоточенных нагрузок и способах их вызова см. ниже в описании отдельных команд.

#### *Повторное указание сосредоточенных нагрузок*

По умолчанию, если для одного и того же узла указывается новое значение сосредоточенной нагрузки, новое значение заменяет предыдущее. Эту установку по умолчанию можно изменить, чтобы добиться добавления (то есть накопления) или игнорирования новых значений сосредоточенных нагрузок указанной ниже командой.

#### *Масштабирование сосредоточенных нагрузок*

Масштабирование граничных условий (степеней свобод) командой **FCUM**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → -Scale FE Loads- Forces ->- Main Menu → Solution → Operate → -Scale FE Loads- Forces

*Передача сосредоточенных нагрузок*

Передача сосредоточенных нагрузок, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится следующей командой **FTRAN**.

*Поверхностные нагрузки (распределенные усилия)*

В таблице 3 показаны поверхностные нагрузки, применяемые в каждом виде исследования и обозначения этих усилий. Команды приложения, просмотра и удаления усилий перечислены в таблице 4. Следует обратить внимание, что эти нагрузки могут прикладываться как в узлах и элементах, так и по линиям и поверхностям.

Таблица 3 - Поверхностные нагрузки, применяемые в различных видах исследований

Вид исследования	Усилие	Обозначение усилий
Прочность	Давление	PRES <sup>1</sup>
Тепловой	Конвекция	CONV
	Поток тепла	HFLUX
	Условия в бесконечности	INF

Таблица 4 - Команды приложения распределенных нагрузок

Тип объекта	Базовые команды	Дополнительные команды
Узлы	SF, SFLIST, SFDELE	SFSCALE, SFCUM, SFFUN, SFGRAD
Элементы	SFE, SFELIST, SFDELE	SFBEAM, SFFUN, SFGRAD
Линии	SFL, SFLLIST, SFLDELE	SFGRAD
Поверхности	SFA, SFALIST, SFADELE	SFGRAD
Перенос усилий	SFTRAN	

Ниже приведены примеры вызова из меню некоторых команд.

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → -Loads- → Apply → load type → On Nodes

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → List → Loads → Surface Loads → On Elements

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → -Loads- → Apply → load type → On Nodes

Примечание. Программа ANSYS запоминает приложенные поверхностные нагрузки в формате элементов и граней элементов. Поэтому, если для одной и той же поверхности используются поверхностные нагрузки, приложенные как к узлам, так и к элементам, использоваться будут нагрузки, приложенные к элементам.

Программа ANSYS прикладывает давление к КЭ тонкостенных оболочек или балочным элементам соответственно на их внутренних или наружных поверхностях. Вектор приложения поверхностных нагрузок для многослойных оболочек (элементы SHELL91 и SHELL99) ориентирован относительно поверхности, в которой лежат узлы элементов. Признак KEYOPT(11) определяет поверхность, содержащую узлы оболочки. При использовании плоских элементов для представления поверхностей II порядка значения радиусов кривизны будут определяться неточно.

#### *Приложение распределенных усилий к балкам*

Для приложения давления на боковых гранях и на концах балочных КЭ. используется команда **SFBEAM**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Apply → -Structural- → Pressure  
→ On Beams Main Menu → Solution → Apply → -Structural- → Pressure  
→ On Beams

Существует возможность приложения распределенной нагрузки, имеющей размерность силы, отнесенной к длине, по нормали и по касательной. Давления могут линейно изменяться, а также прикладываться к части элемента, как показано на рисунке 8. Можно также сводить давление в точку (фактически, создавая сосредоточенную силу) в любом месте элемента путем присвоения опции *JOFFST* значения

- 1. Давления в конечных точках имеют размерность силы.

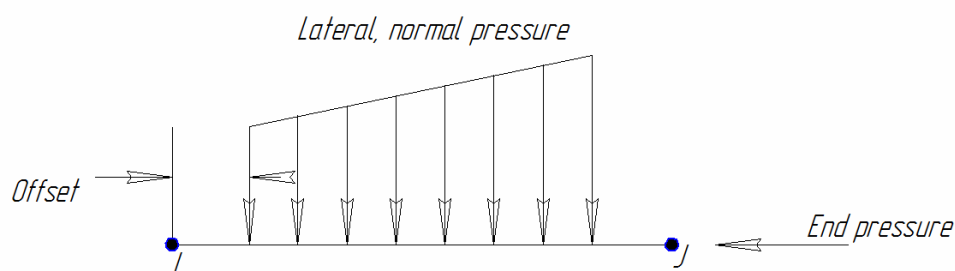


Рисунок 8 - Пример приложения распределенной нагрузки к балке

#### *Повторное указание поверхностных нагрузок*

По умолчанию, если для одной и той же поверхности указывается новое значение нагрузки, новое значение заменяет предыдущее. Эту установку по умолчанию можно изменить, чтобы добиться добавления (то

есть накопления) или игнорирования новых значений нагрузок указанной ниже командой.

Команда **SFCUM**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → -Loads-Settings → Surface Loads

Main Menu → Solution → -Loads- Settings → -Replace vs. Add - Surface Loads

Любые поверхностные нагрузки, изменяемые между вызовами команды **SFCUM**, обрабатываются одинаково. Восстановление настроек по умолчанию производится вызовом команды **SFCUM** без аргументов. Команда **SFSCALE** позволяет производить масштабирование поверхностных нагрузок. Обе команды **SFSCALE** и **SFCUM** действуют на нагрузки элементов, находящихся в активном наборе. Аргумент *Lab* позволяет указывать тип поверхностной нагрузки.

#### *Передача поверхностных нагрузок*

Передача распределенных по поверхности нагрузок. приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится следующей командой - **ВРТКАН**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → -Transfer to FE- → Surface Loads

Main Menu → Solution → Operate → -Transfer to FE- → Surface Loads

Передача всех нагрузок, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится командой **SBCTAN**.

#### *Использование элементов, обладающих свойствами поверхностных эффектов, для приложения распределенных по поверхности нагрузок*

В ряде случаев требуется приложение поверхностной нагрузки, которую не воспринимают используемые типы конечных элементов. Например, к таким нагрузкам относится однородная касательная (или произвольно ориентированная) нагрузка, распределенная по поверхности, действующее вдоль линии излучение в тепловых задачах и тому подобное. В таких случаях на поверхности, подвергаемой указанным воздействиям, создаются специальные элементы, воспринимающие эти нагрузки. В настоящее время существуют следующие элементы с поверхностными эффектами: SURF151 и SURF153 для двумерных моделей и SURF152 и SURF154 для трехмерных моделей.

#### *Объемные нагрузки*

В таблице 5 показаны объемные нагрузки, применяющиеся в разных видах исследований, и соответствующие им обозначения. В таблице 127.8

приведены команды, позволяющие прикладывать, просматривать и удалять нагрузки. Нагрузки могут прикладываться к узлам, элементам, точкам, линиям, поверхностям и объемам.

Таблица 5 - Поверхностные нагрузки, применяемые в различных видах исследований

Вид исследования	Усилие	Обозначение усилий
Прочность	Температура	TEMP <sup>1</sup>
	Разбухание	FLUE
Тепловой	Скорость выделения тепла	HGEN

1 – Не путать со степенью свободы TEMP

Таблица 6 - Команды приложения распределенных нагрузок

Тип объекта	Базовые команды	Дополнительные команды
Узлы	<b>BF. BFLIST, BFDELE</b>	<b>BFSCALE. BFCUM, BFUNIF</b>
Элементы	<b>BFE. BFELIST, BFEDELE</b>	<b>BFESCAL, BFECKM</b>
Точки	<b>BFK. BFKLIST. BFKDELE</b>	
Линии	<b>BFL, BFLLIST. BFLDELE</b>	
Поверхности	<b>BFA. BFALIST. BFADELE</b>	
Объем	<b>BFV. BFVLIST. BFVDELE</b>	
Передача	<b>BFTRAN</b>	

Ниже приведены примеры вызова из меню некоторых команд.

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → -Loads-Apply → load type → On Nodes

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → List → Loads → Body Loads → On Picked Elems

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → -Loads- Apply → load type → On Keypoints

Вызов из выпадающего меню:

Utility Menu → List → Loads → Body Loads → On Picked Lines

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → -Loads-Apply → load type → On Volumes

Описания команд приложения объемных нагрузок см. ниже в текущей главе.

Примечание. Объемные нагрузки, прикладываемые к узлам, независимы от объемных нагрузок, прикладываемых к элементам. Для текущего элемента ANSYS определяет нагрузки следующим образом:

- используются нагрузки, приложенные к элементам;
- если нагрузок, приложенных к элементам, нет, используются нагрузки, приложенные к узлам;

если нагрузок, приложенных к узлам и элементам, нет. используются нагрузки, указанные командой **BFUNIF**.

#### Указание объемных нагрузок для элементов

Команда **BFE** определяет объемные нагрузки в общих узлах нескольких элементов. Однако, можно указывать нагрузки в нескольких узлах одного элемента, создавая несколько векторов нагружения одного элемента. Применяемые узлы различаются в зависимости от типа элемента, как показано на приводимых примерах. Значения по умолчанию (для узлов, в которых нагрузки не определяются) также зависят от типа элемента. Поэтому прежде, чем прикладывать нагрузки к элементу, следует ознакомиться с его описанием по документации.

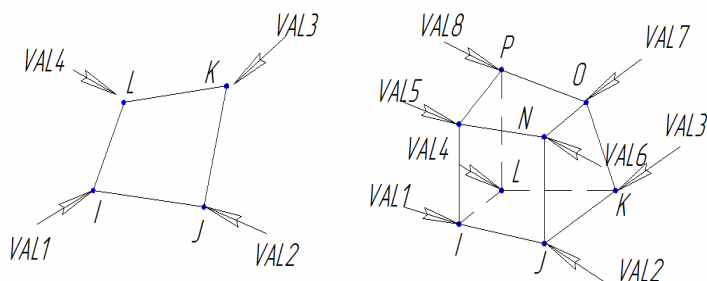


Рисунок 9 - Нагрузки, приложенные к КЭ объемного тела командами **BFE**

- Для двумерных и трехмерных элементов объемного тела (**PLANE<sub>n</sub>** и **SOLID<sub>n</sub>**) объемные нагрузки прикладываются в угловых узлах.
- Для элементов оболочки (**SHELL<sub>n</sub>**) объемные нагрузки прикладываются в угловых псевдоузлах, лежащих снизу и сверху элемента на наружной и внутренней поверхностях.

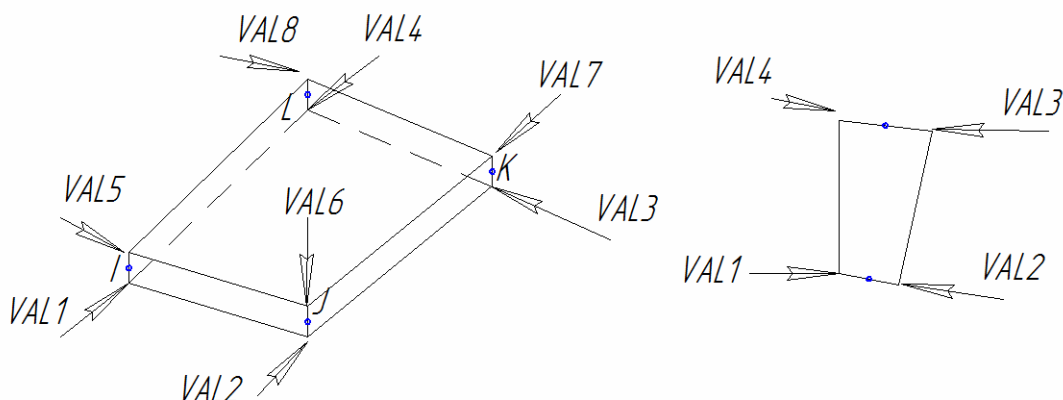


Рисунок 10 - Применение команды **BFE** для оболочек (слева элемент **SHELL63**, справа **SHELL51**)

- Для стержневых и балочных элементов (BEAMn, LINKn, PIPEn и так далее) объемные нагрузки прикладываются аналогично оболочкам, в конечных псевдоузлах.

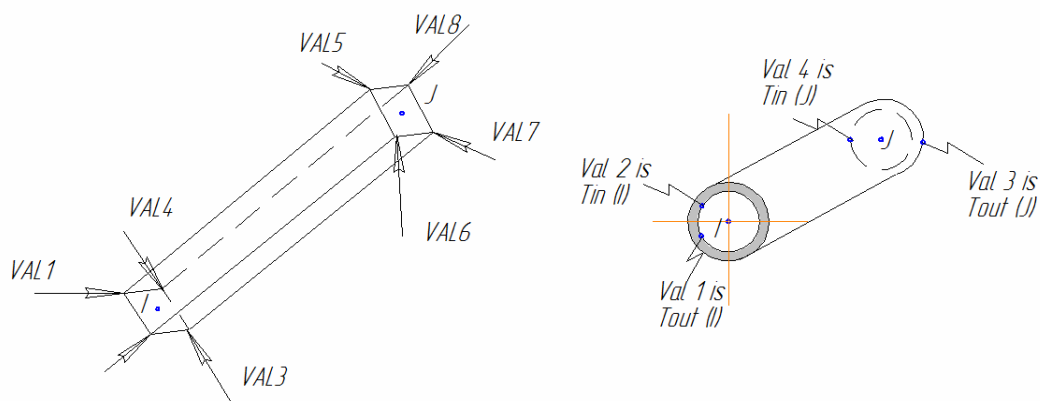


Рисунок 11 - Применение команды VFE для балок

#### *Указание объемных нагрузок для линий, поверхностей и объемов*

Для указания объемных нагрузок на линиях, поверхностях и в объемах используются соответственно команды **BFL**, **BFA** и **BFV**. Объемные нагрузки, приложенные к линиям, передаются соответствующим узлам расчетной модели. Объемные нагрузки, приложенные к поверхностям и объемам, передаются соответствующим элементам расчетной модели.

#### *Повторное указание объемных нагрузок*

По умолчанию, если для одних и тех же узлов или элементов указывается новое значение нагрузки, новое значение заменяет предыдущее. Эту установку по умолчанию можно изменить, чтобы добиться игнорирования новых значений нагрузок указанными ниже командами.

#### **Команды BFCUM, BFECUM**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Settings → Nodal Body Ld

Main Menu → Preprocessor → Loads → Settings → Elem Body Lds

Main Menu → Solution → Settings → Nodal Body Ld

Main Menu → Solution → Settings → Elem Body Lds

Установки, созданные данными командами, вызванными из меню или командной строки, действуют до следующего вызова команд. Восстановление настроек по умолчанию производится вызовом команд из меню или командной строки без аргументов.

#### *Передача объемных нагрузок*

Передача объемных нагрузок, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится следующей командой:

Команда передачи сосредоточенных нагрузок **SFTRAN**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → Body Loads

Main Menu → Solution → Operate → Body Loads

Передача всех нагрузок, приложенных к геометрической модели, в расчетную модель, производится командой **SBCTRAN** (см. выше).

### *Масштабирование объемных нагрузок*

Масштабирование объемных нагрузок проводится указанными ниже командами.

Команда **BFSCALE**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor →→ Loads → Operate → Nodal Body Ld

Main Menu → Solution → Operate → Nodal Body Ld

Команда **BFESCALE**

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Operate → Elem Body Lds

Main Menu → Solution → Operate → Elem Body Lds

Команды **BFCUM** и **BFSCALE** действуют на узлы, находящиеся в активном наборе, а команды **BFECUM** и **BFTSCALE** на элементы, находящиеся в активном наборе.

### *Инерционные нагрузки*

Набор команд приложения инерционных нагрузок приведен ниже.

Таблица 7 - Команды приложения распределенных нагрузок

Команда	Вызов из меню
ACEL	Main Menu → Preprocessor → FLOTRAN Set Up → Flow Environment Gravity
	Main Menu → Preprocessor → Loads → Apply → Gravity
	Main Menu → Preprocessor → Loads → Delete → Gravity
	Main Menu → Solution → FLQTRAN Set Up → Flow Environment → Gravity
	Main Menu → Solution → Apply→→ Gravity

Команды **ACEL**, **OMEGA** и **DOMEGA** определяют ускорение, угловую скорость и угловое ускорение в глобальной декартовой системе координат.

Примечание. Команда **ACEL** определяет ускорение (не гравитационное), приложенное к телу. Поэтому, чтобы приложить гравитационное ускорение свободного падения, действующее в отрицательном направлении оси Y, следует указывать положительное значение в направлении оси Y.



Команды **CGOMGA** и **DCGOMG** используются для указания угловой скорости и углового ускорения вращающегося тела, самостоятельно вращающегося относительно произвольной системы координат. Команда **CGLOC** определяет расположение системы координат относительно начала декартовой системы координат. Эти команды совместно могут использоваться для учета сил Кориолиса при исследовании прочности конструкции.

Инерционные нагрузки имеют смысл только в случае, если модель обладает массой, которая создается на основе плотности материала. Масса модели может быть получена путем применения массового элемента, например, типа **MASS21**, но в большинстве задач чаще используется плотность.

Весовая плотность используется вместо массовой плотности исключительно в следующих условиях:

- модель используется исключительно для статического расчета;
- никаких угловых скоростей или угловых ускорений не прикладывается;

- гравитационное ускорение принимается равным единице ( $g = 1.0$ ).

Удобный способ определения плотности с возможностью использования ее для весовой плотности или без расхождений с массовой плотностью заключается в определении ускорения свободного падения  $g$  в следующем виде:

### *Нагружение начальными напряжениями*

При выполнении исследования прочности в качестве нагрузок ANSYS позволяет использовать начальные напряжения. Нагружение начальными напряжениями допускается при расчете статических и переходных процессов (в том числе для решения линейных и нелинейных задач). Одинаковые для ряда элементов начальные напряжения могут быть определены при помощи команды **ISTRESS**. Для чтения начальных напряжений из входного файла, просмотра таковых и их удаления используется команда **ISFILE**. Аргументы команды позволяют ограничить присвоение начальных напряжений элементам на основе указания номеров материала. Начальные напряжения могут указываться для следующих типов элементов: **PLANE2**, **PLANE42**, **SOLID45**, **PLANE82**, **SOLID92**, **SOLID95**, **LINK180**, **SHELL 181**, **PLANE182**, **PLANE183**, **SOLID185**, **SOLID186**, **SOLID 187**, **BEAM 188**, и **BEAM 189**.

## **8.8 Получение решения**

Пользователь получает результаты анализа на стадии решения, после того как в процессе препроцессорной подготовки построена расчетная модель. Эта фаза применения программы ANSYS состоит в задании вида

анализа и его опций, нагрузок и шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи.

Выбранный вид анализа указывает программе, какие разрешающие уравнения следует использовать для решения данной задачи. Самый общий набор доступных категорий расчета состоит из средств решения прочностных и тепловых задач, средств анализа при действии электростатических, электрических и электромагнитных полей, решения задач гидроаэродинамики и связанных задач.

Каждая категория расчетов включает несколько их отдельных типов, как например, статический и динамический типы прочностных расчетов. Выбором опций можно дополнительно определить особенности проводимого анализа. Так, например, для решения нелинейных уравнений имеется возможность указать один из нескольких вариантов метода Ньютона-Рафсона.

Заданные нагрузки и ограничения определяют граничные условия для расчетной модели. К нагрузкам относятся ограничения степеней свободы, сосредоточенные, распределенные, объемные и инерционные усилия. Конкретный вид нагрузок зависит от вида проводимого анализа (например, приложенная в точке нагрузка может быть сосредоточенной силой при прочностном анализе или тепловым потоком при расчете теплопередачи). Каждое заданное сочетание (конфигурация) нагрузок называется шагом нагружения, и анализ может состоять из одного или более таких шагов. Значения нагрузки для данного шага нагружения могут меняться постепенно от шага к шагу (т.е. нагрузка может быть плавной, иметь наклонный участок) или меняться скачком за один шаг. Последний вариант можно использовать, например, для моделирования резкого нагружения при анализе переходных, нестационарных процессов.

Например, к конструкции можно приложить ветровую нагрузку на первом шаге нагружения, а на втором - гравитационную нагрузку. При нестационарном анализе полную последовательность нагрузок полезно разбить на несколько шагов нагружения. *Шаг решения* - это изменение счетного шага внутри шага нагружения; используется главным образом при нестационарном и нелинейном анализе для улучшения точности и сходимости. Шаг решения так-же называют *шагом по времени*, т.е. шагом, выполняемым в течение некоторого промежутка времени.

Опции шага нагружения используются для организации массивов выходных величин, управления сходимостью решения и обычного определения нагрузок на шаге нагружения. Так, например, пользователь может задать число дополнительных, более мелких, шагов в пределах одного шага нагружения или указать, должна ли нагрузка меняться плавно на данном шаге нагружения.

Для указания допустимых пределов изменения степеней свободы в узлах модели могут использоваться заданные условия-ограничения. Например, в соответствии с требованиями прочностного анализа могут быть ограничены повороты и смещения узлов на закрепленном крае объекта расчета. Кроме

возможности задавать ограничения на стадии получения решения, существует возможность делать это при препроцессорной подготовке, используя твердотельную или конечно-элементную модель. Ограничения степеней свободы, заданные на твердотельной модели, автоматически передаются программой в сеточную модель при инициализации процедуры численного решения.

На стадии получения решения имеется возможность изменить свойства материала и атрибуты конечного элемента, например, толщину, активизировать или деактивировать элементы (опции “есть” - birth и “нет” - death), указать ведущие степени свободы (MDOF) и определить условия в зазорах.

После того как все соответствующие параметры заданы, может быть выполнено и само решение. По команде SOLVE программа обращается за информацией о модели и нагрузках к базе данных и выполняет вычисления. Результаты записываются в специальный файл и в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файл могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

#### **Main Menu>Solution>Curent LS**

Пользователь поручает программе решить определяющие уравнения и получить результаты для выбранного вида анализа. В вычислительном отношении это самая интенсивная часть анализа, не нуждающаяся, однако, во вмешательстве пользователя. Она требует самых значительных затрат компьютерного времени и минимальных затрат времени пользователя.

#### *Методы решения уравнений*

Совокупность дискретных областей (элементов), связанных между собой в конечном числе точек (узлов), представляет собой математическую модель системы, поведение которой нужно анализировать. Основными неизвестными являются степени свободы узлов конечно-элементной модели. К степеням свободы относятся перемещения, повороты, температуры, давления, скорости, потенциалы электрических или магнитных полей; их конкретное содержание определяется типом элемента, который связан с данным узлом. В соответствии со степенями свободы для каждого элемента модели формируются матрицы масс, жесткости (или теплопроводности) и сопротивления (или удельной теплоемкости). Эти матрицы приводят к системам совместных уравнений, которые обрабатываются так называемыми “решателями”.

Набор степеней свободы, присутствующих в общей матрице на данный момент, называется волновым фронтом, который расширяется или сужается по мере того, как неизвестные вводятся в систему уравнений или исключаются из нее. После прохождения волнового фронта через все элементы и вычисления всех неизвестных можно переходить к стадии постпроцессорной обработки для отображения полученных результатов для всей модели в целом.

## 9 Прочностной статический анализ

В расчетах статических задач определяется влияние постоянных нагрузок, приложенных к конструкции, в которых игнорируются эффекты инерция и демпфирование, вызываемые нагрузками, изменяющимися во времени. Однако, в статическом расчете могут учитываться постоянные инерционные нагрузки (такие, как сила тяжести и скорость вращения), и нагрузки, изменяющиеся во времени, которые могут быть аппроксимированы статически эквивалентными нагрузками (например, эквивалентные ветровые и сейсмические нагрузки, обычно определяемые различными строительными нормами и правилами).

Расчеты статического НДС используются для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий в конструкции или деталях, вызванные нагрузками, которые не вызывают существенных эффектов инерции или демпфирования. Предполагается наличие постоянства внешних нагрузок и поведения конструкции, то есть изменение нагрузки, и ответное поведение конструкции считаются медленно изменяющимся во времени. Виды нагрузок, прикладываемых в статическом расчете, включают в себя:

внешние приложенные усилия и давления;

установившиеся силы инерции (например, сила тяжести или скорость вращения);

предписанные (ненулевые) перемещения;

температуры (для расчета температурных напряжений);

поток частиц (используется при расчете изменения размеров при облучении).

В программе ANSYS для решения этих задач используются численные методы. Разрешающее уравнение статического анализа записывается в виде:  $[K] \{u\} = \{F\}$ , где  $[K]$  - матрица жесткостей;  $\{u\}$  - вектор перемещений.

Компоненты вектора сил  $\{F\}$  могут представлять собой сосредоточенные силы, тепловые нагрузки, давления и силы инерции. Можно проводить расчеты по определению таких значений ускорений, которые обеспечивают статическое уравнивание приложенных к системе нагрузок.

### *Выполнение расчетов статического НДС*

Процедура расчета статических задач состоит из следующих действий:

- Создание модели;
- Выбор средств контроля решения;
- Указание дополнительных опций расчета;
- Приложение нагрузок;
- Выполнение расчета;
- Просмотр результатов.

### *Создание модели*

При создании модели следует определить имя задания (jobname) и заголовок, а далее использовать препроцессор PREP7 для указания типов элементов,

геометрических характеристик элементов, свойств материалов и геометрии модели. При выполнении расчетов статических задач МДТТ следует помнить следующее:

- допускается использование как линейных, так и нелинейных элементов МДТТ;
- свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными или ортотропными, а также постоянными или зависящими от температуры;
- свойства жесткости материала должны быть определены в одной из форм (например, модуль Юнга  $E$ , гиперупругие коэффициенты, и так далее);
- для инерционных нагрузок (например, силы тяжести) требуется указывать данные, требующиеся для определения массы, например, плотность (DENS);
- для температурных нагрузок (температур) требуется указывать коэффициент температурного расширения (ALPX).

Следует обратить внимание на следующую информацию относительно плотности сетки:

- области, в которых наблюдаются высокие градиенты напряжений или деформаций (обычно это области, вызывающие интерес исследователя) требуют относительно более мелкой сетки, чем в областях, в которых напряжения или деформации почти постоянны (в пределах элемента);
- при исследовании влияния нелинейностей следует помнить, что сетка должна учитывать влияние нелинейностей; например, пластичность требует рациональной плотности точек интегрирования (и поэтому достаточно густой сетки) в областях с высокими градиентами пластических деформаций.

#### *Выбор средств контроля решения*

Выбор средств контроля решения включает в себя определение типа расчета и общие опции расчета, а равно указание опций шага нагрузки. При выполнении расчета статического НДС можно использовать упрощенный способ указания опций (вызываемый диалоговой панелью Solution Controls). Диалоговая панель Solution Controls имеет настройки по умолчанию, которые удобны для расчета многих задач статического НДС, что означает, что изменению подлежит только малое число опций, если это вообще требуется. Поскольку упрощенный способ указания опций является рекомендуемым средством назначения средств контроля решения, в данной главе рассматривается именно этот метод.

Если пользователь предпочитает не использовать диалоговую панель Solution Controls (вызывается из экранного меню последовательностью Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Sol'n Controls), средства контроля решения могут назначаться путем использования стандартных команд комплекса

ANSYS. вызываемых, в том числе, из меню (Main Menu —> Solution —> Unabridged Menu —> option).

Для доступа к диалоговой панели Solution Controls из экранного меню используется последовательность Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Sol'n Controls.

#### *Использование вкладки Basic*

Диалоговая панель Solution Controls содержит пять вкладок, причем основные средства контроля собраны в первой вкладке, а каждая последующая содержит расширенные средства контроля. Путем последовательного выбора вкладок обеспечивается непрерывность указания опций расчета. Вкладка Basic активизируется при вызове диалоговой панели. Средства контроля, имеющиеся во вкладке Basic, обеспечивают минимальное количество данных, требующихся комплексу ANSYS для проведения расчета. После указания пользователем настроек, удовлетворяющих его требованиям, не требуется переходить к следующим вкладкам, кроме случая необходимости изменения настроек, имеющихся по умолчанию, для расширенных средств контроля. После нажатия кнопки ОК в любой вкладке настройки заносятся в базу данных ANSYS, и диалоговая панель закрывается.

Вкладка Basic используется для указания опций, перечисленных в качестве основных (Basic Tab Options). Для получения более подробной информации об использовании диалоговой панели Solution Controls и выборе опций при ее помощи следует вызвать данную диалоговую панель, выбрать вкладку Basic и нажать кнопку Help.

Особые указания по назначению этих опций при выполнении статических расчетов включают в себя следующее:

- при использовании команд ANTYPE и NLGEOM при выполнении нового расчета, в котором эффекты больших смещений, включающие в себя большие перемещения, большие повороты и большие деформации, игнорируются, указывается вариант Small Displacement Static (малые статические перемещения);
- выбор варианта Large Displacement Static (большие статические перемещения) соответствует ожидаемым большим отклонениям (например, в случае изгиба длинной тонкой балки) или большим деформациям (например, в задачах обработки металла);
- вариант Restart Current Analysis указывается в случае повторного вызова неудачно выполненного нелинейного расчета или в случае, если статический расчет уже выполнен, и требуется провести расчет для дополнительных нагрузок;
- при назначении аргументов команды TIME следует помнить, что данная опция шага нагрузки по времени определяет время конца шага нагрузки;
- по умолчанию значение времени для конца первого шага 1.0;

- для последующих шагов по умолчанию значение времени равно времени конца предыдущего шага, которому добавляется 1.0;
- несмотря на то, что для статического расчета время никакого физического смысла не имеет (кроме случаев учета ползучести, вязкопластичности и иных свойств материала, зависящих от скорости), оно используется в качестве удобного средства для связи с шагами нагрузки и промежуточными шагами;
- при назначении аргументов команды OUTRES следует учитывать предупреждение: по умолчанию, в файл результатов (Jobname.RST) записываются только 1000 наборов результатов; если это значение превышает (в соответствии с аргументами команды OUTRES), выполнение расчета будет прервано с диагностикой ошибки; для превышения этого предела используется команда /CONFIG,NRES).

### *Вкладка Transient*

Вкладка Transient содержит средства контроля расчета переходных процессов; она доступна только в случае применения переходных процессов и остается серой (опции в ней не указываются) при использовании статических расчетов. По этой причине в данном разделе она не описывается.

### *Использование вкладки Sol'n Option*

Вкладка Sol'n Options содержит опции, содержащиеся в списке Sol'n Options Tab Options (опции методов решения). Для получения более подробной информации об использовании диалоговой панели Solution Controls и выборе опций при ее помощи следует вызвать данную диалоговую панель, выбрать вкладку Sol'n Options и нажать кнопку Help.

Особые указания по назначению этих опций при выполнении статических расчетов включают в себя следующее:

- при использовании команды EQSLV можно выбрать один из следующих видов проведения расчета: - метод расчета по выбору программы (комплекс ANSYS самостоятельно выбирает метод расчета на основе физического смысла задачи); - метод расчета для разреженных матриц (по умолчанию применяется для линейных и нелинейных статических задач и полных переходных процессов), - метод предварительно сопряженных градиентов (PCG). рекомендуемый для больших моделей со значительной шириной матрицы жесткости; - алгебраический многоточечный метод (AMG), применяемый для тех же самых задач, что и метод PCG, но с использованием параллельных вычислений, при использовании многопроцессорной среды обеспечивает ускорение расчетов; - метод расчета для распределенных областей (DDS), применяемый для расчета на нескольких компьютерах, объединенных в сеть, с использованием параллельных вычислений; - итерационный метод (выбирается программой самостоятельно; предназначен только для расчетов линейных статических задач, полных переходных процессов и расчета температурного статического состояния; является рекомендуемым методом);
- прямой фронтальный метод.

Методы расчета AMG и DDS являются частью средств параллельных вычислений (Parallel Performance for ANSYS), то есть продуктом, имеющим отдельную лицензию.

#### *Использование вкладки Nonlinear*

Вкладка Nonlinear содержит опции, содержащиеся в списке Nonlinear Tab Options (опции нелинейных расчетов). Для получения более подробной информации об использовании диалоговой панели Solution Controls и выборе опций при ее помощи следует вызвать данную диалоговую панель, выбрать вкладку Nonlinear и нажать кнопку Help.

#### 2.3.2.6. Использование вкладки Advanced NL

Вкладка Advanced NL содержит опции, содержащиеся в списке Advanced NL Tab Options (расширенные опции нелинейных расчетов). Для получения более подробной информации об использовании диалоговой панели Solution Controls и выборе опций при ее помощи следует вызвать данную диалоговую панель, выбрать вкладку Advanced NL и нажать кнопку Help.

#### *Эффекты изменения жесткости при приложении нагрузки*

Некоторые элементы, включая семейство элементов 18х, учитывают эффект изменения жесткости модели при приложении нагрузки (stress stiffening) вне зависимости от значений аргументов команды **SSTIF**. Для определения возможности учета элементом изменения жесткости при приложении нагрузки следует обращаться к описанию соответствующих элементов. По умолчанию эффект изменения жесткости используется (значение ON) в случае, если команда **NLGEOM** имеет значение ON. Случаи, в которых использование эффекта изменения жесткости отключается (OFF), сводятся к следующему: изменение жесткости учитывается только в нелинейных задачах; при выполнении расчетов линейных задач (команда **NLGEOM,OFF**) эффект изменения жесткости отключается (OFF); до проведения расчета известно, что модель не подвергается потере устойчивости (бифуркация, прощелкивание).

Учет эффекта изменения жесткости, в общем случае, ускоряет сходимость нелинейных процессов. Учитывая указанное выше, можно включать учет эффекта изменения жесткости для ряда задач, в которых имеются проблемы сходимости решения, например, в задачах с локальной потерей устойчивости.

Вызов из экранного меню SSTIF: Main Menu —> Solution —> Unabridged Menu —> Analysis Options

#### *Учет начальных напряжений*

Данная опция применяется для учета наличия начальных напряжений в той же самой модели для последующего расчета, например, собственных форм и частот колебаний для предварительно нагруженной модели. Значение по умолчанию OFF (не используется).



Примечание. Учет обоих эффектов, как изменения жесткости при приложении нагрузки, так и наличия начальных напряжений, управляет созданием матрицы жесткости, и поэтому одновременно оба эффекта использоваться не должны. Если указывается учет обоих эффектов, используется последний указанный эффект.

Команда PSTRES

Вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Options

#### *Формулировка матрицы масс*

Данная опция используется при необходимости приложения к модели инерционных нагрузок (например, силы тяжести или центробежных нагрузок). Может указываться один из двух вариантов:

по умолчанию (в зависимости от типа элемента); конденсированная матрица масс.

Примечание. В статических расчетах формулировка матрицы масс существенно на точность расчета не влияет (в предположении, что сетка является достаточно подробной). Однако для расчетов динамических свойств моделей с начальными напряжениями выбор типа матрицы масс может быть существенен.

Команда LUMPM, вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Options

#### *Исходная температура (температура нуля шкалы относительно абсолютного нуля)*

Данная опция шага нагрузки используется при вычислении температурных деформаций. Исходная температура может указываться для материалов, зависящих от температуры, при помощи команды MP,REFT.

Команда TREF, вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → Load Step Opts → Other → Reference Temp

#### *Число узловых диаметров*

Данная опция шага нагрузки используется для осесимметричных гармонических элементов (осесимметричных элементов с возможностью неосесимметричного поведения).

Команда MODE, вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → Load Step Opts → Other → For Harmonic Ele

#### *Вывод результатов*

Данная опция шага нагрузки используется для помещения любых расчетных результатов в выходной файл (Jobname.OUT).

Команда OUTPR вызов из экранного меню:

Main Menu → Solution → Unabridged Menu → - Load Step Opts - Output Ctrls → Solu Printout

## 10 Прочностной динамический анализ

Прочностной динамический анализ используется для определения действия на конструкцию или ее составные части нагрузок, зависящих от времени. В отличие от статических расчетов в этом типе анализа принимается во внимание рассеяние энергии и инерционные эффекты переменных во времени нагрузок. Примерами таких нагрузок являются:

- циклические нагрузки (вращающиеся части оборудования);
- внезапно прикладываемые нагрузки (удар или взрыв);
- случайные нагрузки (землетрясение);

любые другие переменные нагрузки, типа движущихся нагрузок на мосты.

В программе ANSYS все виды динамического анализа основываются на следующем общем уравнении движения в конечно-элементной форме:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F(t)\},$$

где

$[M]$	- матрица масс;
$[C]$	- матрица сопротивлений;
$[K]$	- матрица жесткостей;
$\{u''\}$	- вектор узловых ускорений;
$\{u'\}$	- вектор узловых скоростей;
$\{u\}$	- вектор узловых перемещений;
$\{F\}$	- вектор нагрузок;
$(t)$	- время.

С помощью этого уравнения определяются значения неизвестных  $\{u\}$ , которые в любой момент времени удовлетворяют условиям равновесия системы при наличии сил инерции и рассеяния энергии. Решение уравнения выполняется либо прямым методом Ньюмарка, либо на основе метода суперпозиции форм колебаний.

Программа ANSYS способна выполнять следующие виды динамических расчетов: динамика переходных процессов, модальный анализ, отклик на гармоническое воздействие, спектральный анализ и отклик на случайную вибрацию.

## 11 Модальный анализ

Модальный анализ представляет собой расчетное средство для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Является важной составной частью всякого динамического анализа, поскольку знание фундаментальных форм и частот колебаний конструкции помогает оценить ее динамическое поведение. Результаты анализа дают возможность установить число форм колебаний и шаг интегрирования по времени, что может обеспечить надежное решение задачи о динамическом поведении системы в неустановившемся режиме. Кроме того, некоторые методы получения решения для переходных процессов нуждаются в результатах модального анализа. С помощью программы ANSYS модальный анализ

можно выполнять как для ненагруженной конструкции, так и вслед за нелинейным расчетом с учетом больших смещений.

В программе ANSYS модальный анализ - это решение задачи о свободных (невынужденных), затухающих или незатухающих, колебаниях дискретной системы, которая описывается следующим уравнением движения:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = 0.$$

Этому уравнению придается форма, соответствующая задаче о собственных значениях. Для случая незатухающих колебаний (наиболее типичного для модального анализа) пренебрегают слагаемым  $[C]\{u'\}$ , и уравнение приводится к виду

$$([K] - \omega^2[M])\{u\} = 0,$$

где  $\omega^2$  (квадрат собственной частоты) - собственное значение,  $\{u\}$  (собственные формы, не являющиеся функциями времени) - собственные формы колебаний. В случае затухающих колебаний уравнение имеет вид

$$([K] + i\omega[C] - \omega^2[M])\{u\} = 0.$$

Для проведения модального анализа в программе ANSYS реализовано несколько методов. Наилучших результатов можно добиться, используя метод Ланцоша и метод подпространств. Эти методы используют полные матрицы жесткостей и масс системы; они работают весьма точно и эффективно, почти не требуя вмешательства пользователя в процесс анализа. Реализованный в модуле PowerDynamics быстродействующий алгоритм (метод подпространств в сочетании с итеративным решателем PCG) наиболее подходит для очень больших моделей, которые состоят только из твердотельных элементов.

В тех случаях, когда недостаточные ресурсы оперативной и дисковой памяти препятствуют использованию полных матриц системы, пользователь может выбрать редуцированный метод, или метод приведения. В этом методе используется небольшое число степеней свободы (так называемые мастер-степени, или ведущие степени), что приводит к матрицам системы сравнительно малой размерности.

Данный вид расчета используется для определения характеристик вибраций (собственных частот и форм колебаний) конструкции или ее сборочной единицы в процессе проектирования. Такой расчет может также являться начальной фазой другого, более подробного расчета, в том числе расчета переходных процессов, исследования вынужденных колебаний или случайных колебаний.

#### *Соглашения, используемые при расчете собственных форм и частот колебаний*

Данный расчет используется для определения форм и частот собственных колебаний конструкции. Собственные частоты и формы колебаний являются важными параметрами, учитываемыми при проектировании конструкции в целях учета условий динамического нагружения. Они требуются также в дальнейшем расчете случайных

колебаний, расчете вынужденных колебаний при помощи метода наложения форм или в расчетах переходных процессов.

Имеется возможность расчета форм и частот собственных колебаний в предварительно нагруженных конструкциях, например, для закрученных турбинных лопаток. Другой полезной возможностью является расчет форм и частот собственных колебаний для циклически симметричных моделей путем моделирования единичного сектора таковой модели.

Расчет форм и частот собственных колебаний в семействе продуктов ANSYS проводится только для линейных моделей. Все нелинейные особенности, такие, как пластичность и контактные элементы, игнорируются, даже, если таковые определены. Существует ряд методов определения собственных форм: блочный Ланцоша, итерационный в подпространстве, метод расчета для больших моделей, редуцированный, несимметричный, метод для учета демпфирования и метод для учета демпфирования версии QR. Метод для учета демпфирования и метод для учета демпфирования версии QR позволяют учитывать демпфирование в модели. Подробности применения методов определения собственных форм описаны ниже в текущей главе.

### *Команды, используемые при расчете форм*

#### *и частот собственных колебаний*

Для создания модели и выполнения расчета используется тот же самый набор команд, который используется и для выполнения иных расчетов в среде метода конечных элементов. Аналогично прочим задачам команды вызываются из меню для создания и расчета модели, независимо от типа выполняемого расчета.

#### *Последовательность действий при выполнении расчета собственных частот и форм колебаний*

Процедура расчета собственных форм и частот колебаний состоит из следующих главных этапов:

1. Создание модели.
2. Приложение нагрузок и получение результатов.
3. Расширение форм.
4. Просмотр результатов.

#### *Создание модели*

При создании модели следует определить имя задания (jobname) и заголовков, а далее использовать препроцессор /PREP7 для указания типов элементов, геометрических характеристик элементов, свойств материалов и геометрии модели. Данные действия являются общими для большинства расчетных задач, и подробно объяснены.

При создании модели следует помнить следующее:

- в расчете собственных форм и частот колебаний учитываются только линейные свойства, имеющиеся нелинейные элементы воспринимаются как линейные, например, для имеющихся контактных элементов их жесткость на основе начального состояния и далее никогда не изменяется;

- свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными или ортотропными, а также постоянными или зависящими от температуры; для проведения расчета собственных форм и частот колебаний требуется указывать модуль Юнга EX (или жесткость в иной форме) и плотность DENS (или массу в иной форме); нелинейные свойства игнорируются; при использовании элементов с возможностью демпфирования (COMBIN7, COMBIN14, COMBIN37 и так далее для них требуется указывать необходимые геометрические характеристики.

### *Приложение нагрузок и получение результатов*

На данном этапе следует указать тип расчета и его опции, приложить нагрузки, указать опции шагов нагрузки и вызвать расчет МКЭ для собственных частот. После вызова расчета проводится расширение форм для последующего просмотра результатов.

### *Вызов модуля расчета*

Вызов модуля расчета комплекса ANSYS.

Команда /SOLU

Вызов из экранного меню

Main Menu —> Solution

### *Определение типа расчета и его опций*

После вызова модуля расчета указывается тип расчета и его опции. Комплекс ANSYS имеет опции, перечисленные в таблице 1. Каждая из опций подробно описывается ниже:

Таблица 1 - Тип расчета и опции расчета

Опция	Команда	Вызов из меню
Новый расчет	<b>ANTYPE</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> New Analysis
Тип расчета: собственные колебания	<b>ANTYPE</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> New Analysis—> Modal
Метод получения собственных форм	<b>MODOPT</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options
Число получаемых собственных форм	<b>MODOPT</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options
Число расширяемых собственных форм	<b>MXPAND</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options

(см. Примечание 2 ниже)		
Вид матрицы масс	<b>LUMPM</b>	Main Menu → Solution → Analysis Type → Analysis Options
Учет начальных напряжений	<b>PSTRES</b>	Main Menu → Solution → Analysis Type → Analysis Options

При использовании в качестве типа расчета определение форм и частот собственных колебаний, меню Solution приобретает вид, соответствующий типу данного расчета. Меню Solution может иметь сокращенную и несокращенную форму, в зависимости от ранее применявшихся действий в текущем сеансе работы с комплексом ANSYS. Сокращенное меню содержит только вызовы команд, применяемых и (или) рекомендуемых при расчете форм и частот собственных колебаний. Если используется сокращенное меню Solution и требуется доступ к иным опциям расчета (то есть опциям, возможным для применения, но не рекомендуемым в данном типе расчета), следует указать опцию Unabridged Menu.

Примечание 2. При выполнении спектральных расчетов с режимом возбуждения в одной точке (команда **SPOPT**, **SPRS**) и методом динамического анализа (команда **SPOPT.DDAM**) расширение форм может выполняться после проведения расчетов спектральной плотности, на основе фактора значимости *SIGN IF* команды **MXPAND**. Если расширение форм проводится после спектральных расчетов, в диалоговой панели опций расчета форм и частот колебаний (**MODOPT**) для аргумента команды **MXPAND** следует указывать значение N0.

#### *Опция проведения нового расчета (команда ANTYPE)*

Выбирается новый расчет.

Примечание. Повторный расчет при вычислении собственных форм и частот не проводится. При необходимости использования различных наборов граничных условий, каждый раз следует проводить новый расчет.

#### *Опция выбора типа расчета Modal (команда ANTYPE)*

Данная опция используется для указания проведения расчетов частот и форм собственных колебаний.

#### *Опция выбора метода вычисления форм (команда MODOPT)*

Для получения собственных форм применяется один из указанных ниже методов.

#### *Блочный метод Ланцоша (по умолчанию)*

Блочный метод Ланцоша используется для получения собственных форм в больших симметричных задачах. Данный метод может

использоваться в тех же задачах, что и метод итераций в подпространстве, но имеет по сравнению с ним ускоренную сходимость. Блочный метод Ланцоша использует метод вычислений для разреженных матриц, даже если при помощи команды EQSLV был указан иной метод.

#### *Метод итераций в подпространстве*

Метод итераций в подпространстве используется для получения собственных форм в больших симметричных задачах. Для управления вычислениями имеется несколько способов. При расчете собственных форм и частот с большим числом уравнений, ограничений, метод итераций в подпространстве используется совместно с фронтальным методом, вместо метода JCG, или же используется блочный метод Ланцоша.

#### *Метод учета демпфирования*

Метод учета демпфирования применяется для задач, в которых демпфирование не может игнорироваться, например, при учете подшипников.

#### *Метод учета демпфирования версии QR*

Метод учета демпфирования версии QR проводит расчет быстрее, чем метод учета демпфирования. Он использует концентрированную матрицу демпфирования форм для определения комплексных частот с учетом демпфирования в системе координат, основанной на собственных векторах. В большинстве задач используются методы блочный Ланцоша, итерационный в подпространстве, редуцированный или метод расчета для больших моделей (PowerDynamics). Методы несимметричные, учета демпфирования и учета демпфирования версии QR предназначены для специальных задач.

При выборе метода определения собственных форм, комплекс ANSYS автоматически выбирает метод решения уравнений.

Примечание. Методы учета демпфирования, для несимметричных моделей и учета демпфирования версии QR не применимы в версии комплекса ANSYS/Professional.

#### *Опция вида матрицы масс (команда LUMPM)*

Данная опция определяет вид матрицы по умолчанию (которая зависит от типа элемента) или создание концентрированной матрицы масс. В большинстве случаев рекомендуется применение вида матрицы, назначенного по умолчанию. Однако, для ряда задач, в том числе использования тонких стержней или очень тонких оболочек, применение концентрированной матрицы масс приводит к лучшим результатам. Кроме того, применение концентрированной матрицы масс уменьшает используемое время и память.

#### *Опция учета начальных напряжений (команда PSTRES)*

Данная опция используется для вычисления форм предварительно нагруженной модели. По умолчанию эффект начальных напряжений не учитывается, то есть модель считается свободной от напряжений. Для учета

эффекта начальных напряжений должен иметься файл с напряжениями, определенными в предыдущем статическом (или переходном) расчете. Если эффект начальных напряжений учитывается, матрица масс (команда **LUMPM**) в текущем и последующих расчетах должна иметь тот же самый вид, что и при выполнении начальных напряжений в статическом расчете.

Примечание. Для гармонических элементов, таких, как PLANE25 и SHELL61, можно использовать только осесимметричные нагрузки.

### *Дополнительные опции расчета форм и частот*

После заполнения полей в диалоговой панели Modal Analysis Options следует нажать кнопку ОК. Далее появляется диалоговая панель, соответствующая выбранному методу получения форм. В ней содержатся комбинации указанных ниже полей.

Поля **FREQB**, **FREQE** указывают диапазон частот для определяемых форм. Поле **FREQB** определяет первую расчетную точку - точку, вокруг которой собственные частоты сходятся быстрее. В большинстве случаев данный аргумент можно не указывать, поскольку по умолчанию его значение составляет - 1. Поле **FREQE** определяет конечное, или верхнее, значение диапазона интересующих частот.

## **12 Отклик на гармоническое воздействие**

Анализ гармонического воздействия используется для определения параметров установившегося движения линейной системы при синусоидальном силовом возбуждении. Этот вид анализа актуален при исследовании влияния нагрузок, меняющихся во времени по гармоническому закону, типа тех, что испытывают станины и фундаменты оборудования с вращающимися частями, диски и лопатки турбомашин.

Любая постоянная циклически изменяющаяся вынуждающая нагрузка порождает циклически изменяющийся отклик модели (гармонический отклик). Расчет вынужденных колебаний дает возможность предсказания поведения периодически возбуждаемой динамической системы, позволяя, таким образом, проверять модель конструкции на наличие резонанса, усталость, и другие отрицательные эффекты периодического возбуждения.

### *Использование вынужденных колебаний*

Анализ вынужденных колебаний является способом определения установившегося процесса отклика линейной модели на нагрузки, изменяющиеся во времени по синусоидальному (гармоническому) закону. Смысл расчета заключается в вычислении отклика на нескольких частотах и получения функции некоторой выходной характеристики (обычно перемещения) от частоты. Пиковые значения определяются по графической



зависимости и виду напряжений для частот, вызывающих пиковые отклонения.

Данный метод расчета применим только для установившихся вынужденных колебаний модели. Переходные динамические процессы, которые происходят в начале процесса возбуждения, собственно вынужденными колебаниями не описываются (см. рисунок 1).

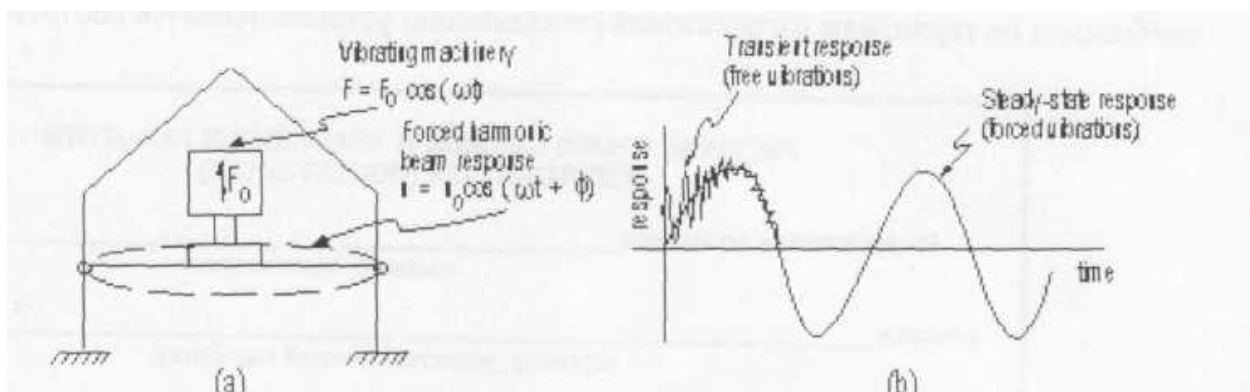


Рисунок 1 - Вынужденные колебания в модели

Расчет вынужденных колебаний применяется для линейных моделей. Любые нелинейности, такие, как пластичность и контактные элементы (зазоры), игнорируются, даже если они и определены. Однако, имеется возможность использования несимметричных матриц, например, порождаемых взаимодействием потока с твердым деформируемым телом. Расчет вынужденных колебаний может выполняться для предварительно нагруженных моделей, например, для скрипичной струны.

### *Три метода расчета*

Для исследования вынужденных колебаний применяются три метода расчета: полный, редуцированный и метод наложения форм. Четвертый, относительно трудоемкий метод заключается в применении исследования динамических переходных процессов при нагрузках, гармонически изменяющихся в течение времени и просмотре результатов в качестве зависящих от истории нагружения.

### *Полный метод*

Полный метод является наиболее простым из всех трех методов. Данный метод использует для вычисления отклика модели систему полных матриц (не применяет редуцирования матриц). Матрицы могут быть симметричными и несимметричными. Преимуществами полного метода являются:

- удобство применения, поскольку нет необходимости в выборе управляющих степеней свободы или вида формы;
- метод использует полные матрицы, и поэтому приближенные матрицы не применяются;
- метод допускает использование несимметричных матриц, что

обычно для таких задач, как акустика и расчет подшипниковых опор:

- метод позволяет вычислять все перемещения и напряжения в одном общем шаге вычислений;
- метод использует все типы нагрузок: узловые усилия, предписанные (ненулевые) перемещения и элементные нагрузки (давления и температуры);
- метод геометрической модели.

Неудобством метода является его повышенная по отношению к другим методам вычислительная трудоемкость при использовании фронтального метода решения системы уравнений. Однако, при использовании методов решения системы уравнений JCG или ICCG, полный метод может оказаться весьма эффективным.

### *Общие для всех методов ограничения*

Все три метода имеют набор общих ограничений:

- все нагрузки считаются зависящими от времени по синусоидальному закону;
- все нагрузки изменяются с равной частотой;
- нелинейности не допускаются;
- переходные эффекты не учитываются.

Каждое из этих ограничений может быть преодолено путем применения исследования динамических переходных процессов при нагрузках, гармонически изменяющихся в течение времени.

### *Полный метод расчета вынужденных колебаний*

Процедура расчета вынужденных колебаний состоит из следующих главных этапов:

1. Создание модели.
2. Приложение нагрузок и получение результатов.
3. Просмотр результатов.

### *Создание модели*

На данном этапе следует определить имя задания (jobname) и заголовок, а далее использовать препроцессор PREP7 для указания типов элементов, геометрических характеристик элементов, свойств материалов и геометрии модели.

### *Рекомендации*

При создании модели следует помнить следующее:

- в расчете вынужденных колебаний учитываются только линейные свойства; имеющиеся нелинейные элементы воспринимаются как линейные; например, для имеющихся контактных элементов их жесткость на основе начального состояния и далее никогда не изменяется; контактные элементы типа поверхность с поверхностью неприменимы;
- для проведения расчета вынужденных колебаний требуется указывать модуль Юнга EX (или жесткость в иной форме) и плотность DENS

(или массу в иной форме); свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными или ортотропными. а также постоянными или зависящими от температуры; нелинейные свойства, если таковые имеются, игнорируются.

### *Приложение нагрузок и получение решения*

На данном этапе следует указать тип расчета и его опции, приложить нагрузки, указать опции шагов нагрузки и вызвать расчет МКЭ. Подробности выполнения данных действий объясняются ниже.

Примечание. Пиковые перемещения в модели наблюдаются при вынужденных частотах, соответствующих собственным частотам модели. Перед расчетом вынужденных колебаний следует определить собственные частоты модели путем проведения расчета форм и частот собственных.

### *Вызов модуля расчета*

Команда /SOLU

Вызов из экранного меню

Main Menu —> Solution

### *Определение типа расчета и его опций*

Комплекс ANSYS имеет опции расчета вынужденных колебаний, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1 - Тип расчета и опции расчета

Опция	Команда	Вызов из меню
Новый расчет	<b>ANTYPE</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> New Analysis
Тип расчета: вынужденные колебания	<b>ANTYPE</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> New Analysis —> Harmonic
Метод расчета	<b>HROPT</b>	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options
Формат выходной информации расчета	HROUT	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options
Вид матрицы масс	LUMPM	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options
Метод решения системы уравнений	EQSLV	Main Menu —> Solution —> Analysis Type —> Analysis Options

Каждая из опций подробно описывается ниже.

### *Опция проведения нового расчета (команда ANTYPE)*

Выбирается новый расчет. Повторный расчет при расчете вынужденных колебаний не проводится; при необходимости приложения дополнительных гармонически изменяющихся нагрузок проводится новый расчет.

*Опция типа расчета (команда ANTYPE)*

Указывается вариант Harmonic Response (вынужденные колебания).

*Опция метода расчета (команда HROPT)*

Выбирается один из следующих вариантов:

- полный метод;
- редуцированный метод;
- метод наложения форм.
- 

*Опция формата выходной информации расчета (команда HROUT)*

Данная опция определяет вид результатов расчета перемещений для задачи вынужденных колебаний в выходных данных (файле Jobname.OUT). Возможны варианты вывода действительной и мнимой частей решения (и по умолчанию) или амплитуды и угла фазы.

*Опция вида матрицы масс (команда LUMPM)*

Данная опция определяет вид матрицы по умолчанию (которая зависит от типа элемента) или создание концентрированной матрицы масс. В большинстве случаев рекомендуется применение вида матрицы, назначенного по умолчанию. Однако, для ряда задач, в том числе использования тонких стержней или очень тонких оболочек, применение концентрированной матрицы масс приводит к лучшим результатам. Кроме того, применение концентрированной матрицы масс уменьшает используемое время и память. После заполнения всех необходимых полей в диалоговой панели Harmonic Analysis Options, следует нажать на кнопку ОК для перехода ко второй диалоговой панели Harmonic Analysis, в которой выбирается метод решения системы уравнений.

*Опция метода решения системы уравнений*

Имеется возможность выбора фронтального метода (и по умолчанию), метода расчета разреженных матриц (SPARSE), метода сопряженных градиентов Якоби (JCG) или неполного метода сопряженных градиентов Холецкого (ICCG). Для большинства задач прочности рекомендуются методы фронтальный или расчета разреженных матриц. При использовании прямых методов исключения для относительно больших моделей следует предпочитать метод расчета разреженных матриц фронтальному методу.

*Приложение нагрузок к модели*

Расчет вынужденных колебаний предполагает, что все прикладываемые нагрузки гармонически (синусоидально) изменяются в течение времени. Для полного указания гармонических нагрузок обычно требуются три вида информации: амплитуда, угол фазы и диапазон изменения частот (см. рисунок 2).

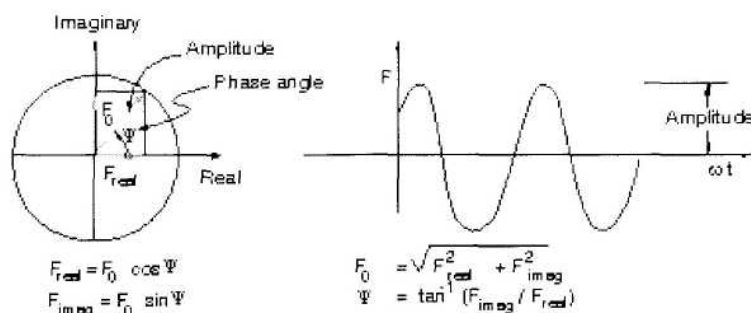


Рисунок 2 - Взаимосвязь действительной и мнимой частями и амплитудой и фазовым углом

Амплитуда является максимальным значением нагрузки, которая указывается посредством команд, указанных в таблице 1. Фазовый угол является мерой времени отставания или опережения в системе координат. В комплексной плоскости (показанной на рисунке 1) он является углом, отсчитываемым от действительной оси. Фазовый угол требуется только в случае, если прикладываемые нагрузки не совпадают по фазе возбуждения. Например, неуравновешенная вращающаяся антенна, показанная на рисунке 2, имеет несовпадение возбуждения по фазе, обусловленное четырьмя точками опор. Угол фазы не может быть указан непосредственно; вместо этого, указываются действительные и мнимые компоненты нагрузок без связи с фазой путем использования аргументов *VALUE* и *VALUE2* в командах для указания соответствующих перемещений и усилий. Давления и другие поверхностные и объемные нагрузки указываются только для угла фазы 0 (мнимой компоненты нет). На рисунке 3 показано вычисление действительных и мнимых компонент. Диапазон возбуждающих частот является рядом частот гармонического возбуждения (в циклах на единицу времени). Диапазон указывается позже в виде опции ага нагрузки при помощи команды **HARFRQ**.

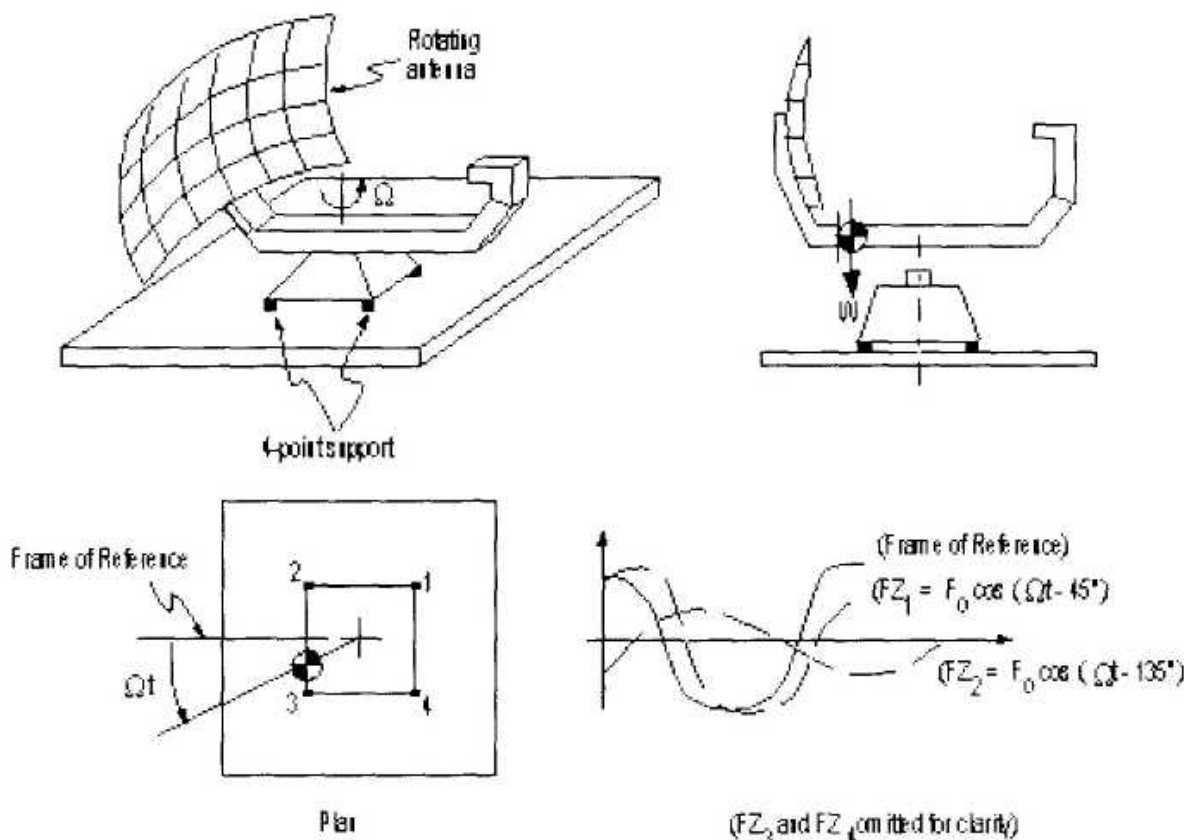


Рисунок 3 - Несбалансированная вращающаяся антенна

Несбалансированная вращающаяся антенна порождает четыре несовпадающие по фазе вертикальные нагрузки, обусловленные наличием четырех точек опор.

Примечание. В расчете вынужденных колебаний нельзя определять функцию отклика на одновременное действие нескольких возбуждающих сил, изменяющихся с разной частотой (например, для конструкции из двух механизмов, действующих одновременно с разной скоростью вращения). Однако, средствами POST1 можно получить наложение отклик на различные нагрузки для получения суммарного отклика.

В таблице 2 приведена сводка нагрузок, прикладываемых при расчете вынужденных колебаний. За исключением инерционных нагрузок, нагрузки могут быть приложены как к геометрической модели (к точкам, линиям или поверхностям), так и к конечноэлементной модели (к узлам и элементам).

Таблица 2 - Нагрузки, прикладываемые в расчете вынужденных колебаний

Тип нагрузки	Категория	Семейство команд	Вызов из меню
Перемещения (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)	Закрепления	D	Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement

Силы, моменты (FX. FY. FZ. MX. MY. MZ)	Усилия	F	Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment
Давление (PRES)	Поверхностные нагрузки	SF	Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Pressure
Температура (TEMP), поток частиц (FLUE)	Объемные нагрузки	BF	Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Temperature
Сила тяжести, вращение и т. п.	Инерционные нагрузки	-	Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Structural → Other

### *Указание опций шага нагрузки*

Для расчета вынужденных колебаний применяются следующие опции:

Таблица 3 Опции шагов нагрузки

Опция	Команда	Вызов из меню
<b>Общие опции</b>		
Число расчетных частот	<b>NSUBST</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Freq and Substeps
Приложение нагрузок скачками или плавное	<b>KBC</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Time - Time Step or Freq and Substeps
<b>Динамические опции</b>		
Диапазон возбуждающих частот	<b>HARFRQ</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Freq and Substeps
Демпфирование	<b>ALPHAD, BETAD, DMPRAT</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Damping
<b>Опции контроля выходной информации</b>		
Вывод результатов в выходной файл	<b>OUTPR</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Output Ctrls → Solu Printout
Вывод результатов в базу данных и файл результатов	<b>OUTRES</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Output Ctrls → DB/ Results File
Экстраполяция результатов	<b>ERESX</b>	Main Menu → Solution → Load Step Opts → Output Ctrls →• Integration Pt

### *Общие опции*

Общие опции включают следующее:

- число расчетных частот (команда **NSUBST**); можно заказывать расчет для произвольного числа возбуждающих частот; результаты (или промежуточные шаги) будут равномерно расположены в пределах указанного диапазона частот (команда **HARFRQ**); например, если

указывается 10 частот в диапазоне от 30 до 40 Гц, программа будет вычислять результаты для частот 31, 32, 33, ... 39 и 40 Гц; для нижней частоты диапазона расчет не проводится;

- приложение нагрузок скачками или плавное (команда **KBC**); нагрузки могут прикладываться скачкообразно или плавно; по умолчанию, нагрузки изменяются плавно, то есть нагрузка равномерно возрастает на каждом промежуточном шаге; при скачкообразном приложении нагрузки (команда **KBC, I**) для всех промежуточных шагов в диапазоне частот применяется одна и та же амплитуда нагрузок.

Примечание. Поверхностные и объемные нагрузки не изменяются по сравнению со значением, примененным на предыдущем промежуточном шаге, за исключением типов элементов PLANE2, SOLID45, SOLID92 и SOLID95. Для остальных типов элементов нагрузки всегда изменяются от нуля или значения, указанного командой **BFUNIF**.

### *Динамические опции*

Динамические опции включают следующее:

- диапазон возбуждающих частот (команда **HARFRQ**); диапазон возбуждающих частот для расчета вынужденных колебаний должен указываться (размерность циклов в единице времени); число расчетных частот указывается в пределах этого диапазона;

- демпфирование; демпфирование в некоторой форме должно указываться; иначе отклик модели на резонансных частотах будет неопределенным; команды **ALPHAD** и **BETAD** определяют зависящее от частоты демпфирование, а команда **DMPRAT** определяет постоянный коэффициент демпфирования для всех частот.

Примечание. Если для прямых методов расчета вынужденных колебаний (полном или редуцированном) демпфирование не указано, программа использует по умолчанию нулевой коэффициент затухания.

- демпфирование, связанное с матрицей масс (команда **ALPHAD**);  
- демпфирование, связанное с матрицей жесткости (команда **BETAD**);  
- постоянный коэффициент демпфирования, или затухания (команда **DMPRAT**).

### *Проведение расчета*

Команда **SOLVE**

Вызов из экранного меню

Main Menu —> Solution —> Solve —> Current LS

### *Повторение расчета для дополнительных шагов нагрузки*

Для любых дополнительных нагрузок и диапазонов частот (то есть для дополнительных шагов нагрузки) процесс можно повторять. Если в дальнейшем планируется применение постпроцессора просмотра результатов по истории нагружения (POST26), диапазоны частот для смежных шагов нагрузки не должны перекрывать друг друга. Другой метод - создание



нескольких шагов нагрузки, позволяющий сохранять шаги нагрузок в файлах и далее проводить сразу все вычисления, использует специальный макрос, и описан в Базовом руководстве комплекса ANSYS.

#### *Выход из модуля SOLUTION*

Команда **FINISH**

Вызов из экранного меню

Кнопка Close в меню Solution

#### *Просмотр результатов*

Результаты расчета вынужденных колебаний записываются в файл результатов расчета задач МДГТ Jobname.RST. Результаты состоят из следующих данных, гармонически изменяющихся для каждой вынуждающей частоты, для которой определялось решение:

- первичные данные:
- узловые перемещения (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ);
- вторичные данные:
- узловые и элементные напряжения;
- узловые и элементные деформации;
- элементные силы;
- узловые реакции;
- и так далее.

Если для модели указывалось демпфирование, отклик модели будет по фазе отклоняться от возбуждения. Все результаты будут иметь комплексный вид и сохраняться в виде действительных и мнимых частей. Комплексные результаты также будут создаваться, если прикладываемые нагрузки различались по фазе возбуждения.

#### *Постпроцессоры*

Полученные результаты могут просматриваться в постпроцессорах POST1 и POST26. Обычно процедура просмотра заключается в предварительном просмотре результатов при помощи POST26 для определения резонансных частот возбуждения -частот, вызывающих самые значительные перемещения (или напряжения) в интересующих точках модели, и дальнейшем использовании POST1 для просмотра результатов полной модели для этих резонансных частот возбуждения.

- постпроцессор POST1 используется для просмотра результатов для полной модели и для указанной частоты возбуждения;
- постпроцессор POST26 используется для просмотра результатов в указанных точках модели для всего диапазона частот.

#### *Напоминания*

- при просмотре результатов в постпроцессорах POST1 или POST26 база данных должна содержать ту же самую модель, для которой выполнялся

расчет;

- файл результатов (Jobname.RST) должен существовать.

### *Использование POST26*

Постпроцессор POST26 оперирует с таблицами объектов результатов, изменяющихся с изменением частоты, применяющихся в качестве переменной. Каждой переменной присваивается свой номер, причем номер 1 резервируется для частоты.

1. Определение переменных производится путем указания следующих опций: Команды **NSOL** для первичных данных (узловые перемещения), **ESOL** для вторичных данных (элементные результаты, например, напряжения), **RFORCE** для сил реакций.

Вызов из экранного меню:

Main Menu —> TimeHist Postpro —> Define Variables

Команда **FORCE** позволяет проводить выбор полных усилий, статических компонент усилий, компоненты, соответствующие демпфированию, или компоненты, соответствующие инерции.

### *Использование постпроцессора POST1*

1. Чтение результатов для требуемой частоты возбуждения. Для этого можно использовать команду SET, но она будет читать только действительные или мнимые компоненты результатов, но не обе компоненты одновременно. Истинная амплитуда результатов определяется как комбинация SRSS (square – root – of – sum – of – squares, то есть квадратный корень из суммы квадратов) действительной и мнимой компонент, но не как обе в одно и то же время (см. рис. 4.2), и может получаться средствами постпроцессора POST26.

2. Просмотр вида деформированной модели, изображение напряжений, деформации и тому подобного в контурном виде или отображение векторных объектов в виде векторов (команда PLVECT). Для просмотра результатов в текстовом виде, применяются команды PRNSOL, PRESOL, PRRSOL и так далее.

Опция просмотра вида деформированной модели

Команда PLDISP

Вызов из командного меню

Main Menu —> General Postproc —> Plot Results —> Deformed Shape.

## **13 Спектральный анализ**

Определение спектра отклика конструкции применяется для анализа ее поведения при ударном нагружении. В этом случае используются результаты модального анализа, и для динамической нагрузки с известным спектром определяются максимальные значения перемещений и напряжений в

конструкции на каждой из ее собственных частот. Типичным приложением спектрального анализа является расчет на сейсмическое воздействие, который проводится для изучения влияния землетрясений на такие сооружения, как сети трубопроводов, башни и мосты. Результатом спектрального анализа являются функции отклика, зависящие от частоты. Можно получить четыре различных типа функций отклика: для перемещений, скоростей, ускорений и сил.

Спектральными расчетами называются расчеты, в которых результаты расчета собственных колебаний используются совместно с заранее известным спектром возбуждения для определения перемещений и напряжений в модели. Эти расчеты используются главным образом вместо расчетов динамических процессов с известной историей нагружения во времени для определения отклика конструкции на приложение случайных или не зависящих от времени нагрузок, таких, как сейсмические нагрузки (землетрясение), ветровые нагрузки, океанские волновые нагрузки, колебаний авиационного двигателя, вибраций ракетного двигателя и так далее.

### *Определение спектральных расчетов*

Спектром называется функциональная зависимость каких - либо характеристик от частоты, включающая интенсивность и частотный состав при нагружении, зависящем от времени. При проведении спектральных расчетов применяются три перечисленных ниже метода:

- -Спектральный отклик:
- спектральный отклик с возбуждением в единичной точке (Single-point Response Spectrum, или SPRS);
- спектральный отклик с возбуждением в нескольких точках (Multi-point Response Spectrum, или MPRS);
- метод расчета динамической схемы (Dynamic Design Analysis Method, или DDAM);
- метод полной спектральной плотности (Power Spectral Density, или PSD). Единственным методом, возможным для применения в версии ANSYS Professional, является метод спектрального отклика с возбуждением в одной точке.

### *Спектральный отклик*

Спектральный отклик является отклик системы с одной степенью свободы на функцию нагружения, зависящую от времени. Она является графиком отклика в зависимости от частоты, где отклик может являться перемещением, скоростью, ускорением или усилием. Возможны два типа расчета: спектр с единой точкой возбуждения и спектр с несколькими точками возбуждения.

*Спектр с единой точкой возбуждения (SPRS)*

При расчетах спектров с единичной точкой возбуждения (SPRS) определяется одна кривая отклика (или семейство кривых) для набора точек в модели, таких, как все опоры (см. рисунок 1 а).

#### *Спектр с несколькими точками возбуждения (MPRS)*

При расчетах спектров с несколькими точками возбуждения (MPRS) для разных наборов точек указываются разные спектральные кривые, как показано на рисунке 1b.

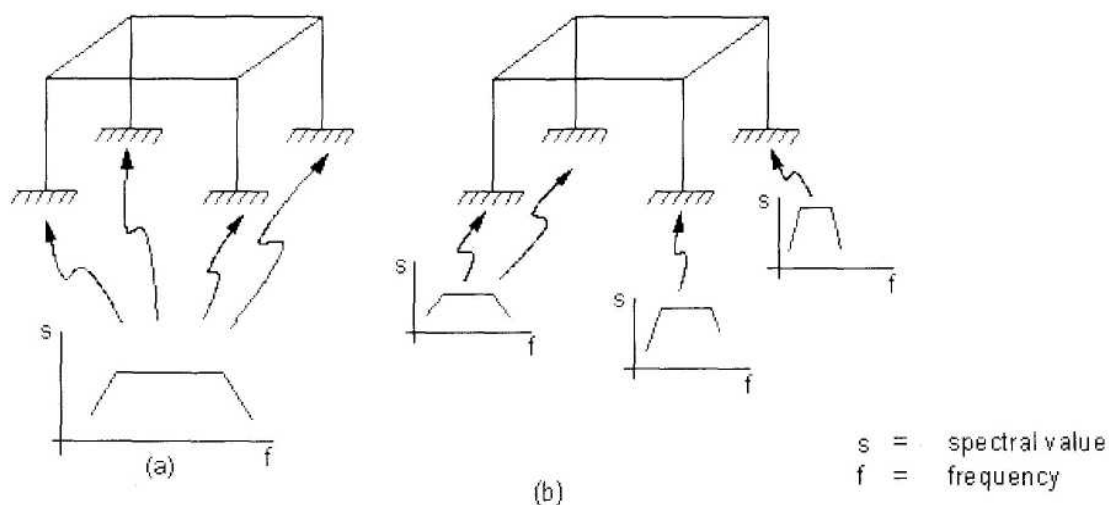


Рисунок 1 - Спектры возбуждения с единичной точкой и несколькими точками

#### *Метод расчета динамической схемы (DDAM)*

Метод расчета динамической схемы обычно применяется для оценки чувствительности к удару корабельного оборудования. В основе метода фактически лежит расчет спектральных характеристик, соответствующий набору эмпирических зависимостей и таблиц, имеющих в отчете Военно - морской исследовательской лаборатории (U.S. Naval Research Laboratory Report) NRL-1396.

#### *Метод полной спектральной плотности (PSD)*

Метод полной спектральной плотности (PSD) является статистической оценкой величины среднеквадратичного значения случайной переменной. Метод используется для расчета случайных колебаний, в которых значения отклика могут быть определены только в виде функций распределения вероятности.

Метод PSD является статистической мерой отклика модели на случайные динамические условия нагружения. Метод определяет связь

спектральной плотности с частотой, причем можно определять плотность спектра перемещений, скоростей, ускорений и усилий. Математически площадь под кривой связи спектральной плотности с частотой равна вариации (квадрату стандартного отклонения отклика).

Подобно расчетам спектров отклика, расчет случайных колебаний может иметь характер возбуждения с единичной точкой и несколькими точками. При расчете случайных колебаний с одной точкой возбуждения для всей модели указывается единый спектр плотности возбуждения. При расчете случайных колебаний с несколькими точками возбуждения для разных точек модели указываются разные плотности спектра возбуждения.

### *Сравнение детерминированного и случайного расчетов*

Расчеты спектральной плотности и DDAM являются детерминированными расчетами, поскольку оба они используют и для входных, и выходных данных действующие значения величин. С другой стороны, расчет случайных колебаний является по своей природе вероятностным, поскольку и входные, и выходные значения представляют вероятностные оценки неких значений.

### *Последовательность выполнения спектрального расчета с единичной точкой нагружения*

Процедура расчета спектральных задач с единой точкой возбуждения сводится к шести основным шагам:

1. Создание модели.
2. Проведение расчета собственных форм и частот.
3. Проведение расчета спектральных характеристик.
4. Расширение форм.
5. Комбинирование форм.
6. Просмотр результатов.

Расчет собственных форм и частот требуется, поскольку для получения спектральных характеристик необходимы формы и частоты колебаний. Кроме того, при выполнении спектральных расчетов, перед расширением форм, можно подвергнуть расширению только те формы, которые вносят значащий вклад в окончательный результат.

### *Создание модели*

#### *Напоминания*

При спектральных расчетах применимы только линейные свойства. Нелинейные элементы, если есть, считаются линейными. Если используются контактные элементы, их жесткость вычисляется на основе начального состояния и далее не изменяется.

Для проведения расчета требуется указывать модуль Юнга EХ (или жесткость в иной форме) и плотность DENS (или массу в иной форме). Свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными или ортотропными, а также постоянными или зависящими от температуры. Нелинейные свойства, даже если таковые указываются, игнорируются.

### *Проведение расчета собственных колебаний*

Проведение расчета собственных колебаний - собственных частот и форм колебаний - является необходимым для вычисления спектральных характеристик. Для определения форм колебаний допускается применение блочного метода Ланцоша (и по умолчанию), итерационного в подпространстве или редуцирования. Остальные методы - несимметричный, учета демпфирования, учета демпфирования версии QR и т. н. PowerDynamics для проведения последующих спектральных расчетов неприменимы. Число рассчитываемых форм должно быть достаточным для описания отклика модели в требуемом диапазоне частот. При использовании меню (GUI) в диалоговой панели опций расчета собственных колебаний (команда MODOPT) для расширения форм указать N0, так, чтобы формы в данный момент не подвергались расширению, но могли быть выборочно расширены в ходе отдельного шага расширения (см. использование аргумента SIGNIF команды MXPAND). В противном случае для расширения форм в данной фазе расчета следует указать YES. Если в спектральном расчете учитывается демпфирование, зависящее от материала, оно должно быть указано и в расчете собственных колебаний. Следует убедиться в наложении ограничений степеней свобод (DOF) в местах приложения базового спектра возбуждения. После выполнения расчета следует выйти из модуля SOLUTION.

### *Проведение спектрального расчета*

Процедура проведения спектрального расчета описана ниже. Файл форм колебаний (Jobname.MODE) полученный в ходе расчета собственных частот, должен существовать, и база данных должна содержать данные использованной модели.

1. Вход в модуль SOLUTION.

Команда /SOLU

Вызов из экранного меню:

**Main Menu —> Solution**

2. Указание типа расчета и опций расчета. Комплекс ANSYS имеет опции расчета спектральных задач, перечисленные ниже. Не все опции расчета собственных колебаний и не все методы расчета собственных

значений могут согласованно использоваться с произвольными опциями спектральных расчетов.

Таблица 1 - Типы и опции расчета

Опция	Команда	Вызов из меню (то есть средствами GUI)
Новый расчет	ANTYPE	Main Menu → Solution → Analysis Type →> New Analysis
Тип расчета: спектральный	ANTYPE	Main Menu → Solution → Analysis Type →> New Analysis →> Spectrum
Тип спектра: SPRS	SPOPT	Main Menu → Solution →> Analysis Type →> Analysis Options
Число форм для использования в расчете	SPOPT	Main Menu → Solution →> Analysis Type →> Analysis Options

- Опция: *Новый расчет* (команда ANTYPE)

Указывается New Analysis.

- Опция: *Тип расчета* (команда ANTYPE)

Указывается спектральный расчет.

- Опция: *Тип спектрального расчета: спектральный отклик с единичной точкой нагружения* (команда SPOPT)

Указывается спектральный отклик с единичной точкой нагружения (SPRS).

- Опция: *Число форм, используемое в расчете* (команда SPOPT)

Существует большое число способов для учета диапазона частот при заполнении спектра и определения структуры отклика. Точность решения зависит от числа используемых форм: чем больше число, тем выше точность. При необходимости вычисления напряжений в элементах следует в аргументах команды **SPOPT** указать соответствующее значение равным YES.

3. Указание опций шага нагрузки. При спектральных расчетах с единичной точкой нагружения применяются перечисленные ниже опции:

Таблица 2 - Опции шага нагрузки

Опция	Команда	Вызов из меню (то есть средствами GUI)
Спектральные опции		
Тип спектрального отклика	SVTYP	Main Menu → Solution → Load Step Opts →> Spectrum →> Single Point →> Settings
Направление возбуждения	SED	Main Menu → Solution → Load Step Opts →> Spectrum →> Single Point →> Settings
Значения в точках спектра или кривая по частотам	FR EQ, SV	Main Menu → Solution → Load Step Opts →> Spectrum →> Single Point →> Freq Table или Spectr Values
Демпфирование (динамические опции)		
Демпфирование, связанное с жесткостью	BETAD	Main Menu → Solution → Load Step Opts →> Time/Frequenc →> Damping

Постоянный коэффициент демпфирования	<b>DMPRAT</b>	<b>Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Damping</b>
Демпфирование, связанное с формами колебаний	<b>MDAMP</b>	<b>Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequenc → Damping</b>

### *Спектральные опции*

Эти данные включают следующее:

- *-Тип спектра отклика* (команда **SVTYP**)

Типом спектра могут являться спектр перемещения, скорости, ускорения, усилия или PSD. Все спектры, за исключением спектра усилия являются сейсмическими спектрами; это значит, что они считаются воздействующими на опоры (основание). Спектр усилия воздействует в узлах, не являющихся опорами, прикладывается командами F или FK и в направлениях, соответствующих меткам (обозначениям) FX, FY, FZ. Спектр PSD (команда SVTYP.4) внутренне преобразовывается в спектр отклика перемещений и ограничен равномерными узкополосными спектрами.

- Направление возбуждения (команда **SED**)

- Указание значений в точках спектра или кривой по частотам (команды **FREQ, SV**)

Команды **SV** и **FREQ** используются для указания кривой спектра. Возможно указание семейства спектральных кривых, каждой кривой для своего (отдельного) значения коэффициента демпфирования. Для просмотра текущих значений кривых спектров применяется команда **STAT**. Другая команда, **ROCK**, позволяет указывать периодический спектр.

### *Демпфирование (динамические опции)*

Если указывается более чем один вид демпфирования, комплекс ANSYS вычисляет эффективный коэффициент демпфирования для каждой частоты. Спектральное значение для этого эффективного коэффициента демпфирования далее вычисляется двойной логарифмической интерполяцией спектральных кривых. Если демпфирование не учитывается, используется спектральная кривая с самым низким демпфированием.

Применяются следующие виды демпфирования:

- Демпфирование, связанное с жесткостью (команда **BETAD**)

Данная опция вызывает применение коэффициента демпфирования, зависящего от значения частоты.

- Постоянный коэффициент демпфирования (команда **DMPRAT**)

Данная опция вызывает применение коэффициента демпфирования, постоянного для всех значений частоты.



Демпфирование, связанное с формами колебаний (команда **MDAMP**)

Примечание. Коэффициент демпфирования, зависящий от материала (команда **MP,DAMP**) также может применяться, но только в случае, если он использовался при расчете собственных колебаний. Команда **MP,DAMP** также определяет постоянный коэффициент демпфирования, зависящий от материала (и не зависящее от материала демпфирование, связанное с жесткостью, используемое в других типах расчета).

4. Вызов процедуры расчета.

Команда **SOLVE**

Вызов из экранного меню:

**Main Menu** —> **Solution** —> **Solve** —> **Current LS**

Выходная информация расчета включает таблицу коэффициентов вкладов. Таблица коэффициентов вкладов, которая является частью выходной текстовой информации, содержит список коэффициентов вкладов, коэффициентов форм (основанных на самом низком коэффициенте демпфирования) и распределение масс для каждой формы. Для вычисления максимального отклика на каждой форме (частотного отклика) имеющиеся значения расчетных объектов для формы умножаются на коэффициенты форм. Подобное можно реализовать путем восстановления коэффициента формы командой **\*GET** и дальнейшего применения такового в качестве масштабного множителя при вызове 'команды **SET**.

5. Повторение шагов 3 и 4 для дополнительных спектров отклика, если таковые имеются. Следует обратить внимание, что результаты для текущего времени в файл `file.rst` же записываются.

6. Выход из модуля **SOLUTION**.

Команда **FINISH**

Вызов из меню:

Кнопка Close меню **Solution**.

### *Расширение форм*

1. С целью вызова шага расширения щелкнуть на кнопке опции шага расширения в диалоговой панели **Expansion Pass** для назначения опции значения **YES**.

Команда **MXPAND**

Вызов из экранного меню:

**Main Menu** —> **Solution** —> **Analysis Type** —> **New Analysis** —> **Modal**

**Main Menu** —> **Solution** —> **Analysis Type** —> **Expansion Pass**

**Main Menu** —> **Solution** —> **Load Step Opts** —> **Expansion Pass** —> **Expand Modes**

2. Расширение форм проводится независимо от примененного метода вычисления собственных форм, в том числе метода Ланцоша, итераций в подпространстве и редуцирования. Подробности расширения форм, требуется учитывать следующее:

- Выборочному расширению требуется подвергать только значащие формы (см. использование аргумента *SIGNIF* команды **MXPAND**). При использовании средств GUI и необходимости выборочного расширения форм, в диалоговой панели опций расчета собственных частот (команда **MODOPT**) при выполнении расчета собственных частот для расширения форм указывается N0. В дальнейшем расширение форм выполняется в виде отдельного этапа расчета после выполнения спектрального расчета.

- Для операций с комбинированием форм на последующем этапе комбинирования форм применяются только *расширенные* формы.

- Если требуется проводить просмотр напряжений, вызываемых спектральными нагрузками, следует убедиться, что в той же диалоговой панели указан признак вычисления напряжений. По умолчанию никакие напряжения в спектральных расчетах не вычисляются.

- При необходимости расширения всех форм шаг расширения форм можно проводить на этапе расчета собственных колебаний путем вызова команды **MXPAND**. При использовании средств GUI и необходимости расширения всех форм в указанной выше диалоговой панели опций расчета собственных колебаний (аналог команды **MODOPT**) для признака расширения форм указывается значени YES. Но при необходимости расширения только значащих форм расширение форм выполняется в виде отдельного этапа расчета после выполнения спектральных расчетов.

## 14 Анализ устойчивости конструкций

Анализ устойчивости используется, во-первых, для определения уровня нагрузок, при котором конструкция теряет устойчивость, во-вторых, для выяснения, сохраняет ли конструкция устойчивость при заданном уровне нагрузок. Этот тип анализа важен для определения стабильности состояния любых сооружений, несущих нагрузку, таких, как башни или мосты. В программе ANSYS имеется возможность выполнять два типа анализа устойчивости: в линейной и нелинейной постановке.

Расчет задач устойчивости является методом, используемым для определения *нагрузок, вызывающих потерю устойчивости* - критических нагрузок, при воздействии которых конструкция становится нестабильной, и *формы потери устойчивости* -характерной формы, связанной с откликом (поведением) конструкции при потере устойчивости.

### *Типы выполняемых расчетов потери устойчивости*

В версиях комплекса ANSYS Multiphysics, ANSYS Mechanical, ANSYS Structural и ANSYS Professional имеются два метода предсказания нагрузок, вызывающих потерю устойчивости и форму потери устойчивости: *нелинейный*

расчет потери устойчивости и расчет потери устойчивости, связанный с вычислением собственных значений (он же линейный). Поскольку эти два метода часто приводят к получению существенно различающихся результатов, следует описать различие этих методов до описания подробностей их применения.

### *Нелинейный расчет потери устойчивости*

*Нелинейный расчет потери устойчивости* обычно обеспечивает более точное решение и поэтому рекомендуется при проектировании или исследовании существующих конструкций. Данный метод использует нелинейный статический расчет с постепенным увеличением нагрузок для определения уровня нагрузок, при котором поведение модели становится нестабильным, как показано на рисунке 1 (а).

Использование нелинейных методов расчета позволяет включать в модель особенности, такие, как начальные отклонения формы, пластические свойства материала, зазоры и поведение при больших перемещениях. Дополнительно, путем использования нагрузок, связанных с перемещениями модели, можно определить поведение модели после потери устойчивости (что может оказаться полезным в обстоятельствах, когда происходит переход конструкции в новое устойчивое состояние, например, прощелкивание полой сферической оболочки).

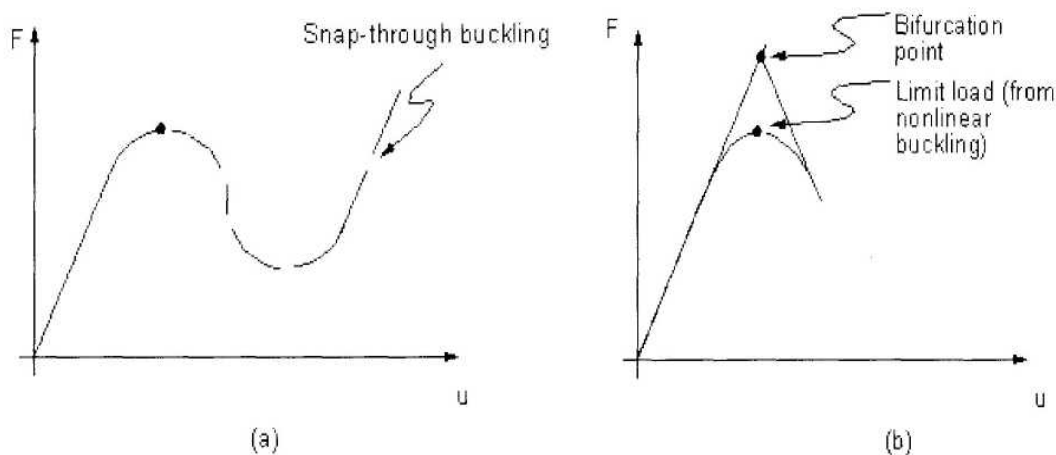


Рисунок 1 - Кривые поведения модели при потере устойчивости

### *Расчет устойчивости при помощи собственных значений*

- а) Нелинейная связь нагрузки с перемещением;
- б) Линейная потеря устойчивости (собственное значение)

Расчет устойчивости при помощи собственных значений предсказывает теоретическое значение нагрузок, вызывающих потерю устойчивости (точку бифуркации) для идеальных упругих линейных моделей (см. рисунок 1 (b)). Этот метод соответствует подходу, описанному в курсах

устойчивости упругих систем: например, собственное значение при расчете устойчивости колонны соответствует классическому решению Эйлера. Однако, погрешности формы и нелинейности препятствуют для большинства действительно существующих конструкций осуществлению теоретической потери устойчивости. Таким образом, исследование потери устойчивости при помощи собственных значений часто порождает неконсервативные результаты и, в общем случае, не должно использоваться в повседневной практике инженерных приложений.

### *Процедура выполнения нелинейного расчета устойчивости*

Нелинейный расчет задачи устойчивости является статическим расчетом с включенным учетом больших перемещений (команда NLGEOM,ON), продолжающийся до точки, в которой обнаруживается предельная нагрузка или имеется максимально допустимая нагрузка. В расчет могут включаться иные нелинейные свойства, например, пластичность.

### *Приложение приращений нагрузки*

Основной подход нелинейного расчета устойчивости заключается в постоянном приращении нагрузки до момента достижения дивергенции (расхождения) решения. Следует убедиться, что при приближении к ожидаемой критической нагрузке приращения нагрузки являются приемлемыми и обеспечивают точность расчета. Если приращение нагрузки чрезмерно велико, предсказываемая нагрузка при потере устойчивости может оказаться неточной. Во избежание потери точности следует включать деление шага времени пополам и автоматическое назначение шага по времени (команда AUTOTS,ON).

### *Автоматическое назначение шага по времени*

При использовании автоматического назначения шага по времени комплекс *автоматически* определяет нагрузки, вызывающие потерю устойчивости. Если признак использования автоматического назначения шага по времени имеет значение ON, при выполнении статического расчета нагрузка прикладывается плавно и в случае отсутствия сходимости при указанной нагрузке комплекс проводит деление приращения шага нагрузки пополам, и далее проводит расчет с уменьшенной нагрузкой. В задачах расчета устойчивости каждый случай отсутствия сходимости обычно сопровождается предупреждением «negative pivot (отрицательное значение на главной диагонали)», указывающим, что имеющаяся нагрузка равна или превосходит нагрузку, вызывающую потерю устойчивости (критическую). Обычно в случае, если комплекс успешно вычислил сходящееся решение при следующей, уменьшенной нагрузке, это сообщение можно игнорировать.

Если изменение жесткости при нагружении активно (команда **SSTIF.ON**), для гарантии получения нижней оценки критической нагрузки следует вызвать применение адаптивного схождения (команда **NROPT,FULL.,OFF**). Комплекс в процессе деления шага пополам и продолжения расчета обычно получает сходящееся решение для предельной нагрузки в точке, в которой выявляется минимальное приращение шага по времени (указанного командами **DELTIM** или **NSUBST**). Размер минимального шага по времени непосредственно влияет на точность результатов.

#### *Рекомендации*

Следует помнить, что *отсутствие сходимости расчета не является достаточным признаком достижения максимальной нагрузки*. Это может также вызываться *численной неустойчивостью* процесса решения, которая может быть устранена улучшением сетки. Для принятия решения о том, является ли отсутствие сходимости шага нагрузки действительным признаком потери устойчивости или оно обусловлено иными причинами, следует проверить историю связи нагрузок с перемещениями отклика модели. Для предсказания приближенного значения критических нагрузок рекомендуется выполнять предварительный расчет при помощи метода поиска по длине дуги (*arc-length*, команда **ARCLEN**). Сравнение этого приближенного значения с более точным результатом, выполненным при помощи деления шага пополам, может помочь определить достижение моделью максимальной нагрузки. Метод поиска по длине дуги можно использовать и непосредственно, но этот метод требует эмпирического приспособления радиуса дуги при выполнении серии повторных расчетов.

#### *Напоминания*

- - Если нагрузка на модель прикладывается в одной плоскости (то есть имеются только мембранные или осевые напряжения), перемещения из плоскости, необходимые для вызова процесса потери устойчивости не развиваются и расчет окажется не в состоянии описывать процесс реальной потери устойчивости. Для преодоления этой проблемы и вызова отклика потери устойчивости прикладывается малое отклонение из плоскости, в виде малого временного усилия или перемещения. Ранее вычисленное собственное значение для модели может являться предварительной оценкой усилий, вызывающих потерю устойчивости, позволяя выбрать место приложения малого возбуждения для получения требуемого отклика устойчивости. Начальное несовершенство формы (или возмущение) должно соответствовать месту действительного подобного явления в модели. Точность расчета весьма чувствительна к подобным параметрам модели.

- При расчете задач с большими перемещениями усилия (и

перемещения) сохраняют свои исходные направления, но нагрузки, распределенные на поверхности, учитывают изменение геометрии модели при ее деформировании. Поэтому следует убедиться в правильном приложении соответствующих типов нагрузки.

- Расчет устойчивости для определения коэффициента безопасности следует проводить при выполнении нелинейного расчета вплоть до момента выявления критической нагрузки. Простая констатация факта наличия устойчивости при данном уровне нагрузки в общем случае недостаточно для большинства случаев расчетов; обычно требуется обеспечение указанного коэффициента безопасности (запаса прочности), который может определяться только путем вычисления фактической предельной нагрузки.

- Расчет может быть продлен в область закритического поведения модели путем вызова поиска по длине дуги (команда **ARCLEN**). Данная возможность используется для проведения кривой связи нагрузки и перемещения в целях выявления отклика в областях прощелкивания и возврата.

- Для элементов, использующих согласованную матрицу жесткости (BEAM4, SHELL63 и SHELL 143) для улучшения сходимости при нелинейном расчете устойчивости и для обеспечения точности результатов используется согласованная касательная матрица жесткости (при KEYOPT(2) = 1 и использовании команды **NLGEOM,ON**). Этот признак элемента KEYOPT должен указываться до вызова первого шага нагрузки и не может изменяться в процессе расчета.

- Многие другие элементы (такие, как BEAM 188, BEAM 189 и SHELL181) при вызове команды **NLGEOM.ON** используют согласованную касательную матрицу жесткости.

#### *Процедура расчета устойчивости при помощи собственных чисел*

Еще раз следует напомнить, что расчет устойчивости при помощи собственных чисел в общем случае порождает *неконсервативные* результаты и не может использоваться при расчете конструкций. Если считается, что расчет устойчивости при помощи собственных чисел применим к наличной модели, процедура расчета сводится к следующему:

1. Создание модели.
2. Выполнение статического расчета.
3. Расчет собственных значений.
4. Расширение результатов.
5. Просмотр результатов.

## **15 Расчет переходных динамических процессов**

Расчет переходных динамических процессов (иногда называемых процессами с историей нагружения) является методом, используемым для

определения динамического поведения системы при действии любых зависящих от времени нагрузок. Данный тип расчета может использоваться для определения изменяющихся во времени перемещений, деформаций, напряжений и сил в модели, вызываемых комбинацией статических, переходных и гармонически изменяющихся нагрузок. Масштаб времени нагружения должен быть таким, чтобы учитывать влияние инерции и демпфирования. Если инерция и демпфирование не важны, можно применять вместо переходных процессов расчет статического состояния.

Основное применяемое уравнение движения при исследовании переходных динамических процессов имеет следующий вид:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}$$

Где:

[M] - матрица масс;

[C] - матрица демпфирования;

[K] - матрица жесткости;

$\{\ddot{U}\}$  - вектор узловых ускорений;

$\{\dot{U}\}$  - вектор узловых скоростей;

$\{U\}$  - вектор узловых перемещений;

$\{F(t)\}$  - вектор нагрузок.

Для любого текущего значения времени,  $t$ , эти уравнения можно считать набором уравнений статического равновесия, которые учитывают силы инерции ( $[M]\{\ddot{U}\}$ ) и силы демпфирования ( $[C]\{\dot{U}\}$ ). Комплекс ANSYS для решения этой системы уравнений для дискретных значений времени использует метод интегрирования по времени Ньюмарка (Newmark). Приращение времени между его дискретными значениями называют шагом интегрирования по времени.

### *Подготовка выполнения расчетов переходных процессов*

Расчет переходных динамических процессов более трудоемок, чем обычный динамический процесс, поскольку в общем случае требует большего количества ресурсов компьютера и больших затрат времени и труда пользователя. Существует возможность значительной экономии этих ресурсов при помощи выполнения определенных предварительных работ для уточнения физического смысла задачи. Например, имеются возможности:

1. Предварительный расчет упрощенной модели. Модели, состоящие из балок сосредоточенных масс и упругих элементов могут обеспечить хорошее приближение решения с минимальными затратами ресурсов. Подобная упрощенная модель может оказаться достаточной для определения динамического поведения конструкции.

2. При наличии нелинейностей следует определить их влияние на поведение модели. Путем выполнения предварительного расчета статического состояния. В ряде случаев учет нелинейностей в динамических расчетах не требуется.

3. Определение динамических характеристик модели. Путем

выполнения расчете собственных колебаний можно определить собственные частоты и формы колебаний и определить поведение системы при наличии возбуждения соответствующих форм. Значения собственных частот также полезны для вычисления правильного значения шага интегрирования по времени.

4. Для нелинейных задач следует рекомендовать для уменьшения объема вычислений выделение частей модели с линейным поведением в суперэлементы (подконструкции). Применение суперэлементов (подконструкций) описано в специальной главе документации.

#### *Три метода расчета*

Для расчета переходных динамических процессов применяются три метода: полный, метод наложения форм и метод

#### *Полный метод*

Полный метод расчета использует полную систему матриц для вычисления отклике системы (без редуцирования матриц). Этот метод является наиболее общим из всех трех методов, поскольку он допускает учет всех типов нелинейностей (пластичность, большие перемещения, большие деформации и так далее).

Примечание. Если учет любых нелинейностей не требуется, следует рассмотреть возможность применения иного метода расчета, поскольку полный метод является наиболее трудоемким из всех трех имеющихся.

Преимуществами полного метода являются:

- удобство использования, поскольку не требуется проведение выборе управляющих степеней свобод или собственных форм;
- применяются любые виды нелинейностей;
- в методе используются полные матрицы, и никакого приближения матриц не проводится;
- все перемещения и напряжения вычисляются за один шаг вычислений;
- метод допускает применение всех типов нагрузок: узловых усилий предписанных (ненулевых) перемещений (хотя такие нагрузки и не рекомендуются), элементные нагрузки (давления и температуры), а также табличное задание граничных условий посредством массивов параметров TABLE;
- позволяет эффективное использование нагрузок, приложенных к геометрической модели.
- Главным неудобством полного метода является его повышенный объем вычислений.

#### *Метод наложения форм*



Метод наложения форм суммирует факторизованные формы колебаний (собственные векторы), полученные в расчете собственных колебаний, для вычисления отклика модели.

*Преимуществами метода являются:*

- для большого числа задач метод работает быстрее и менее трудоемок, чем методы полный и редуцирования; элементные нагрузки, примененные в предыдущем расчете собственных колебаний, могут применяться для выполнения расчета динамических переходных процессов при помощи команды **LVSCALE**, кроме случая, когда расчет собственных колебаний выполнялся при помощи метода PowerDynamics;

- метод допускает применение демпфирования для отдельных собственных форм (коэффициент демпфирования является функцией номера формы).

*Недостатками метода наложения форм являются:*

- шаг интегрирования по времени остается постоянным в течение всего процесса, вследствие чего автоматическое назначение шага по времени не проводится;
- единственной допускаемой нелинейностью является контакт узлов с узлами (условия зазора);
- предписанные (ненулевые) перемещения не допускаются.

*Метод редуцирования*

Редуцированный метод позволяет уменьшить размер задачи путем применения управляющих степеней свобод и редуцирования матриц. После вычисления перемещений для набора управляющих степеней свобод, комплекс ANSYS расширяет решение до полного набора исходных степеней свобод.

*Преимуществами данного метода являются:*

- метод работает быстрее и менее трудоемок, чем полный метод.

*Недостатками метода редуцирования являются:*

- начальное решение вычисляется только в виде перемещений для набора управляющих степеней свобод; для вычисления полных перемещений, напряжений и усилий, требуется второй шаг. именуемый шагом расширения; однако, шаг расширения может быть необязательным для ряда задач;

- элементные нагрузки (давления, температуры и так далее) не могут прикладываться; однако, допускается приложение ускорения;

- все нагрузки должны прикладываться в указанных пользователем управляющих степенях свобод, что ограничивает применение нагрузок, примененных к геометрической модели;

- шаг интегрирования по времени остается постоянным в течение всего процесса, вследствие чего автоматическое назначение шага по времени не проводится;

- единственной допускаемой нелинейностью является контакт узлов с узлами (условия зазора).

### *Выполнение расчета переходного динамического процесса полным методом*

Процедура использования полного метода при расчете переходного динамического процесса (применяемого в версиях комплекса ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical и ANSYS/Structural) состоит из следующих главных этапов:

1. Создание модели.
2. Приложение начальных условий.
3. Назначение опций контроля расчета.
4. Назначение дополнительных опций расчета.
5. Приложение нагрузок.
6. Сохранение конфигурации нагрузок для текущего шага нагрузки.
7. Повторение этапов 3-6 для каждого шага нагрузок.
8. Сохранение резервной копии базы данных.
9. Вызов вычислений переходных процессов.
10. Выход из модуля расчета.
11. Просмотр результатов.

#### *Создание модели*

Первым шагом, требуемым при выполнении расчета переходного динамического процесса полным методом, является создание модели. На данном шаге следует определить имя задания (jobname) и заголовок, а далее использовать препроцессор PREP7 для указания типов элементов, геометрических характеристик элементов, свойств материалов и геометрии модели.

#### *Напоминания*

При создании модели для применения в расчете переходного динамического процесса полным методом следует помнить следующее:

- допускается использование линейных и нелинейных элементов;
- требуется указывать модуль Юнга EX (или жесткость в иной форме) и плотность DENS (или массу в иной форме): свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными или ортотропными, а также постоянными или зависящими от температуры.

*Плотность сетки должна удовлетворять следующим требованиям:*

- вид сетки должен быть пригоден для получения собственных форм, соответствующих высоким значениям собственных чисел;
- области, в которых распределения напряжений или деформаций вызывают повышенный интерес, должны иметь относительно подробную сетку, чем области, в которых определяется только распределение перемещений;
- если требуется учет нелинейностей, сетка должна обеспечивать расчет таковых; например, наличие пластичности требует рационального

размещения точек интегрирования (и, следовательно, достаточно подробной сетки) в зонах с высокими градиентами пластических деформаций;

- - если исследуются эффекты, связанные с распространением волн (например, брус, падающий точно на торцевую грань), сетка должна быть достаточно подробной для расчета волновых процессов. В общем случае, в направлении распространения волны модель должна иметь как минимум 20 элементов.

#### *Приложение начальных условий*

Перед выполнением расчета переходного динамического процесса полным методом необходимо определить назначение начальных условий и использование шагов нагрузки. Расчет переходного динамического процесса по определению включает нагрузки, зависящие от времени. Для указания каждой нагрузки необходимо разделение нагрузки, являющейся функцией времени, на удовлетворяющие пользователю шаги нагрузки. Каждый перелом на линии связи нагрузки и времени может восприниматься в виде индивидуального шага нагрузки, как это показано на рисунке 1.

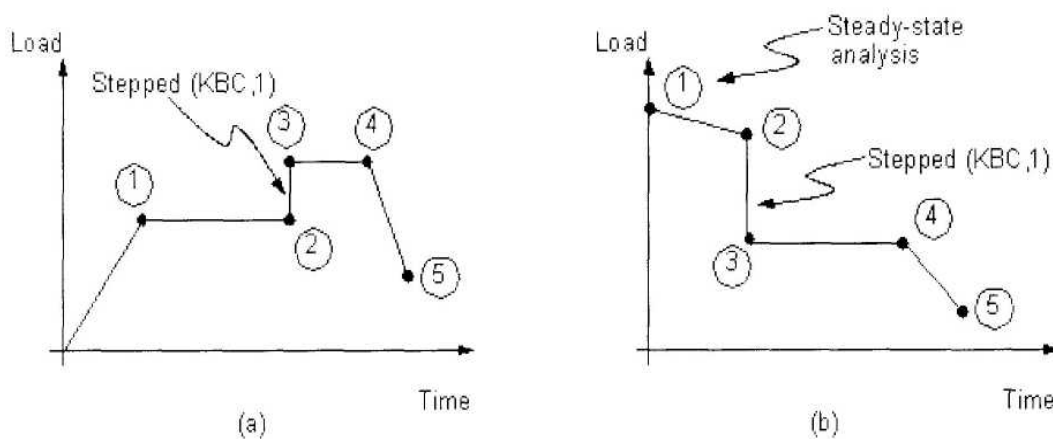


Рисунок 1 - Пример связи времени и нагрузки

Обычно начальные условия назначаются на первом шаге прикладываемой нагрузки. Далее указываются нагрузки и опции шагов нагрузки для второго и последующего шагов нагрузки переходного процесса. Для каждого шага нагрузки следует указывать значение нагрузки и значение времени, а также иные опции шагов нагрузки, такие, как опция приложения нагрузки скачкообразно или плавно, опция использования автоматического назначения шага по времени и так далее. Далее каждый шаг нагрузки записывается в файл и проводится общий расчет для всех шагов нагрузки. Назначение начальных условий описывается ниже.

На первом шаге при приложении переходных нагрузок должны назначаться начальные условия, то есть условия при Time = 0. Расчет

переходных динамических процессов требует наличия двух групп начальных условий (поскольку система уравнений имеет II порядок): начальные перемещения ( $U_0$ ) и начальные скорости ( $\dot{U}_0$ ). Если никаких начальных условий не указывается, предполагается, что  $U_0$  и  $\dot{U}_0$  одновременно имеют нулевые значения. Начальные ускорения  $\ddot{U}$  всегда считаются равным нулю, но начальные ускорения можно определить и отличным от нуля, путем приложения подходящих нагрузок в виде ускорения в течение малого интервала времени.

*Нулевые начальные напряжения и нулевые начальные скорости* – являются условиями по умолчанию, то есть, если  $U_0 = \dot{U}_0 = 0$ , ничего особо указывать не требуется. Нагрузки, соответствующие первому перелому на линии связи нагрузки и времени можно, прикладывая на первом шаге нагрузки.

*Ненулевые начальные перемещения и (или) ненулевые начальные скорости* – эти начальные условия могут назначаться при помощи команды IC. Команда IC вызов из экранного меню: Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Initial Condit'n → Define

Предупреждение. Следует проявлять осторожность, чтобы не создать несогласованных начальных условий. Например, если начальная скорость указывается для единичной степени свободы, а для всех остальных степеней свобод начальная скорость равна 0. это может привести к несогласованности начальных условий. В большинстве случаев желательно определять начальные скорости во всех незакрепленных степенях свобод модели. Если для разных степеней свобод эти граничные условия не совпадают, обычно начальные условия проще указывать в явном виде, как описано ниже, а не при помощи команды IC.

*Нулевые начальные перемещения и ненулевые начальные скорости* - ненулевая скорость назначается путем приложения малых перемещений в течение малого промежутка времени у части модели, для которой эта скорость приложена. Например, если  $\dot{U}_0 = 0.25$ , можно приложить перемещение, равное 0.001 за промежуток времени, равный 0.004, как показано ниже.

...

TIMINT,OFF ! Выключение эффекта интегрирования по времени  
D,ALL,UY,.001 ! Малое перемещение UY (предполагается скорость в направлении оси Y)

TIME,.004 ! Начальная скорость =  $0.001/0.004 = 0.25$

LSWRITE ! Запись данных нагрузок в файл шага нагрузки (Jobname.SOL)

DDEL.ALL.UY ! Удаление приложенных перемещений

TIMINT.ON ! Включение эффекта интегрирования по времени

...

*Ненулевые начальные перемещения и ненулевые начальные скорости* - подобно указанному выше приему, за исключением того, что приложенные перемещения являются действительными значениями вместо малых приращений. Например, если  $U_0 = 1.0$ , и при этом  $\dot{U}_0 = 2.5$ , перемещение, равное 1.0 прикладывается в течение интервала времени 0.4:

...

TIMINT,OFF ! Выключение эффекта интегрирования по времени

D,ALL,UY, 1.0 ! Начальное перемещение = 1.0

TIME,.4 ! Начальная скорость =  $1.0/0.4 = 2.5$

LSWRITE ! Запись данных нагрузок в файл шага нагрузки (Jobname.SOI)

DDELE,ALL,UY ! Удаление приложенных перемещений

TIMINT,ON ! Включение эффекта интегрирования по времени

...

*Ненулевые начальные перемещения и нулевые начальные скорости* - данные начальные условия требуют использования двух промежуточных шагов (команда **NSUBST,2**) с изменением шага для приложенных перемещений (команда **KBC,1**)- Без изменения шага (или при наличии одного шага) приложенные перемещения изменятся непосредственно в ходе времени, порождая отличную от нуля начальную скорость. Приведенный ниже пример демонстрирует приложение начальных условий вида  $U_0 = 1.0$  и  $\dot{U}_0 = 0$ :

TIMINT.OFF ! Выключение эффекта интегрирования по времени для статического расчета

D,ALL,UY,1.0 ! Начальное перемещение = 1.0

TIME,.001 ! Малый интервал времени

NSUBST,2 ! Два промежуточных шага

KBC,1 ! Приложение нагрузок скачком

LSWR.ITE ! Запись данных нагрузок в файл шага нагрузки (Jobname.SOI)

! Расчет переходного процесса

TIMINT,ON ! Включение эффекта интегрирования по времени

TIME,... ! Действительный интервал времени

DDELE,ALL,UY ! Удаление ограничений степеней свобод

KBC,O ! Плавное приложение нагрузки (если требуется)

! Продолжение обычной процедуры расчета переходного процесса

*Ненулевые начальные ускорения* - такое начальное условие может быть аппроксимировано приложением требуемого ускорения в течение малого интервала времени (команда **ACEL**). Например, набор команд приложения начального ускорения, равного 9.81, имеют вид:

ACEL..9.81 ! Начальное ускорение в направлении оси Y

TIME,.001 ! Малый интервал времени

NSUBST,2 ! Два промежуточных шага

KBC,1 ! Приложение нагрузок скачком

LSWRITE ! Запись данных нагрузок в файл шага нагрузки (Jobname.SOI)

! Расчет переходного процесса

TIME, ... ! Действительный интервал времени

DDELE. ... ! Удаление ограничений степеней свобод (если требуется)

KBC,O ! Плавное приложение нагрузки (если требуется)

! Ускорение не должно ограничиваться на начальном шаге нагрузки.

! Если это условие не выполняется, приложенное ускорение не будет иметь никакого эффекта.

! Продолжение обычной процедуры расчета переходного процесс

### *Назначение опций контроля расчета*

Назначение опций контроля расчета включает определение типа расчета и общих опций расчета, требуемых для проведения расчета, а равно определения опций шага нагрузки для проведения расчета. Если проводится расчет переходных динамических переходных процессов полным методом для задач МДТТ, можно использовать для указания этих опций упрощенные средства управления (вызываемые из диалоговой панели Solution Controls). Диалоговая панель Solution Controls содержит значения опций, принятые по умолчанию, которые можно применять для большинства расчетов переходных динамических переходных процессов полным методом для задач МДТТ.

Предупреждение. Если требуется назначить начальные условия для расчета переходных динамических переходных процессов полным методом, их необходимо назначать для первого шага нагрузки. Далее путем применения диалоговой панели можно Solution Controls назначать дополнительные значения параметра времени для второго и последующих шагов нагрузки.

Если не использовать диалоговую панель Solution Controls (вызываемую из экранного меню последовательностью Main Menu —>• Solution —> Analysis Type —> Sol'n Control), можно назначать значения опций путем вызова команд комплекса ANSYS из командной строки или из экранного меню (последовательностью Main Menu —> Solution —> Unabridged Menu —> *option*

### *Использование вкладки Basic Tab*

Опции контроля решения в диалоговой панели Solution Controls собраны в пять закладок, причем основные опции собраны в первой закладке, а последующие вкладки содержат расширенные средства контроля. Последовательно переходя по закладкам диалоговой панели, можно получить ряд удобств в процессе проведения расчета. При вызове диалоговой панели активизируется вкладка Basic. Опции, содержащиеся во вкладке Basic, содержат минимальное количество данных, требуемых для проведения расчета в комплексе ANSYS. После указания опций, содержащихся во вкладке Basic, переходить к остальным закладкам нет необходимости, кроме случаев необходимости использования расширенных средств контроля. После нажатия кнопки ОК в любой закладке диалоговой панели значения опций сохраняются в базе данных ANSYS, а диалоговая панель закрывается.

Вкладка Basic применяется для указания значений опций, перечисленных в таблице 1. Basic Tab Options (опции вкладки Basic). Для получения информации об использовании диалоговой панели Solution Controls следует вызвать данную диалоговую панель, вызвать закладку Basic и нажать кнопку Help.

Специальные рекомендации по указанию значений этих опций при расчете переходных процессов полным методом (полных переходных процессов) включают следующее:

- при вызове команд **ANTYPE** и **NLGEOM** в случае выполнения нового расчета и игнорирования эффектов больших деформаций, в том числе больших перемещений, больших поворотов и больших собственно деформаций, следует выбирать вариант Small Displacement Transient; если ожидаются большие перемещения (например, при изгибе длинных тонкостенных балок) или больших деформаций (например, при обработке металлов давлением) следует выбирать вариант Large Displacement Transient; в случае повторного вызова несошедшегося нелинейного процесса, или наличия предварительно проведенного расчета статических начальных напряжений, или ранее проведенного полного переходного процесса следует выбирать вариант Restart Current Analysis;

- при вызове команды **AUTOTS** следует помнить, что данная опция шага нагрузки (которая также может рассматриваться как опция оптимизации шага по времени при выполнении расчетов переходных процессов) увеличивает или уменьшает шаг интегрирования по времени на основе отклика модели: для большинства задач рекомендуется включать автоматическое определение шага по времени ступенчато изменяя таковое в пределах минимального и максимального значений; эти пределы, указанные посредством команд **DELTIM** или **NSUBST**, позволяют ограничивать диапазон изменения шага по времени;

- команды **NSUBST** и **DELTIM** определяют значения опций шага нагрузки при выполнении расчетов переходных процессов; шаг по времени для интегрирования является приращением времени, используемым для интегрирования по времени уравнений движения; приращение времени может указываться непосредственно или косвенно (то есть через число промежуточных шагов); размер шага по времени определяет точность решения - чем меньше его значение, тем выше точность; для правильного назначения шага по времени следует учитывать несколько факторов;

- при использовании команды **OUTRES** необходимо учитывать следующее предупреждение:

Предупреждение. По умолчанию, в файл результатов (Jobname.RST) записываются данные, полученные на последнем промежуточном шаге расчета полного переходного динамического процесса. Для записи результатов, полученных на всех промежуточных шагах, следует использовать поле Frequency. Кроме того, по умолчанию в файл результатов записываются данные только для 1000 наборов результатов. Если это число (основанное на значении аргументов команды **OUTRES**) превышает, действия комплекса прекращаются с сообщением об ошибке. Для изменения данного предела используется команда /CONFIGURES (подробности см. в главе «Управление памятью и конфигурирование»).

### *Использование вкладки Transient Tab*

Вкладка Transient применяется для указания значений опций. Специальные рекомендации по указанию значений этих опций при расчете переходных процессов полным методом (полных переходных процессов) включают следующее:

команда TIMINT является командой указания динамических опций шага нагрузки, определяющей включение эффекта интегрирования по времени или его отключение; эффект интегрирования по времени должен быть включен для учета в расчете влияния инерции или демпфирования (в противном случае выполняется расчет статического НДС), так что по умолчанию интегрирование по времени используется; данная опция полезна на начальном этапе выполнения расчета переходных процессов для создания начального статического состояния, когда первые шаги по времени проводятся без использования эффектов интегрирования по времени;

команды ALPHAD (указание демпфирования, связанного с матрицей масс) и BETAD (указание демпфирования, связанного с матрицей жесткости) являются командами указания динамических опций шага нагрузки для определения опций вида демпфирования; демпфирование в той или иной форме имеется в большинстве конструкций и должно учитываться при их расчете;

команда TINTP является командой указания динамических опций шага нагрузки, определяющей параметрами интегрирования в переходных процессах; эти параметры интегрирования контролируют вид интегрирования по Ньюмарку; по умолчанию используется схема интегрирования с постоянным усредненным ускорением.

### *Использование вкладки Sol'n Options Tab*

Вкладка Sol'n Options при выполнении расчета переходных процессов полным методом применяется для указания тех же значений опций, что и при расчете статического НДС.

### *Использование вкладки Nonlinear Tab*

Вкладка Nonlinear при выполнении расчета переходных процессов полным методом применяется для указания тех же значений опций, что и при расчете статического НДС

### *Использование вкладки Advanced NL Tab*

За исключением опций поиска по длине дуги, вкладка Advanced NL при выполнении расчета переходных процессов полным методом



применяется для указания тех же значений опций, что и при расчете статического НДС.

### *Указание дополнительных опций расчета*

Данные опции, поскольку не являются часто применяемыми, не включаются в диалоговую панель Solution Controls, и их значения, существующие по умолчанию, изменяются достаточно редко. В данном разделе указываются способы вызова команд из меню для обеспечения помощи в случаях, когда требуется изменить значения опций, имеющиеся в комплексе ANSYS по умолчанию.

### *Эффект изменения жесткости при приложении нагрузки*

Ряд элементов, включая семейство элементов 18х, учитывают эффект изменения жесткости при приложении нагрузки, вне зависимости от аргументов команды **SSTIF**. Для уточнения наличия в элементе возможности учета эффекта изменения жесткости при приложении нагрузки следует обратиться к описанию конкретного элемента.

По умолчанию, эффект изменения жесткости при приложении нагрузки включен (имеет значение ON), если команда **NLGEOM** имеет аргумент ON. Ситуации, в которых эффект изменения жесткости при приложении нагрузки можно отключить, включают в себя:

- изменение жесткости при приложении нагрузки происходит только при выполнении расчетов нелинейных процессов; если проводится расчет линейных процессов (команда **NLGEOM,OFF**), эффект изменения жесткости при приложении нагрузки можно отключить (указать для него значение OFF);

- если еще до проведения расчета известно, что модель не доводится до потери устойчивости (бифуркации, прощелкивания).

Включение учета эффекта изменения жесткости при приложении нагрузки в общем случае ускоряет сходимость нелинейных задач. Учитывая упомянутые выше обстоятельства, можно отключить учет эффекта изменения жесткости при приложении нагрузки (указать для него значение OFF) для ряда задач, в которых имеются проблемы сходимости, например, в случаях локальной потери устойчивости. Команда **SSTIF** - вызов из экранного меню - Main Menu —> Solution —> Unabridged Menu —> Analysis Type —> Analysis Options

## **16 Тепловой анализ**

В программе ANSYS реализованы расчетные средства для трех видов теплообмена: кондуктивного, конвективного (свободного и вынужденного) и радиационного. Эти средства используются при проведении стационарного, нестационарного, линейного или нелинейного теплового анализа.

Для конечно-элементного представления системы разрешающее уравнение процесса теплопередачи имеет вид:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\},$$

где

- [C] - матрица удельных теплоемкостей;
- {T} - производная по времени температуры в узле;
- [K] - матрица эффективной теплопроводности;
- {T} - вектор узловых температур;
- {Q} - вектор эффективного теплового потока в узле.

С помощью программы ANSYS можно выполнить тепловой анализ для следующих задач:

- стационарная теплопроводность;
- неустановившийся температурный режим;
- фазовые превращения;
- расчет температурных напряжений и деформаций.

### *Термо-прочностной анализ*

Средства термо-прочностного анализа программы ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа. Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на прочность конструкции. Пользователь может задать тепловую нагрузку отдельно или в совокупности с механическими нагрузками. В программе ANSYS доступны два способа связывания теплового и прочностного анализов. Первый состоит в том, что эти два анализа делаются друг за другом. Сначала получают температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена. Значения температур затем используются в виде нагрузок на стадиях препроцессорной подготовки и получения решения при последующем прочностном анализе. Второй способ предусматривает проведение совместного термо-прочностного решения. В программе ANSYS это достигается использованием конечных элементов связанной задачи, которые имеют как тепловые, так и прочностные степени свободы. Из этих элементов создается расчетная модель и задаются тепловые и механические граничные условия. На каждой итерации выполняется решение тепловой и прочностной задач с использованием значений температур и перемещений, полученных на предыдущей итерации. Имеется возможность вводить в расчетную модель контактные элементы общего типа. Эти элементы допускают теплопередачу через поверхность контакта. Как только контактные поверхности смыкаются, становится возможным процесс теплообмена.

## **17 Постпроцессорная обработка**

В программе ANSYS стадия постпроцессорной обработки следует за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения. С помощью постпроцессорных средств программы пользователь имеет возможность легко обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом, используя обширный набор команд и функций дружественного интерфейса. Результаты решения включают значения перемещений, температур, напряжений, деформаций, скоростей и тепловых потоков. Итогом работы программы на постпроцессорной стадии является графическое и/или табличное представление результатов. Графическое изображение может быть выведено на монитор в интерактивном режиме во время постпроцессорной обработки или преобразовано в твердую копию. Поскольку в программе ANSYS стадии препроцессорной подготовки, получения решения и постпроцессорной обработки объединены в одно целое, пользователь имеет возможность немедленно обратиться к полученным результатам. Некоторые полезные команды постпроцессора описаны ниже.

Масштаб перемещений в деформированном состоянии –

**UM>PlotCtrl>Style>Displacement Scaling**

Анимация результатов решения –

**UM>PlotCtrl>Animate**

Перенаправление вывода всей графики в \*.avi файл (с дублированием на экране) –

**UM>PlotCtrl>Redirect Plot>To Animation File**

Настройка параметров отображения модели, в том числе настройка секущей плоскости **UM>PlotCtrl>Style>Hidden Line Options**

Настройка цветовой палитры, используемой для вывода графики

**UM>PlotCtrl>Style>Colors**

Вывод на печатающее устройство – **UM>PlotCtrl>Hard Copy**

## **18 Язык параметрического программирования APDL**

Обычная процедура выполнения анализа с использованием метода конечных элементов состоит в создании расчетной модели, задании нагрузок, получении решения и интерпретации результатов. Если результаты решения указывают на необходимость внесения изменений в проектную разработку, то требуется изменить геометрию модели и повторить весь процесс. Такой подход может оказаться весьма дорогостоящим и длительным, особенно для сложных моделей и при большом числе вносимых изменений.

Язык параметрического проектирования программы ANSYS (APDL) дает возможность автоматизировать процесс за счет “интеллектуального” анализа, т.е. за счет такой организации программы, когда решение принимается на основе установленных соотношений, значений переменных и критериев. Язык проектирования APDL позволяет осуществить усложненный ввод исходных данных, что позволяет управлять вносимыми изменениями и

такими основными объектами анализа, как перемещения, свойства материала, нагрузки, положение связей-ограничений и размеры конечно-элементной сетки.

Язык APDL располагает следующими средствами, которые можно использовать раздельно или совместно:

- параметры;
- параметры-массивы;
- выражения и функции;
- ветвление и циклы;
- функции повторения и аббревиатуры команд;
- макрокоманды;
- процедуры пользователя.

### *Параметры*

Параметр задается в виде константы, выражения или строки символов. Параметр-константа представляет собой идентификатор, которому присвоено определенное значения. Так, например, пользователь может ввести константу PI с помощью команды PI=3.14159. После того как этот параметр определен, программа подставляет число 3.14159 вместо аргумента PI любой разрешенной команды. Параметр-константу можно задать, используя условное выражение. Например, команда A=B<5.7 установит величину параметра A, равную текущему значению B, если B меньше 5.7, в противном случае параметр A примет значение 5,7.

Выражение, определяющее параметр, может включать символы обычных математических действий и/или функций языка FORTRAN. Разрешено использовать арифметические операции, операции сравнения, выделение ближайшего целого и стандартные тригонометрические, экспоненциальные и гиперболические функции, принятые в языке FORTRAN.

### *Массив параметров*

Параметр-массив представляет собой совокупности величин, которые можно представить в матричной форме. Матрицы могут быть одномерными (столбец данных), двумерными (строки и столбцы) или трехмерными (строки, столбцы и плоскости). Элементы массивов принимают значения, указанные пользователем или вычисленные программой ANSYS. Значения переменных, определенных пользователем, могут вводиться непосредственно во время сеанса работы программы или считываться из существующего файла данных.

Параметр-массив используется для упрощения ввода данных. Например, зависимость вынуждающей силы от времени может быть введена в виде табличного параметра-массива с минимальным числом точек ввода, а программа ANSYS сможет вычислять значения силы в те моменты времени, которых нет в заданном массиве. Еще одним признаком, присущим параметрам-массивам, является возможность выполнять операции с

векторами и матрицами. Векторные операции (применимы к столбцам векторов) включают сложение, вычитание, скалярное и векторное произведения и др. Также допускаются такие типичные матричные операции, как матричное умножение, транспонирование и решение совместных уравнений.

### *Ветвление и циклы*

Многократная повторяемость действий достигается использованием обычного оператора DO-цикла, который предписывает программе повторять некоторый набор команд. Число повторений контролируется счетчиком цикла или условиями выхода из цикла. Эти условия позволяют пропускать часть цикла или выполнять его полностью в зависимости от выполнения заданного условия.

Ветвление процесса, т.е. выполнение программой команд не в том порядке, как они написаны, обеспечивается использованием традиционных операторов GO и IF языка FORTRAN. Оператор перехода GO предписывает программе выполнять строку с меткой, указанной пользователем. Условный оператор IF содержит условие, которое предписывает переход к другой строке программы только в том случае, если заданное условие выполняется. Возможно также использование оператора IF-THEN-ELSE, который осуществляет переход к выполнению тех или иных действий в зависимости от значения текущего условия. Условные операторы могут применяться вместе с параметрами, определенными пользователем или вычисленными в программе ANSYS.

### *Макрокоманды*

Макрокоманда (или иначе, макрос) представляет собой определенную последовательность команд программы ANSYS, которая записана в файл и может быть выполнена в любой подходящий момент. Макрокоманда создается с помощью редактора операционной системы или в рамках программы ANSYS. Такие команды могут состоять из любых допустимых конструкций языка APDL, таких как параметры, функции повторения, операторы ветвления и т.п.

Макрокоманды можно повторить любое число раз при анализе, при этом допускается уровень вложений до десяти команд. Количество используемых при анализе макрокоманд не ограничено. Из макросов, которые используются часто, можно создать библиотеку макрос-файлов и применять при работе с программой ANSYS.

При использовании макросов альтернативным способом определения параметров является команда \*ASK. С помощью этой команды запрашивается значение параметра посредством ввода сообщения пользователя. Командой, обычно используемой в макросах (а также в любом файле, который может читаться в программе ANSYS), является команда \*MSG. Эта команда дает возможность пользователю записывать параметры и/или сообщения пользователя в форматированный выходной файл.

Сообщением может быть обычное примечание, предупреждение, ошибка или даже фатальная ошибка (в последних двух случаях приостанавливается выполнение программы).

## 19 Использование СК и рабочей плоскости (WP)

Рабочая плоскость – это бесконечная воображаемая плоскость со своей декартовой или полярной двухмерной системой координат, на которой происходят все построения при работе в экранном режиме с использованием мыши. Рабочая плоскость (в дальнейшем WP) может располагаться, как угодно относительно координатных систем ANSYS`а и как угодно относительно экрана дисплея, ее можно вращать и перемещать по трем осям. Удобство его использования в том, что, расположив WP так, как необходимо можно сменить активную систему координат на систему координат WP и задавать координаты вновь создаваемых объектов в этой СК. Причем обратный переход в глобальную декартову или цилиндрическую СК не вызывает изменения координат ранее созданных объектов, что эквивалентно тому, что эти объекты были бы созданы в глобальной СК.

При загрузке ANSYS, WP совпадает с плоскостью X-Y в глобальной декартовой системой координат, их оси коллинеарны. Настройки WP доступны в панели диалога, вызываемого из **UM>WorkPlane>WP Setting...** В них можно поставить отображение триады (значка XYZ) и сетки (grid). Опция **Enable Snap** включает или выключает привязку к узлам ячеек сетки, размер которых задается в поле **Spacing. Minimum** – минимальное значение X в глобальной декартовой СК в котором начинает отображаться сетка. **Maximum** – максимальное значение X в глобальной декартовой СК в котором отображается сетка. **Radius** – радиус в котором отображается сетка (для полярной СК). **Tolerance** – допуск на расположение объектов, например если вершина не лежит на WP, но лежит в  $\pm$  **Tolerance** от WP, то считается что она лежит на WP. Другой панелью управляющей WP является панель **Offset WP**, которая вызывается из **UM>WorkPlane>Offset WP by Increments**.

Верхние кнопки X,Y,Z смещают WP по соответствующим осям на величину, установленную в счетчике **Snap**, нижние вращают WP вокруг соответствующей оси на угол, установленный в счетчике **Degrees**. Динамический режим включает мышь – курсор принимает вид триады. Перемещение по графическому окну с нажатой левой кнопкой динамически перемещает WP, перемещение с нажатой правой кнопкой динамически вращает WP. Вы можете располагать WP следующими способами –

- По трем произвольным точкам, определяющим начало координат WP, ось X и плоскость XY.  
**UM>WorkPlane>Align WP with>XYZ Location**
- По трем, выбранным узлам  
**UM>WorkPlane>Align WP with>Nodes**
- По трем выбранным вершинам  
**UM>WorkPlane>Align WP with>Keypoints**
- Нормально к выбранному ребру  
**UM>WorkPlane>Align WP with>Plane Normal To Line**

- WP можно также совместить с активной СК, с глобальной декартовой и с выбранной локальной

**UM>WorkPlane>Align WP with>Active Coord Sys**

**UM>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian**

**UM>WorkPlane>Align WP with>Specified Coord Sys**

Сместить (параллельным переносом) начало координат WP можно используя следующие способы –

- Переместить в вершину  
**UM>WorkPlane>Offset WP To>Keypoints**
- Переместить в узел  
**UM>WorkPlane>Offset WP To>Nodes**
- Совместить с началом активной СК, с глобальной декартовой или выбранной локальной  
**UM>WorkPlane> Offset WP To >Active Coord Sys**  
**UM>WorkPlane> Offset WP To >Global Cartesian**  
**UM>WorkPlane> Offset WP To >Specified Coord Sys**

### *Координатные системы*

В программе ANSYS координатные системы используются для размещения в пространстве геометрических объектов, определения направлений степеней свободы в узлах сетки, задания свойств материала в разных направлениях и для управления графическим изображением и содержанием выходных результатов. Можно использовать декартовы, цилиндрические, сферические, эллиптические и тороидальные системы координат; все они могут быть расположены и ориентированы в пространстве произвольным образом.

В программе ANSYS существуют следующие системы координат: декартовы, цилиндрические, сферические, эллиптические и тороидальные. Все они могут быть расположены и ориентированы в пространстве произвольным образом. Также различают следующие типы координатных систем используемых для различных целей:

- Глобальные и локальные СК в которых происходит моделирование;
- Экранная СК, используется для вывода компонентов на экран или координат компонентов в текстовый файл;
- Узловая СК определяет направление степеней свободы в каждом узле и ориентацию результатов узлового решения (реакции, напряжения и т.д.);
- Элементная СК определяет направление заданных материальных свойств (например, различные значения модуля Юнга для монокристалльной отливки) и ориентацию результатов элементного решения



## Глобальные СК

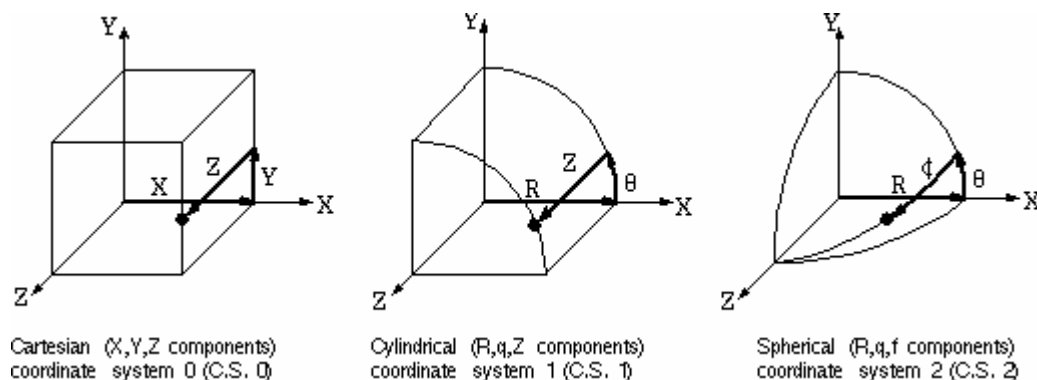


Рисунок 1 - Глобальные СК

ANSYS имеет четыре predefined глобальные СК – декартову, цилиндрическую, сферическую и тороидальную. Все эти СК подчиняются правилу правой руки. Каждая глобальная и локальная СК имеет свой уникальный идентификационный номер: глобальная декартова – 0; глобальная цилиндрическая – 1; глобальная сферическая – 2; тороидальная – 3 (см. рисунок). При загрузке ANSYS всегда имеет активной декартову СК.

## Локальные СК

Во многих случаях удобно или необходимо установить свою координатную систему смещенную и развернутую относительно глобальной СК. Такая СК называется локальной и может быть установлена следующими командами:

- Определить локальную СК заданием начала координат в текущей СК  
**UM>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>At Specified Loc**  
В открывающемся диалоге необходимо задать идентификационный номер, который должен быть больше 10, и можно изменить положение начала отсчета, тип создаваемой СК, ее ориентацию относительно текущей СК
- Определить локальную СК по трем узлам;  
**UM>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>By 3 Nodes**  
Необходимо указать последовательно узел определяющий начало координат, ось X и плоскость XY
- Определить локальную СК по трем вершинам  
**UM>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>By 3 KP**  
Необходимо указать последовательно вершину определяющую начало координат, ось X и плоскость XY
- Определить локальную СК в начале координат рабочей плоскости  
**UM>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>At WP Origin**

После того, как вы создали локальную СК, она становится активной СК. Вы можете создавать или удалять СК в любой момент работы в ANSYS.

- Чтобы удалить локальную СК используйте следующий способ –  
**UM>WorkPlane>Local Coordinate System>Delete Local CS**
- Просмотреть статус всех существующих СК –  
**UM>List>Other>Local Coordinate System>**

### *Активные СК*

Вы можете создать сколько угодно локальных СК, но только одна из них может быть активна в данный момент времени. Каждый раз, как вы создаете новую СК она становится активной. Если вы хотите активизировать какую-либо глобальную СК или ранее созданную используйте следующие способы –

**Utility Menu>Change Active CS to>Global Cartesian**  
**Utility Menu>Change Active CS to>Global Cylindrical**  
**Utility Menu>Change Active CS to>Global Spherical**  
**Utility Menu>Change Active CS to>Specified Coord Sys**  
**Utility Menu>Change Active CS to>Working Plane**

Активизировать СК можно в любое время. При активизации любой из координатных систем значки X,Y,Z в панелях диалогов не изменяют свой вид, но вы должны помнить, что смысл X,Y,Z в цилиндрической СК – R, $\theta$ ,Z, а в сферической R, $\theta$ , $\phi$ .

### *Отображение СК*

По умолчанию, при выводе координат вершин и узлов в текстовый файл они принимают свое значение в глобальной декартовой СК, чтобы вывести координаты в какой-либо другой СК активизируйте нужную СК одним из следующих способов –

**Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Cartesian**  
**Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Cylindrical**  
**Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Spherical**  
**Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Specified Coord Sys**

А затем выводите интересующие координаты –

**UM>List>Keypoints** или **UM>List>Nodes**

Изменение экранной СК также ведет с за собой смену активной СК, поэтому после ее смены не забывайте активизировать нужную глобальную или локальную СК.

### *Узловая СК*

Узловая СК предназначена для ориентации степеней свободы в узлах конечно-элементной модели, причем в каждом узле существует своя СК (не имеющая идентификационного номера), которая может быть ориентирована произвольным способом. По умолчанию СК во всех узлах параллельны глобальной декартовой СК. Вывести на экран значок отображающий узловые

СК можно включив поле **NDIR** диалога **Symbols** находящийся в **UM>PlotCtrls>Symbols** (отображаться будут только узловые СК не параллельные глобальной СК).

Вращать узловые СК можно следующим образом –

- Повернуть узловую СК параллельно активной СК (после поворота ось X будет параллельна оси X или R активной СК, ось Y будет параллельна оси Y или  $\theta$  активной СК)

**MM>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-To Active CS**

**MM>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-To Active CS**

- Повернуть узловую СК на известный угол  
**MM>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-By Angles**  
**MM>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-By Angles**

- Повернуть узловую СК на вектор **Main Menu>Preprocessor>Create>Nodes>-Rotate Node CS-By Vectors**  
**Main Menu>Preprocessor>Move/Modify>-Rotate Node CS-By Vectors**

Необходимо указать глобальные координаты единичного вектора, задающего направление оси X, глобальные координаты единичного вектора, задающего направление оси Y и глобальные координаты единичного вектора, задающего направление оси Z. Если заданы только два вектора, третий берется по правилу правой руки. Если вектора заданы неправильно и ANSYS не может создать такую СК, то выдается ошибка.

- Чтобы вывести в текстовый файл значение поворотов узловых СК относительно глобальной декартовой СК используйте следующие способы

**Utility Menu>List>Nodes**

**Utility Menu>List>Picked Entities>Nodes**

Следующие данные всегда интерпретируются ANSYS'ом в узловых СК

- ограничения степеней свободы (degree of freedom constraints);
- силы;
- связанные перемещения (повороты) (coupled nodes);
- уравнения в узлах (constraint equations);
- ведущие степени свободы (master DOF);

Следующие результаты сообщаются в узловых СК в выходных файлах;

- степени свободы решения (degree of freedom solution);
- узловые силы (nodal loads);
- реакции (reaction loads)/

### *Элементные СК*

Каждый элемент имеет собственную СК, которая ориентирует свойства ортотропного материала, приложенных давлений и отображаемых результатов расчета, таких как напряжения или деформации. Элементная СК – правая ортогональная. По умолчанию элементные СК направлены следующим образом:

- Для стержневых элементов – ось X направлена от узла I к узлу J;

- Для оболочечных элементов – ось X направлена от узла I к узлу J, ось Z перпендикулярна плоскости элемента, ось Y по правилу правой руки;
- Для 2-D и 3-D твердотельных элементов СК параллельна глобальной декартовой СК.

Не все элементы подчиняются вышеизложенному правилу. Большинство элементов имеют опции позволяющие изменять ориентацию их СК. Для 2-D и 3-D твердотельных элементов можно совместить их СК с предварительно созданной локальной СК следующим:

**Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs**

**Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Elem Attributes**

В атрибутах нужно указать номер желаемой СК.

## 20 Определение нелинейных задач МДТТ

Нелинейные задачи прочности на практике появляются постоянно. Например, всякий раз при соединении (скреплении) двух листов бумаги металлическая скобка при сгибании всегда меняет форму (см. рисунок 1а). Если к деревянной полке прикладывать значительную нагрузку, с течением времени ее прогиб увеличивается (рисунок 1б). Если на легковой автомобиль или грузовик добавлять груз, поверхности контакта между его пневматическими шинами и поверхностью дороги увеличивается с возрастанием нагрузки (рисунок 1). При изображении кривой связи перемещения с нагрузкой для данных примеров можно обнаружить, что все они демонстрируют фундаментальную характеристику нелинейного поведения конструкции - изменение жесткости конструкции.

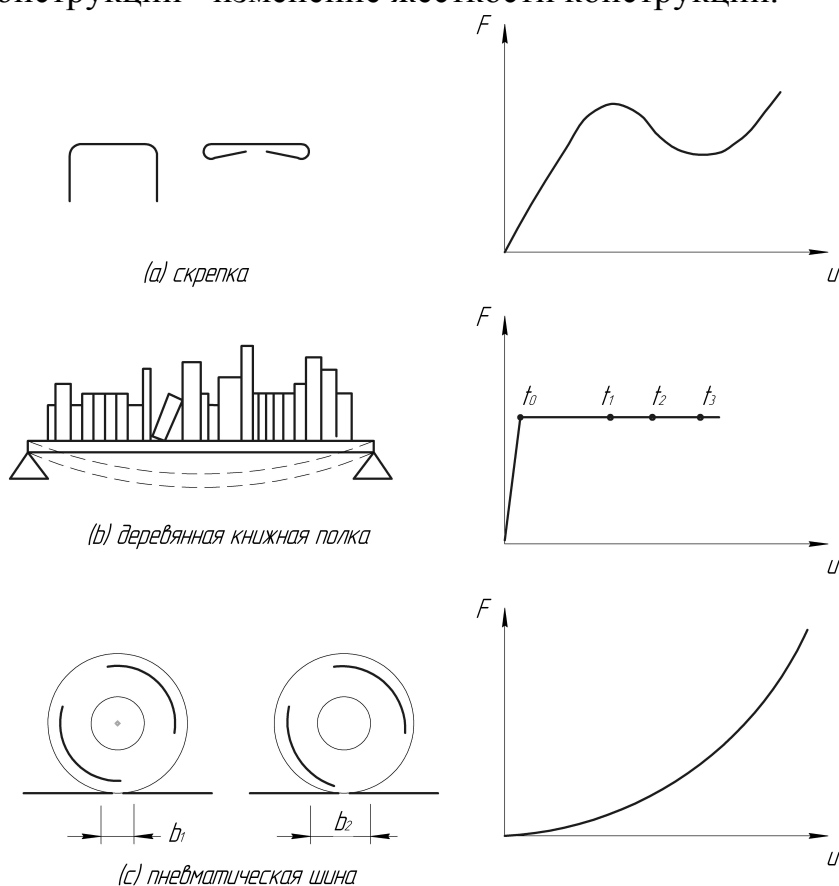


Рисунок 1 - Типовые примеры нелинейного поведения конструкций

### Причины нелинейного поведения

Нелинейное поведение конструкции является результатом множества причин, которые могут быть сведены в перечисленные ниже основные категории: изменение состояния, геометрические нелинейности, нелинейное поведение материала (физические нелинейности).

*Изменение состояния (включая контактные задачи)*

Ряд типовых объектов конструкций демонстрируют нелинейное поведение, которое является зависящим от состояния. Например, трос, работающий только на растяжение, является ослабленным или натянутым; роликовая опора (подшипник) может находиться в контакте или не находиться в таковом. Изменения состояния могут быть непосредственно связаны с нагрузкой (как в случае троса) или определяться некоторой внешней причиной.

Ситуации, в которых происходит контакт, являются обычными для многих различных нелинейных инженерных приложений. Контакт создает существенно отличающееся и важное подмножество задач нелинейностей, связанных с изменением состояния.

### *Геометрические нелинейности*

Если конструкция имеет большие деформации, изменение ее геометрической формы может вызывать нелинейный отклик. Примером подобного является рыболовное удилище, показанное на рисунке 2. Рыболовное удилище, демонстрирующее геометрически нелинейное поведение. Геометрическая нелинейность характеризуется большими перемещениями и (или) поворотами.

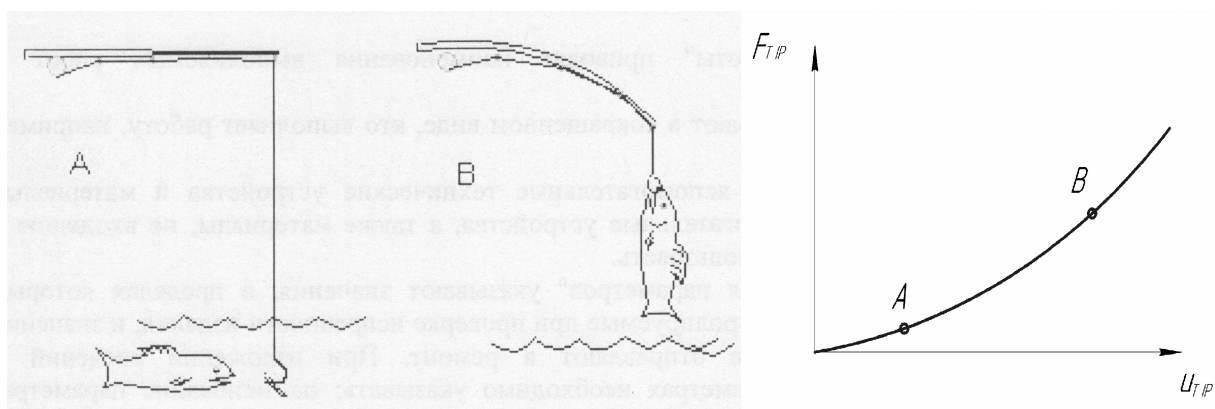


Рисунок 1 - Рыболовное удилище, демонстрирующее геометрически нелинейное поведение

### *Нелинейное поведение материала (физическая нелинейность)*

Нелинейная связь напряжений с деформациями является обычной причиной нелинейного поведения конструкции. На свойства связи напряжений с деформациями материала влияют многие факторы, включая историю приложения нагрузок (как для упругопластического отклика), условия окружения (такие, как температура), и длительность времени приложения нагрузок (как для отклика при ползучести).

### *Начальная информация о выполнении нелинейных расчетов*

Для расчета нелинейных задач в комплексе ANSYS используется метод Ньютона -Рафсона. В данном методе нагрузка разделяется на серию

приращений нагрузки. Приращения нагрузки могут прикладываться в течение нескольких шагов нагрузки. На рисунке 3 показано использование итераций метода Ньютона -Рафсона для нелинейного расчета системы с одной степенью свободы.

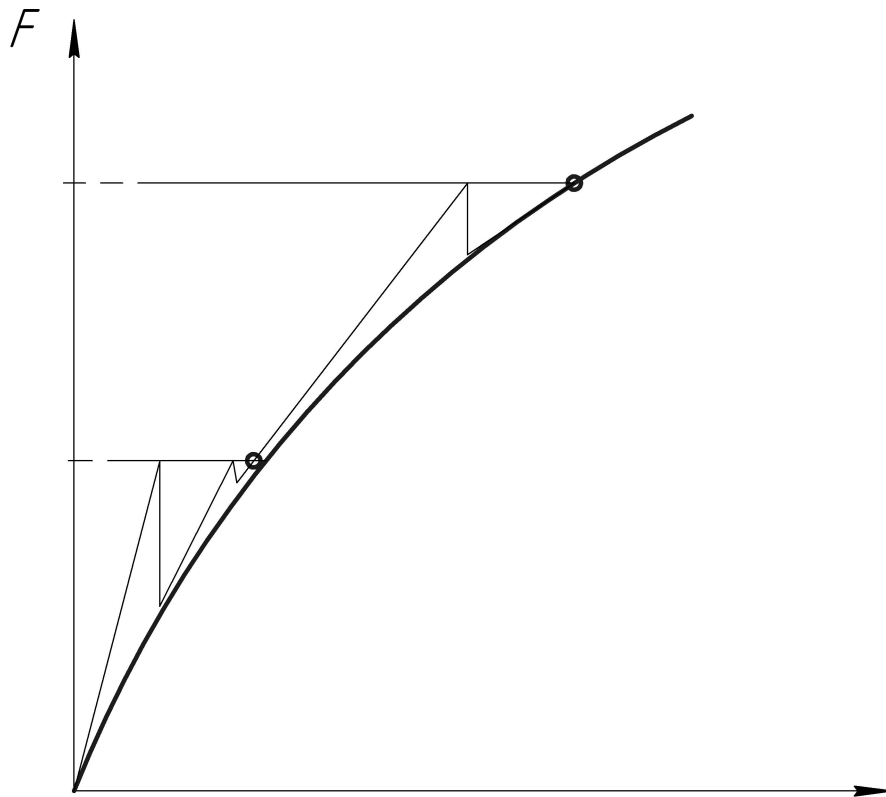


Рисунок 3 - Метод Ньютона – Рафсона

Перед каждым решением, метод Ньютона - Рафсона оценивает невязку вектора нагрузок, появляющуюся вследствие различия между восстановленными усилиями (нагрузками, соответствующими элементным напряжениям) и приложенными нагрузками. Далее комплекс выполняет линейный расчет, используя невязки нагрузок, и проверяет наличие сходимости. Если критерии сходимости не удовлетворяются, невязка вектора нагрузки вычисляется повторно, матрица жесткости обновляется, и вычисляется новое решение. Эта итерационная процедура продолжается до сходимости расчета. Для улучшения сходимости задачи могут применяться многие возможности, используемые для определения сходимости, такие, как поиск на линии, автоматическое назначение шага нагрузки и деление его пополам, и вычисляемые объекты. Если сходимость не может быть достигнута, комплекс пытается проводить расчет с уменьшенным приращением нагрузки. В отдельных нелинейных статических расчетах при использовании только одного метода Ньютона - Рафсона, касательная матрица жесткости может стать сингулярной (или неоднозначной), вызывая серьезные проблемы сходимости. Подобное может происходить в задачах нелинейных расчетов устойчивости, в которых конструкция полностью

разрушается или переходит в новое устойчивое состояние. В подобных случаях можно вызвать альтернативный итеративный метод вычислений, метод длины дуги, который помогает избежать точек бифуркации и линии разгрузки. Метод длины дуги вызывает итерации вычислений метода Ньютона - Рафсона для поиска сходимости на дуге, таким образом, часто предотвращая расхождение решения, даже в случаях, когда наклон линии связи нагрузки с перемещением становится нулевым или отрицательным. Этот итерационный метод схематически представлен на рисунке 4.

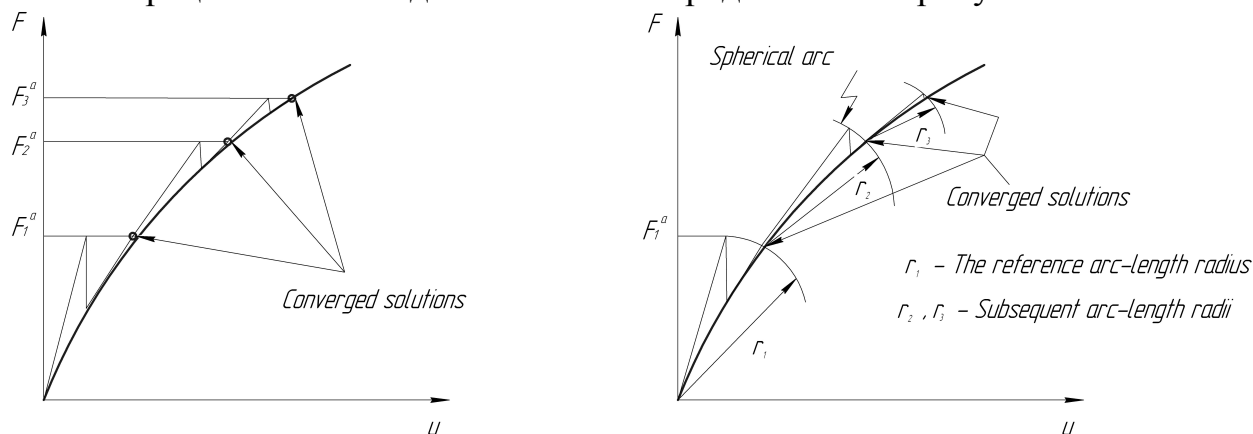


Рисунок 4 - Сравнение традиционного метода Ньютона - Рафсона с методом длины дуги

В результате, нелинейные расчеты организованы в виде трех уровней операций: Верхний уровень состоит из шагов нагрузки, которые определяются в явном уровне на основе промежутков параметра времени. Для статических расчетов нагрузки считаются изменяющимися линейно внутри шага нагрузки. В пределах каждого шага нагрузки можно заставить комплекс получить несколько решений (промежуточные шаги или шаги по времени) для постепенного приложения нагрузки. На каждом промежуточном шаге комплекс для получения сходящегося решения выполняет несколько итераций. На рисунке 5 шаг нагрузки, промежуточный шаг и параметр времени показана типичная история приложения нагрузок для нелинейного расчета.



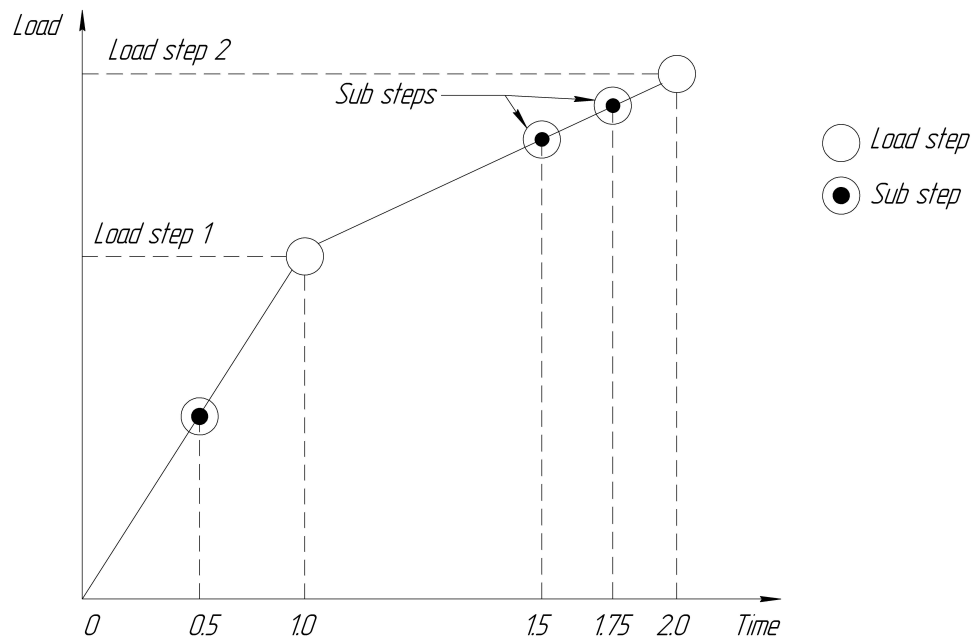


Рисунок 5 - Шаг нагрузки, промежуточный шаг и параметр времени

Комплекс ANSYS содержит множество возможностей для определения критериев сходимости: сходимость можно основывать на проверке усилий, моментов, перемещений или поворотов, или иных комбинаций данных объектов. Кроме того, каждый объект может иметь различное значение точности сходимости. Для задач с множественными типами степеней свобод также имеется возможность выбора нормы сходимости.

В большинстве случаев следует использовать точность сходимости, определяемую на основе усилий (и, если применимо, моментов). Проверка сходимости на основе перемещений (и, если применимо, поворотов) при необходимости может добавляться, но, обычно, не должна использоваться самостоятельно.

#### *Сравнение консервативного и неконсервативного поведения; независимость от истории приложения нагрузок*

Если вся энергия, переданная в систему внешними нагрузками, при удалении нагрузок возвращается, система, как говорят, является консервативной. Если при удалении нагрузок энергия рассеяна системой (например, пластической деформацией или трением скольжения), система, как говорят, является неконсервативной. Пример неконсервативной системы показан на рисунке 6. Расчет консервативной системы не зависит от пути (истории) приложения нагрузок: обычно нагрузки могут прикладываться в любом порядке и любым количеством приращений, не затрагивая полученные результаты. Наоборот, расчет неконсервативной системы зависит от пути (истории) приложения нагрузок: фактическая история отклика на нагрузки системы для получения точных результатов должна весьма близко воспроизводить реальную историю приложения нагрузок. Расчет также зависит от истории приложения нагрузок, если для данного

уровня нагрузок может существовать более одного решения (как в системе с переключениями). Задачи, зависящие от истории приложения нагрузок, обычно требуют медленного (постепенного) приложения нагрузок (то есть с использованием большого числа промежуточных шагов) до достижения окончательного значения нагрузок.

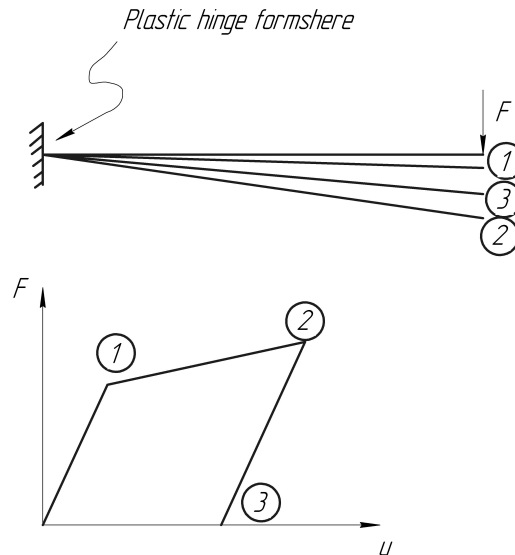


Рисунок 6 - Неконсервативное (зависимое от пути нагружения) поведение

### *Промежуточные шаги*

При использовании нескольких промежуточных шагов достигается баланс между точностью и экономией ресурсов: увеличенное число промежуточных шагов (то есть малые размеры шага по времени) обычно приводит к повышению точности, но увеличивает время вычисления. Комплекс ANSYS обеспечивает автоматическое назначение шага по времени, предназначенное для этой цели. Автоматическое назначение шага по времени регулирует необходимый размер шага по времени, обеспечивая лучший баланс между точностью и экономией ресурсов. Автоматическое назначение шага по времени вызывает имеющуюся в комплексе ANSYS возможность деления шага (по времени) пополам. Деление шага (по времени) пополам обеспечивает средство автоматического восстановления при отсутствии сходимости. Данная возможность сокращает размер шага по времени вдвое всякий раз, когда итерации не в состоянии обеспечить сходимость, и автоматически повторно вызываются после последнего сошедшегося промежуточного шага. Если разделенный вдвое шаг по времени снова не в состоянии обеспечить сходимость, деление шага пополам снова сократит размер шага по времени и вызовет повторный расчет, продолжая процесс, пока сходимость не будет обеспечена, или пока не будет достигнут минимальный размер шага по времени (указанный пользователем).

### *Направления нагрузок и перемещений*

Следует определить поведение нагрузок при наличии в конструкции больших перемещений. Во многих случаях нагрузки, приложенные к системе, обеспечивают постоянное направление, независимо от перемещений в конструкции. В других случаях нагрузки изменяют направления в соответствии с перемещениями элементов, которые подвергаются большим поворотам. Комплекс ANSYS может моделировать обе ситуации, в зависимости от типа приложенной нагрузки. Ускорения и сосредоточенные усилия сохраняют свою исходную ориентацию, независимо от ориентации элемента. Нагрузки, приложенные к поверхностям, всегда действуют в направлении нормали к переместившимся поверхностям элементов, и могут использоваться для моделирования следящих нагрузок. На рисунке 7 показаны нагрузки с постоянным направлением и следящие.

Примечание. Ориентация узловой системы координат в расчетах с большими перемещениями не изменяется. Поэтому вычисленные перемещения соответствуют исходным направлениям.

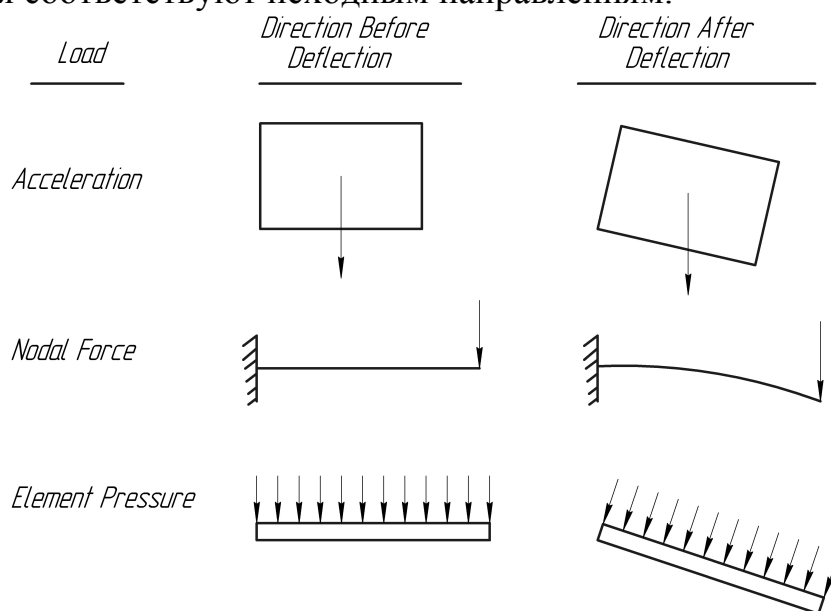


Рисунок 7 - Направление нагрузок до и после перемещений

### *Расчеты нелинейных переходных процессов*

Процедура расчета нелинейных переходных процессов аналогична процедуре, используемой для нелинейного статического расчета: нагрузки прикладываются при помощи приращений, а комплекс выполняет итерационные вычисления для каждого шага. Главное различие между статическими и переходными процедурами заключается в наличии эффектов интегрирования по времени, которые применяются при расчетах переходных процессов. Таким образом, время в переходном процессе всегда представляет фактическую хронологию. Автоматическое назначение шага по времени и деление шага по времени пополам также может применяться в расчетах переходных процессов.

## *Использование геометрических нелинейностей*

В расчетах с малыми перемещениями и малыми деформациями предполагается, что перемещения являются достаточно малыми и полученные изменения жесткости являются незначительными. Напротив, расчеты с большими деформациями учитывают изменения жесткости, которые возникают вследствие изменения формы и ориентации элемента. Вызов учета эффекта больших деформаций для определенных типов элементов, поддерживающих данную возможность, проводится вызовом команды NLGEOM,ON (вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Control (вкладка Basic Tab) или Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options). Возможность учета больших деформаций применяется для большинства объемных элементов (включая все элементы с большими деформациями и гиперупругие), а равно большинства элементов оболочек и балок. Эффекты больших деформаций не учитываются в версии комплекса ANSYS Professional. Процедура учета больших деформаций не имеет никакого теоретического предела для полных поворотов или деформаций, действующих в элементе. Некоторые типы элементов комплекса ANSYS подчиняются практическим ограничениям на полную деформацию однако, процедура требует, чтобы приращения деформаций были ограничены для обеспечения точности расчета. Таким образом, полная нагрузка должна разделяться на малые шаги.

### *Напряжения и деформации*

В задачах с большими деформациями весь ввод связи напряжения с деформациями и расчетные результаты имеют форму истинных напряжений и истинных (или логарифмических) деформаций. Для одного измерения (одномерной задачи), истинная деформация выражается в форме  $\varepsilon = \ln(l/l_0)$ . Для областей с малыми откликами деформаций, истинная деформация и инженерная деформация достаточно точно совпадают. Для преобразования деформаций из формы малых (инженерных) деформаций в логарифмические деформации, используется зависимость  $\varepsilon_{\ln} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$ . Для преобразования инженерных напряжений в истинные напряжения, используется зависимость  $\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng})$ . Это преобразование напряжений действительно только для данных пластичности несжимаемых материалов.

### *Большие перемещения с малыми деформациями*

Данная возможность применяется для балок и большинства элементов оболочек, а равно для многих нелинейных элементов. Для вызова учета эффекта больших перемещений для данных типов элементов, предназначенных для расчета малых деформаций, поддерживающих данную

возможность, применяется команда NLGEOM,ON (вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Control (вкладка Basic Tab) или Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options).

### *Повышение жесткости, вызываемое напряжением*

На жесткость конструкции вне плоскости может значительно влиять вид напряжений в конструкции, действующих в плоскости. Эта связь между напряжением в плоскости и поперечной жесткостью известна как повышение жесткости, вызываемое напряжением (stress stiffening), лучше всего проявляется в тонкостенных, существенно нагруженных конструкциях, например, тросах и мембранах. Натянутая тонкая обшивка (в оригинале drumhead, кожа, натянутая на барабан, или барабанная перепонка), которая приобретает поперечную жесткость на сжатие, является обычным примером изменения жесткости конструкции. Несмотря на то, что теоретически для повышения жесткости предполагается применение малых поворотов и деформаций в элементе, в отдельных конструкциях изменение жесткости проявляется только при расчете задач с большими перемещениями (см. рисунок 8 (a)). В иных системах повышение жесткости может наблюдаться и при использовании теории малых перемещений, или линейной (см. рисунок 8 (b)).

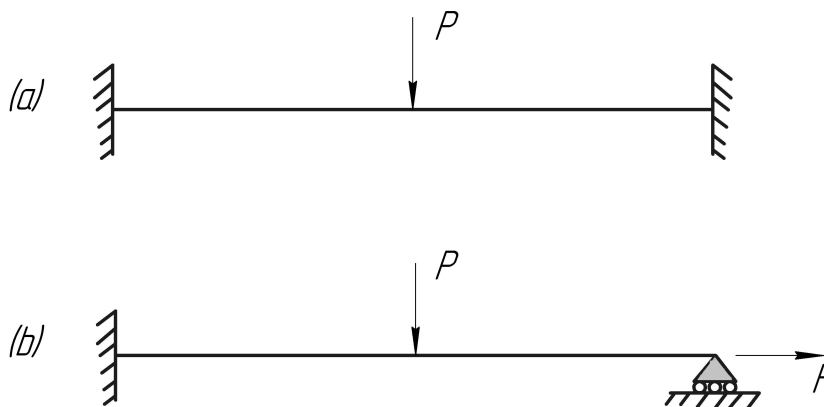


Рисунок 8 - Повышение жесткости балки

Для использования повышения жесткости в системах второго типа, следует на первом шаге нагрузки вызвать команду PSTRES,ON (вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options). Процедуры учета больших деформаций и больших перемещений включают учет начальных напряжений в качестве подмножества своей теории. Для большинства элементов эффекты начальной жесткости включаются автоматически при вызове учета эффектов больших деформаций командой NLGEOM,ON (вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Control (вкладка Basic Tab) или Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options).

### *Изменение жесткости при наличии скорости вращения*

Изменение жесткости при наличии скорости вращения изменяет матрицу жесткости вращающегося тела для учета динамических эффектов, связанных с наличием масс. Это изменение аппроксимирует влияние изменения геометрической формы, возникающей вследствие больших перемещений при вращении для задач с малыми перемещениями. Обычно подобное используется совместно с начальными напряжениями (команда PSTRES, вызывается из экранного меню Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options), которые обусловлены наличием во вращающемся теле центробежной силы. Данная возможность не должна использоваться совместно с другими деформационными нелинейностями, большими перемещениями, или большими деформациями. Изменение жесткости вызывается аргументом KSPIN команд OMEGA и CMOMEGA (вызов из экранного меню Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Inertia → Angular Velocity).

### *Моделирование материала нелинейного поведения*

Изменение жесткости конструкции в ходе расчета может быть связано с многочисленными факторами, обусловленными материалом. Нелинейная связь напряжений с деформациями при пластичности, нелинейной упругости и гиперупругости материала вызывают изменение жесткости конструкции при различных уровнях нагрузки (и, обычно, при различных температурах). Ползучесть, вязкопластичность и вязкоупругость вызывают нелинейности, которые могут быть связаны с влиянием времени, скорости, температуры и напряжений. Радиационное набухание вызывает появление деформаций, которые являются функциями температуры, времени, уровня потока нейтронов (или отдельных аналогичных факторов) и напряжений. Любой из этих видов материальных свойств может быть включен в расчет, выполняемый в среде комплекса ANSYS, если используются подходящие типы элементов.

### *Нелинейные материалы*

Если материал демонстрирует нелинейное или зависящее от скорости поведение связи напряжений с деформациями, для указания нелинейных свойств материала в виде таблиц данных требуется использовать семейство команд TB (TB, TBTEMP, TBDATA, TBPT, TBCOPY, TBLIST, TBPLOT, TBDELE, вызов из экранного меню Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Nonlinear). Точная форма этих команд изменяется в зависимости от типа указываемого нелинейного поведения материала. Различные опции нелинейного поведения материала кратко описаны ниже.

### *Пластичность*

Большинство обычных материалов, применяемых в технике, демонстрируют линейную зависимость напряжений от деформаций вплоть до уровня напряжения, известного как предел пропорциональности

(proportional limit). За этим пределом зависимость напряжений от деформаций становится нелинейной, но не обязательно неупругой. Пластическое поведение, характеризующееся необратимостью деформаций, начинается, когда напряжения превышают предел текучести (yield point) материала. Поскольку между значениями предела текучести и предела пропорциональности различие обычно является небольшим, комплекс ANSYS предполагает, что эти два значения в задачах пластичности совпадают (см. рисунок 9).

Пластичность является неконсервативным, зависящим от истории приложения нагрузок явлением. Иными словами, последовательность, в которой прикладываются нагрузки и проявляется пластический отклик, существенно влияет на окончательные результаты расчета. Если в расчете предполагается пластический отклик, нагрузки следует прикладывать в виде ряда малых возрастающих шагов нагрузки или шагов по времени, так, чтобы модель следовала за историей приложения нагрузки насколько возможно близко. Максимальная пластическая деформация выводится вместе с информацией о промежуточном шаге в выходной файл (Jobname.OUT).

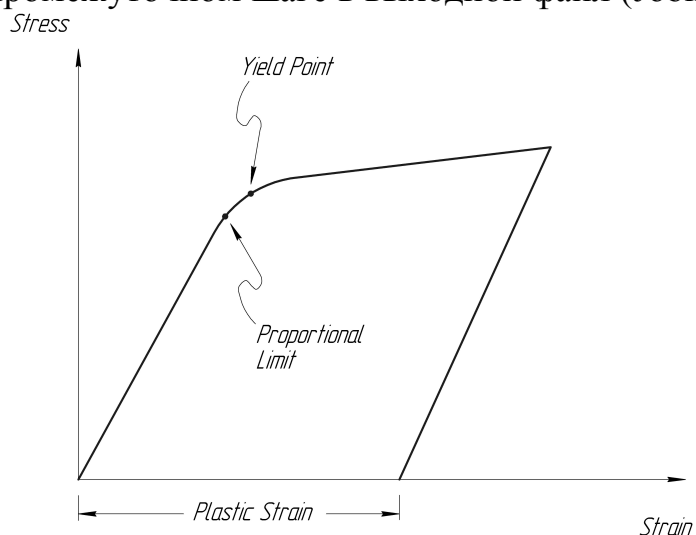


Рисунок 9 - Упругопластическая кривая зависимости напряжений от деформаций

Возможность автоматического направления шага по времени (команда AUTOTS, вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Control (вкладка Basic Tab) или Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Load Step Opts → Time/Frequency → Time and Substeps) соответствует отклику в пластической форме после фактического появления пластичности, сокращая размер шага нагрузки после шага нагрузки, в котором было выполнено значительное количество итераций, или в котором обнаружена пластическая деформация, превышающая 15%. Если используется слишком большой шаг, комплекс будет делить его пополам и проводить расчет с уменьшенным шагом по времени.

Наряду с пластичностью могут иметься другие виды нелинейного поведения. В частности, геометрические нелинейности в виде больших перемещений или больших деформаций также часто могут оказаться

связанными с пластическим откликом материала. Если в конструкции ожидаются большие деформации, данные эффекты могут учитываться командой NLGEOM (вызов из экранного меню Main Menu → Solution → Analysis Type → Sol'n Control (вкладка Basic Tab) или Main Menu → Solution → Unabridged Menu → Analysis Type → Analysis Options). Для расчетов с большими деформациями, свойства связи напряжений с деформациями в материале должны указываться в терминах истинных напряжений и логарифмических деформаций.

### *Опции пластичности материала*

Для описания поведения в области пластичности имеется несколько опций. Другие опции могут включаться в комплекс путем использования объектов, программируемых пользователем - опция билинейного кинематического упрочнения (Bilinear Kinematic Hardening, BKIN) предполагает, что полный диапазон напряжения равен удвоенному значению предела текучести, так, чтобы эффект Баушингера (Bauschinger). Данная опция рекомендуется для общего использования при малых деформациях для материалов, подчиняющихся критерию пластичности фон Мизеса (который включает большинство металлов). Эта опция не рекомендуется для задач с большими деформациями. Допускается комбинирование опции BKIN с ползучестью и опцией анизотропии Хилла (Hill) для моделирования более сложного поведения материала. На рисунке 10 демонстрируется типовое изображение (командой TBPLLOT) свойств билинейного кинематического упрочнения.

MPTEMP, 1,0,500 ! Указание температуры для модуля Юнга

MP, EX,1,12E6,-8E3 ! Коэффициенты  $C_0$  и  $C_1$  для модуля Юнга

TB, BKIN, 1, 2 ! Активизация таблицы данных

TBTEMP, 0, 0 ! Temperature = 0.0

TBDATA, 1, 44E3, 1.2E6 ! Yield = 44,000; Tangent modulus = 1.2E6

TBTEMP, 500 ! Температура = 500

TBDATA, 1, 29.33E3, 0.8E6 ! Напряжение пластичности = 29,330;

Касательный модуль = 0.8E6

TBLIST, BKIN, 1 ! Просмотр таблицы данных в текстовой форме

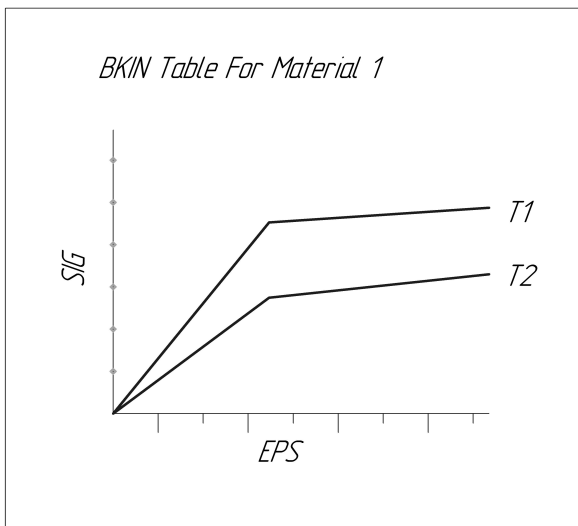
/XRANGE, 0, 0.01 ! Ось X в команде TBPLLOT ограничивает значения 0 и

0.01

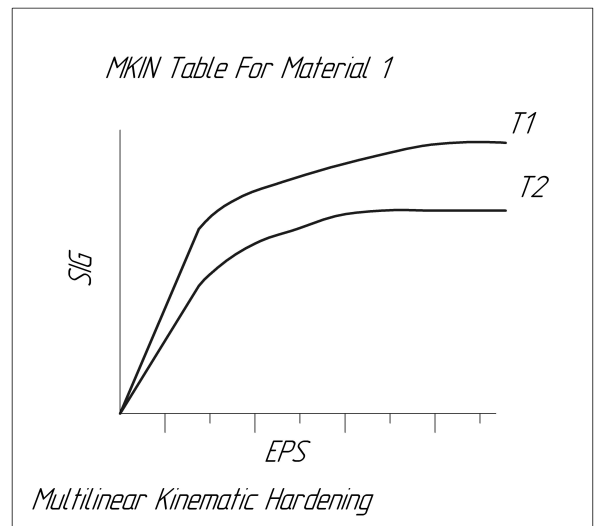
TBPLLOT, BKIN, 1 ! Просмотр таблицы данных в графической форме.

Более подробную информацию см. в описании команд MPTEMP, MP, TB, TBTEMP, TBDATA, TBLIST, /XRANGE и TBPLLOT.





*a*



*b*

Рисунок 10 - Кинематическое упрочнение

## *Заключение*

Прочность пневмо-и гидромашин обеспечивает студента минимумом знаний, необходимым для проведения расчетов на прочность. Описываются: модель в прочностном расчете, дается понятие о напряжениях и деформациях, конструкционной прочности материалов, теории предельных состояний, и методах испытаний и оценке прочностной надежности. Даются основные сведения об основах теории колебаний, описываются случаи возбуждения колебаний в ДЛА и борьба с ними. Рассмотрены основные сведения о программе конечно-элементного моделирования Ansys и подготовке в нем модели для расчета на прочность. Даются сведения о основных видах анализа: статическом, динамическом, модальном, гармоническом, спектральном, устойчивости, тепловом. Приводятся сведения о используемых нелинейностях модели. Рассмотрены основы языка параметрического моделирования APDL.

Учебное пособие предназначено для факультета ДЛА для подготовки магистров по специальности 160700.1.68 по дисциплине «Прочность пневмо и гидромашин» в 9 семестре, специалистов по специальности 150802.65 по дисциплине «Прочность пневмо и гидромашин» в 9 семестре, а также для самостоятельной работы студентов-дипломников, аспирантов, магистрантов и научных работников, чьи исследования связаны с турбомашиностроением.

### *Список рекомендуемой литературы*

- 1 Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / [В. П. Данильченко [и др.] ; Самар. науч. центр РАН. - Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008. - 619 с.
- 2 Никитин, Олег Филиппович. Надежность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов : курс лекций с решением примеров / О. Ф. Никитин. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. - 312 с
- 3 Чигарев, Анатолий Власович. ANSYS для инженеров : справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. - М. : Машиностроение : 2004. - 511 с
- 4 Хронин Д.В. Колебания в двигателях летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 296 с.
- 5 Лозицкий Л.П., Ветров А.Н., Дорошенко С.М. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Воздушный транспорт, 1992 – 536 с.
- 6 Расчет на прочность авиационных ГТД / под редакцией Биргера И.А. – М.: Машиностроение, 1984. - 296 с.
- 7 Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] / [В. П. Данильченко [и др.] ; Самар. науч. центр РАН. - Электрон. дан. (1 файл : 10,1 Мбайт). - Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008