

ОПД.Р.03 СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Учебное пособие

Приводятся основные практические понятия об анализе инженерных конструкций методом конечных элементов. На примерах подробно рассматривается последовательность формирования конечноэлементных моделей для расчёта стержневых, тонкостенных и объёмных конструкций применительно к их расчётам на прочность, устойчивость и колебания в системе MSC/NASRAN for Windows. Имеются задания для лабораторных работ по расчёту конструкций. В приложениях даны справочные сведения о командах системы MSC/NASRAN for Windows.

Учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей, изучающих курсы «Численные методы решения инженерных задач», «Численные методы анализа прочности судовых конструкций», «Вычислительная механика».

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и в процессе эксплуатации инженерных конструкций возникает необходимость обеспечения им таких важных функциональных показателей, как прочность, жёсткость, вибростойкость и др. Для этого выполняются соответствующие расчеты методами строительной механики.

По мере развития науки и техники происходит быстрое усложнение научных теорий и методов расчётов конструкций, увеличивается разнообразие конструкций, совершенствуются их свойства, расширяются условия их эксплуатации, применяются новые материалы. Всё это привело к тому, что современному инженеру, связанному с проектированием или эксплуатацией инженерных конструкций, уже недостаточно тех знаний, которые даются в стандартных курсах сопротивления материалов и строительной механики. На их основе многие современные конструкции просто невозможно с достаточной для практики точностью рассчитать, например, по причинам того, что: их форма не соответствует традиционным моделям типа балок или тонких пластин (сложные оболочки и сплошные тела); материал имеет нелинейные свойства и является композиционным (пластики, многослойные, сотовые панели); нагрузка является динамической, причём изменяющейся по мере деформаций конструкции (флэттер крыла, слеминг судна, пробивание брони, столкновение автомобилей и пр.).

В таких случаях помочь инженеру оказывают компьютерные технологии и программные системы CAE (Computer Aided Engineering), основанные на применении численных методов решения задач механики сплошных сред. К наиболее универсальным методам относятся метод конечных разностей и метод конечных элементов (МКЭ). Технология МКЭ в настоящее время стала фактически мировым стандартом для анализа конструкций. Среди наиболее широко применяемых пакетов прикладных программ CAE на основе МКЭ выделяются NASTRAN (компании MSC) , ANSYS (ANSYS Corp.), Cosmos (Structural Research & Analysis Corp.).

Конечно же, для использования этих средств инженеру необходимо сначала изучить основы, а затем достаточно долго совершенствовать навыки работы с ними. Это требует дополнительных знаний теории (строительной механики, математического моделирования, численных методов), умения эффективной работы с компьютером (знаний компьютерных технологий и навыков работы со средствами САПР). Наградой Вам за трудолюбивое и настойчивое освоение этих наук будет не просто квалификация инженера современного уровня, но и искусство создания качественных и рациональных конструкций.

1. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Определение напряженно-деформированного состояния многих современных инженерных конструкций (летательных аппаратов, судов, автомобилей, гидротехнических сооружений, зданий и пр.) является трудной задачей. Связано это в основном со следующими причинами:

- конструктивной сложностью объектов;
- сложностью силового воздействия на них;
- сложностью свойств новых материалов;
- сложностью взаимодействия элементов конструкции в пространстве и во времени (нелинейность и динамичность процессов);
- ужесточением требований к точности полученных результатов.

При этом глобальной целью является получение прочной, надежной и экономичной конструкции при минимальных коэффициентах запаса.

Для достижения этой цели принципиально существуют два пути: экспериментальные исследования и расчёты с применением математического моделирования. Первый путь требует значительных материальных затрат и почти не поддается универсализации, т.е. каждый сложный эксперимент всегда уникален. С помощью математического моделирования решение научно-технической задачи сводится к решению математической задачи, являющейся ее моделью. На практике, при проектировании и исследовании сложных конструкций используются оба пути, часто дополняя друг друга.

Для решения математических задач используются аналитические и численные методы. При использовании аналитических методов решение задачи удается выразить с помощью формул. Например, если математическая задача состоит в решении простого линейного уравнения в частных производных с простыми ограничениями, то использование метода Фурье для разделения переменных обычно легко приводит к цели. К сожалению, на практике это слишком редкие случаи.

Усложнение конструкций, с одной стороны, и ужесточение требований к их прочности, с другой стороны, привели в последние 20-30 лет к такой ситуации, когда традиционные аналитические методы расчетов в ряде случаев перестали считаться удовлетворительными. Причины этому следующие.

Прежние методы основаны на раздельном рассмотрении конструкций, раздельном определении напряжений от общего и местного изгиба с последующим суммированием. При этом предполагается, что взаимодействие элементов конструкций (влияние их друг на друга) довольно ясно просматривается и может быть учтено при формулировке граничных усло-

вий. Кроме того, расчетные схемы конструкций строятся на использовании упрощенных физических моделей: балочных или пластинчатых.

Надежность таких моделей проверялась многолетней практикой, которая в необходимых случаях вносила корректиды в эти расчетные схемы. Сейчас конструктивное оформление сооружений часто и существенно меняется. И предшествующие расчетные схемы оказываются малополезными. А построение новых достаточно простых расчетных схем затруднено и требует большого опыта и интуиции.

Основным инструментом для решения сложных математических задач в настоящее время являются численные методы, позволяющие свести решение задачи к выполнению конечного числа, арифметических действий над числами; при этом результаты получаются в виде числовых значений. Многие численные методы разработаны давно, однако при вычислениях вручную они могли использоваться лишь для решения не слишком трудоемких задач. С появлением ЭВМ начался период бурного развития численных методов и их внедрения в практику. Только вычислительной машине под силу выполнить за сравнительно короткое время объем вычислений в миллиарды и более операций, необходимых для решения многих задач. При счете вручную человеку не хватило бы и жизни для решения одной такой задачи.

Расчеты с применением математического моделирования требуют глубокого теоретического осмысливания сути процессов и наличия эффективного программного обеспечения для ЭВМ.

1.1. Физические основы анализа конструкций

Основные функциональные требования к инженерным конструкциям сводятся к необходимости придания им достаточной прочности и, иногда, жесткости. Часто при этом ставится задача улучшения (оптимизации) конструкции, - например, снижения веса, придания хорошо обтекаемой формы, исключения «жестких точек», исключения резонансных колебаний при вибрации и пр.

Условие прочности обычно состоит в том, чтобы напряжения во всех точках конструкции не превышали допустимых: $\sigma \leq \sigma_{\text{don}}$.

Условие жесткости накладывает ограничения на перемещения (деформацию) w конструкции: $w \leq w_{\text{don}}$.

Напряжения в конструкции определяются отношением внутренних сил (реакций, уравновешивающих внешнюю нагрузку), к площади их действия. В каждой точке сплошного тела напряженное состояние определяется тензором напряжений - тремя векторами, нормальными к трём бесконечно малым (элементарным) площадкам. Обозначив декартовы оси координат в виде x_1, x_2 и x_3 , тензор напряжений можно записать так:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = [\sigma_{ij}] = [\sigma].$$

Этот тензор симметричен. Его можно представить и в виде одномерного массива – вектора $\{\sigma\}$:

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_{11} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{13} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{33}].$$

Для оценки прочности применение тензора напряжений неудобно, в этом случае используются так называемые приведенные напряжения. Наиболее часто применяется условие прочности по критерию Мизеса (Von Mises) (формула (1.1))

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}} \leq \sigma_{\text{允}}. \quad (1.1)$$

Перемещения точек упругого тела определяются вектором $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3) = \{u\}$. Деформация упругого тела определяется относительными перемещениями его отдельных точек. Для получения общих уравнений, не связанных с формой тела, используется понятие относительных деформаций, которые определяются в каждой точке тензором деформаций. Он связан с вектором перемещений зависимостью

$$[\varepsilon_{ij}] = [\nabla]\{u\}, \quad \text{т.е.} \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (1.2)$$

где $[\nabla]$ – матрица дифференциальных операторов.

Тензор деформаций также симметричен. И его так же, как и тензор напряжений, можно представить и в виде одномерного массива $\{\varepsilon\}$.

Связь между напряжениями и деформациями для идеально упругого тела определяется законом Гука:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (1.3)$$

где элементы матрицы $[D]$ являются постоянными величинами, характеризующими упругие свойства (жёсткость) материала.

В простейшем случае растяжения – сжатия стержня закон Гука связывает продольные напряжения и деформации:

$$\sigma = E\varepsilon = Eu/L, \quad (1.4)$$

где E – модуль Юнга (упругости материала), u – продольное перемещение, L – длина стержня. С другой стороны, напряжения в этом случае равны отношению продольной силы T к площади поперечного сечения стержня F :

$$\sigma = T/F. \quad (1.5)$$

С учётом (1.4) и (1.5) можно получить связь между перемещениями в стержне и действующей на него внешней силой в виде

$$Ku = T, \quad (1.6)$$

где $K = EF/L$ – коэффициент жёсткости стержня.

В случае поперечного изгиба стержневых систем напряжённое состояние в поперечном сечении стержня (балки) в плоскости изгиба можно определить двумя компонентами: нормальными σ и касательными τ напряжениями, по формулам (1.7)

$$\sigma = \frac{Mz}{EI}; \quad \tau_{\max} = k \frac{N}{F_c}, \quad (1.7)$$

где M – изгибающий момент; z – отстояние расчётной точки от центра тяжести сечения в плоскости изгиба (от так называемой нейтральной оси); I – момент инерции сечения; N – перерезывающая сила; F_c – площадь сечения стенки балки; k – коэффициент, зависящий от формы сечения (для прямоугольного профиля он равен 1.5, а для балок с развитыми поясками $k \approx 1.15$). Перемещения w от простого изгиба балок (прогибы) определяются из решения краевой задачи, включающей дифференциальное уравнение изгиба

$$\left(EI(x)w''(x) \right)'' = q(x), \quad (1.8)$$

где $q(x)$ – распределённая по длине балки поперечная погонная нагрузка.

Уравнения (1.6) или (1.8) имеют некоторую аналогию. Их можно обобщить и записать в виде, пригодном для любой конструкции

$$K(u) = P, \quad (1.9)$$

где K – некоторый оператор (математическое действие) над функцией перемещений u конструкции, P – внешняя нагрузка.

Здесь пока рассматривалось состояние конструкций без изменения во времени t . В динамических задачах присутствуют производные от перемещений по времени: скорости $\dot{u} = du/dt$ и ускорения $\ddot{u} = d^2u/dt^2$. При этом уравнения динамического состояния (движения) принимают вид:

$$K(u) + C(\dot{u}) + M(\ddot{u}) = P(t), \quad (1.10)$$

где K , C и M - операторы, определяющие жёсткость, демпфирование и массу элементов конструкции.

В случае линейности операторов K , C и M , а также, если внешняя нагрузка не зависит от параметров состояния конструкции (перемещений), уравнения типа (1.6), (1.8) – (1.10) являются линейными. В противном случае задача анализа поведения конструкций является нелинейной.

В качестве искомой функции могут быть разные физические величи-

ны. При расчёте инженерных сооружений чаще всего вначале ищутся перемещения. В этом случае метод составления исходных уравнений в механике принято называть методом перемещений. Иногда применяется метод сил, где основными неизвестными являются внутренние силы.

1.2. Основные этапы анализа сложных конструкций

При анализе сложных конструкций можно условно выделить следующие основные этапы.

Этап 1. Построение физической модели.

Этот этап связан с некоторой идеализацией (упрощением) свойств материалов, конструкций и внешних воздействий.

Всякая реальная конструкция имеет бесконечно много особенностей геометрии, свойств материалов, характера внешнего нагружения и т.п. В практических расчетах учесть все эти особенности невозможно. Поэтому для упрощения решения задачи некоторые свойства не учитываются, другие как-то изменяются. Таким образом, реальный объект заменяется некоторой физической моделью, обладающей только теми его основными свойствами, которые наиболее существенно влияют на результат расчёта.

От того, насколько удачно выбрана физическая модель конструкции, зависит трудоёмкость расчёта и точность результата. Здесь многое зависит от опыта расчётчика, понимания физической картины и умения выделить наиболее существенные детали поведения конструкции.

Этап 2. Построение математической модели.

Математическая модель описывает физическую модель языком математики. Математически поставленная задача в первую очередь содержит общие уравнения (дифференциальные, интегральные или др.), описывающие состояние (равновесие, движение, взаимодействие) произвольных частиц или элементов конструкции. Границные (краевые) условия определяют закрепления конструкции или её взаимодействие с другими объектами. Для динамических (неstationарных) процессов следует определить также начальные условия.

Границные и начальные условия обеспечивают существование и единственность решения задачи. Сами названия этих условий являются данью традициям, основанным на расчётах простых задач. На самом деле для произвольных конструкций граничные условия (например, закрепления перемещений $u = 0$) могут быть заданы не только на границе, а в любых точках. Начальные условия также могут быть поставлены не обязательно в начальный момент движения.

При создании математической модели часто приходится вводить дополнительные упрощающие допущения математического характера. Наиболее очевидными и характерными являются допущения о характере зави-

симости или о независимости тех или иных параметров друг от друга. Например, гипотеза плоских сечений при расчёте балок состоит в том, что продольные перемещения линейно изменяются по высоте сечения. Часто предполагается независимость искомой функции: от одной из координат (плоская задача, пластины, оболочки); от двух координат (стержневые модели); от времени (статическая задача).

При внимательном рассмотрении можно заметить, что граница между физической и математической моделями весьма условна. В самом деле, гипотезы, введенные в математической модели, можно трактовать как дополнительные ограничения на свойства физической модели.

Этапы построения физической и математической моделей являются наиболее ответственными.

Этап 3. Выбор численного метода.

Этот выбор диктуется, с одной стороны, особенностями физической и математической постановок задачи, а с другой стороны, наличием и особенностями программного обеспечения, реализующего численные методы анализа. Обе стороны этой проблемы мы рассмотрим в следующих разделах.

Этап 4. Построение численной модели.

Этот этап для инженера-расчетчика является обычно наиболее трудоёмким и таким же ответственным, как и первые два. Он включает построение геометрической модели конструкции, преобразование её к дискретной численной модели, задание граничных условий и нагрузок, а также параметров, определяющих особенности расчётного алгоритма.

Любой численный метод является приближённым и имеет некоторую степень погрешности. Однако в нем заложены определённые параметры, с помощью которых можно управлять степенью точности получаемых результатов (размеры сетки, способы аппроксимации, параметры граничных условий и нагрузки и др.). Все это возлагается на плечи расчетчика, - ответственность за результат несет только он.

Этап 5. Проведение расчёта.

Этот этап обычно выполняется в автоматическом режиме и в основном определяется количеством вычислений и размером матриц коэффициентов САУ. Эти параметры зависят от качества математической и численной моделей. Они же определяют необходимые характеристики компьютера: быстродействие и объём оперативной памяти.

Этап 6. Анализ полученных результатов.

На этом этапе в первую очередь следует оценить достоверность полученных результатов. Она определяется точностью заложенных допущений, исходных данных и вычислений. Получение реально более точного результата за счет уточнения какого-либо элемента расчета может быть достигнуто лишь тогда, когда адекватно уточняются и все другие элементы.

При анализе результатов всегда следует помнить две фразы: 1) эксперимент - критерий истины; 2) истина познаётся в сравнении. Хорошо, если результаты расчётов согласуются с экспериментальными данными, однако возможность такого сравнения предоставляетя далеко не всегда. Проанализируйте (если это возможно) соответствие результатов данным расчётов, экспериментов и практики эксплуатации аналогичных конструкций. Согласование численной и математической моделей можно определить путём выполнения тестовых расчётов, для которых имеются, либо можно получить аналитические результаты. Погрешности, связанные с построением численной модели можно выявить путём проведения и сопоставления результатов серии расчётов, варьируя параметры численной модели (например, размеры расчётной сетки). Если Вы не докажете достоверность результатов, то весь труд будет напрасным.

Второй частью анализа результатов является решение вопроса, будет ли полученное состояние модели допустимым либо опасным. Здесь надо знать критерии оценки состояния конструкции, например, превышают ли напряжения допустимый уровень, предел текучести, предел прочности, порог потери устойчивости или др.

1.3. Краткий обзор численных методов

Любое физическое явление можно описать различными уравнениями в зависимости от принятой математической модели. Однако процессор компьютера может выполнять непосредственно только алгебраические действия. Поэтому решение дифференциальных, интегральных, функциональных и др. уравнений требует их предварительного преобразования к системе алгебраических уравнений (САУ).

Сведение уравнений к алгебраическим имеет определённый физический смысл. Например, поведение сплошного тела, имеющего бесконечное число степеней свободы, часто описывается дифференциальным уравнением. Решением этого уравнения является непрерывная функция или бесконечный ряд. САУ описывает поведение приближённой модели сплошного тела, имеющей конечное число степеней свободы N (обычно равное числу уравнений). Его решением является конечный ряд с числом членов, равным N .

Таким образом, решение прикладных задач на компьютере обычно производится в два уровня: вначале производится преобразование исходных уравнений к САУ, а затем решается САУ. Соответствующие численные методы применяются на обоих этапах. Методы решения САУ в настоящее время настолько реализованы в виде стандартных программ, что обычно при решении практических задач нет необходимости в их детальном изучении.

Существует большое разнообразие методов сведения исходных уравнений к алгебраическим. Их можно условно разделить на три основные группы: 1) конечноразностные; 2) проекционные, в том числе вариационные (методы Бубнова – Галеркина, Ритца, конечных элементов и др.); 3) полуаналитические методы (методы Канторовича, Власова, граничных элементов, модуль-элементов и др.). Их изучение выходит за рамки данного пособия. Отметим здесь лишь некоторые самые общие их особенности.

Метод конечных разностей (метод сеток) является наиболее универсальным методом решения задач анализа сплошной среды, имеющих дифференциальную постановку. В основе метода лежит замена дифференциалов конечными разностями. Конечные разности по пространственным координатам образуют сетку, покрывающую исследуемую область. Метод сеток эффективен при решении наиболее сложных плоских и пространственных нелинейных задач, для которых имеется дифференциальная постановка. Наибольшее распространение этот метод получил в задачах динамики жидкости и газа, когда уравнения записываются в координатах Эйлера. В методе сеток имеются некоторые неудобства при моделировании граничных и начальных условий, так как на границах сложно заменить конечными разностями дифференциалы высоких порядков.

Преимуществом проекционных методов является то, что они могут быть применены в задачах, для которых не известна дифференциальная постановка (описываемых, например, интегральными уравнениями).

В основе проекционных методов лежит разложение искомой функции, например перемещений $u(x)$ ¹ по системе независимых заданных функций $\varphi_i(x)$ (их называют базисными либо координатными) и неизвестных (искомых) коэффициентов q_i (их называют обобщёнными координатами или обобщёнными перемещениями):

$$u(x) = \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i(x). \quad (1.11)$$

Разложение по базису $\varphi_i(x)$ в математике называется проектированием. Функции $\varphi_i(x)$ могут быть глобальными, то есть определёнными на всей исследуемой области (рис. 1.1, а), либо локальными, то есть не равными нулю только на соответствующих им малых подобластях – конечных элементах (рис. 1.1, б).

На рис. 1.1 показано разложение функции $u(x)$ по базисным функциям $\varphi_i(x)$: а - глобальным (в ряд Фурье); б - локальным (определенным на линейных конечных элементах).

¹ Под x для краткости и общности будем понимать не одну координату, а несколько, – в зависимости от размерности рассматриваемого пространства. Например, для трёхмерной области $x \equiv (x, y, z) \equiv (x_1, x_2, x_3)$.

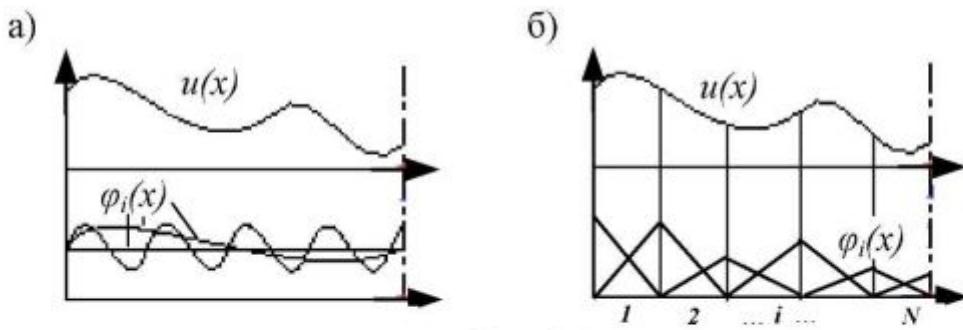


Рис. 1.1

По сути, проектирование (1.11) означает не что иное, как преобразование координат, то есть переход от декартовой системы $x(x_1, x_2, x_3)$ к некоторой обобщённой системе $q(q_1, q_2, \dots, q_N)$, которая выбирается исходя из удобства численного моделирования. Если исследуемая область регулярная (например, стержень, пластина или цилиндрическая оболочка), то формулу (1.11) удобно представить в виде ряда Фурье, - тогда обобщёнными координатами будут определяться амплитуды гармоник на рис. 1.1, а.

Для сложных конструкций можно определить множество местных систем обобщённых координат и соответствующих базисных функций, характерных для отдельных типовых элементов конструкции – конечных элементов. Тогда вместо формулы (1.11) получим (1.12)

$$u(x) = \sum_{i=1}^{N^{(k)}} q_i^{(k)} \varphi_i^{(k)}(x) + \sum_{i=1}^{N^{(l)}} q_i^{(l)} \varphi_i^{(l)}(x) + \dots, \quad (1.12)$$

где k, l, \dots - типы КЭ. Имея в распоряжении широкий набор (библиотеку) элементов можно достаточно точно смоделировать произвольную конструкцию.

Суть большинства полуаналитических методов состоит в том, что в качестве основных неизвестных (обобщённых координат) используются не коэффициенты (1.11), а функции (1.13)

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^N q_i(y) \varphi_i(x). \quad (1.13)$$

Практически это означает, что по координате y решение ищется аналитически, а по координате x – численно. Использование таких методов удобно в тех случаях, когда конструкция имеет регулярную структуру по одним координатам и нерегулярную – по другим. Например, призматические конструкции со сложным поперечным сечением либо наоборот, - не-призматические структуры с простым сечением.

Другой способ, используемый в методе граничных элементов, состоит в том, что в исходных уравнениях задачи используются известные аналитические решения от составляющих внешнего воздействия на бесконечную область. Это позволяет получить САУ с неизвестными только на границе области решения.

Полуаналитические методы позволяют сократить вычислительные затраты и упростить формирование численной модели. Однако их область применения ограничена.

2. ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Общие понятия о конечноэлементном расчете конструкций

Основной единицей представления конструкции в методе конечных элементов (МКЭ) является конечный элемент (КЭ) - геометрически упрощенное представление малой части физической конструкции. Модель конструкции состоит из дискретных КЭ, образующих сетку. Эти элементы могут быть разными. Вы сами решаете, какой тип и размер каждого КЭ выбрать, в зависимости от ряда факторов, таких, как геометрическая форма и ожидаемое поведение конструкции - например, важен ли изгиб, имеется ли концентрация напряжений и пр. Программа может по стандартным формулам вычислять свойства каждого элемента, например, коэффициенты жесткости и распределения масс.

Элементы объединяются в модель в определенных точках пространства, называемых узлами. В этих точках КЭ соединяются и работают совместно. В зависимости от типа, ориентации и числа элементов, соединяющихся в узле, этот узел (в силу упругих свойств элементов) может противодействовать поступательным перемещениям и вращениям вдоль и относительно определенных направлений. Каждое отдельное возможное (обобщённое) перемещение или вращение называется "степенью свободы". Оно представляет собой неизвестную величину, подлежащую определению. Таким образом, перемещение узла определяется его поступательными перемещениями вдоль осей X, Y и Z и его вращениями относительно этих осей (т.е. узел может иметь всего 6 степеней свободы). На основании описания соединений КЭ в узлах программа объединяет (осуществляет сборку) отдельных элементов в эквивалентные, но гораздо более сложные, характеристики полной модели.

Созданная таким образом модель позволяет определить поведение реальной конструкции, т.е. ее отклик на внешние воздействия. Обычно этот отклик выражается через перемещения и напряжения. Отклик будет статическим, если внешние силы прикладываются медленно и возникающие силы инерции пренебрежительно малы. В этих условиях необходим статический расчет.

Отклик будет динамическим, если нагрузки изменяются во времени настолько быстро, что получающиеся скорости и ускорения вызывают заметные отклонения перемещений и напряжений от статических величин.

Вычисление зависимостей перемещений и напряжений от времени составляет содержание динамического анализа переходных процессов.

Несколько слов по поводу "линейного" и "нелинейного" анализа. Если характеристики конструкции, такие, как жесткость и масса, остаются постоянными на протяжении всего расчета (моделируемого процесса деформации конструкции), то мы имеем дело с линейным расчетом. Если же характеристики изменяются, то расчет становится нелинейным. Эти изменения могут быть связаны, например, с большими изменениями формы конструкции (геометрическая нелинейность), текучестью материала (физическая нелинейность) или изменением граничных условий (как, например, в контактных задачах).

Созданная для расчета конечноэлементная модель - это лишь приближенное представление реальной конструкции. Как во всех численных методах, расчет производится не для реальной конструкции, а для построенного Вами упрощенного образа. Упрощения, например, связаны с тем, что каждый КЭ построен, исходя из определенных базисных функций (геометрических аппроксимаций). Это автоматически налагает ограничения на распределения перемещений и напряжений по области конструкции, которую представляет элемент.

Если, например, КЭ с линейным распределением перемещений (или, как его называют, элемент с постоянными напряжениями и деформациями) используется для представления области, в которой изменения напряжений невелики, то это не очень скажется на результатах, даже если сетка элементов грубо отображает реальную конструкцию. Если же грубая сетка используется для представления области со значительным изменением напряжений, то результаты будут гораздо менее точными. Или если, скажем, для моделирования части конструкции, претерпевающей сильный изгиб из плоскости, вместо пластинчатых элементов используются мембранные (в которых изгиб не учитывается), то результаты могут оказаться бессмысленными. С другой стороны, если пластинчатые элементы используются в модели с незначительным изгибом из плоскости, то расчет (хотя и точный) может оказаться слишком дорогостоящим. Аналогично, если обратиться к примеру из динамики, при слишком большом шаге по времени, результаты вычисления нестационарного отклика будут либо неточными (окажутся потерянными высшие частоты), либо неустойчивыми, в зависимости от принятой схемы интегрирования по времени. Если же шаг по времени слишком мал, то вычисления оказываются излишне дорогостоящими.

Короче говоря, эффективный и осмысленный конечноэлементный расчет возможен лишь в том случае, если Вы заранее представляете себе хотя бы приблизительное поведение конструкции, знаете, где можно ожидать больших градиентов напряжений и т.д. Знание теоретических допу-

щений, лежащих в основе описания КЭ и применяемых вычислительных алгоритмов повышает эффективность вашей работы.

Однако отсутствие надлежащих знаний не должно Вас отпугивать от конечноэлементного анализа. Напротив, это должно побуждать Вас как к непрерывному изучению предмета, - как путем пополнения формальных знаний, так и постоянным экспериментированием с программой для приобретения необходимого умения. Вознаграждены Вы будете возрастающими возможностями эффективного применения этого мощного современного метода. Приобретенный таким путем опыт лишь повысит вашу ценность как инженера.

Как должно быть ясно из сказанного, точность результатов конечноэлементного анализа очень сильно зависит от качества разработанной модели и наложенных на нее условий. Чем ближе модель к реальной конструкции и чем точнее она представляет ее местные особенности, тем точнее результат. При наличии опыта всегда удается, построив хорошую модель, получить высококачественные результаты. Нужно, однако, помнить, что повышение точности неизбежно сопряжено с увеличением затрат времени на подготовку модели, а также времени расчёта и обработки результатов (что особенно заметно при динамическом и нелинейном анализе). Созданию эффективной модели, прежде чем она будет сформирована, нагружена и рассчитана, должна предшествовать тщательная подготовка. Имеющаяся в современных программах анализа автоматическая генерация сетки ускоряет процесс построения и использования сложной модели. Интерактивная графика помогает Вам всесторонне рассмотреть модель прежде, чем Вы начнете расчет, - это существенно повышает шансы на успешное прохождение расчета с первой попытки. Искусство, необходимое для эффективного выполнения конечноэлементного анализа, представляет собой результат обширной практической работы.

2.2. Теоретические основы метода конечных элементов

Конечным элементом (КЭ) называется часть целой конструкции, имеющая геометрически простую форму, например, отрезок стержня, треугольник пластины, тетраэдр сплошного тела и пр. Каждый КЭ имеет несколько узлов, в которых он взаимодействует с другими конечными элементами.

Перемещение КЭ в процессе деформирования характеризуется узловыми обобщёнными перемещениями. В качестве узловых перемещений могут приниматься смещения по направлениям осей координат, первые производные (углы поворота относительно осей координат), вторые производные и т.д. Обозначаются обобщенные перемещения - q_i .

Количество узловых обобщенных перемещений может быть различным. Это зависит от характера деформирования КЭ в составе конструкции

и от степени точности расчетной модели. В зависимости от того, сколько и какие перемещения приняты во внимание, возникают новые разветвления в классификации типов КЭ.

Каждому обобщенному перемещению q_i может быть поставлено в соответствие некоторое обобщенное узловое усилие P_i . Это либо реакции взаимодействия КЭ друг с другом, либо внешние нагрузки.

На рис. 2.1 показаны обозначения и нумерация обобщенных перемещений и обобщенных усилий простого элемента балки. Принятая нумерация является стандартной для МКЭ.

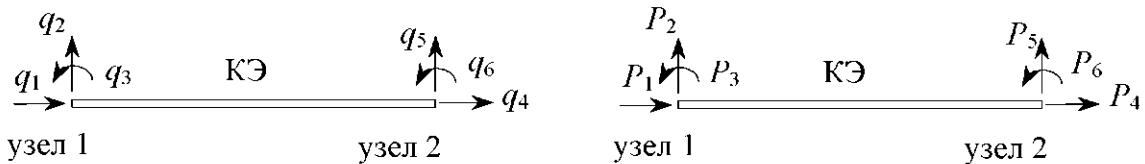


Рис. 2.1

Система сил, действующих на КЭ, приводится к эквивалентной системе обобщенных узловых усилий, ориентированных по направлениям возможных перемещений для КЭ. К таким усилиям могут быть сведены все виды нагрузок (объемные, поверхностные, температурные, инерционные и др.). Совокупность узловых усилий КЭ образует собой матрицу усилий $\{P\}^l$ (грузовой вектор) l -го конечного элемента размером $n \times 1$. Совокупность принятых неизвестных узловых перемещений образует для одного КЭ вектор $\{q\}^l$:

$$\{P\}^l = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix}, \quad \{q\}^l = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}.$$

Конечный элемент представляет собой упругое тело. В направлении каждого из возможных узловых перемещений конечный элемент работает как некоторая упругая связь. Это значит, что свойства КЭ в направлении каждого из перемещений q характеризуется коэффициентом жесткости k (по аналогии с формулой (1.6)).

Так как у КЭ каждое из усилий P_i связано с каждым из возможных перемещений q_i , то упругие свойства КЭ характеризуются некоторым множеством коэффициентов жесткости k_{ij} . Это множество называется матрицей жесткости КЭ. Для l -го КЭ обозначим матрицу жесткости как $[K]^l = [k_{ij}]^l$. Это матрица квадратная. Ее порядок $n \times n$ (n - количество узловых перемещений для КЭ). Например, для КЭ, изображенного на рис. 2.1, матрица жесткости имеет вид (2.1)

$$[K] = [k_{ij}] = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 1 & k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ \hline 2 & k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ \hline 3 & k_{31} & k_{32} & \dots & \dots & k_{35} & \dots \\ \hline 4 & k_{41} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline 5 & k_{51} & \dots & \dots & k_{ij} & \dots & \dots \\ \hline 6 & k_{61} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \end{array} \quad (2.1)$$

Физический смысл коэффициента k_{ij} – это усилие (реакция) P_i вызванное единичным смещением q_j . Например, k_{35} на рис. 2.1 - это третье усилие (изгибающий момент на левом конце), вызванное единичным пятым перемещением (вертикальное смещение на правом конце КЭ).

Следует отметить, что набор обобщённых перемещений и выражения для коэффициентов матрицы жёсткости КЭ определяются исходной математической моделью и базисными функциями. В программах анализа конструкций по МКЭ существуют библиотеки элементов, содержащие разные формулировки КЭ.

Уравнение равновесия для конечного элемента аналогично уравнению (1.9):

$$[K]^T \{q\}^T = \{P\}^T. \quad (2.2)$$

При построении системы уравнений равновесия для всей конструкции необходимо выполнить три действия:

- вычислить матрицы жесткости и векторы внешних нагрузок для отдельных КЭ;
- «состыковать» конечные элементы в целую конструкцию;
- учесть граничные условия.

Стыковка элементов выполняется автоматически путём приравнивания между собой реакций взаимодействия между соседними КЭ в узлах. В результате образуется САУ равновесия для всей конструкции:

$$[K]\{q\} = \{P\}, \quad (2.3)$$

где $[K]$, $\{q\}$, $\{P\}$ - это матрицы жесткости, узловых перемещений и внешних узловых усилий для конструкции в целом.

В линейных задачах система уравнений (2.3) линейна. Для ее решения используются методы Гаусса, Халецкого, Зейделя и др. Для нелинейных задач система уравнений не линейна, например, когда матрица $[K]$ зависит от неизвестных перемещений $\{q\}$. При решении нелинейной системы алгебраических уравнений используются итерационные методы, методы пошагового нагружения и др.

В результате решения системы уравнений оказывается найденным вектор $\{q\}$. После этого с помощью зависимостей типа (1.11) можно определить перемещения, а затем и остальные параметры (например, по формулам (1.2) – деформации, по формулам (1.3) – напряжения).

2.3. Уравнения метода конечных элементов для различных видов анализа

При воздействии нагрузок, интенсивно изменяющихся во времени, существенное влияние на поведение конструкций приобретают силы инерции и сопротивления движению. В динамических задачах присутствуют также производные от перемещений по времени: скорости $\dot{u} = du/dt$ и ускорения $\ddot{u} = d^2u/dt^2$. Систему уравнений движения при анализе конструкций по МКЭ можно получить из (1.10):

$$[K]\{q\} + [C]\{\dot{q}\} + [M]\{\ddot{q}\} = \{P(t)\}, \quad (2.4)$$

где $[K]$, $[C]$ и $[M]$ - матрицы жёсткости, демпфирования и масс конструкции. Расчёт динамики конструкций по уравнению (2.4) требует на порядок больше вычислений, чем статический расчёт по уравнению (2.3). Он обычно выполняется пошаговым методом: путём многократного решения САУ (2.4) для фиксированных отсчётов времени t с пересчётом скоростей и ускорений на основе начальных условий и экстраполяции решений, полученных в предыдущие моменты времени.

В случае колебаний с малыми потерями энергии можно отбросить второе слагаемое матричного уравнения (2.4), выраждающее силы сопротивления. Если колебания свободные, то отбрасывается правая часть уравнения.

В задачах вибрации обычно считается, что колебания происходят с частотой ω по гармоническому закону:

$$\{q\} = \{q_0\} \sin \omega t, \quad \{P\} = \{P_0\} \sin \omega t, \quad (2.5)$$

где $\{q_0\}$ и $\{P_0\}$ – узловые амплитуды колебаний и возмущающих сил. Выражения (2.5) позволяют свести задачу вибрации (2.4) к однократному решению САУ вида

$$([K] - \omega^2 [M])\{q_0\} = \{P_0\}. \quad (2.6)$$

Свободные колебания (когда вектор правой части нулевой) могут происходить только с частотой из определенного спектра. Количество возможных частот N равно порядку САУ (2.6), а сами они могут быть вычислены из следующего уравнения N -й степени:

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0. \quad (2.7)$$

Корни этого уравнения называются собственными частотами колебаний ω_i . При этом САУ (2.6) является однородной, и она может быть решена только в относительных перемещениях для какого-либо предварительно вычисленного значения ω_i . То есть один из компонентов вектора $\{q_0\}$ полагается заданным (например, $q_{0j} = 1$). Одно из уравнений САУ (2.6) становится лишним и отбрасывается (любое). Остальные перемещения определяются относительно q_{0j} . В результате получаются формы свободных (собственных) колебаний.

Решение задачи (2.7) актуально при анализе возможности резонансов, так как известно, что резонанс возникает в момент совпадения частоты периодической нагрузки с какой-либо собственной частотой конструкции.

Определение собственных частот и форм колебаний также позволяет в последующем решать задачу (2.4) методом разложения по собственным формам. Расчёт этим методом связан с меньшими вычислительными затратами, чем прямой пошаговый расчёт.

Геометрически нелинейное поведение конструкций возникает в случаях, когда деформации нелинейно зависят от перемещений (тогда в формуле (1.2) матрица $[\nabla]$ будет зависеть от перемещений). Физически нелинейное поведение характерно тем, что напряжения нелинейно связаны с деформациями (в формуле (1.3) коэффициенты матрицы $[D]$ зависят от деформаций). В таких случаях матрица жёсткости будет определяться не только начальным состоянием, но и всем поведением конструкции. Кроме того, внешняя нагрузка также может зависеть от состояния конструкции (примеры: следящие силы; гидроаэроупругие эффекты). В результате уравнение МКЭ (2.3) будет нелинейным (2.8)

$$[K(q)]\{q\} = \{P(q)\}. \quad (2.8)$$

Такая система может быть решена только так называемыми итерационными методами (методами последовательных приближений). При этом происходит многократное решение системы (2.3), то есть в предположении постоянства коэффициентов матриц. На каждом приближении (итерации) эти коэффициенты пересчитываются с учётом их поведения на предыдущих итерациях.

Сходимость итерационных методов к точному решению сильно зависит от удачного выбора начального приближения. Обычно начальным приближением считается решение задачи в линейной постановке. Поэтому, чем сильнее окончательное решение отличается от линейного, тем труднее его добиться.

Бывают ситуации, когда при достижении внешней нагрузкой некоторого (критического) значения, конструкция может потерять устойчивость,

то есть способность сохранять равновесие. Обычно потеря устойчивости характерна для гибких элементов (тонких стержней, пластин, оболочек), находящихся под действием сжимающих сил, - в этом случае им присуще наличие реакций R , зависящих от перемещений. Для линейной задачи можно записать $R = [T]\{q\} = \lambda [K_g]\{q\}$, где $[K_g]$ – так называемая матрица геометрической жёсткости, λ - силовой параметр, определяющий сжатие. В результате вместо уравнения (2.3) получим:

$$([K] - \lambda [K_g])\{q\} = \{P\}. \quad (2.9)$$

Для определения критического значения сжимающей нагрузки следует решить уравнение

$$\det ([K] - \lambda [K_g]) = 0. \quad (2.10)$$

Наименьший корень уравнения (2.10) определяет критическую силу, а последующее решение системы (2.9) с нулевой правой частью определяет форму потери устойчивости (это делается как и при анализе форм собственных колебаний).

2.4. Оценка точности численного решения

Численные методы, в том числе и МКЭ, называют приближёнными. Они отличаются тем, что при чётко поставленной математической модели, в отличие от аналитических методов, не приводят к абсолютно точному решению.

Это, конечно, не означает, что аналитические методы лучше. Дело в том, что очень часто аналитические решения удается получить только для довольно грубых, упрощённых математических моделей сложных явлений и конструкций. Очевидно, что в таких случаях преимущество аналитических методов в точности не имеет особого смысла.

С другой стороны, погрешности приближённых методов можно регулировать в зависимости от требуемой точности расчётов. Однако для этого, естественно, требуется дополнительный анализ погрешностей. Такой анализ производится обычно путём выполнения серии тестовых расчётов с разными конечноэлементными моделями. Объём таких дополнительных исследований зависит от многих факторов: возможности проверки результата сопоставлением с данными эксперимента либо другого расчёта; сложности конструкции либо её поведения; степени ответственности за результаты расчётов; опыта и знаний расчётчика; доверия к программному обеспечению и др. Главное, нужно твердо запомнить: **достоверность любого результата нужно доказать**, - иначе доверия к нему не будет.

В расчётах по МКЭ следующие основные погрешности:

- геометрической модели;
- расчётной схемы;
- разбиения (дискретизации) на КЭ;
- аппроксимации (интерполяции) параметров состояния системы (перемещений, усилий, напряжений и т.п.) по полю КЭ;
- в виде разрывов или нарушения гладкости искомых функций на стыках элементов (при применении так называемых несовместных КЭ);
- округления при решении САУ.

Анализ этих погрешностей далеко не всегда прост, так как они все взаимосвязаны. Например, учёт малого скругления угла требует более мелкой разбивки в этом районе, однако если расчётная схема предполагает анализ общих деформаций конструкции, то этот учёт может вообще не потребоваться.

Геометрическую модель, созданную средствами CAD, часто приходится подстраивать для соответствия расчётной схеме. Так, например, лопасти объёмной модели винта корабля преобразуются в оболочки с разбивкой на пластинчатые КЭ. Это позволяет избежать очень мелкой разбивки при достижении достаточной точности результатов.

Как правило, чем гуще сетка элементов, тем выше точность результатов расчёта. Если это не так, то либо неправильно построена расчётная схема, либо неудачно выбран тип КЭ. Важен не только размер элементов, но и их форма. Сильно вытянутые элементы, а также элементы с очень острыми углами являются источником накопления ошибок дискретизации.

Если для одной математической модели и расчётной схемы имеются как аналитическое, так численные решения, то можно оценить сходимость численного решения к точному при применении более густой сетки. Как видно на рис. 2.2, зависимость перемещения в какой-либо характерной точке конструкции от густоты сетки обычно асимптотическая. Это позволяет исследовать сходимость, даже не имея аналитического решения для сравнения (учтите только, что кроме неточностей разбивки могут быть другие ошибки, тогда сходимость останется, однако, возможно к неправильному результату).

В динамических задачах, когда решение ищется шагами по времени, имеет большое значение также дискретизация по времени, определяемая размером временного шага. Более того, размеры элементов и шаг по времени должны быть согласованы. Шаг по времени подбирается таким, чтобы с размерами КЭ были соразмерны длины волн учитываемых колебаний или ударных процессов. При грубой сетке малый шаг по времени не приведёт к уточнению результатов, и наоборот.

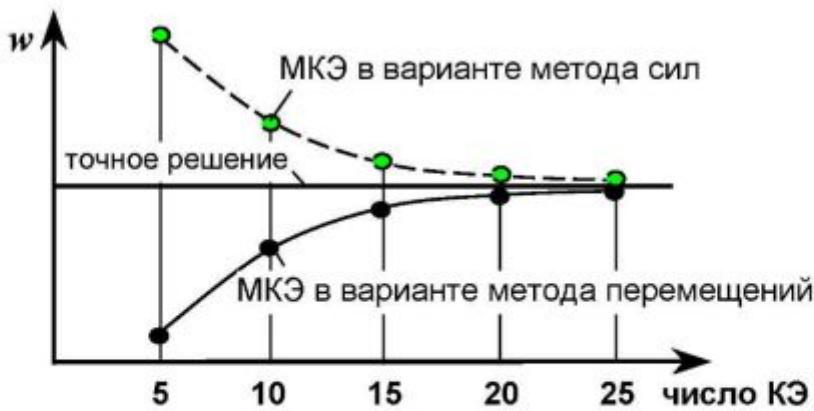


Рис. 2.2

В результате решения САУ МКЭ определяются неизвестные только в узлах сетки. Точность представления перемещений, напряжений и других параметров между узлами зависит от вида соответствующих интерполирующих функций по объёму КЭ. Обычно эти функции являются полиномами. Коэффициенты полинома определяются узловыми значениями функции, поэтому элементы должны иметь достаточный набор этих узловых значений – степеней свободы. Чем больше порядок полиномов, тем больше степеней свободы имеет КЭ, тем он точнее.

Узлы КЭ может иметь не только в углах, но и на рёбрах, гранях, а также внутри. Более точные элементы позволяют получить достаточно хорошие результаты даже при грубой расчётной сетке. В некоторых случаях, например при анализе изгиба тонких оболочек, в расчётах на ударные нагрузки, более точные элементы просто необходимы, так как применение КЭ с малым числом степеней свободы может дать неверный результат.

Если МКЭ используется для решения задачи, описываемой дифференциальным уравнением чётного порядка m , то относительную погрешность дискретизации и интерполяции можно оценить по следующей формуле [2]:

$$\delta = \left(\frac{a}{l} \right)^{2(n - m/2 + 1)},$$

где a – характерный размер КЭ, l – характерный размер тела, n – степень интерполирующего полинома.

Существуют КЭ, которые математически не строго описывают иско-мые функции по исследуемой области. Они допускают существование изломов, а иногда и разрывов функций в узлах или на линиях расчётной сетки. Тем не менее, иногда такие ошибки мало влияют на точность решения при достаточно мелкой сетке. Применение таких несовместных элементов оправдано, если при этом уменьшается время компьютерного расчёта.

Погрешности округления растут с увеличением количества арифметических операций при решении САУ, а значит, с ростом числа и сложности элементов. Имеет значение также выбор способов решения САУ и численного интегрирования при вычислении коэффициентов матриц. Если эти способы достаточно надёжны, то в современных компьютерах неточностей округления можно ожидать только при расчёте сложных конструкций – с числом узлов порядка десятков и сотен тысяч в статических задачах и тысяч – в динамических и нелинейных задачах.

Таким образом, при практическом расчёте конструкций с помощью современных, апробированных систем конечноэлементного анализа точность и время расчёта определяется, в основном, рациональным выбором типов КЭ и построением соответствующей (пожалуй, можно сказать «красивой») сетки КЭ. Для оценки точности и достоверности результатов следует выполнять расчёты для моделей с разной сеткой, сопоставлять результаты с другими доступными данными (экспериментов, аналитических расчётов и пр.).

2.5. Построения разбиений конструкций на конечные элементы

Центральное место в подготовке конечноэлементной модели занимает дискретизация – разбиение на КЭ. Число элементов в сложных конструкциях нередко достигает десятков и сотен тысяч. Очевидно, что в таких случаях процедуру разбиения должен выполнять компьютер. Однако если конструкция имеет сложную, нерегулярную структуру, то деление на КЭ требует неформального анализа, обычно недоступного компьютерной программе. Поэтому дискретизация обычно выполняется в режиме диалога инженера с компьютером.

Можно условно выделить **три уровня автоматизации разбиений**. Низший из них – «*вручную*». В этом случае непосредственно (с помощью графических команд компьютерной программы) задаются узловые точки и соединяются отрезками – рёбрами элементов. Такое разбиение обычно применяется для простых областей с малым количеством КЭ.

Наиболее распространено *автоматизированное разбиение* – автоматическое деление на основе предварительных вспомогательных построений. Предварительные построения выделяют в сложной конструкции односвязные подобласти без резких изменений формы, по возможности регулярные. Затем эти подобласти могут быть автоматически разделены на КЭ. Общая методология автоматизированного разбиения включает три основных действия [8]: 1) выделение простых подобластей (рис. 2.3); 2) разбиение подобластей; 3) объединение подобластей (сшивка).

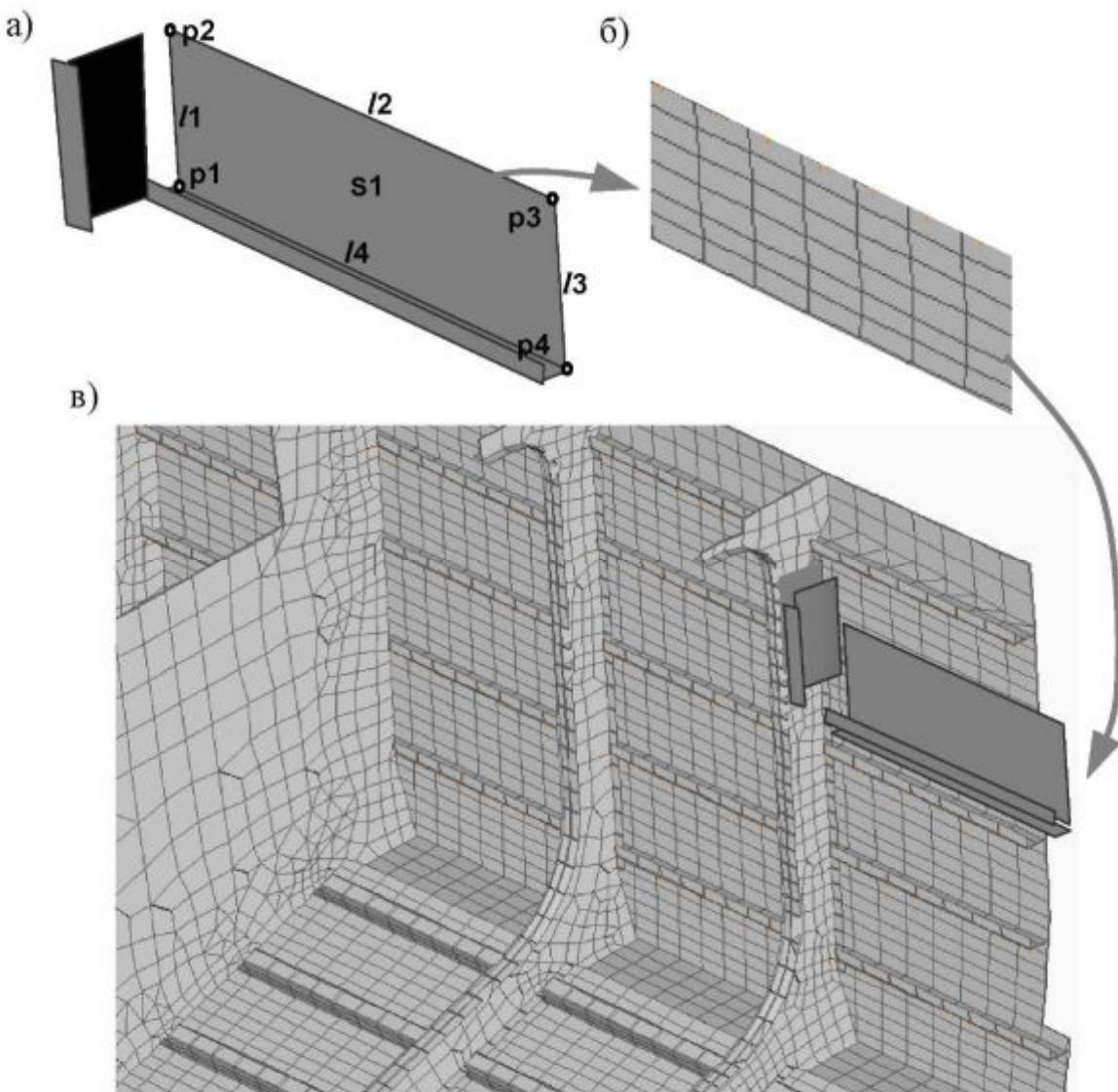


Рис. 2.3

Подобласти обычно определяются путём последовательного построения (см. рис. 2.3, а) ключевых точек (points), затем линий (curves), поверхностей (surfaces) и объёмов (volumes). В результате формируется геометрическая модель конструкции. Вспомогательные построения могут также включать: определение узлов на линиях (поверхностях) разделения подобластей; задание некоторых узлов внутри подобластей; определение осей (плоскостей) симметрии; построение параметрических линий сложных поверхностей.

На рис. 2.3 изображено автоматизированное построение конечноэлементной модели: а - интерактивное построение подобласти путём задания ключевых точек (p_1, p_2, p_3, p_4), линий (l_1, l_2, l_3, l_4) и поверхности (s_1); б - автоматическая разбивка подобласти на КЭ; в - объединение (сшивка) подобластей.

Перед автоматическим разбиением подобласти густота сетки регулируется заданием количества узлов по линиям границы. В местах ожидаемого резкого изменения искомых функций (например, в концентраторах напряжений) размеры элементов должны быть малы, а на удалении от источников концентраций – там, где функции изменяются плавно – можно применять более крупные КЭ. Изменение размеров обычно задаётся с помощью коэффициента сгущения k , определяющего отношение размеров первого и последнего элементов граничной линии. На рис. 2.4 рассматривается сгущение сетки.

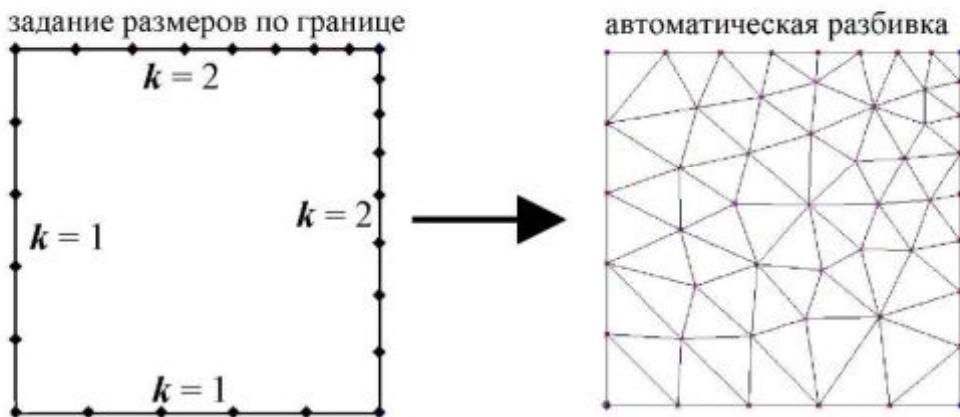


Рис. 2.4

При разбиении необходимо следить, чтобы не было элементов с очень острыми углами и слишком вытянутых. Такие «плохие» КЭ существенно снижают точность вычислений.

Желательно, чтобы в каждом узле сетки сходилось одинаковое количество элементов. Для двумерных областей идеальной является сетка из равносторонних треугольников с шестью сходящимися в узле элементами. Если в узле сходится большее число КЭ, то можно подправить сетку, введя дополнительный узел (рис. 2.5).

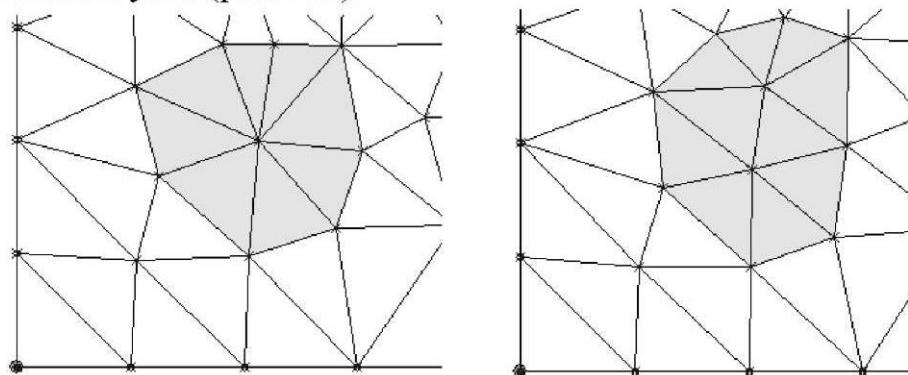


Рис. 2.5

Так как подобласти обычно разбиваются на КЭ по отдельности, то на

их границах элементы получаются не связанными общими узлами. Поэтому далее смежные подобласти должны быть связаны, то есть узлы элементов на общей геометрической границе следует сделать общими (рис. 2.6).

Для этого на общих границах должна быть обеспечена одинаковая или близкая разбивка, а смежные элементы должны быть совместимыми (по крайней мере, они должны иметь одинаковые степени свободы узлов). Как правило,стыковка подобластей выполняется наиболее просто, если смежные подобласти имеют общие геометрические границы (линии либо поверхности).

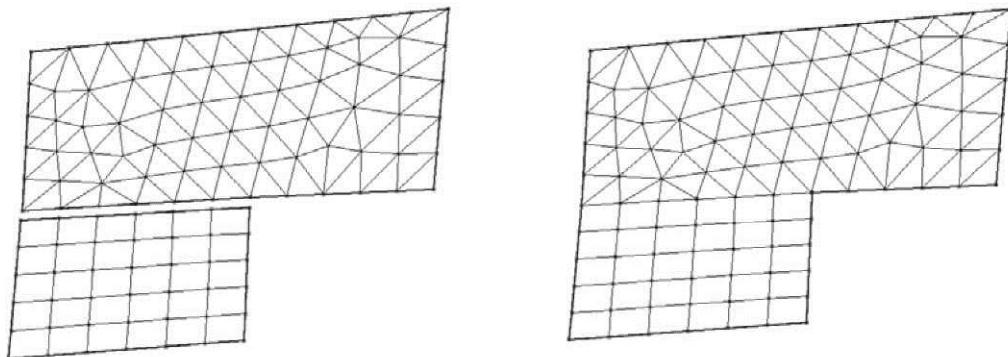


Рис. 2.6

В некоторых динамических либо нелинейных процессах происходит существенное изменение формы конструкции. При этом сетка КЭ, построенная для исходной формы, может настолько сильно измениться, что будет непригодна для дальнейших расчётов. Может значительно измениться и внутреннее состояние исследуемой области, например, появиться зона сильной концентрации напряжений. Если в этой зоне не стущать сетку, то погрешность вычислений будет стремительно расти. В таких случаях используется автоматическая перестройка сетки – *адаптивное разбиение*. Критериями перестройки сетки являются параметры состояния конструкции - результаты расчётов на предыдущих приближениях или шагах по времени.

3. ОСНОВЫ РАБОТЫ В MSC/NASTRAN FOR WINDOWS

Программный комплекс MSC/Nastran for Windows, разработанный корпорацией MacNeal-Schwendler (MSC.Software), предназначен для анализа конструкций по МКЭ. Несмотря на сложную структуру и большие возможности, этот пакет достаточно прост для изучения благодаря удобному интерфейсу и наличию встроенного описания (в меню Help). Изучать программу удобно непосредственно в процессе работы с ней. Для этого необходимо знать английский язык и основные понятия о методе конечных элементов.

Для более быстрого освоения графических возможностей пакета и приобретения навыков по формированию расчетных моделей желательно

иметь опыт работы с системами САПР (например, с пакетами AutoCAD, SolidEdge, Unigraphics).

Перечислим некоторые возможности системы MSC/NASTRAN.

Виды анализа конструкций: статический анализ напряженно-деформированного состояния (линейный и нелинейный), анализ собственных колебаний и устойчивости, анализ теплопроводности (стационарной и нестационарной), динамический анализ и др.

Пользовательский интерфейс: все стандартные возможности для Windows-программ; управление посредством меню команд, кнопок, панелей настройки; одновременное использование до 20 окон.

Построение модели: импорт моделей, созданных в основных пакетах CAD (форматы ACIS, Parasolid, STL, DXF и др.) и CAE (ANSYS, COSMOS, ABAQUS и др.); все основные геометрические примитивы, характерные для САПР (включая поверхности, объемные тела, сплайны и пр.); автоматическое генерирование сеток конечных элементов; библиотеки различных материалов, профилей, элементов.

Графика: динамический поворот и изменение масштаба изображения; удаление невидимых линий; тонирование и многое другое.

Графический вывод результатов расчета: деформации, эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил, изохромы полей напряжений и прочее с возможностью анимации.

Встроенный язык моделирования Basic позволяет создавать и выполнять программы и макросы для автоматического построения модели, расширяя возможности системы.

В пособии мы не будем приводить подробное описание команд системы MSC/NASTRAN. Эту информацию Вы можете найти в документации к системе, в справке Help, а также в книге Д. Г. Шимковича [9]. Обучение мы построим на основе описания процесса моделирования и расчёта конкретных конструкций. Слова и фразы в тексте, которые соответствуют вводимым командам для компьютера, будем выделять жирным шрифтом и сопровождать переводом на русский язык. Для надлежащего усвоения уроков необходимо после разбора примеров самостоятельно решать задачи, приведённые в конце каждой последующей главы.

3.1. Первые шаги

Итак, запустите программу MSC/NASTRAN щелчком мыши на соответствующей иконке , а затем на логотипе (рис. 3.1, а).

В результате появится диалоговое окно (рис. 3.1, б) открытия файла модели (**Open Model File**). Выберите пункт **New Model** (новая модель). Откроется рабочий стол MSC/NASTRAN (рис. 3.2).

Координатные линейки в центре рабочего стола можно отключить, как показано на рис. 3.3, а затем обновить, два раза щелкнув указателем мыши в графическом окне.

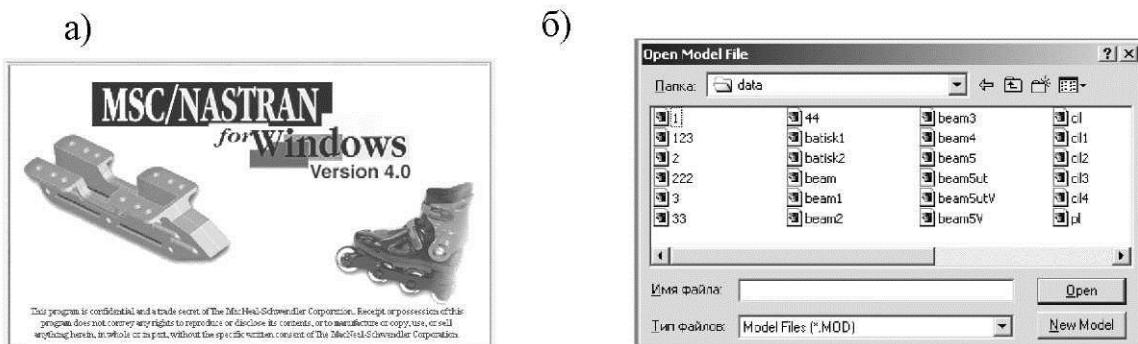


Рис. 3.1

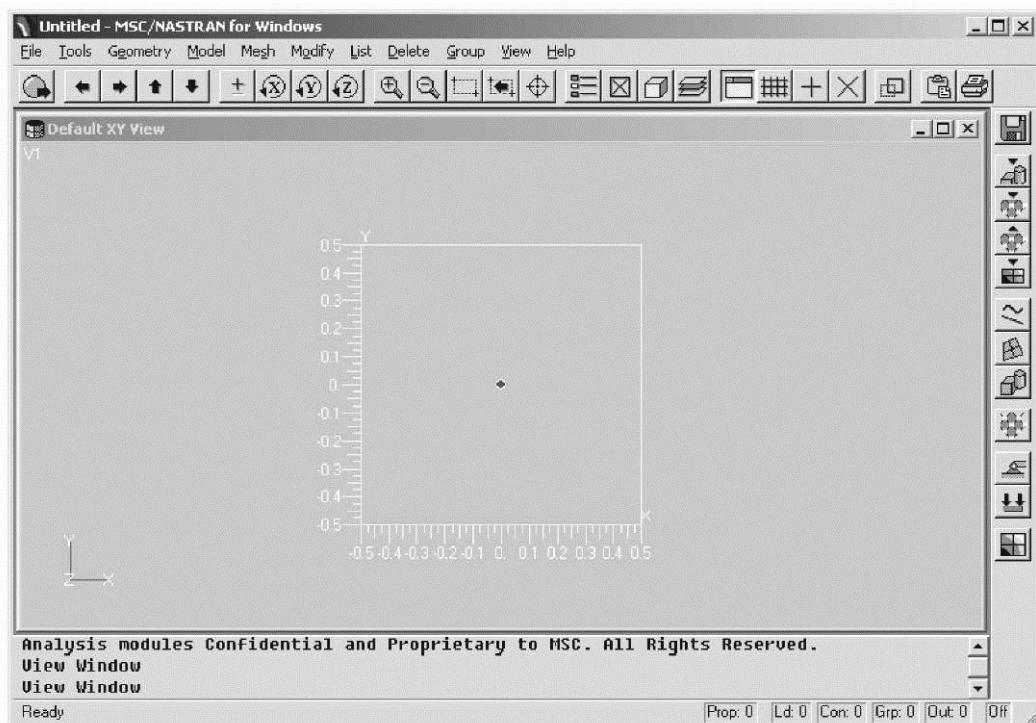


Рис. 3.2

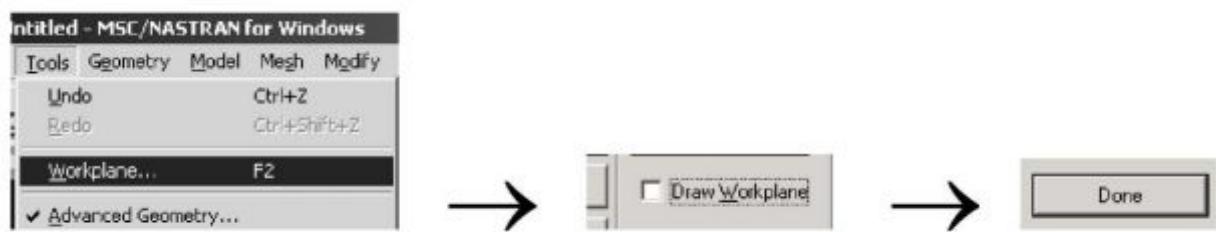


Рис. 3.3

Теперь все готово к работе, но есть некоторые предостережения и напутствия:

- 1) *имена файлов должны иметь не более **восьми** символов;*
- 2) *весь путь нахождения файлов и сами файлы должны иметь в названии только **латинские** символы;*
- 3) *не запускайте задачу на счет с дискеты (в процессе расчета создаются дополнительные файлы больших размеров, используемые только в момент расчета и которые попросту не войдут на дискету, в результате произойдет сбой);*
- 4) *файл, имеющий всю необходимую информацию о модели, имеет расширение **.mod** (для простых задач он имеет небольшой размер и может храниться на дискете);*
- 5) *берегите дискеты от деформаций, пыли и холода (отрицательные температуры нарушают файловую структуру на носителе).*

4. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. Создание модели

Рассмотрим пример анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) стержневой системы, изображенной на рис. 4.1. Опишем действия, необходимые для решения данной задачи в системе MSC/NASTRAN.

Материал: St3

$E=2.1e11 \text{ Н/м}^2$

$\nu_u=0.3$

Предел текучести $Tension=235e6 \text{ Па}$

Размер: $l=1 \text{ м}$

Профиль - уголок

Высота $H=0.1 \text{ м}$

Ширина $Width=0.07 \text{ м}$

Толщина полки $Thick, Bottom=0.01 \text{ м}$

Толщина стенки $Thickness=0.01 \text{ м}$

Нагрузка: $P=17 \text{ KN}$; $Q_1=64 \text{ KN}$; $Q_2=Q_1/2$.

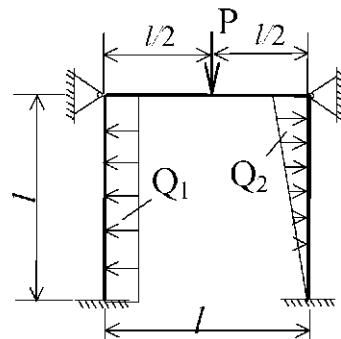


Рис. 4.1

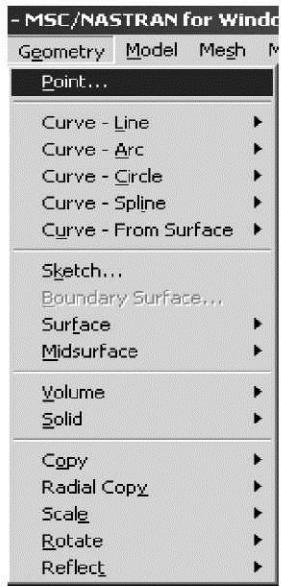


Рис. 4.2

Создание стержневой модели. Выберите пункт меню **Geometry** (геометрия). В появившемся подменю (рис. 4.2) выберите **Point** (точка). В дальнейшем мы при описании действий с вложенными подменю будем указывать кратко: выберите **Geometry Point**.

В появившемся окне (рис. 4.3) введите координаты одной из точек отрезка ($x=0, y=0, z=0$) и выберите **OK**. Далее аналогично введите координаты второй, третьей и четвертой точки соответственно ($x=0, y=1, z=0$), ($x=1, y=1, z=0$), ($x=1, y=0, z=0$). В месте действия сосредоточенной нагрузки также зададим точку ($x=0.5, y=1, z=0$). После задания последней точки выберите **Cancel** (отменить).

Некоторые точки не попадают в область видового экрана, исправить это можно с помощью команды **View Autoscale** (показать с автоматическим масштабированием).

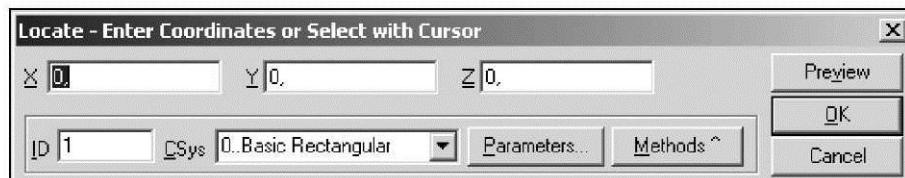


Рис. 4.3

Теперь соединим точки с помощью отрезков, выполнив команду **Geometry Curve – Line Points**.

В результате появится окно (рис. 4.4). Далее последовательно указываем мышкой пару точек и нажимаем **OK**. После создания последнего отрезка **Cancel**. Таким образом, создана стержневая конструкция.



Рис. 4.4

Показ меток стержней. По умолчанию метки (номера) различных элементов модели не показаны в графическом окне. Но их изображение можно «включить» с помощью соответствующего диалогового окна, выбрав **View Options** (показать опции).

Посмотрим номера стержней. Для этого в разделе **Category** диалогового окна выберите опцию **Labels, Entities and Color** (метки, объекты и цвет), а в разделе **Options** укажите на **Curve** (кривая - этим термином обь-

единены все отрезки линий, в том числе и прямых). После этого справа в диалоговом окне появятся новые оконца, позволяющие настраивать показ меток и цвет объекта (рис. 4.5). В окошке **Label Mode** выберите **1..ID**, а затем **Apply** (применить). Аналогичным образом выберите **Point** и **1..ID, OK**. Если необходимо отключить показ меток, то выбираем **0..No Labels** в окошке **Label Mode**.

Получившаяся модель будет иметь вид как на рис. 4.6.

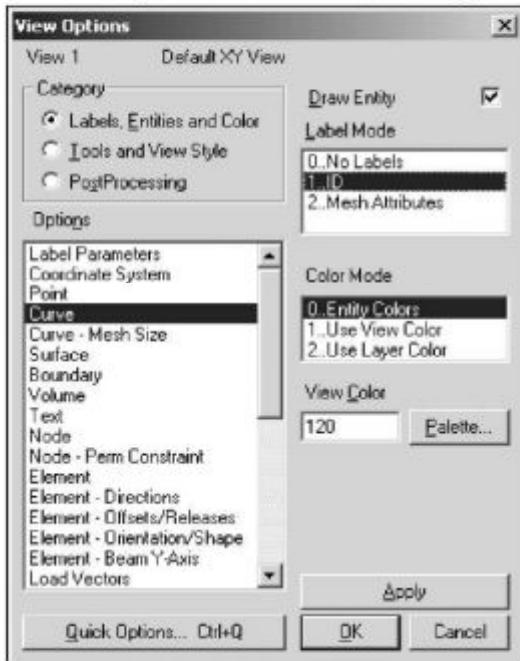


Рис. 4.5

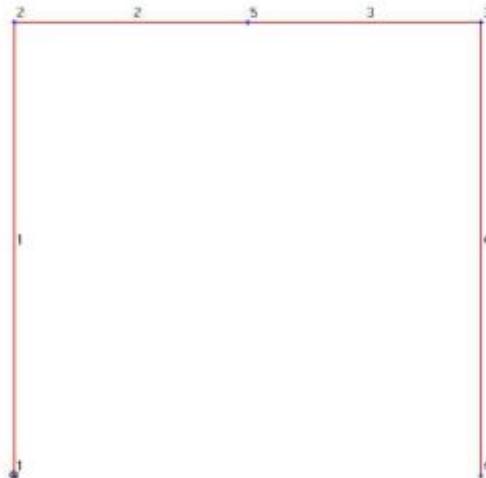


Рис. 4.6

Сохранение модели. Для сохранения модели в меню выберите **File Save** и введите имя файла модели. Назовем его Beam.mod. Не забывайте далее сохранять вашу модель по мере ее формирования с помощью команды **Save**.

Задание свойств материала. Определим свойства материала стержней. Выберем в меню **Model Material** (создать материал). В результате появится диалоговое окно для задания материала (рис. 4.7).

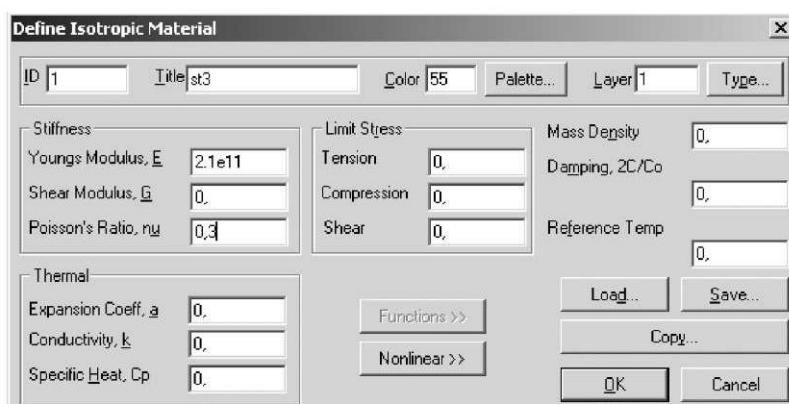


Рис. 4.7

В ячейке **Title** укажите марку материала St3. В ячейке **Young's Modulus, E** (модуль упругости) укажите 2.1e11, в ячейке **Poisson's Ratio, nu** (коэффициент Пуассона) – 0.3. После ввода свойств материала выберите пункт **OK**. Далее будет предложено задать свойства следующего материала (ID = 2). Так как в этом нет необходимости, то выберите **Cancel**.

По умолчанию материал полагается изотропным. Если тип материала другой, например ортотропный, то щелкните по кнопке **Type**.

Свойства материала можно сохранить в библиотеке материалов с целью его использования в других расчетах. Для этого служит кнопка **Save...** данного диалогового окна (рис. 4.7).

Задание свойств элементов конструкции. Для этого в меню выберем команду **Model Property**. Появится новое диалоговое окно (рис. 4.8).

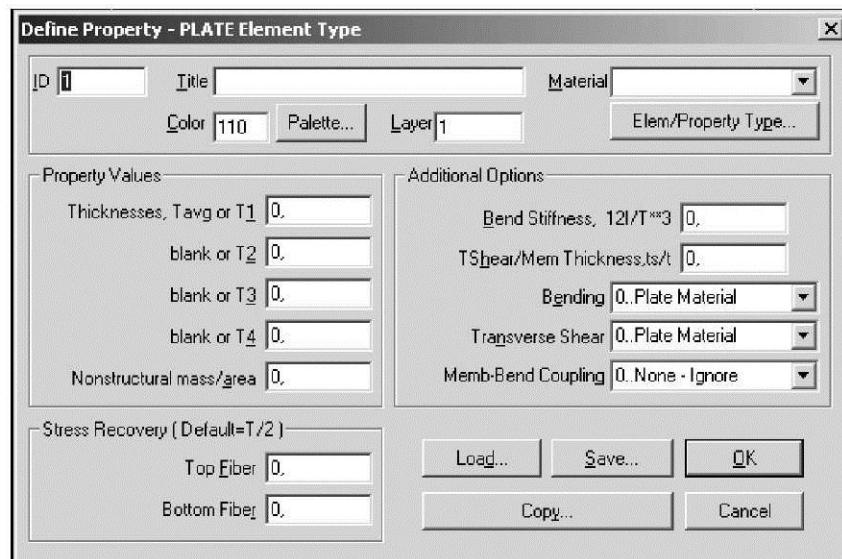


Рис. 4.8

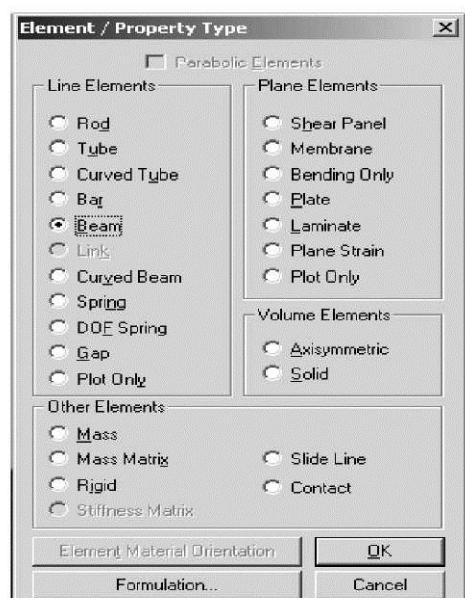


Рис. 4.9

По умолчанию окно настроено на ввод характеристик пластины. Кнопкой **Elem / Property Type...** можно настроить окно на другие типы конструкций (например, балки, мембранны, трубы и пр.). Сделаем это. В результате появится окно, изображенное на рис. 4.9. Выберем в этом окне **Beam** (балка) и нажмем **OK**.

Появится окно (рис. 4.10). Выберите в данном окне материал (**Material**) St3. Укажите также в разделе **Title** имя свойств - Beam. Для задания геометрии поперечного сечения балки нажмите **Shape** (форма). В появившемся окне (рис. 4.11) укажите форму и геометрические размеры поперечного сечения

балки. В поле со списком **Shape** выберите **Angle (L) Section** (профиль – уголок). Далее в окошке **Size** - **H=0.1**(высота, м), **Width=0.07** (ширина, м),

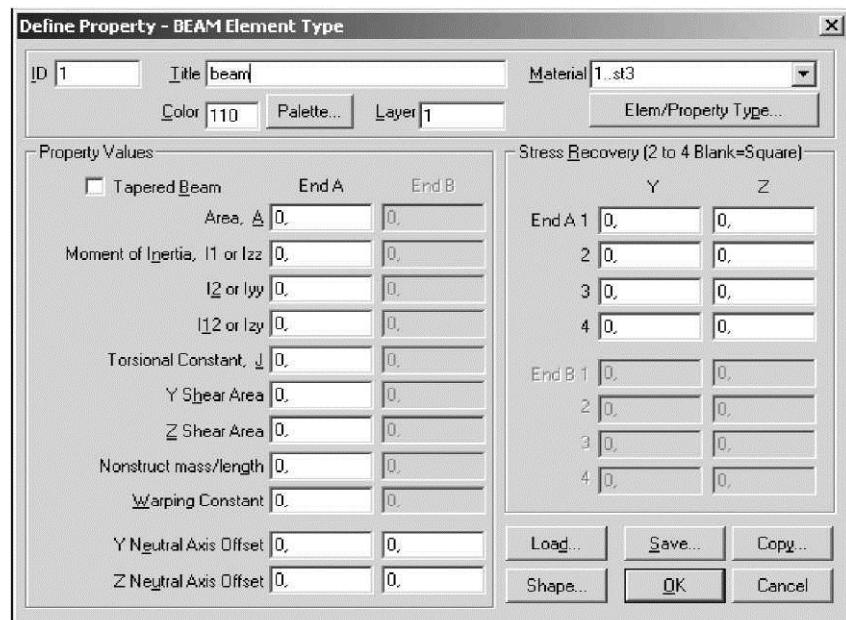


Рис. 4.10

Thick, Bottom=0.01 (толщина стенки), **Thickness=0.01** (толщина полки, м). Нажав кнопку **Draw Section** (рис. 4.11), получим форму поперечного сечения. Далее сориентируем ось **Y** вверх. Для этого в разделе **Orientation Direction (y)** укажем **Up** затем **OK**.

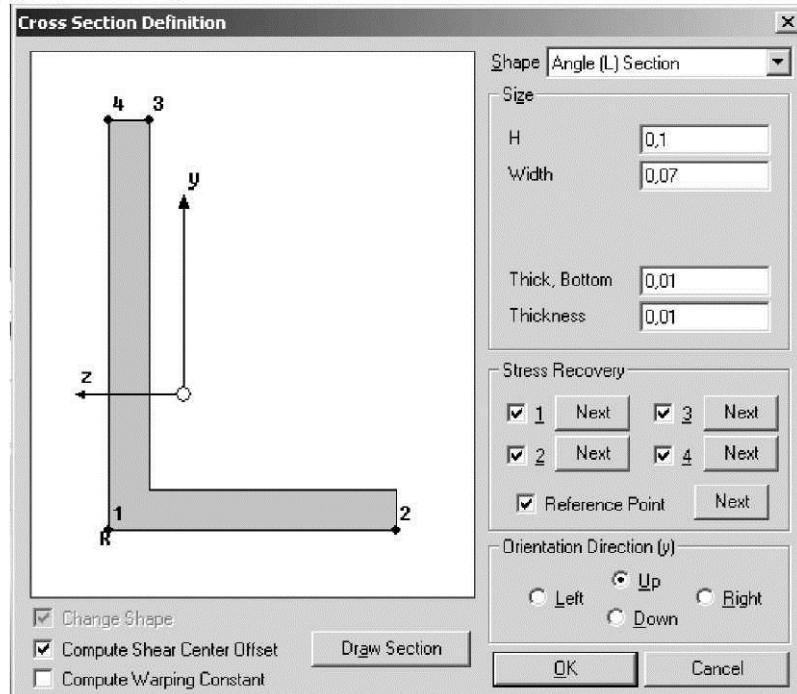


Рис. 4.11

Площадь поперечного сечения, моменты инерции и другие характеристики определяются автоматически (рис. 4.12).

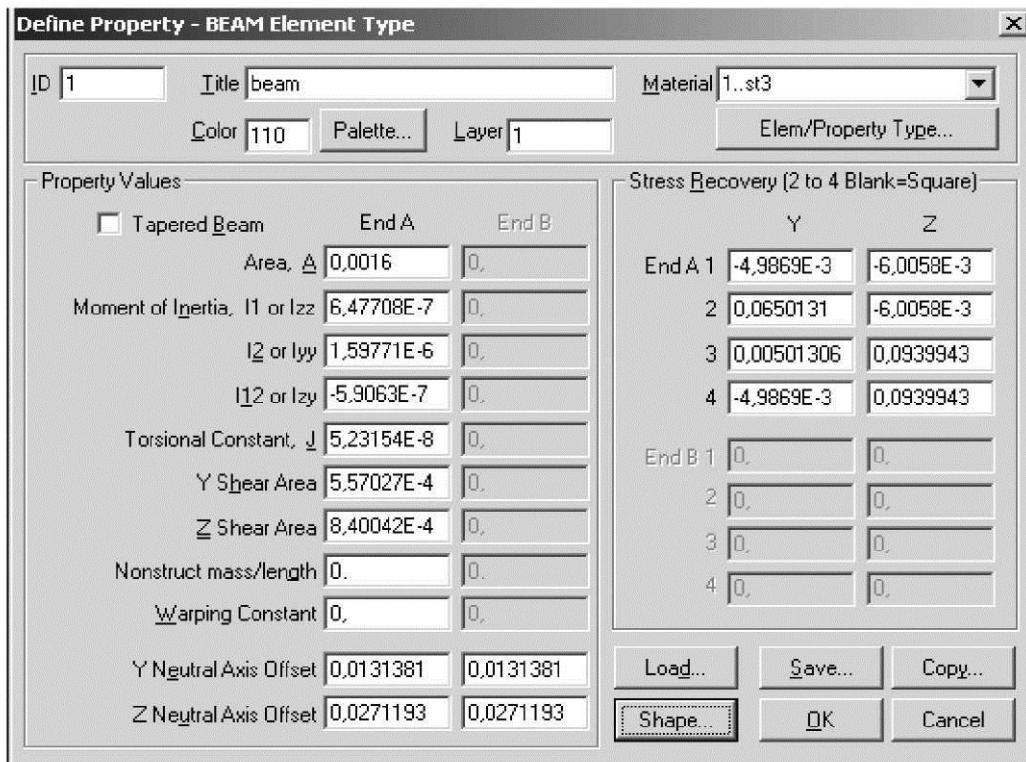


Рис. 4.12

Если площадь и моменты инерции известны заранее, то их можно задавать явным образом в разделе **Area, A** (площадь) и в разделе **Moments of inertia I1 и I2**. Ориентация поперечного сечения балки относительно осей координат выполняется при разбивке на конечные элементы.



Рис. 4.13

Если свойства отдельных балок различны, необходимо их указать под разными именами в разделе **Title**. Для выхода из данного диалогового окна нажмите **OK**, а затем **Cancel**.

Дискретизация. В большинстве случаев произвести разбиение конструкции на конечные элементы в системе MSC/NASTRAN можно способом автоматического построения сетки. Для этого вначале зададим команду **Mesh Mesh_Control Size_Along_Curve** (задание количества элементов сетки по длине отрезка) (рис. 4.13). В появившемся диалоговом окне (рис. 4.14) укажите мышкой отрезки равной длины (1 и 4 (рис. 4.6)), нажмите **OK**.

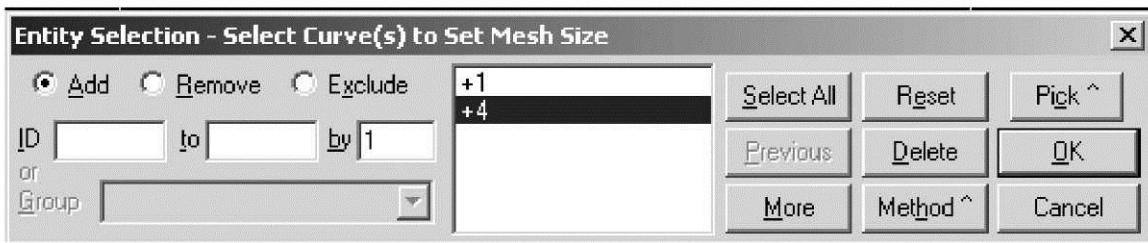


Рис 4.14

В появившемся окне (рис. 4.15) в ячейке **Number of Elements** (количество конечных элементов) задайте 10 **OK**. Аналогичным образом для стержней 2 и 3 (рис. 4.10) задайте 5 конечных элементов, затем **OK, Cancel**.

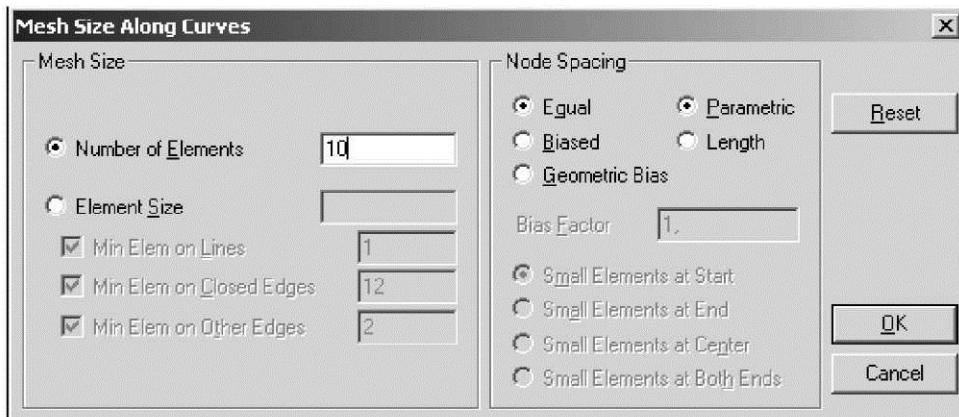


Рис. 4.15

Далее выберите команду **Mesh Geometry Curve** (формирование сетки по длине отрезка) (рис. 4.16). В появившемся окне (*Entity Selection - Select Curves to Mesh*) укажите мышкой стержень, который будет подвергнут дискретизации (пусть это будет вертикальный стержень 1). После того как стержень выбран, нажмите **OK**.

Возникнет окно формирования сетки (*Geometry Mesh Options*) (рис. 4.17). Здесь следует в разделе **Property** (свойства элементов конструкции) ввести с помощью стрелки выбора значение **1..Beam**, затем указать **OK**.

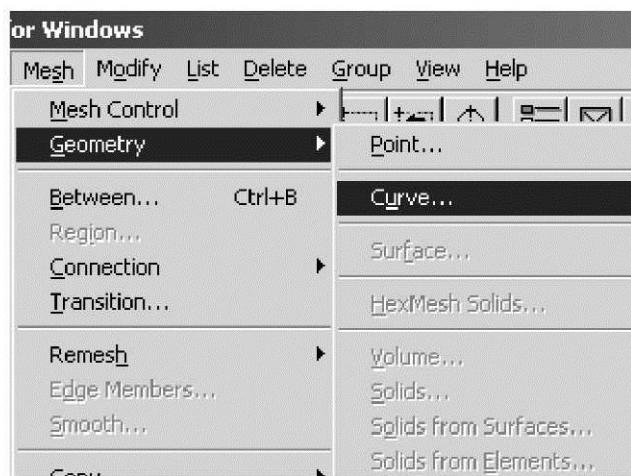


Рис. 4.16

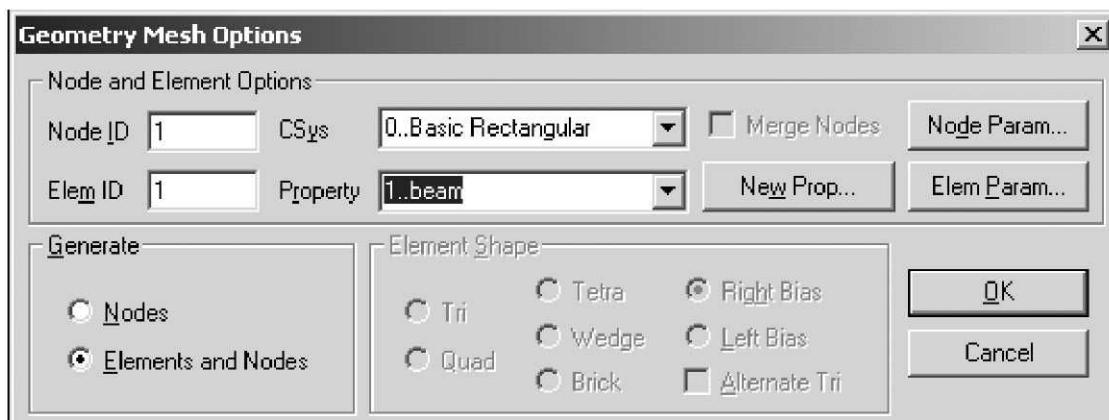


Рис. 4.17

Появится окно выбора ориентации сечения стержня (Vector Locate - Define Element Orientation Vector). В этом окне надо выбрать **Methods**. В появившемся окне (Vector Definition Method) необходимо выбрать глобальные оси координат **Global Axis**.

После выбора осей нажмите **OK**. Теперь в окне (Vector Locate - Define Element Orientation Vector) выбираем **X Axis** (рис. 4.18).

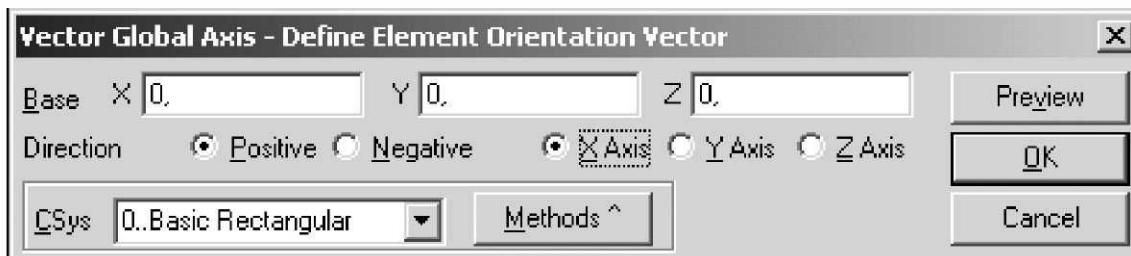


Рис. 4.18

Тем самым мы устанавливаем ориентацию поперечного сечения, а именно: задаем направление оси Y (рис. 4.11) вдоль оси X (автоматически ось Z будет соответствовать другой поперечной оси). Оси координат рабочего стола всегда находятся в нижнем левом углу. После чего нажмите **OK**. Процесс формирования сетки элементов может занять несколько секунд.

Аналогичным образом производится разбивка на конечные элементы оставшихся стержней (для горизонтальных отрезков выберите ось Y).

Далее найдите на панели инструментов кнопку и в появившемся меню (рис. 4.25), отключите опцию **Offsets** (положение центра тяжести).

Выведем нумерацию узлов на нашу модель и одновременно отключим нумерацию точек и отрезков. Это возможно с помощью соответствующего диалогового окна, выбрав **View Options** (показать опции).

Отключим номера стержней. Для этого в разделе **Category** диалогового окна выберите опцию **Labels, Entities and Color** (метки, объекты и цвет), а в разделе **Options** укажите на **Curve** (кривая - этим термином объединены все отрезки линий, в том числе и прямых). После этого справа в диалоговом окне появятся новые оконца, позволяющие настраивать показ меток

(рис. 4.9). В окошке **Label Mode** выберите **0..No Labels**, а затем **Apply** (применить). Аналогичным образом выберите **Point** и **0..No Labels, Apply**.

Посмотрим номера узлов. Для этого в разделе **Category** диалогового окна выберите опцию **Labels, Entities and Color** (метки, объекты и цвет), а в разделе **Options** укажите на **Node** (узел). В окошке **Label Mode** выберите **1..ID**, а затем **Apply** (применить) и **OK**. В результате получим модель разбивки стержневой конструкции на конечные элементы с указанием номеров узлов (как это показано на рис. 4.19).

Теперь необходимо учесть еще один важный момент. Так как разбивка на конечные элементы для каждого стержня велась раздельно, в местах стыковки стержней получились два различных узла (рис. 4.19). Это узлы 11и12, 17и18, 23и24. Т.е. стержни не связаны в узловых точках. Поэтому узлы в местах стыковки стержней необходимо объединить. Иначе это приведет к тому, что стержни будут работать независимо друг от друга.

Выберите команду **Tools Check Coincident_Nodes** (контроль совпадающих узлов). В появившемся окне (Entity Selection - Enter Node(s) to Check) выберите **Select All** (выбрать все) и нажмите **OK**. В появившемся диалоговом окне ответьте на вопрос **Нет**.

Далее появится окно **Check/Merge Coincident** (объединение совпадающих узлов), изображенное на рис. 4.20. Поставьте флажок в окошке **Merge Coincident Entities** и нажмите **OK**.

В результате получаем по одному узлу в точке стыковки стержней (рис. 4.21). Не забывайте обновлять рабочий стол, два раза щелкнув левой кнопкой мыши в рабочую область.

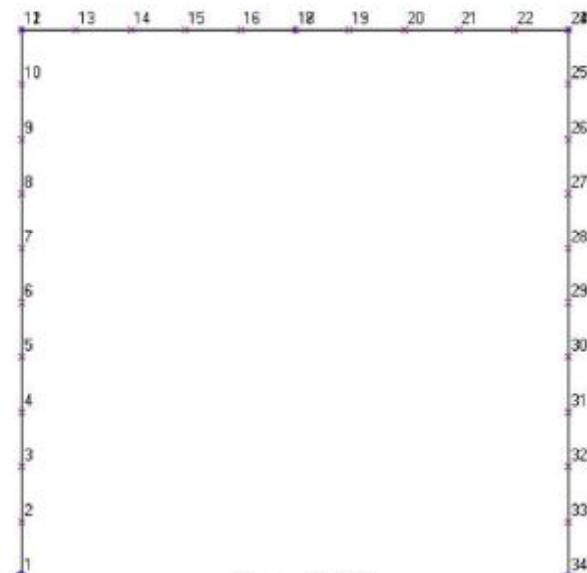


Рис. 4.19

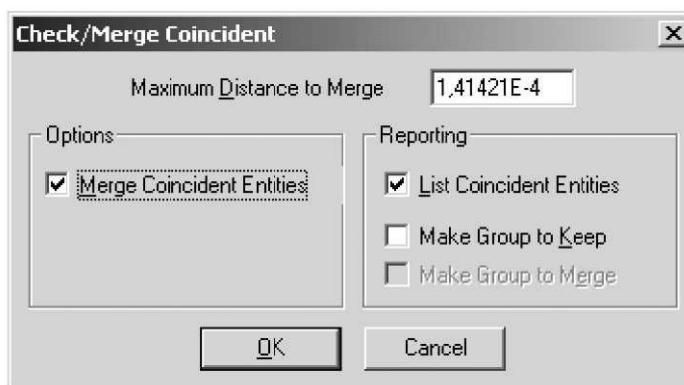


Рис. 4.20

Чтобы номера элементов и узлов не загромождали чертеж, в меню **View Options...** укажите опцию для их «отключения».

На рис. 4.21 изображена модель конструкции в стержневой интерпретации, т.е. конечные элементы представлены в виде линейных отрезков. Существует возможность отобразить **профиль** конечных элементов, как это показано на рис. 4.22.

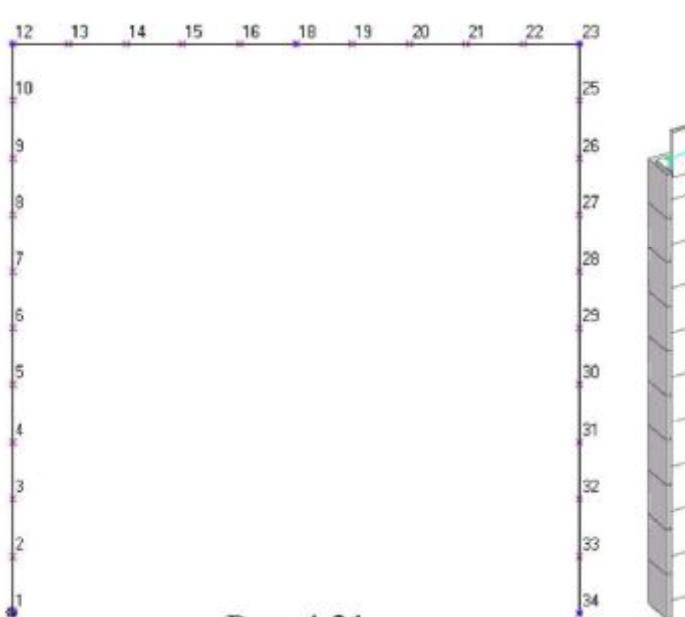


Рис. 4.21

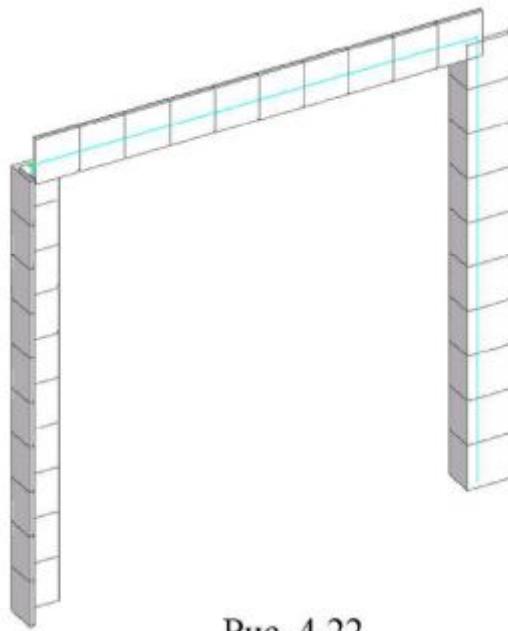


Рис. 4.22

Для этого необходимо проделать:

1) Повернем модель в одну из аксонометрий, выполнив команду **View Rotate**. В результате всплывает окно, изображенное на рис. 4.23.



Рис. 4.23

Выберем **Trimetric** (триметрия).

2) Выполним команду **View Options...** и в появившемся окне (рис. 4.24) выберем **Element – Orientation/Shape** и **2..Show Inertia Ratio**. В результате получим картинку конечных элементов в виде прозрачных параллелограммов.

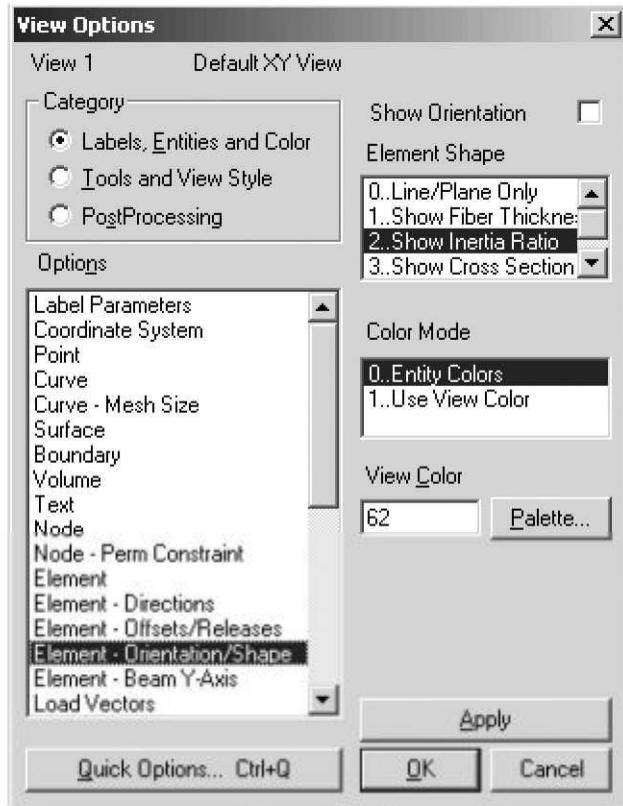


Рис. 4.24

3) Далее найдите на панели инструментов кнопку . И в появившемся меню (рис. 4.25) выберите **Render** (представить), **Fill** (залить), **Shading** (затенить).

В режиме **Render** есть возможность свободно вращать модель, нажав левую кнопку мыши.

Вернемся к исходному стержневому состоянию.

Отключите **Render**, **Fill** и **Shading**.

Выполните команду **View Options...** и в появившемся окне (рис. 4.24) выберите **Element – Orientation/Shape** и **0..Line/Plane Only**.

Повернем модель в плоскость XY, выполнив команду **View Rotate** и **XY Top, OK** (рис. 4.23).

Задание граничных условий. Сформируем граничные условия, указанные на рис. 4.1. Выберите в меню команду **Model Constraint Nodal** (закрепление по узлам) (рис. 4.26). Появится окно (рис. 4.27), в котором следует указать вариант закрепления, например "узловое закрепление", нажмите **OK**.



Рис. 4.25



Рис. 4.26

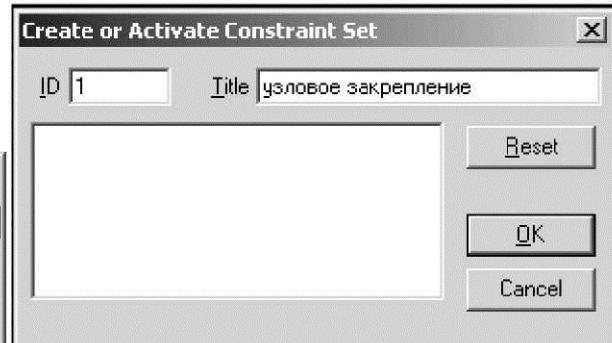


Рис. 4.27

Появится окно (рис. 4.28), в котором следует отметить мышкой закрепляемые с одинаковой степенью узлы, например 1 и 34, нажмите **OK**.

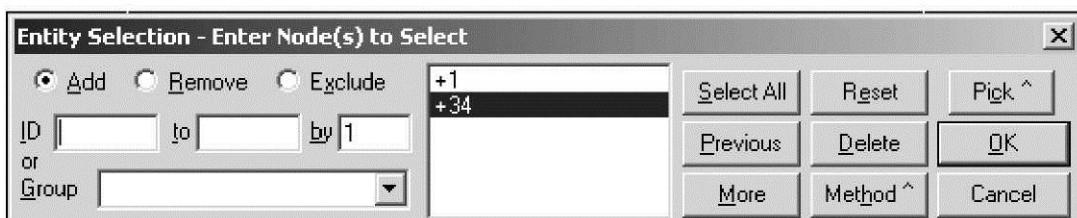


Рис. 4.28

Появится новое диалоговое окно - для закрепления группы отмеченных узлов по степеням свободы (рис. 4.29).

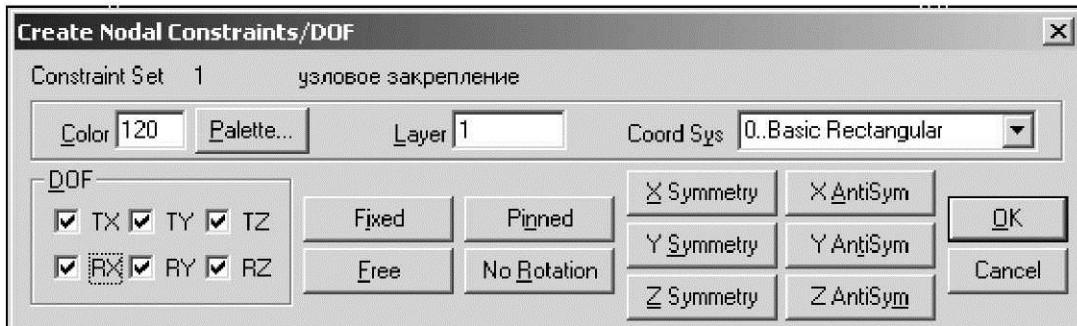


Рис. 4.29

В блоке DOF - Degrees Of Freedom (степени свободы) следует мышью отметить закрепляемые перемещения (по направлениям системы координат, определяемой в окончке Coord Sys). Закрепление узлов можно установить и проще - с помощью кнопок Fixed (полное закрепление), Pinned

(шарнирное закрепление), Free (без закреплений) или No Rotation (закрепление вращений). Здесь же можно задать условия симметрии относительно указанных узлов. Выберите кнопку **Fixed**, т.к. узлы 1 и 34 жестко защемлены, а затем - **OK**. Аналогичным образом поступаем с узлами 12 и 23, с той лишь разницей, что оставляем возможность для этих узлов поворачиваться вокруг оси **Z** (рис. 4.30). Так как этого требует условие задачи.

Выберите далее кнопку **OK**, а затем **Cancel** для выхода из окна задания закреплений. В результате модель примет вид как на рис. 4.31.

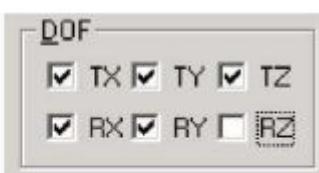


Рис. 4.30

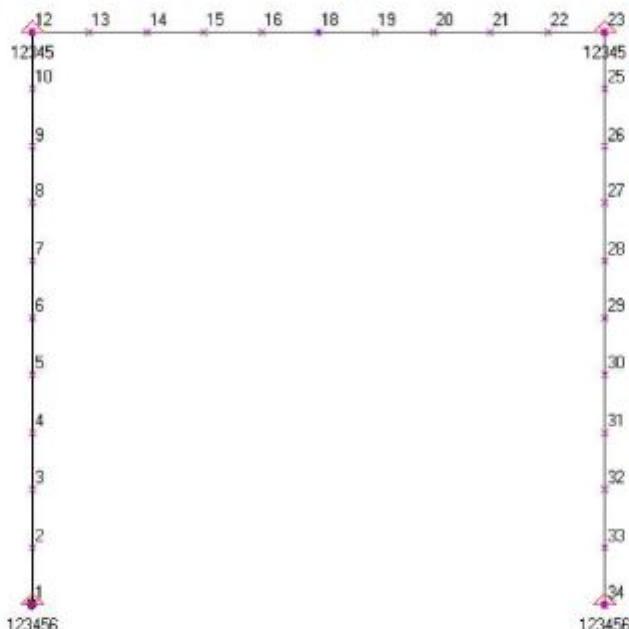


Рис. 4.31

Поясним нумерацию в закрепляемых узлах. В узле существует шесть степеней свободы:

- 1 - запрет перемещений в направлении оси X, TX;
- 2 - запрет перемещений в направлении оси Y, TY;
- 3 - запрет перемещений в направлении оси Z, TZ;
- 4 - запрет поворотов вокруг оси X, RX;
- 5 - запрет поворотов вокруг оси Y, RY;
- 6 - запрет поворотов вокруг оси Z, RZ.

Таким образом, нумерация 123456 – отсутствие всех шести перемещений, т.е. жесткое защемление, а 12345 – отсутствие первых пяти перемещений, т.е. свобода только по 6 перемещению (угол поворота вокруг оси Z, шарнир).

4.2. Статический анализ

Задание нагрузжения. Сформируем нагрузжение модели, указанное на рис. 4.1. Выберите в меню команду **Model Load Nodal** (нагружение по узлам) (рис. 4.32). Появится окно (рис. 4.33), в котором следует указать вариант нагружения, например "Нагрузка", нажмите **OK**.

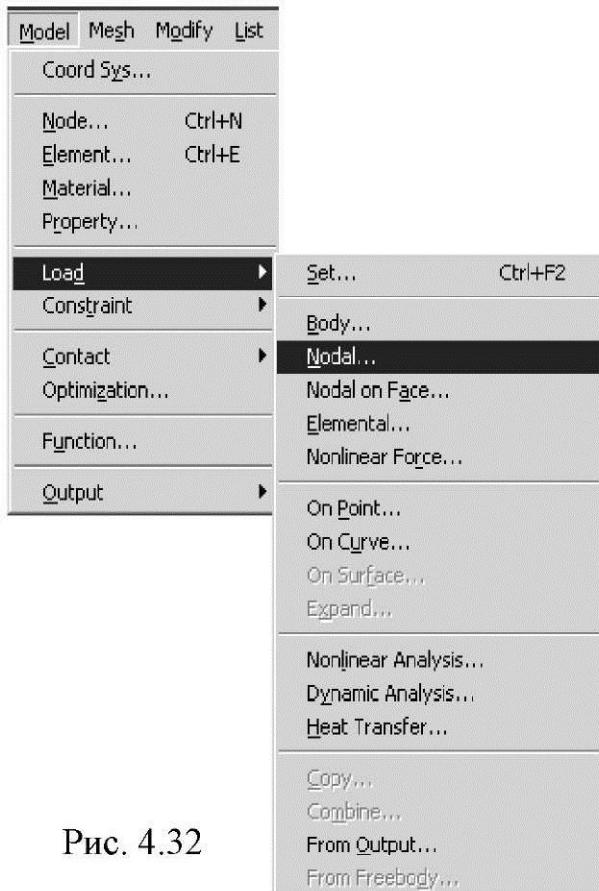


Рис. 4.32

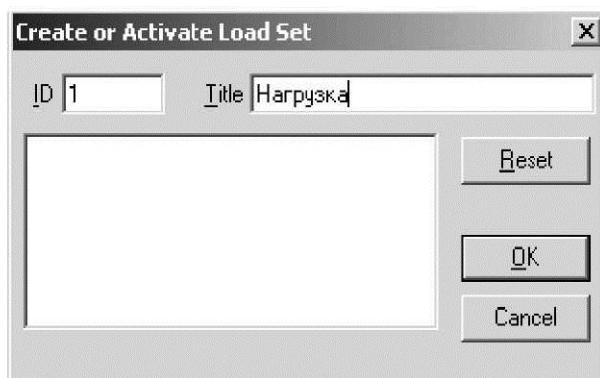


Рис. 4.33

Далее появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.34. Отметьте щелчком левой кнопки мыши 18 узел (рис. 4.31). После введения номера узла выберите **OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.35.

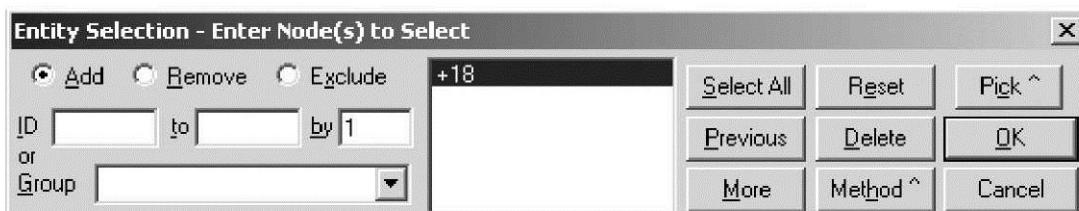


Рис. 4.34

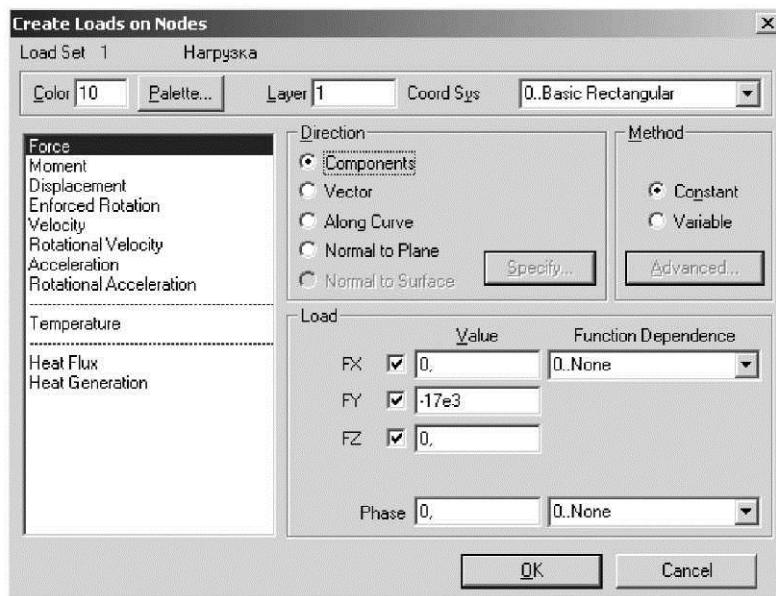


Рис. 4.35

В этом окне необходимо выбрать **Force** (усилие), а в окошке Value FY укажите величину сосредоточенной нагрузки, в направлении противоположном оси Y, равную -17KN ($-17\text{e}3$). После этого выберите **OK** и **Cancel**. Таким образом, сосредоточенная нагрузка задана.

Для задания распределенной нагрузки поступаем следующим образом.

Укажите команду меню **Model Load Elemental** (задание нагрузки в элементе), которая вызовет диалоговое окно, изображенное на рис. 4.36. Отметьте щелчком левой кнопки мыши конечные элементы, принадлежащие левой вертикальной балке. После введения конечных элементов выберите **OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.37. В этом окне выберите **Distributed Load** (распределенная нагрузка). Далее необходимо вычислить погонную равномерную нагрузку по формуле: $q_1(y) = \frac{Q_1}{l} = \frac{64000\text{H}}{1\text{m}} = 64\text{KN/m}$. Т.к. распределенная нагрузка Q_1 направлена в направлении противоположном оси X, в окошках **Load - End A** (нагрузка на торце A) и **Load - End B** (нагрузка на торце B) укажите $-64\text{e}3$. После этого нажмите **OK**.

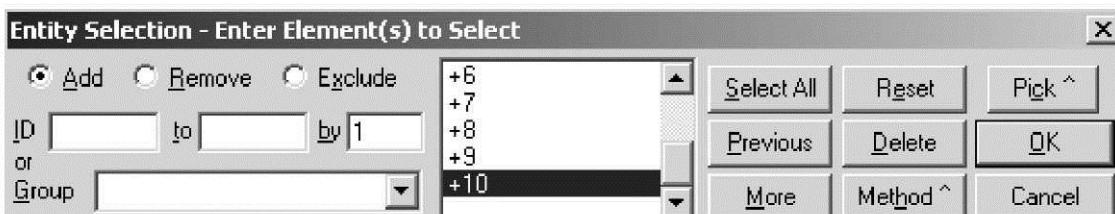


Рис. 4.36

Появится новое окно **Distributed Load Direction**, в котором выберите направление действия распределенной нагрузки (Global X), как указано на рис. 4.38. После этого нажмите **OK**.

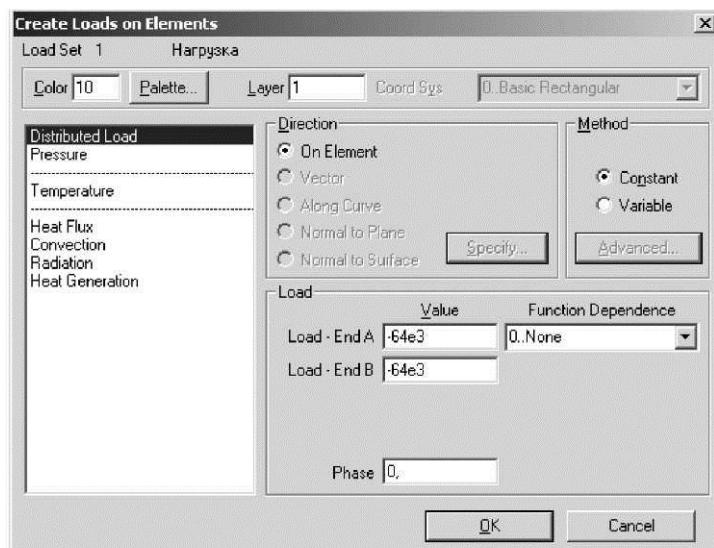


Рис. 4.37

Вновь появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.36. Отметьте щелчком левой кнопки мыши нижний конечный элемент правой вертикальной балки. После введения конечного элемента выберите **OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.37. В этом окне выбе-



Рис. 4.38

рите **Distributed Load** (распределенная нагрузка). Далее необходимо вычислить погонную треугольную нагрузку по формуле: $q_{2(y)} = \frac{y \cdot Q_2}{l} = \frac{y \cdot Q_1}{l \cdot 2}$.

Результаты расчетов по каждому узлу представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

| Номера узлов | Координаты Y, м | Нагрузка, Н/м | Номера узлов | Координаты Y, м | Нагрузка, Н/м |
|--------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|
| 34 | 0,0 | 0 | 28 | 0,6 | 19 200 |
| 33 | 0,1 | 3 200 | 27 | 0,7 | 22 400 |
| 32 | 0,2 | 6 400 | 26 | 0,8 | 25 600 |
| 31 | 0,3 | 9 600 | 25 | 0,9 | 28 800 |
| 30 | 0,4 | 12 800 | 23 | 1,0 | 32 000 |
| 29 | 0,5 | 16 000 | | | |

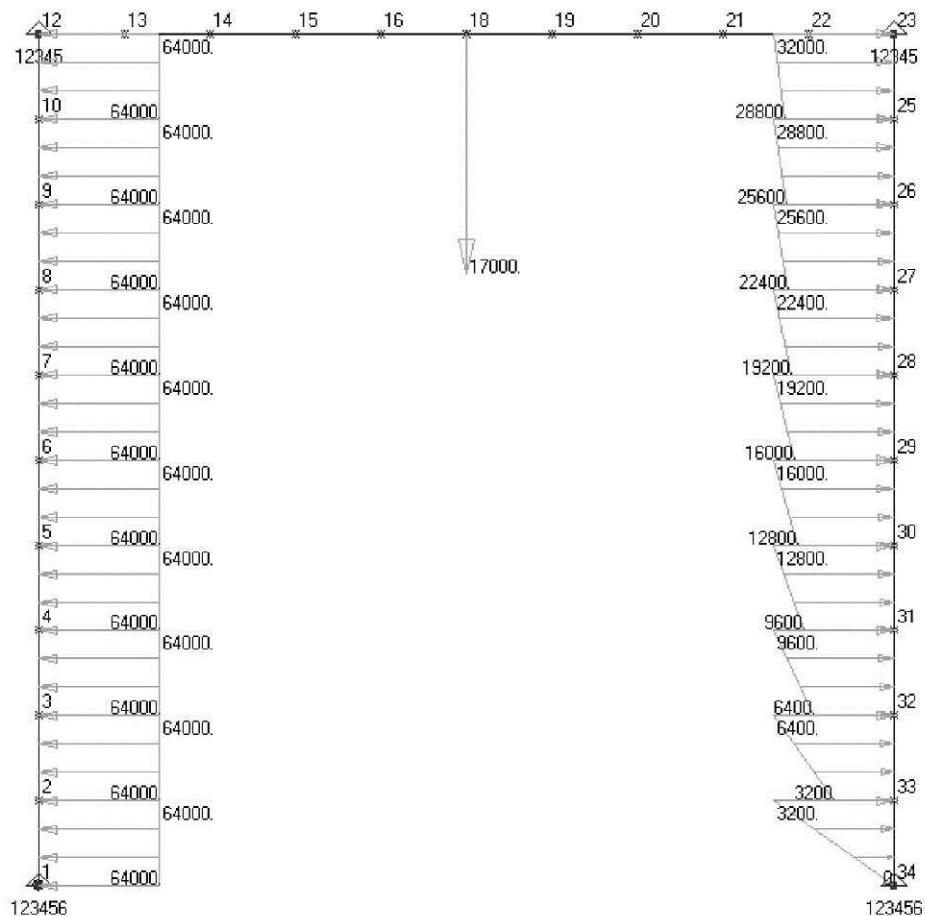


Рис. 4.39

Далее поступаем аналогично тому, как задавали равномерно распределенную нагрузку Q_1 (с той лишь разницей, что в этом случае нагрузку задаем для каждого конечного элемента в отдельности). Например, для выбранного конечного элемента, содержащего узлы 34 и 33, задаем **Load - End A = 3200 Н/м** (для 33 узла) и **Load - End B = 0 Н/м** (для 34 узла). После этого нажмите **OK**.

Появится окно **Distributed Load Direction**, в котором выберите направление действия распределенной нагрузки (Global X), как указано на рис. 4.38. После этого нажмите **OK**.

Далее выбираем следующий снизу элемент с узлами 33 и 32 и повторяем все операции, т.е. **Load - End A = 6400 Н/м** (для 32 узла) и **Load - End B = 3200 Н/м** (для 33 узла). Продолжаем изложенный процесс вплоть до верхнего конечного элемента.

В результате получим полностью сформированную расчетную модель (рис. 4.39).

Теперь не забудьте сохранить ее (задайте команду **File Save**).

Выполнение расчета. Выберите в меню команду **File Analyze...** для установки параметров и запуска вычислительного процесса. Соответствующее диалоговое окно приведено на рис. 4.40.

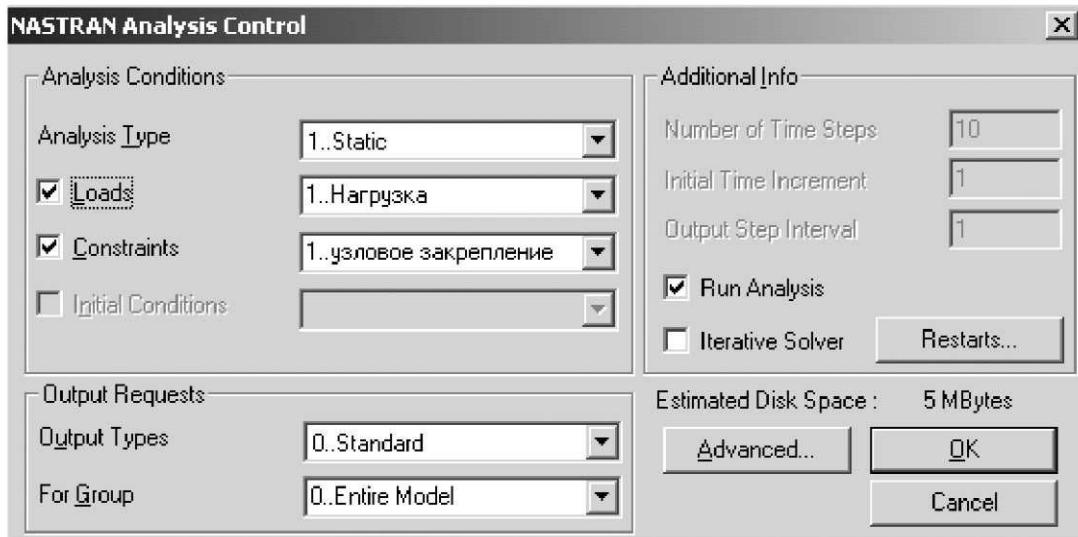


Рис. 4.40

В поле со списком **Analysis Type** (тип анализа) можно выбрать различные варианты расчета (статика, динамика, устойчивость и др.), расшифровку которых можно посмотреть в приложении 1, в нашей задаче нас интересует статика, которая выбирается по умолчанию (1..Static). Выберите **OK**. Появится окно с запросом на сохранение модели – ответьте **OK**.

В процессе расчета (который может занять до нескольких десятков секунд времени в зависимости от быстродействия компьютера и сложности задачи) информация о выполняемых действиях отражается в окне **MSC/NASTRAN Manager**.



Рис. 4.41

После завершения вычислений появляется окно **Message Review** (рис. 4.41), в котором отражается количество ошибок, выявленных в процессе вычислений (Errors), предупреждений о возможной потере точности (Warnings) и прочая информация. Из этого окна можно сразу выйти (**Continue**) либо, если имеются ошибки и предупреждения, просмотреть более подробные сообщения.

Просмотр результатов анализа. Выберите команду **View Select** или на панели инструментов кнопку

позволяющую выбрать в диалоговом окне (рис. 4.42) стиль графического изображения модели и результатов расчетов.

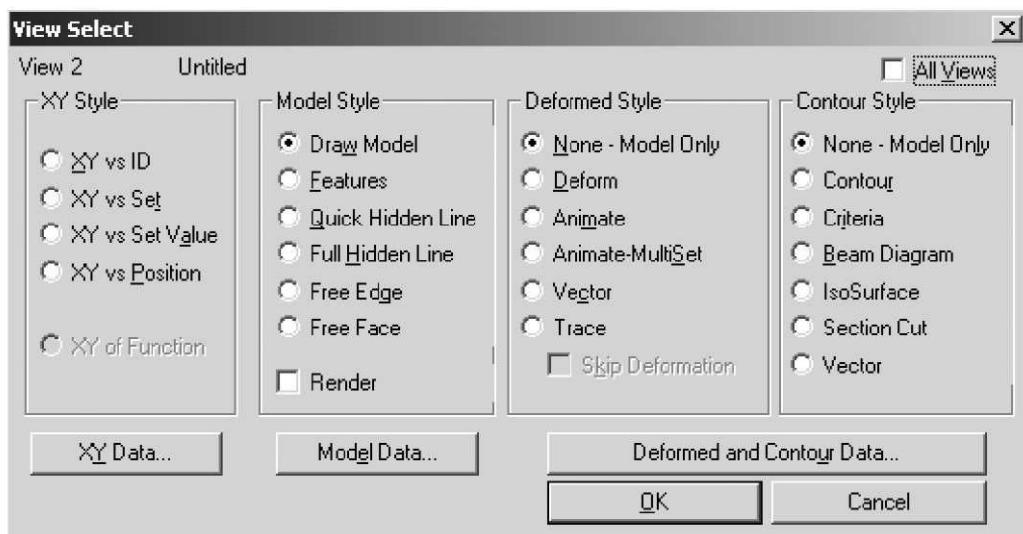


Рис. 4.42

В столбце **Deformed Style** выберите стиль **Deform**. Он представляет изображение упругой линии балки. Выбор поля, подлежащего рассмотрению, производится в диалоговом окне (рис. 4.43), которое вызывается «кнопкой» **Deformed and Contour Data...**

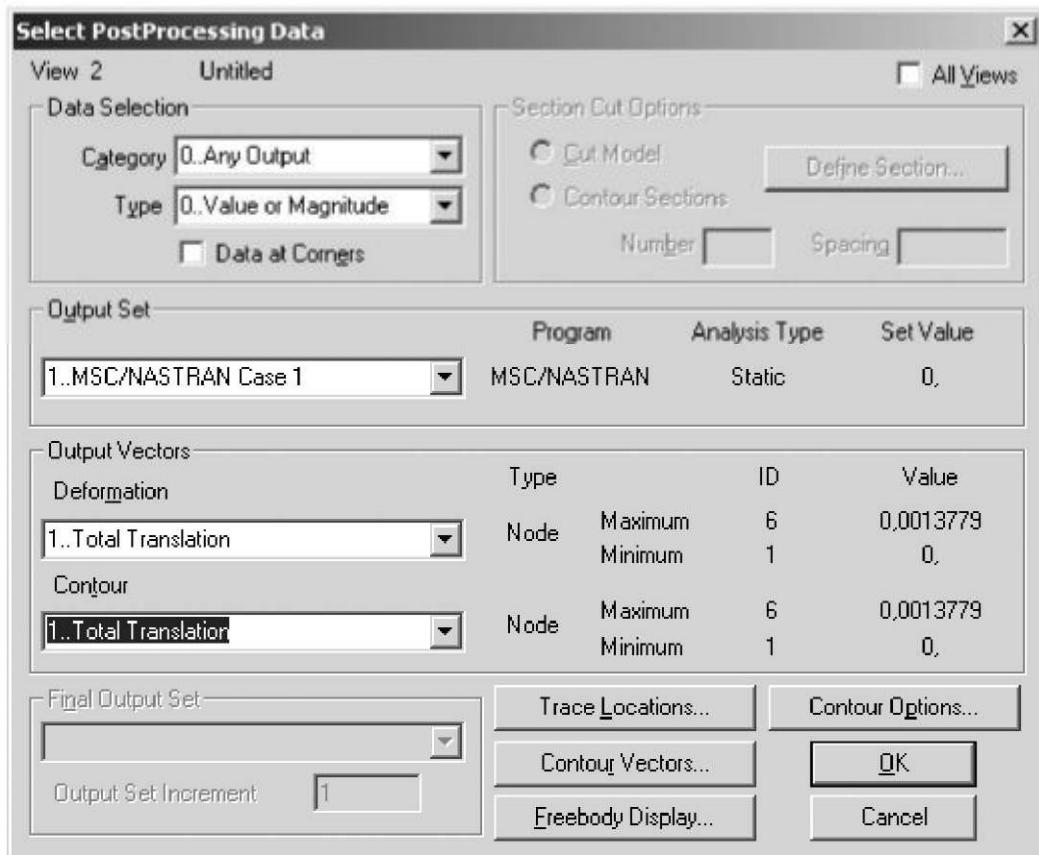


Рис. 4.43

Найдите поле со списком **Output Set**. В этом поле выбирается вариант расчета, т.е. после каждого расчета, если есть необходимость изменять модель, будут появляться все новые и новые результаты. В нашем случае это первый расчет **1..MSC/NASTRAN Case 1**.

Деформацию стержней можно наглядно представить, выбрав в поле со списком **Deformation** пункт **1..Total Translation** (в поле со списком **Deformation** должно быть всегда выбрано только **1..Total Translation**, все остальные пункты в этом поле не имеют смысла). Это поле задает только форму упругой линии балки.

Поле со списком **Contour** задает вид эпюры (перемещения, углы поворотов, моменты и т.д.). Для первого случая выберем **1..Total Translation** (суммарные перемещения). Расшифровка остальных вариантов приведена в приложении 1.

Далее выбираем **OK** и еще раз **OK**.

На рис. 4.44 представлена форма изгиба рассматриваемой стержневой конструкции.

Все графические изображения можно легко представить в виде документов. Для этого используйте команду **File Picture Save...**, которая позволит сохранить рис. в виде **bmp**-файла.

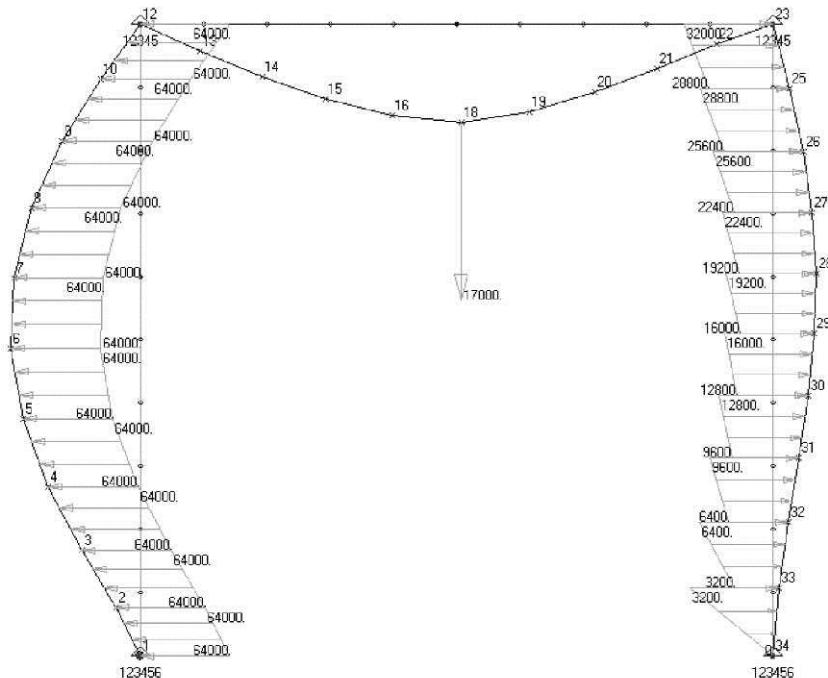


Рис. 4.44

Для оценки эпюр нам необходимо для удобства отключить (убрать) лишнюю информацию. Уберем показ меток узлов, закреплений, нагрузки.

Команда **View Options** → **Node** → **0..No Labels** → **Apply** отключит показ меток узлов. Далее выберем в оконце **Options** (рис. 4.45) **Constraint** (закрепления) и в строке **Draw Entity** уберем флажок → **Apply**.

Аналогичным образом поступим, выбрав в оконце **Options Load-Force** (усилия в узлах) и **Load-Distributed Loads** (распределенная нагрузка), и последовательно для каждого варианта в строке **Draw Entity** уберем флажок → **Apply** и **OK**.

Теперь перейдем к рассмотрению вариантов эпюр.

Выберите команду **View Select** или на панели инструментов кнопку , позволяющую выбрать в диалоговом окне (рис. 4.42) стиль графического изображения модели и результатов расчетов.

В столбце **Contour Style** выберите стиль **Beam Diagram**. Он представляет изображение полей (напряжений, перемещений и пр.) в виде изохром - цветных линий, сливающихся в «радугу», каждый цвет которой означает определенное значение интересующей величины.

Т.к. эпюры обычно прорисовываются в недеформируемом состоянии модели, в столбце **Deformed Style** выберите **None-Model Only** и далее **OK**.

В результате получаем эпюру суммарных перемещений (рис. 4.46).

Для более плавного перетекания слоев задайте команду **Render**. Для этого в столбце **Model Style** окна **View Select** (рис. 4.42) поставьте флажок в строке **Render**.

Проведем анализ прочности. Для этого необходимо оценить напряжения, возникающие в конструкции.

Выберите команду **View Select** или на панели инструментов кнопку , позволяющую выбрать в диалоговом окне (рис. 4.42) стиль графического изображения модели и результатов расчетов. Выбор поля,

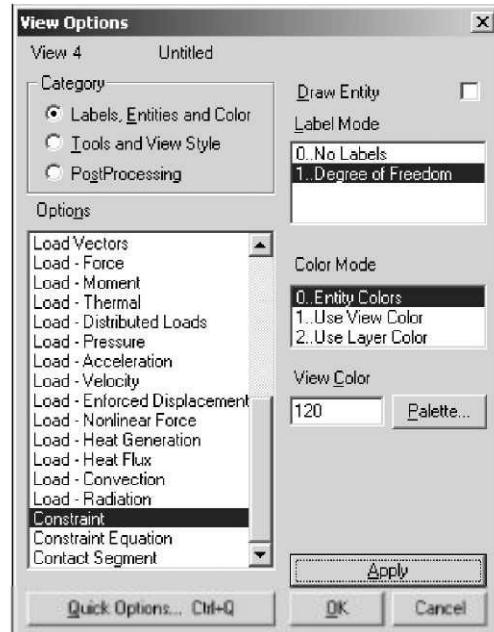


Рис. 4.45

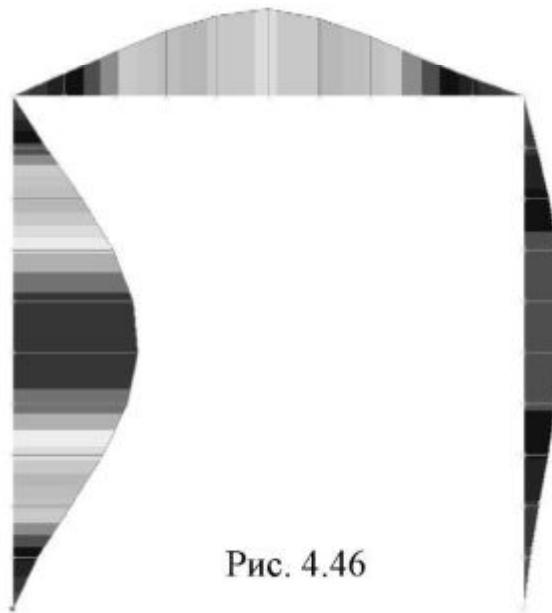


Рис. 4.46

подлежащего рассмотрению, производится в диалоговом окне (рис. 4.43), которое вызывается «кнопкой»

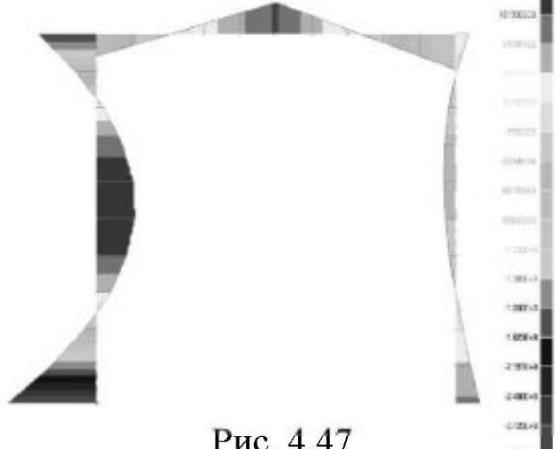


Рис. 4.47

Deformed and Contour Data...

В поле со списком **Contour** выберем **3139..Beam EndA Pt1 Comb Stress** (напряжения). Далее выбираем **OK** и еще раз **OK**.

На рис. 4.47 представлена эпюра распределения напряжений стержневой конструкции.

Максимальные по модулю напряжения ($\sigma=2.992\text{e}8$ Па) возникают в нижней части левой вертикальной балки.

Предел текучести стали 3 равен $\sigma_{T(st3)}=2.35\text{e}8$ Па. Для сравнения в нашей задаче $\sigma>0.7\sigma_{T(st3)}$ ($2.992\text{e}8 > 1.645\text{e}8$). Величина 0.7 устанавливает запас, т.е. допустимую величину напряжений, к которой можно "приблизиться".

Делаем заключение, что смоделированная нами конструкция не выдержит заданных нагрузок (возникнут пластические деформации). К решению этой проблемы можно подойти с двух сторон, либо уменьшить нагрузку, либо увеличить жесткость балок. Как правило, нагрузки мы не вправе изменить, т.к. конструкцию обычно моделируют под уже существующую задачу, где усилия заданы. Поэтому будем увеличивать жесткость.

Выполним команду **Modify Edit Property**, как указано на рис. 4.48.

В появившемся окне выберите свойства конструкции, которые будут изменены, в нашем случае можно выбрать все (**Select All**), т.к. у нас только один тип балки. Далее **OK**.

В появившемся окне выберите **Shape**, а далее в окне **Cross Section Definition**, поставьте флажок в строке **Change Shape**. Теперь можно вносить изменения, как показано на рис. 4.49.

(Высота H=0.15м,
Ширина Width=0.09м,
Толщина полки Thick, Bottom=0.015м,
Толщина стенки Thickness=0.015м).

После внесения изменений **OK** и **OK**.

Теперь, после внесения изменений необходимо сделать расчет (**File Analyze...**). После расчета вновь делаем оценку прочности.

Найдите поле со списком **Output Set** (рис. 4.43). В этом поле выбирается вариант расчета, т.е. после каждого расчета будут появляться все новые и новые результаты. В нашем случае это второй расчет **2..MSC/NASTRAN Case 1**. В поле со списком **Contour** выберем

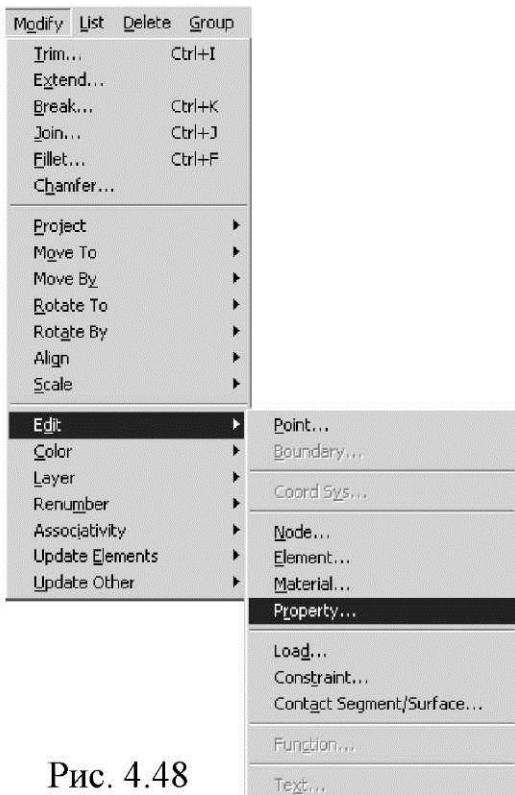


Рис. 4.48

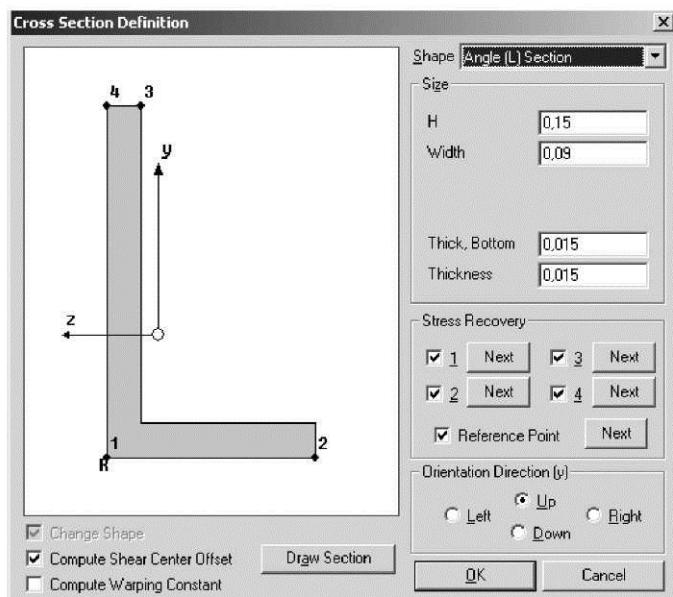


Рис.4.49

3139..Beam EndA Pt1 Comb Stress (напряжения). Далее выбираем **OK** и еще раз **OK**.

Максимальные по модулю напряжения ($\sigma=9.501e7$ Па) возникают в нижней части левой вертикальной балки.

Предел текучести стали 3 равен $\sigma_{T(st3)}=2.35e8$ Па. Для сравнения в нашей задаче $\sigma < 0.7\sigma_{T(st3)}$ ($9.501e7 > 1.645e8$).

$$\text{Коэффициент запаса } k = \frac{0.7\sigma_{T(st3)}}{\sigma} = 1.73 .$$

Делаем заключение, что смоделированная нами конструкция выдержит заданные нагрузки с коэффициентом запаса по напряжениям $k=1.73$. Величина k (в идеальном случае должна стремиться к 1) косвенно указывает на излишки материала, т.е. завышенную стоимость конструкции.

4.3. Расчёт на тепловые нагрузки

Рассмотрим стационарную задачу теплопроводности на примере стержневой конструкции, изображенной на рис. 4.54.

В задачах теплопроводности модель конструкции и условия закрепления формируются аналогично двум предыдущим задачам.

При задании свойств (**Property**) задайте профиль как указано на рис. 4.11 и 4.12.

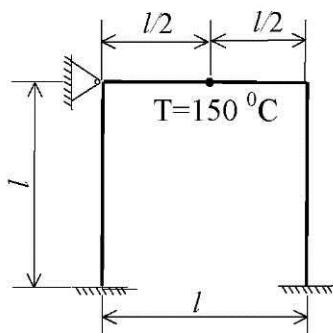


Рис. 4.54

Материал: St3
 $E=2.1e11 \text{ Н/м}^2$
 $\nu=0.3$

Предел текучести $Tension=235e6 \text{ Па}$

Размер: $l=1 \text{ м}$

Профиль - уголок

Высота $H=0.1 \text{ м}$

Ширина $Width=0.07 \text{ м}$

Толщина полки $Thick, Bottom=0.01 \text{ м}$

Толщина стенки $Thickness=0.01 \text{ м}$

Нагрузка: в точке 1 приложен источник нагрева $T=150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Особенности заключаются в задании свойств материала (рис. 4.55). В оконце **Reference Temp** (указание начала отсчета температур, т.е. по сути, это температура, при которой происходила сборка конструкции) укажите $0 \text{ }^\circ\text{C}$. В оконце **Expansion Coeff** необходимо указать коэффициент линейного расширения, в нашем случае, $a=6,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{ }^\circ\text{C}$.

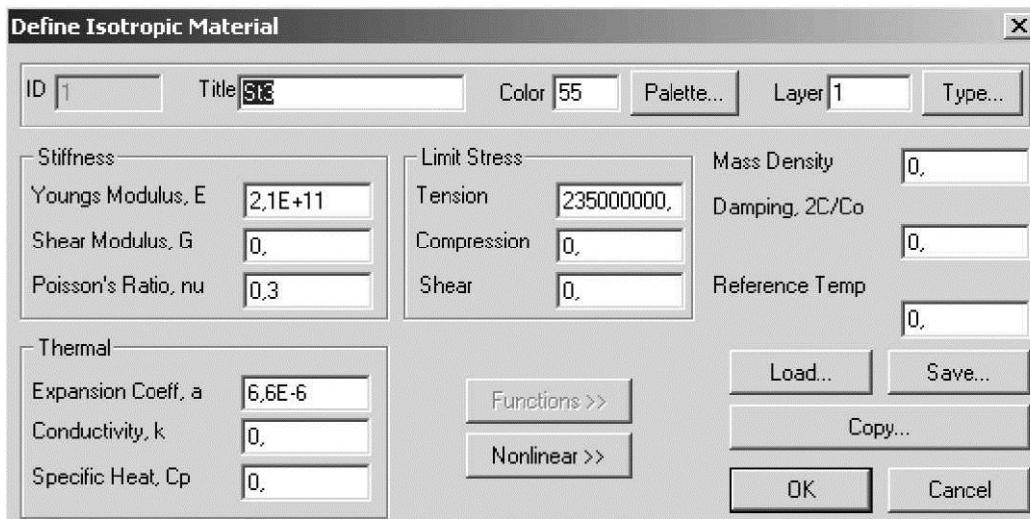


Рис. 4.55

Для задания температурной нагрузки выберите команду **Model Load Body, OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 4.56. Активизируйте раздел Thermal, для этого в оконце Active поставьте флажок. В оконце Default Temperature (нагрев тела от температуры окружающей среды) задайте $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

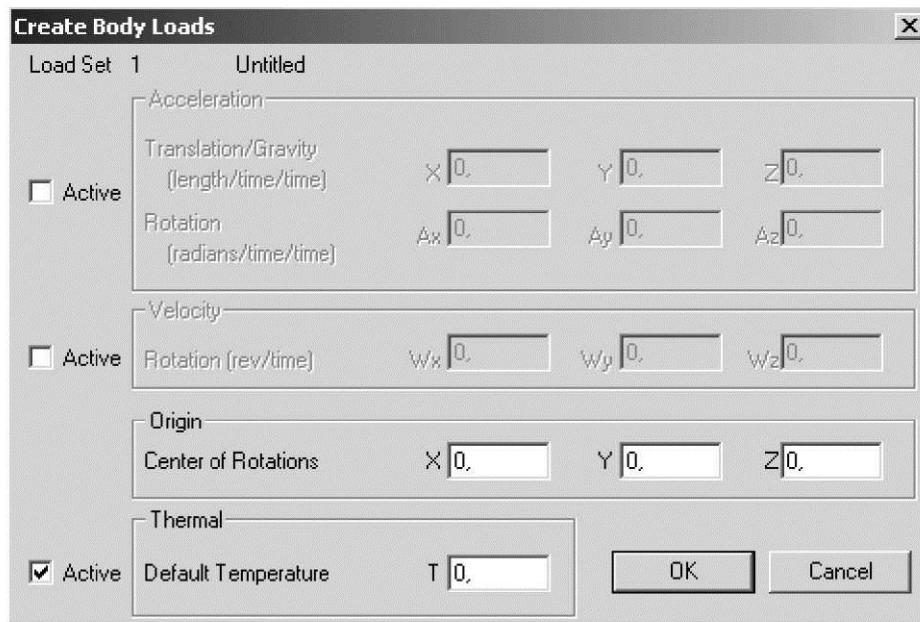


Рис. 4.56

Далее выберите команду **Model Load Nodal** и укажите номер узла, к которому будет приложен точечный источник тепловой нагрузки, для нашей задачи это будет 17 узел (рис. 4.58). В окне **Create Nodal Loads** выберите **Temperature** и укажите температуру $T=150$ $^{\circ}\text{C}$ в оконце Temperature (рис. 4.57).

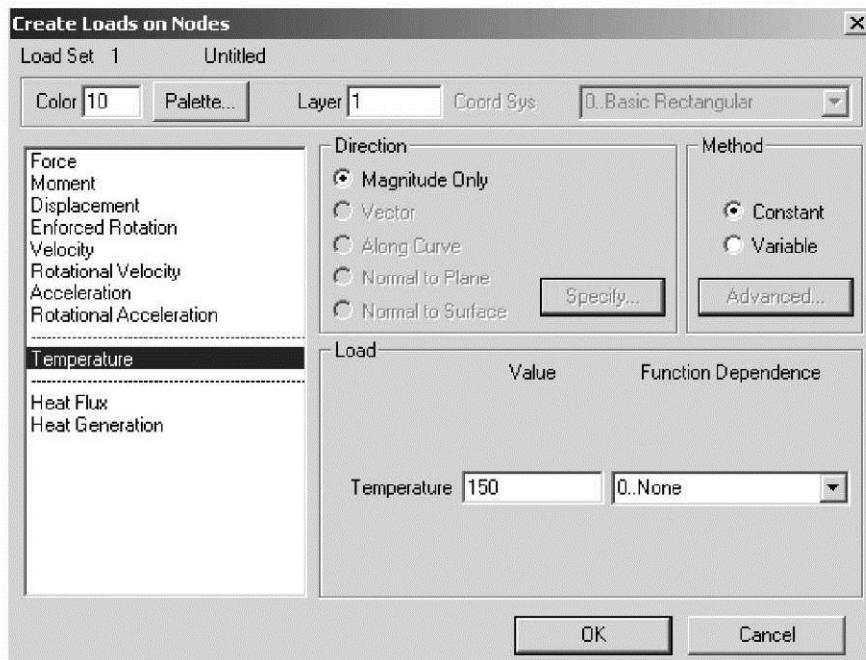


Рис. 4.57

После этого можно запустить программу на счет.

Результаты деформации стержневой системы от приложения тепловой нагрузки указаны на рис. 4.59.

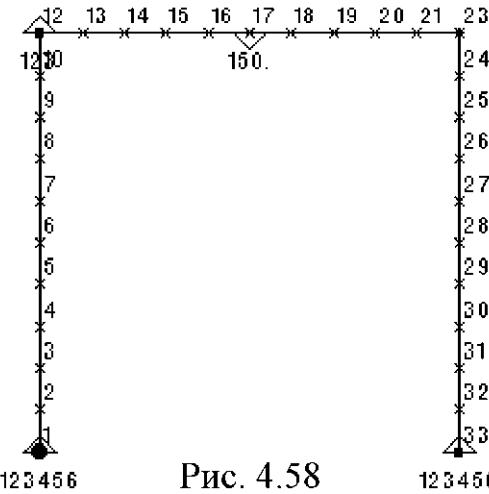


Рис. 4.58

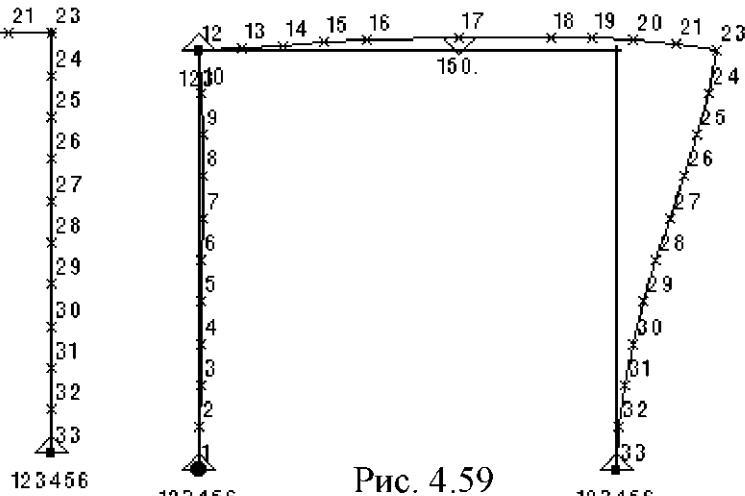


Рис. 4.59

4.4. Варианты заданий для лабораторных работ

4.4.1. Лабораторная работа 1

Цель работы: Провести статический анализ напряженно-деформированного состояния стержневой системы. Получить навыки работы с программным комплексом NASTRAN при решении таких задач.

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- 1) исходные данные;
- 2) расчетную модель с указанием номеров узлов, конечных элементов, закреплений, нагрузки;
- 3) значения перемещений и напряжений;
- 4) сделать заключение о прочности конструкции;
- 5) в случае необходимости подобрать профиль.

В табл. 4.2, 4.3, 4.4 представлены варианты заданий, в табл. 4.5 - расчетные схемы для лабораторной работы.

Материал: Сталь3 ($E=2.1 \cdot 10^11$ Н/м 2 ; $\nu=0.3$; $\sigma_t=235 \cdot 10^6$ Па).

Нагрузка: $Q_2=Q_1/2$.

$$\text{Погонная нагрузка: } q_{1(x)} = \frac{Q_1}{l}; q_{2(x)} = \frac{x \cdot Q_2}{l} = \frac{x \cdot Q_1}{l \cdot 2}.$$

Стреки рекомендуется разбивать на конечные элементы количеством не менее 5, выдерживая одинаковую степень дискретности по длине для разных балок (все конечные элементы примерно равной длины).

Профиль необходимо сориентировать так, чтобы ось наибольшего момента инерции была перпендикулярна прилагаемой нагрузке.

На рис. 4.60, 4.61 и 4.62 показаны способы формирования профилей.

Таблица 4.2

| Вариант | Размер <i>l</i> , м | Профиль Shape | Высота <i>H</i> , м | Ширина Width, м | Толщина стенки Thickness, м | Толщина полки Thick, Bottom, м | Нагрузка | |
|---------|---------------------|---------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|---------------------|
| | | | | | | | P, КН | Q ₁ , КН |
| 1 | 1.2 | Уголок | 0.10 | 0.07 | 0.010 | 0.010 | 17 | 64 |
| 2 | 0.9 | Уголок | 0.11 | 0.08 | 0.012 | 0.012 | - | 52 |
| 3 | 1.0 | Уголок | 0.10 | 0.06 | 0.010 | 0.011 | - | 47 |
| 4 | 1.5 | Уголок | 0.12 | 0.09 | 0.013 | 0.015 | 15 | 50 |
| 5 | 1.4 | Уголок | 0.15 | 0.11 | 0.015 | 0.016 | - | 40 |
| 6 | 1.8 | Уголок | 0.14 | 0.10 | 0.012 | 0.012 | - | 35 |
| 7 | 2.0 | Уголок | 0.17 | 0.14 | 0.018 | 0.018 | 12 | 30 |
| 8 | 1.3 | Уголок | 0.11 | 0.09 | 0.012 | 0.015 | 20 | 32 |
| 9 | 1.4 | Уголок | 0.14 | 0.11 | 0.015 | 0.015 | - | 42 |
| 10 | 1.5 | Уголок | 0.16 | 0.15 | 0.020 | 0.021 | - | 20 |

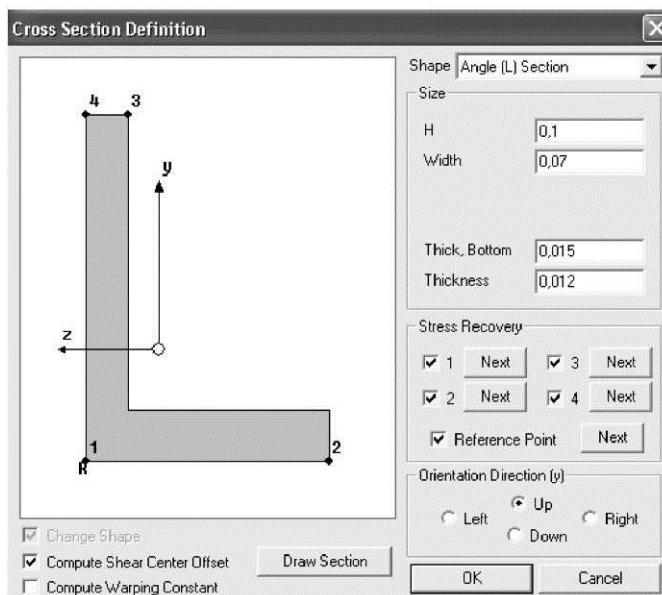


Рис. 4.60

Таблица 4.3

| Вариант | Размер <i>l</i> , м | Профиль Shape | Высота <i>H</i> , м | Ширина Width, Top, м | Толщина стенки Thickness, м | Толщина полки Thick, Top, м | Нагрузка | |
|---------|---------------------|---------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|---------------------|
| | | | | | | | P, КН | Q ₁ , КН |
| 11 | 1.2 | Тавр | 0.10 | 0.07 | 0.010 | 0.010 | - | 25 |
| 12 | 0.9 | Тавр | 0.11 | 0.08 | 0.012 | 0.012 | - | 30 |
| 13 | 1.0 | Тавр | 0.10 | 0.06 | 0.010 | 0.011 | 10 | 20 |
| 14 | 1.5 | Тавр | 0.12 | 0.09 | 0.013 | 0.015 | 15 | 20 |
| 15 | 1.4 | Тавр | 0.15 | 0.11 | 0.015 | 0.016 | 17 | 25 |
| 16 | 1.8 | Тавр | 0.14 | 0.10 | 0.012 | 0.012 | 18 | 33 |
| 17 | 2.0 | Тавр | 0.17 | 0.14 | 0.018 | 0.018 | 14 | 45 |
| 18 | 1.3 | Тавр | 0.11 | 0.09 | 0.012 | 0.015 | - | 40 |
| 19 | 1.4 | Тавр | 0.14 | 0.11 | 0.015 | 0.015 | - | 42 |
| 20 | 1.5 | Тавр | 0.16 | 0.15 | 0.020 | 0.021 | 19 | 34 |

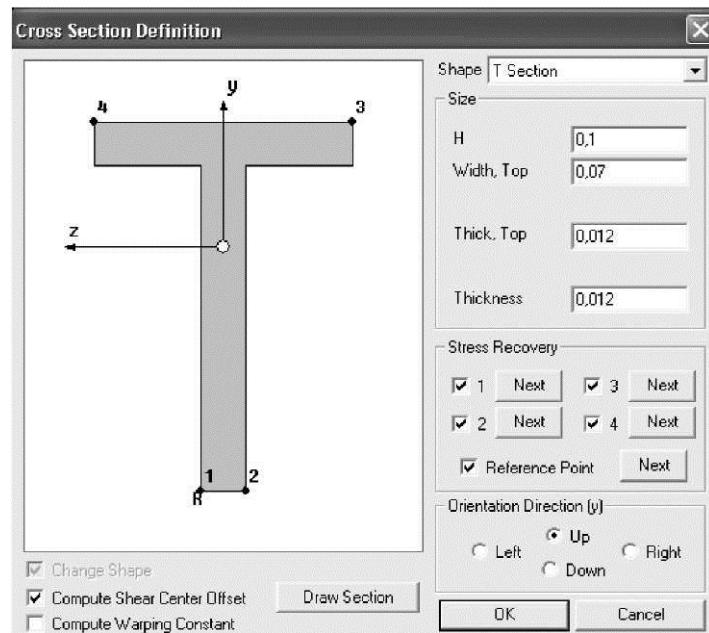


Рис. 4.61

Таблица 4.4

| Вариант | Размер l , м | Профиль Shape | Радиус Radius, м | Толщина стенки Thickness, м | Нагрузка | |
|---------|-------------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|----------|---------------------|
| | | | | | P, кН | Q ₁ , кН |
| 21 | 1.5 | Труба | 0.10 | 0.010 | 17 | 35 |
| 22 | 1.4 | Труба | 0.10 | 0.011 | - | 30 |
| 23 | 1.8 | Труба | 0.12 | 0.015 | 25 | - |
| 24 | 2.0 | Труба | 0.15 | 0.018 | - | 40 |
| 25 | 1.3 | Труба | 0.11 | 0.012 | 18 | 34 |
| 26 | 1.4 | Труба | 0.14 | 0.015 | 20 | 36 |

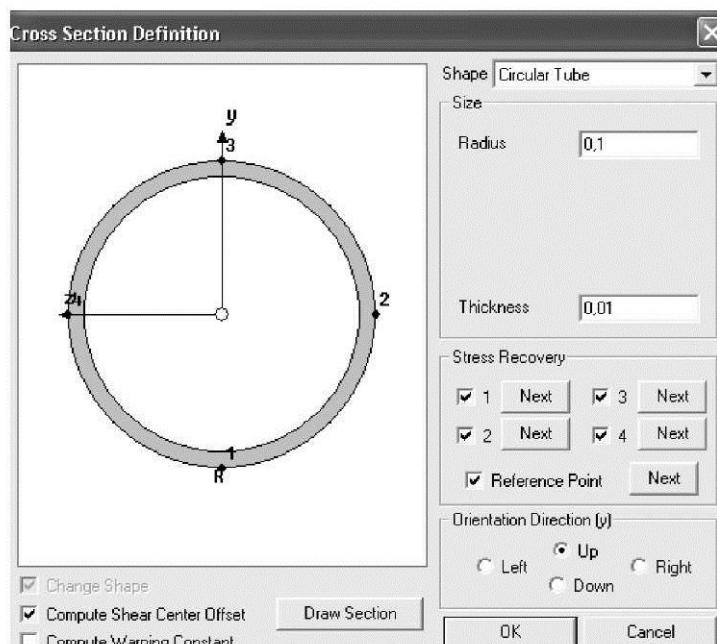
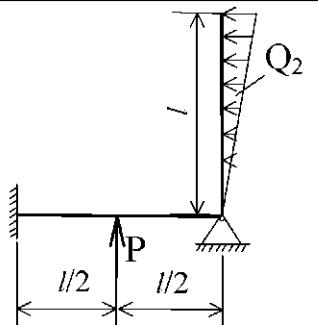
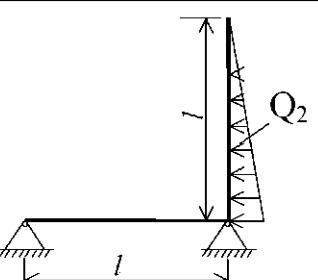
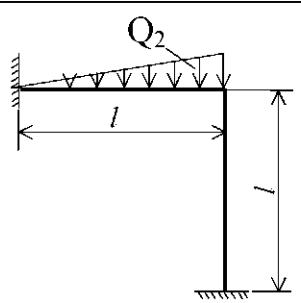
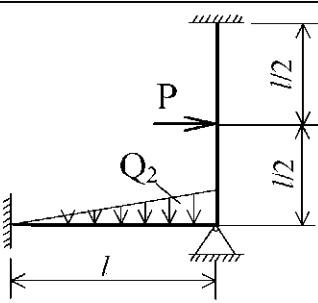
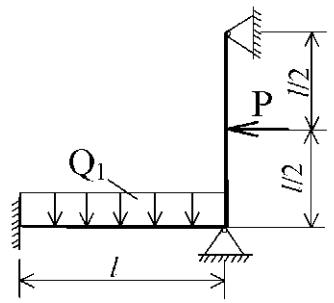
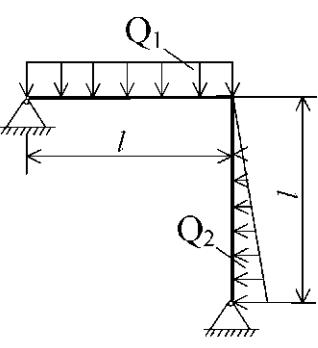
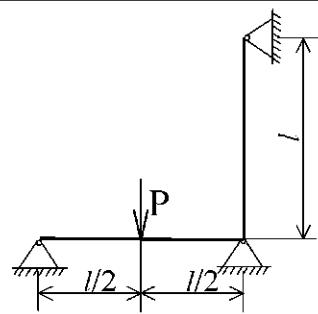
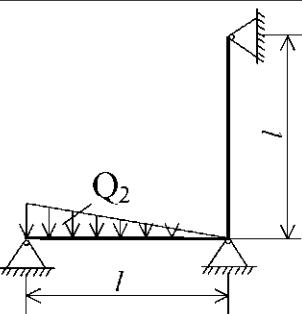
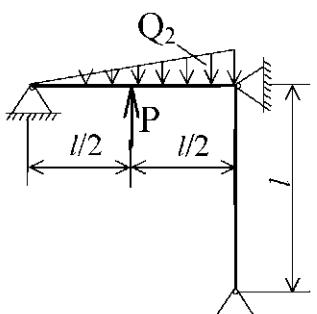
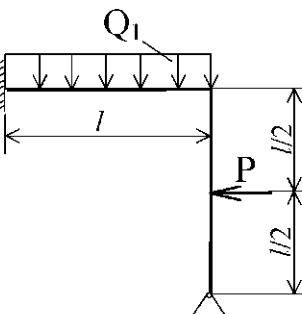


Рис. 4.62

Таблица 4.5

| Вариант | Расчетная схема | Вариант | Расчетная схема |
|---------|-----------------|---------|-----------------|
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | | 2 | |
| 3 | | 4 | |
| 5 | | 6 | |
| 7 | | 8 | |
| 9 | | 10 | |
| 11 | | 12 | |
| 13 | | 14 | |
| 15 | | 16 | |

Продолжение табл. 4.5

| I | 2 | I | 2 |
|----|---|----|--|
| 17 |  | 18 |  |
| 19 |  | 20 |  |
| 21 |  | 22 |  |
| 23 |  | 24 |  |
| 25 |  | 26 |  |

4.4.2. Лабораторная работа 2

Цель работы: Провести анализ теплопроводности плоской рамы. Получить навыки работы с программным комплексом NASTRAN при решении таких задач.

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- 1) исходные данные;
- 2) расчетную модель с указанием номеров узлов, конечных элементов, закреплений, тепловой нагрузки;
- 3) значения перемещений и напряжений.

В табл. 4.6 и 4.7 представлены варианты заданий, на рис. 4.63 - расчетная схема для лабораторной работы.

Материал: Сталь3 ($E=2.1e11 \text{ Н/м}^2$; $\nu=0.3$; $\sigma_t=235e6 \text{ Па}$).

Стержни рекомендуется разбивать на конечные элементы количеством не менее 5, выдерживая одинаковую степень дискретности по длине для разных балок (все конечные элементы примерно равной длины).

Профиль (Shape) – труба. Отношения: $T=0.4B$; $H=0.6B$.

Температурная нагрузка задается посередине отрезка [3, 4] и представлена в табл. 4.7.

Узлы 1, 2, 5, 6, указанные на расчетной схеме (рис. 4.63), закреплены со степенями 1, 2, 3, 4, 5 (шарнир).

Таблица 4.6

| Вариант | Размер $B, \text{ м}$ | Радиус, м | Толщина стенки, м |
|---------|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | | | |
| | | 1-2 | 3-4 | | 5-6 | | | 1-3, 2-4 | | 3-5, 4-6 | |
| 1 | 1.0 | 0.010 | 0.0010 | 0.015 | 0.0015 | 0.018 | 0.0018 | 0.012 | 0.0012 | 0.012 | 0.0012 |
| 2 | 1.1 | 0.011 | 0.0011 | 0.016 | 0.0016 | 0.019 | 0.0019 | 0.013 | 0.0013 | 0.013 | 0.0013 |
| 3 | 1.2 | 0.012 | 0.0012 | 0.017 | 0.0017 | 0.010 | 0.0010 | 0.014 | 0.0014 | 0.014 | 0.0014 |
| 4 | 1.3 | 0.013 | 0.0013 | 0.018 | 0.0018 | 0.011 | 0.0011 | 0.024 | 0.0024 | 0.015 | 0.0015 |
| 5 | 1.4 | 0.014 | 0.0014 | 0.019 | 0.0019 | 0.011 | 0.0011 | 0.018 | 0.0018 | 0.018 | 0.0018 |
| 6 | 1.5 | 0.015 | 0.0015 | 0.010 | 0.0010 | 0.012 | 0.0012 | 0.019 | 0.0019 | 0.019 | 0.0019 |
| 7 | 1.6 | 0.016 | 0.0016 | 0.011 | 0.0011 | 0.019 | 0.0019 | 0.010 | 0.0010 | 0.015 | 0.0015 |
| 8 | 1.7 | 0.017 | 0.0017 | 0.012 | 0.0012 | 0.010 | 0.0010 | 0.011 | 0.0011 | 0.016 | 0.0016 |
| 9 | 1.8 | 0.018 | 0.0018 | 0.013 | 0.0013 | 0.024 | 0.0024 | 0.019 | 0.0019 | 0.024 | 0.0024 |
| 10 | 1.9 | 0.019 | 0.0019 | 0.014 | 0.0014 | 0.025 | 0.0025 | 0.020 | 0.0020 | 0.025 | 0.0025 |
| 11 | 2.0 | 0.020 | 0.0020 | 0.024 | 0.0024 | 0.018 | 0.0018 | 0.027 | 0.0027 | 0.027 | 0.0027 |
| 12 | 2.1 | 0.021 | 0.0021 | 0.025 | 0.0025 | 0.019 | 0.0019 | 0.020 | 0.0020 | 0.020 | 0.0020 |
| 13 | 2.2 | 0.022 | 0.0022 | 0.026 | 0.0026 | 0.021 | 0.0021 | 0.013 | 0.0013 | 0.023 | 0.0023 |
| 14 | 2.3 | 0.023 | 0.0023 | 0.027 | 0.0027 | 0.022 | 0.0022 | 0.014 | 0.0014 | 0.024 | 0.0024 |
| 15 | 2.4 | 0.024 | 0.0024 | 0.020 | 0.0020 | 0.013 | 0.0013 | 0.021 | 0.0021 | 0.025 | 0.0025 |
| 16 | 2.5 | 0.025 | 0.0025 | 0.021 | 0.0021 | 0.014 | 0.0014 | 0.022 | 0.0022 | 0.026 | 0.0026 |

Продолжение табл. 4.6

| Вариант | Размер В, м | Радиус, м | Толщина стенки, м |
|---------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| | | 1-2 | | 3-4 | | 5-6 | | 1-3, 2-4 | | 3-5, 4-6 | |
| 17 | 2.6 | 0.026 | 0.0026 | 0.022 | 0.0022 | 0.021 | 0.0021 | 0.020 | 0.0020 | 0.021 | 0.0021 |
| 18 | 2.7 | 0.027 | 0.0027 | 0.023 | 0.0023 | 0.022 | 0.0022 | 0.021 | 0.0021 | 0.022 | 0.0022 |
| 19 | 2.8 | 0.028 | 0.0028 | 0.032 | 0.0032 | 0.035 | 0.0035 | 0.033 | 0.0033 | 0.033 | 0.0033 |
| 20 | 2.9 | 0.029 | 0.0029 | 0.033 | 0.0033 | 0.028 | 0.0028 | 0.034 | 0.0034 | 0.034 | 0.0034 |
| 21 | 3.0 | 0.030 | 0.0030 | 0.034 | 0.0034 | 0.035 | 0.0035 | 0.028 | 0.0028 | 0.035 | 0.0035 |
| 22 | 3.1 | 0.031 | 0.0031 | 0.035 | 0.0035 | 0.028 | 0.0028 | 0.029 | 0.0029 | 0.030 | 0.0030 |
| 23 | 3.2 | 0.032 | 0.0032 | 0.028 | 0.0028 | 0.028 | 0.0028 | 0.030 | 0.0030 | 0.031 | 0.0031 |
| 24 | 3.3 | 0.033 | 0.0033 | 0.029 | 0.0029 | 0.029 | 0.0029 | 0.031 | 0.0031 | 0.028 | 0.0028 |
| 25 | 3.4 | 0.034 | 0.0034 | 0.030 | 0.0030 | 0.030 | 0.0030 | 0.032 | 0.0032 | 0.029 | 0.0029 |
| 26 | 3.5 | 0.035 | 0.0035 | 0.031 | 0.0031 | 0.031 | 0.0031 | 0.033 | 0.0033 | 0.029 | 0.0029 |

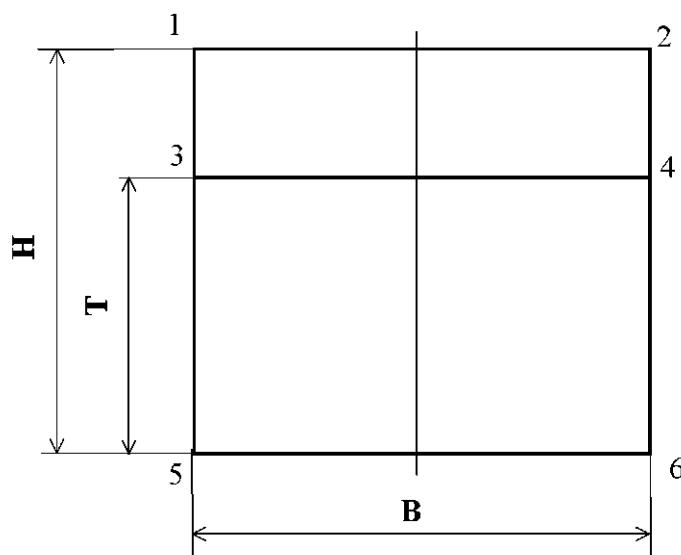


Рис. 4.63

Таблица 4.7

| Вариант | Температура Т, С° | Вариант | Температура Т, С° |
|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 1 | 100 | 14 | 630 |
| 2 | 150 | 15 | 240 |
| 3 | 300 | 16 | 520 |
| 4 | 500 | 17 | 310 |
| 5 | 700 | 18 | 260 |
| 6 | 200 | 19 | 380 |
| 7 | 250 | 20 | 410 |
| 8 | 350 | 21 | 480 |
| 9 | 420 | 22 | 330 |
| 10 | 540 | 23 | 270 |
| 11 | 650 | 24 | 530 |
| 12 | 230 | 25 | 470 |
| 13 | 170 | 26 | 130 |

5. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. Пример расчёта пластиинки с вырезом

Рассмотрим пример расчета напряженно-деформированного состояния пластины с вырезом (рис. 5.1).

Материал: сталь (St3) $E=2.1e11 \text{ Н/м}^2$;

$\nu = 0.3$; $\rho = 7830 \frac{\text{Кг}}{\text{м}^3}$

Предел текучести

Tension = $235e6 \text{ Па}$

Размер: $a = b = 1 \text{ м}$; $d = 0.5 \text{ м}$

Толщина $t = 0.01 \text{ м}$

Нагрузка: сила тяжести (действие гравитации) $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ по направлению нормали к поверхности.

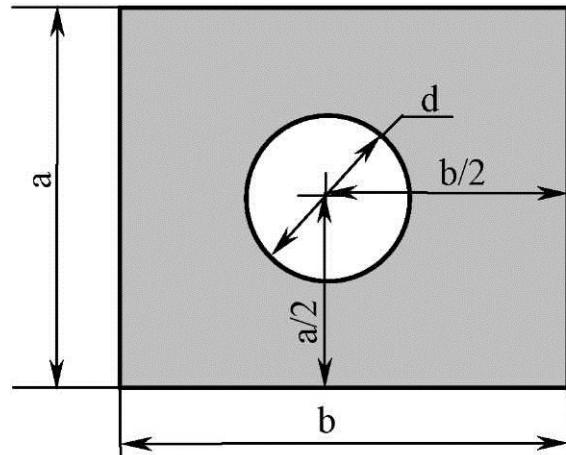


Рис. 5.1

Опишем действия, необходимые для решения данной задачи.

Создание квадрата. Выберите пункт меню **Geometry** (геометрия). В появившемся подменю выберите **Curve-Line** (линия) и в последующем за ним подменю - **Rectangle** (прямоугольник). В дальнейшем мы при описании действий с вложенными подменю будем указывать кратко: выберите **Create Line Rectangle**.

В появившемся окне (рис. 5.2) введите координаты одного из углов прямоугольника ($x = 0, y = 0, z = 0$) и выберите **OK**.



Рис. 5.2

Далее аналогично введите координаты второго угла (лежащего напротив первого по диагонали: $x = 1, y = 1, z = 0$). Таким образом, создан квадрат со стороной 1м. Созданный квадрат может оказаться не по центру графического окна. Удобно его расположить можно командой **View Autoscale** (показать с автоматическим масштабированием).

Показ меток сторон квадрата. По умолчанию метки (номера или имени) различных элементов модели не показаны в графическом окне. Но их изображение можно «включить» с помощью соответствующего диалогового окна, выбрав **View Options** (показать опции).

Посмотрим номера сторон созданного квадрата. Для этого в разделе **Category** диалогового окна выберите опцию **Labels, Entities and Color** (метки, объекты и цвет), а в разделе **Options** укажите на **Curve** (кривая - этим термином объединены все отрезки линий, в том числе и прямых). После этого справа в диалоговом окне появятся новые оконца, позволяющие настраивать показ меток и цвет объекта.

Создание отверстия в центре квадрата. Для этого в меню выберем команду **Geometry Curve-Circle Center** (создать центр окружности), после чего появится диалоговое окно (рис. 5.3). Введите координаты центра отверстия ($x = 0.5$, $y = 0.5$, $z = 0$) и укажите **OK**.

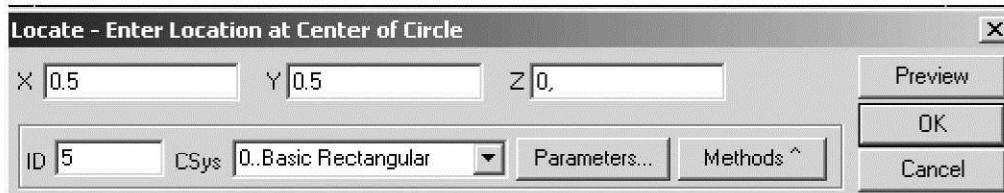


Рис. 5.3

Появится следующее окно (рис. 5.4), в котором следует указать радиус отверстия (0.25 м), а затем - **OK**. Далее будет предложено задать центр нового отверстия (ID = 10). Так как в этом нет необходимости, то выберите **Cancel** (отменить).

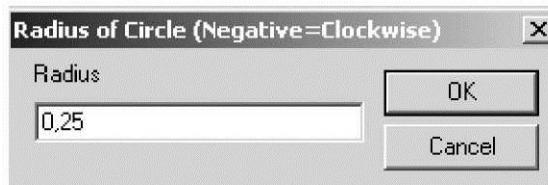


Рис. 5.4

Сохранение модели. Для сохранения модели в меню выберите **File Save as ...** и введите имя файла модели. Назовем его plate.mod. Не забывайте далее сохранять вашу модель по мере ее формирования с помощью команды **Save**.

Задание свойств материала. Определим свойства материала пластины. Выберем в меню **Model Material** (создать материал). В результате появится диалоговое окно для задания материала (рис. 5.5).

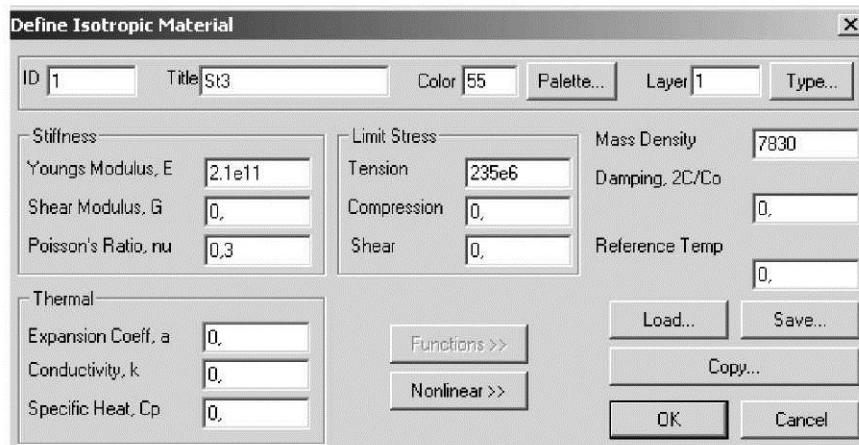


Рис. 5.5

По умолчанию материал полагается изотропным. Если тип материала другой, например ортотропный, то щелкните по кнопке **Type**. В графе **Title** задайте метку материала, например St3. В разделе **Stiffness** определим: модуль упругости $E = 2.1e11 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. В разделе **Limit Stress** можно определить допускаемые напряжения на растяжение, сжатие и сдвиг. Так как расчет будем выполнять на гравитационную нагрузку - зададим плотность материала: **Mass Density** = 7830 кг/м³. Для выполнения данного расчета остальные свойства можно не задавать.

Свойства материала можно сохранить в библиотеке материалов с целью его использования в других расчетах. Для этого служит кнопка **Save...** данного диалогового окна. Можно использовать в расчетах материалы из библиотеки с помощью кнопки **Load...**. После ввода свойств материала выберите пункт **OK**. Далее будет предложено задать свойства следующего материала (ID = 2). Так как в этом нет необходимости, то выберите **Cancel**.

Задание свойств элементов конструкции. Для этого в меню выберем команду **Model Property**. Появится новое диалоговое окно (рис. 5.6). По умолчанию окно настроено на ввод характеристик пластины. Кнопкой **Elem / Property Type...** можно настроить окно на другие типы конструкций (например, балки, мембранные, трубы и пр.).

Выберите в данном окне материал (**Material**). В разделе **Property Values** введите значение 0.01 м для свойства **T1** - это толщина пластины. Остальные свойства в данном примере можно принять по умолчанию.

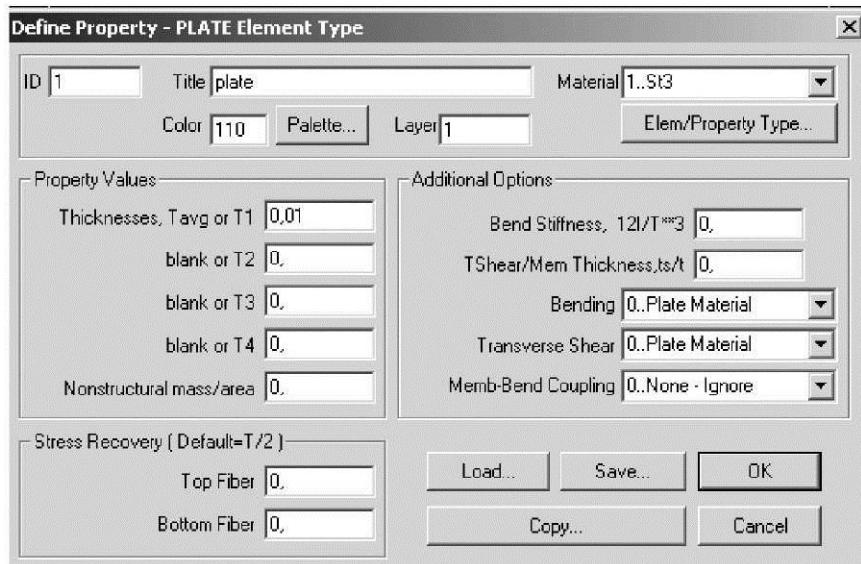


Рис. 5.6

Далее выберите пункт **OK**, а затем - **Cancel** (для выхода из данного диалогового окна).

Дискретизация. В большинстве случаев произвести разбиение конструкции на конечные элементы в системе MSC/NASTRAN можно способом автоматического построения сетки. Для этого вначале зададим коман-

ду **Mesh - Mesh Control - Default Size...** (задание размера элементов сетки). В появившемся диалоговом окне задайте ориентировочный характерный размер (длину) конечных элементов сетки (**Size = 0.1 м**).

Далее выберите команду **Geometry Boundary Surface...** (определение границ сетки). В появившемся окне (рис. 5.7) следует пометить идентификационные номера (ID) линий - сторон квадрата, образующих границу сетки. Для нашего случая выберите **Select All** или, двигая мышью, указывать курсором на каждую линию и отмечать ее щелчком левой кнопки (при этом отмеченная линия будет помечена кружком).

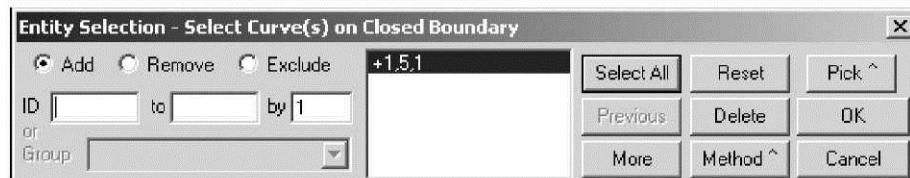


Рис. 5.7

После указания всех линий границы выберите **OK** и затем **Cancel**. Теперь вся граница сетки выделится новым цветом.

Далее выберите команду **Mesh Geometry Surface...** (формирование сетки). В появившемся окне указания границы сетки щелкните по кнопке **OK**, после чего возникнет окно формирования сетки (Automesh Surfaces). Здесь следует в разделе **Property** (свойства элементов конструкции) с помощью кнопки выбора задать **1..plate**, в блоке **Element Shape** (форма элементов) выбрать **All Triangles** (треугольные) или **Quads** (четырехугольные), а затем указать **OK** (рис. 5.8).

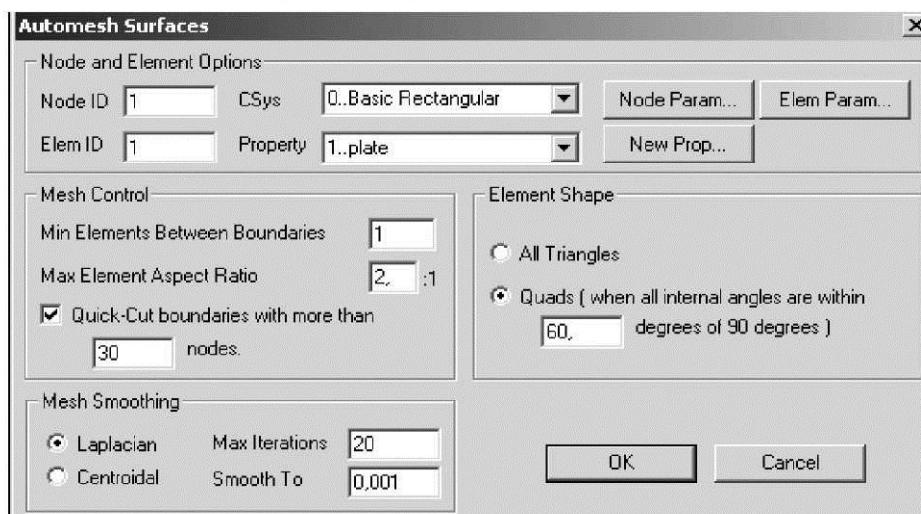


Рис. 5.8

Процесс формирования сетки элементов может занять несколько секунд. Сетка четырехугольных конечных элементов представлена на рис. 5.9. Чтобы номера элементов и узлов не загромождали чертеж, используйте команду **View Options...** для их «отключения».

Задание граничных условий. Сформируем условия свободного опирания на внешних кромках пластины. Выберите в меню команду задания варианта закрепления: **Model Constraint Nodal...** В возникшем диалоговом окне для варианта закрепления ID = 1 введите его название (Title), например «Simply Supported» (необязательно), после чего укажите **OK**.

Далее появится окно, в котором следует отметить номера закрепляемых узлов. Это можно сделать двумя способами: 1) отметьте щелчком левой кнопки мыши каждый граничный узел; 2) если номера узлов приведены на чертеже (их изображение можно «включить» с помощью **View Options...**), то укажите номера узлов, лежащих на внешних кромках пластины (вводя значения ID = 1, to = 40, by = 1). После введения всех номеров граничных узлов выберите **OK**.

Появится новое диалоговое окно - для закрепления группы отмеченных узлов по степеням свободы (рис. 5.10). В блоке DOF - Degrees Of Freedom (степени свободы) следует мышью отметить закрепляемые перемещения (по направлениям системы координат, определяемой в окошке Coord Sys). Закрепления узлов можно установить и проще - с помощью кнопок Fixed (полное закрепление), Pinned (шарнирное закрепление), Free (без закреплений) или No Rotation (закрепление вращений). Здесь же можно задать условия симметрии относительно указанных узлов. Выберите кнопку **Pinned**, а затем - **OK**. Закрепления узлов отобразятся в графическом окне (рис. 5.11). Выберите далее кнопку **Cancel** для выхода из окна задания закреплений.

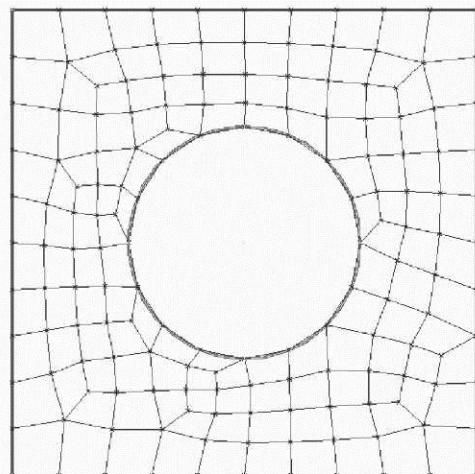


Рис. 5.9

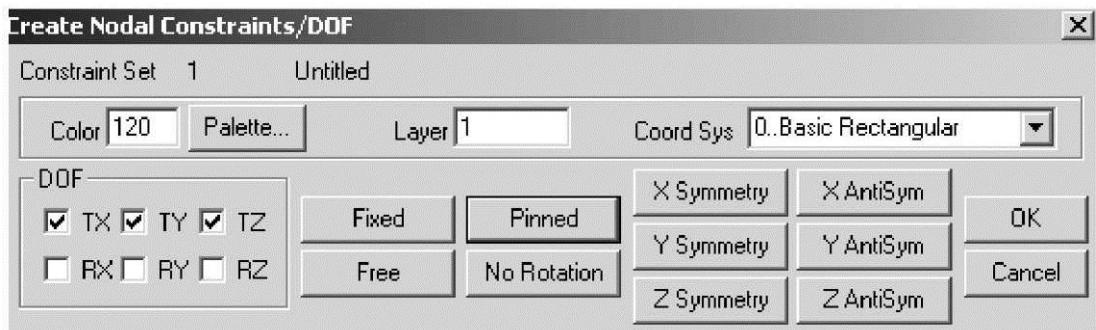


Рис. 5.10

Задание нагрузжения. Выберите в меню команду задания варианта нагружения: **Model Load Body...** (задание объемных сил). В возникшем диалоговом окне для варианта нагрузки ID = 1 введите его название (Title), например «Gravity», после чего укажите **OK**. Далее в окне Create Body

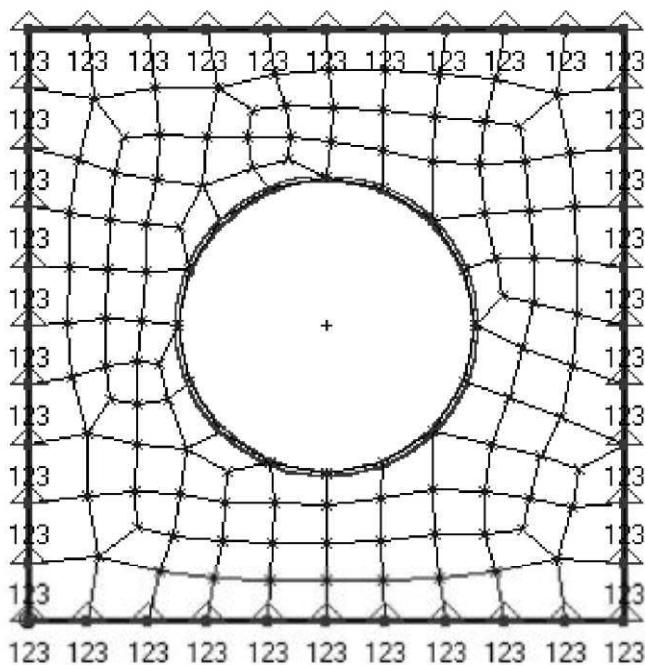


Рис. 5.11

Load (рис. 5.12) слева от блока Acceleration (ускорение) щелкните мышью в белом квадратике. В результате блок ввода ускорений становится активным. Введите значение ускорения по оси Z (-9.8 м/с²), то есть по нормали к поверхности пластины. После этого выберите **OK**.

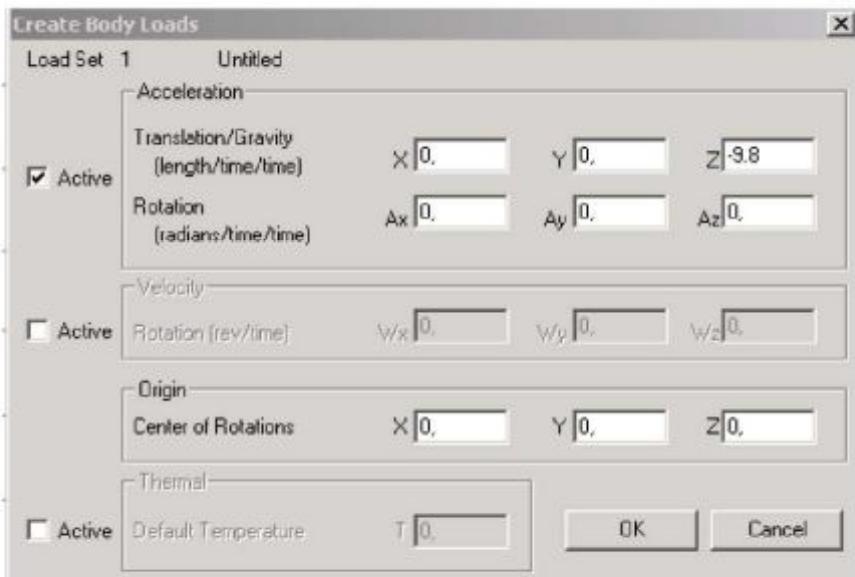


Рис. 5.12

Таким образом, расчетная модель полностью сформирована. Теперь не забудьте сохранить ее (задайте команду **File Save**).

Выполнение расчета. Выберите в меню команду **File Analyze...** для установки параметров и запуска вычислительного процесса. Выберите **OK**.

В процессе расчета (который может занять до нескольких десятков секунд времени в зависимости от быстродействия компьютера и сложности задачи) информация о выполняемых действиях отражается в окне **MSC/NASTRAN Manager**.

После завершения вычислений появляется окно **Message Review**, в котором отражается количество ошибок, выявленных в процессе вычислений (Errors), предупреждений о возможной потере точности (Warnings) и прочая информация. Из этого окна можно сразу выйти (Continue) либо, если имеются ошибки и предупреждения, просмотреть более подробные сообщения.

Просмотр результатов анализа. Выберите команду **View Select...**

или нажмите кнопку  на панели инструментов, позволяющую выбрать в диалоговом окне (рис. 5.13) стиль графического изображения модели и результатов расчетов.

В столбце **Contour Style** выберите стиль **Contour**. Он представляет изображение полей (напряжений, перемещений и пр.) в виде изохром - цветных линий, сливающихся в «радугу», каждый цвет которой означает определенное значение интересующей величины. Выбор поля, подлежащего рассмотрению, производится в диалоговом окне, которое вызывается «кнопкой» **Deformed and Contour Data...**

Деформацию пластины можно наглядно представить, выбрав в столбце **Deformed Style** пункт **Deform**. Перемещения пластины возникают практически перпендикулярно ее плоскости. Чтобы их разглядеть, необходимо повернуть модель. Для этого используйте команду **View Rotate...**

Все графические изображения можно легко представить в виде документов. Для этого используйте команду **File Picture Save...**, которая позволит сохранить рис. в виде **bmp**-файла.

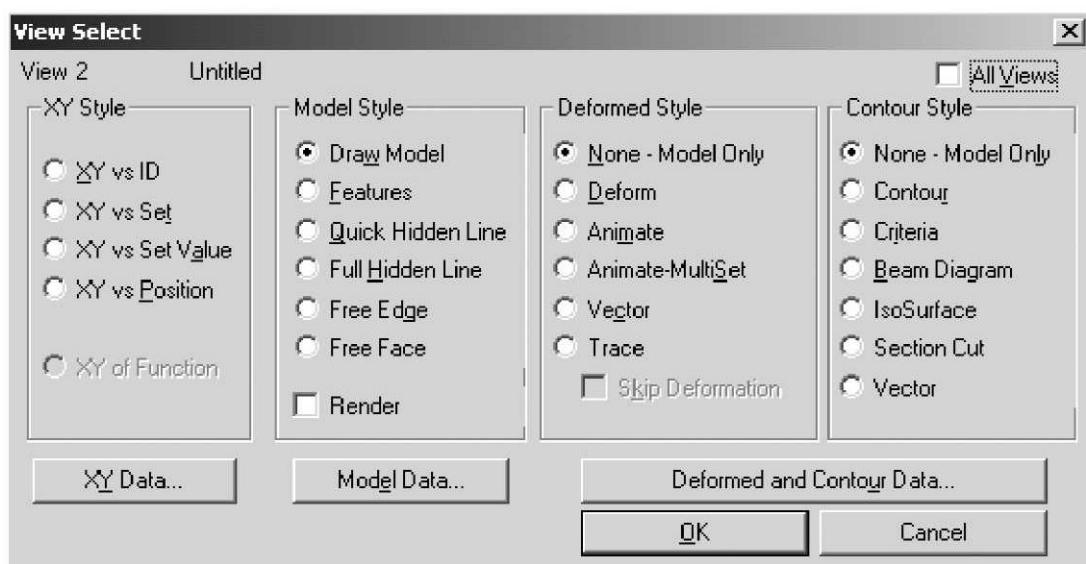


Рис. 5.13

На рис. 5.14 показано напряженно-деформированное состояние пластины с полями напряжений, а на рис. 5.15 НДС с полями перемещений.

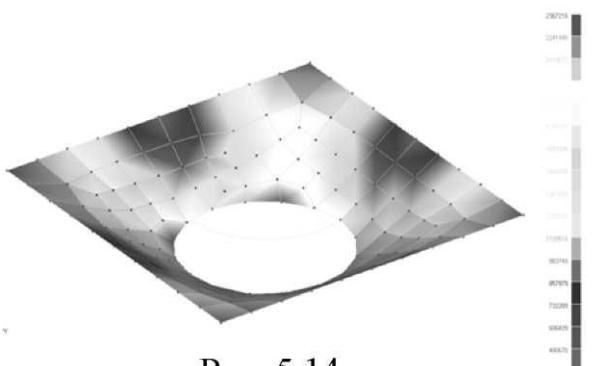


Рис. 5.14

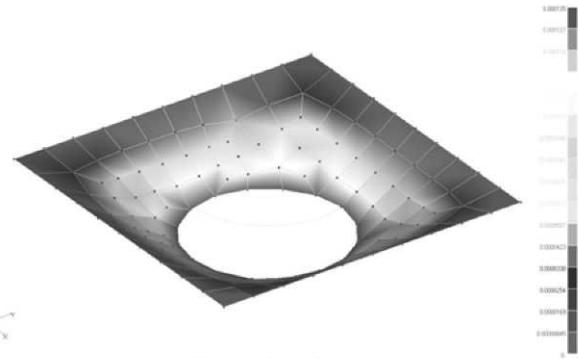


Рис. 5.15

5.2. Пример расчёта на прочность упора

Упор (рис. 5.16) состоит из трёх пластин: нижней (с вырезами под болты, которыми упор жёстко фиксируется), опорной (на неё действует распределённая нагрузка 10 кН) и кницы.

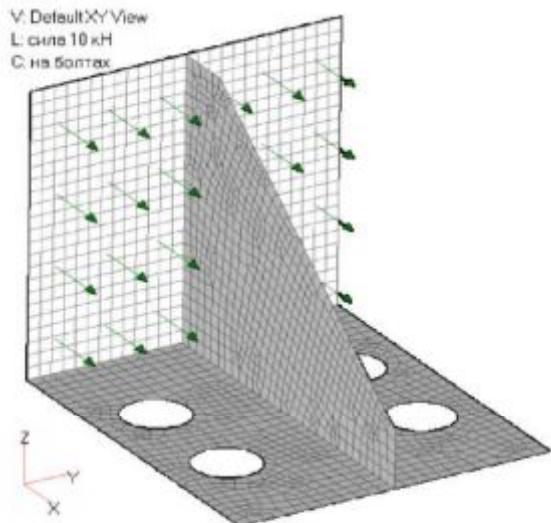


Рис. 5.16

Последовательность формирования модели и последующего расчёта на прочность выглядит следующим образом.

1) Создадим точки, которые понадобятся для формирования линий, а затем поверхности – половины нижней пластины упора (учтём симметричность детали):

Geometry / Point .../ вводим координаты четырёх точек, см: (0; -4; 0) /Ok; (0; 0; 0) /Ok; (9; 0; 0) /Ok; (9; -4; 0) / Ok / Cancel.

2) Создадим точки – центры отверстий:

Geometry / Point .../ вводим координаты двух точек, см: (3; -2.5; 0) /Ok; (6; -2.5; 0) / Ok / Cancel.

3) Создадим линии наружного контура нижней поверхности:

Geometry / Curve-Line / Points .../ соединяем 4 крайних точки линиями, щёлкая мышью по точкам и вводя Ok.

4) Создадим окружности отверстий:

Geometry / Curve-Circle / Center... / указываем на центр; **Ok /** задаём радиус отверстия: 0.85 / Ok. Аналогично – для второго отверстия.

5) Создадим нижнюю поверхность по границе:

Geometry / Boundary Surface.../ указываем линии наружного контура и окружности / **Ok / Cancel**.

6) Создадим вторую (опорную) поверхность:

Geometry / Surface / Corners ... / вводим координаты четырёх углов поверхности, см: (0; -4; 0) / **Ok**; (0; 0; 0) / **Ok**; (0; 0; 7) / **Ok**; (0; -4; 7) / **Ok** / **Cancel**.

7) Создадим точки (которые понадобятся для формирования линий, а затем поверхности книги):

Geometry / Point .../ вводим координаты пяти точек, см: (0; 0; 0) / **Ok**; (9; 0; 0) / **Ok**; (9; 0; 1.4) / **Ok**; (0; 0; 7) / **Ok**; (1.4; 0; 7) / **Ok** / **Cancel**.

8) Создадим линии контура книги:

Geometry / Curve-Line / Points... / соединяем точки линиями (рис. 5.17).

9) Создадим поверхность по границе книги:

Geometry / Boundary Surface.../ последовательно указываем пять линий контура книги / **Ok / Cancel**.

10) Создадим оставшуюся (симметричную) часть модели путём отражения относительно плоскости симметрии.

Этот шаг обычно необязателен, особенно если закрепления и нагрузка на деталь также симметричны, - к тому же «отбрасывание» симметричных частей позволяет сократить вычислительные затраты при расчётах сложных узлов. Однако в данном случае для большей наглядности смоделируем явно и симметричную часть.

Следует отметить, что создать симметричные части модели можно двумя способами: на этапе создания геометрической модели; на этапе создания элементов. Первый способ необходим, если отражённые копии геометрических примитивов (точки, линии, поверхности) далее используются при задании на них нагрузок или закреплений. Во втором случае геометрические объекты не отражаются, поэтому такой способ менее универсален, однако он позволяет построить модель с меньшим количеством геометрических построений. Здесь применим первый способ, так как отражённые линии вырезов далее пригодятся для задания по ним закреплений.

Итак, сделаем отражённые относительно плоскости книги копии нижней и упорной поверхностей:

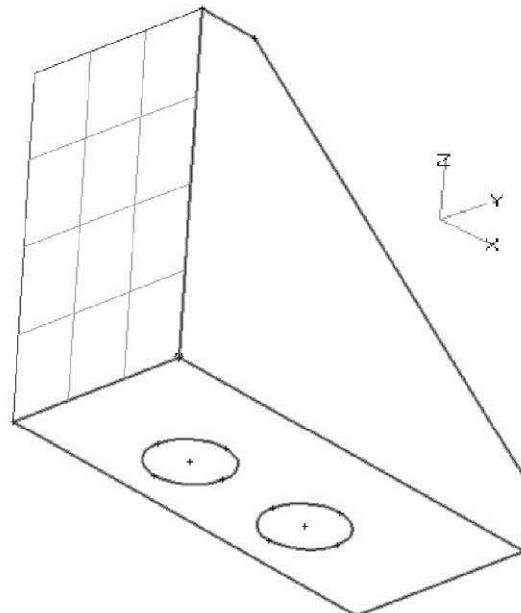


Рис. 5.17

Geometry / Reflect / Surface.../ щёлкните мышью на двух отражаемых поверхностях (нижней и упорной) / **Ok / Ok / Methods[^] / Points** / щёлкните мышью в поле **Base Point ID**, а затем – по трём точкам на плоскости симметрии (на книце) / **Ok / View / Redraw**.

11) Зададим свойства материала (сталь):

Model / Material... / заполните форму, как показано на рис. 5.18.

12) Зададим свойства элементов детали:

Model / Property/ задать тип: **Elem / Property Type.../ Plate / Ok** / в бланке задания свойств заполните поля: **Title** (заголовок – любой); **Material** (выберите из списка); **Thicknesses, Tavg or T1** (толщина пластины – 0.6) / **Ok / Cancel**. Так как все элементы детали имеют одну толщину, равную 0.6 см, то достаточно задать одно свойство.

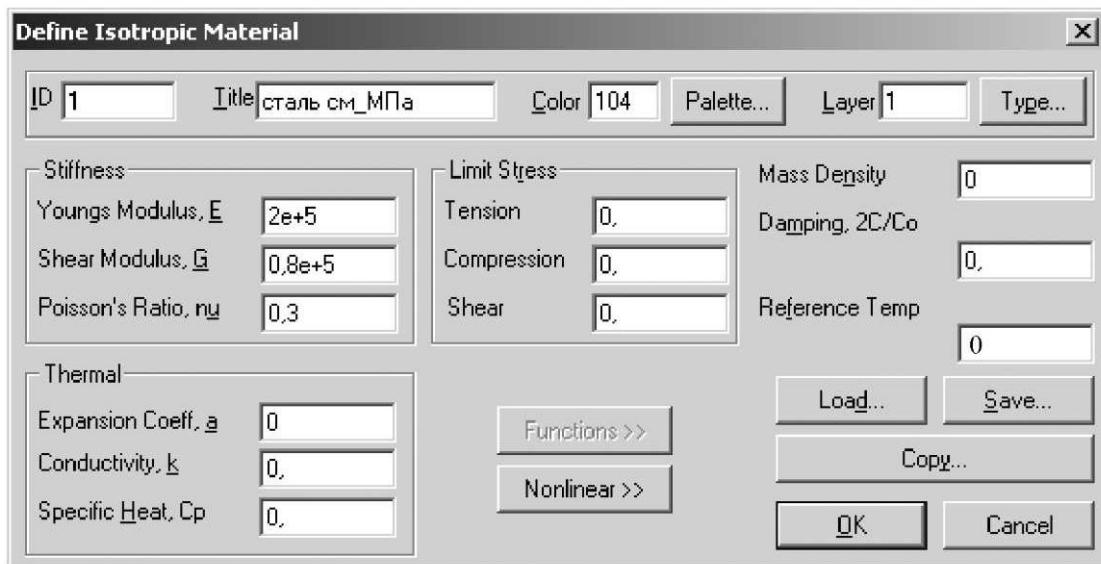


Рис. 5.18

13) Зададим размер конечных элементов:

Mesh / Mesh Control / Default Size.../ в окне **Size** введите: 0.5 / **Ok** /.

14) Выполним разбивку поверхностей на элементы:

Mesh / Geometry / Surface .../ Select All / Ok / Да / в окне **Automesh Surfaces** заполните поле **Property** (выберите из списка), - остальные параметры можно оставить по умолчанию / **Ok**.

15) Далее для контроля можете посмотреть модель в режиме удаления невидимых линий (**View / Select / Quick Hidden Line / Ok**), а также вращая её с помощью кнопки **Dyn Rotate** . Получить более реалистичное трёхмерное изображение можно с применением рендеринга (**View / Select / Render / Ok**), а также настройкой заливки и теней:

View / Options / Tools and View Style: Fill, BackFaces and Hidden / Fill On Shading / Option On; Render Options / Curve Transparency.

16) Зададим закрепления по линиям болтовых отверстий:

Model / Constraint / Set ... / в разделе **Title** напишите название варианта закрепления, например: **на болтах / Ok.**

Model / Constraint / On Curve / щёлкните мышью на четырёх линиях отверстий под болты / **Ok** / пометьте вид закрепления: **Fixed** (по всем узловым степеням свободы) / **Ok / Cancel**.

17) Зададим нагрузку на упор в виде давления на упорную поверхность, соответствующего усилию 10 кН. Давление определяется отношением нагрузки к площади упорной поверхности: $10 \text{ кН} / (7 \times 8) \text{ см}^2 = 1.79 \text{ МПа}$:

Model / Load / Set ... / в разделе **Title** напишите название варианта нагрузки, например: **10 кН / Ok.**

Model / Load / On Surface / щёлкните мышью на двух упорных поверхностях / на появившейся форме слева в списке выберите вид нагрузки: **Pressure** и в поле **Value** введите значение **-1.79** (отрицательное, так как против направления оси *X*) / **Ok / Cancel**.

В заключение формирования модели рекомендуется выполнить проверку и слияние совпадающих узлов. Дело в том, что если разбивка на элементы производится отдельно для поверхностей, имеющих общую границу, то узлы на линии соединения двух поверхностей получаются двойными: один узел принадлежит элементу одной поверхности, а совпадающий с ним узел – элементу другой поверхности. Таким образом, деталь будет иметь «оторванные» друг от друга части. Если Вы не точно следовали изложенному выше алгоритму формирования элементов, то такая ситуация возможна.

18) Итак, объединим возможные совпадающие узлы:

Tools / Check / Coincident Nodes ... / Select All / Ok / Да / Select All / Ok / отметьте галочкой **Merge Coincident Entities** (соединить совпадающие узлы, - в пункте **Maximum Distance to Merge** указывается расстояние, в пределах которого близкие узлы будут слиты в один) / **Ok.**

19) Таким образом, модель создана. Запуск задачи на расчёт выполняется следующим образом:

File/ Analyze... / укажите: **Analyze Type: 1.. Static ; Loads:** укажите вариант нагрузки; **Constraints:** укажите вариант закреплений / **Ok.**

Перед началом расчёта будет предложено сохранить модель.

20) После расчёта выберите **View / Select** (или **F5**) / **Deformed Style: Deform; Contour Style: Contour** ; далее можете подробнее настроить вид выводимых результатов: **Deformed and Contour Data / Ok.**

Оформление графического вывода настраивается также командами настройки: **View / Options.** На рис. 5.19 приведена картина напряженно-деформированного состояния данной детали.

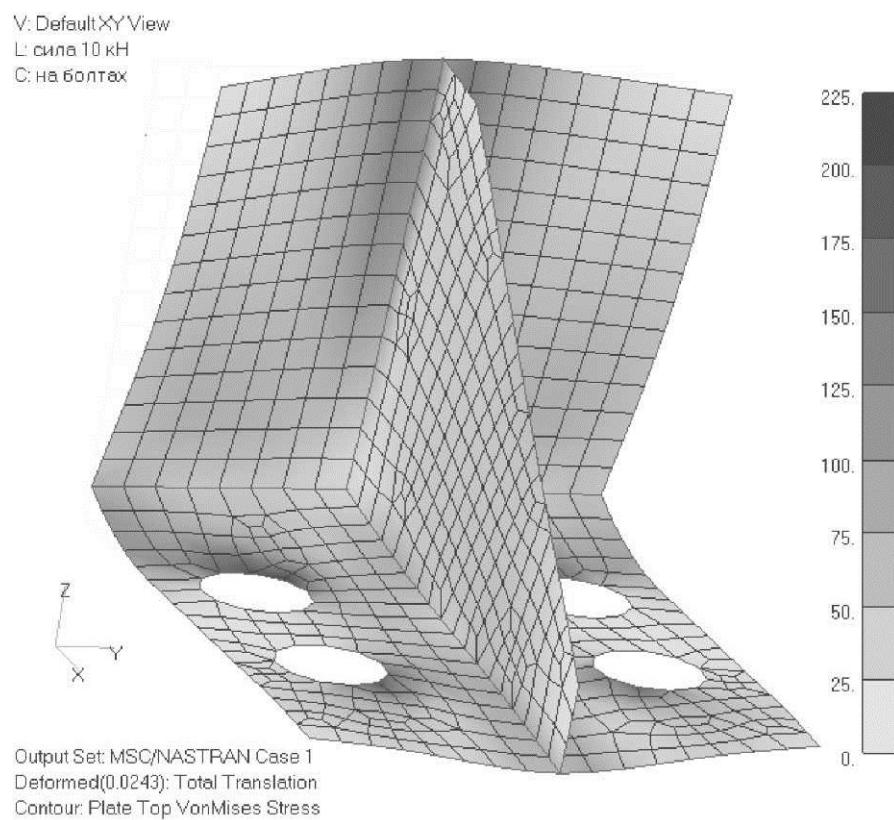


Рис. 5.19

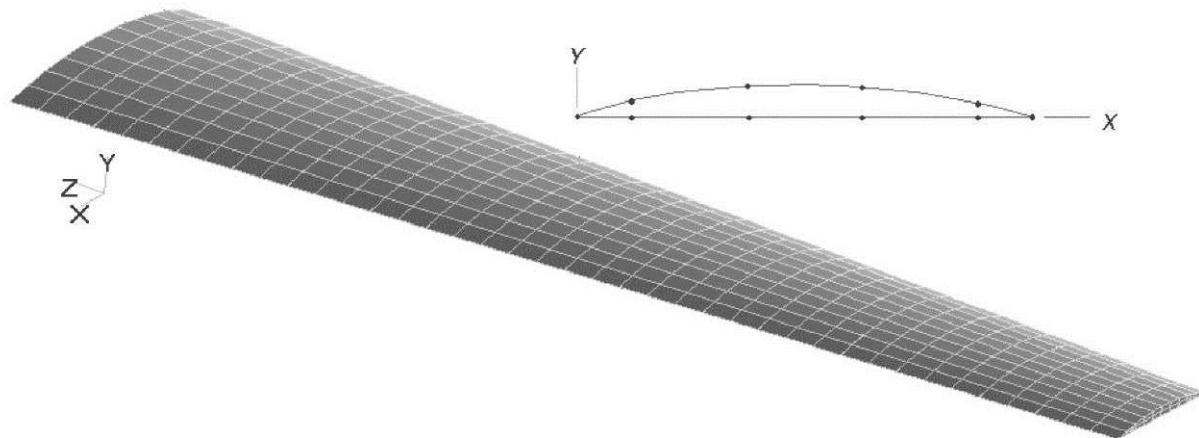


Рис. 5.20

5.3. Пример расчёта крыла

Крыло жёстко защемлено одним концом и состоит из тонкостенной обшивки и элементов поперечного набора – 4 нервюров (рис. 5.20).

Последовательность формирования модели и последующего расчёта на прочность выглядит следующим образом.

1) Создадим точки, определяющие профиль крыла:

Geometry / Point .../ вводим координаты шести точек, м: (0; 0; 0) /Ok; (0.1; 0.0255; 0) /Ok; (0.2; 0.034; 0) /Ok; (0.3; 0.0335; 0) /Ok; (0.4; 0.0225; 0) /Ok; (0.5; 0; 0) /Ok / Cancel . **View / Autoscale**.

2) Прорисуем верхнюю кромку профиля с помощью сплайна:

Geometry / Curve-Spline / Points... / Methods^ / On Point / щёлкните мышью в поле **Point ID** и далее указывайте по порядку точки профиля / Ok / пройдя все точки от первой до шестой нажмите **Cancel / Cancel**.

3) Создадим линию нижней кромки профиля:

Geometry / Curve-Line / Points ... / соедините первую точку с последней, Ok / Cancel.

4) Для удобства просмотра дальнейших построений изменим вид:

View / Rotate / Isometric / Ok.

5) Создадим копии профилей в плоскостях расположения нервюр – на расстоянии 0.5 м друг от друга:

Geometry / Copy / Curve... / Select All / Ok / Repetitions (число копий): 4 / Ok / далее задайте вектор переноса копий (рис. 5.21) / Ok.

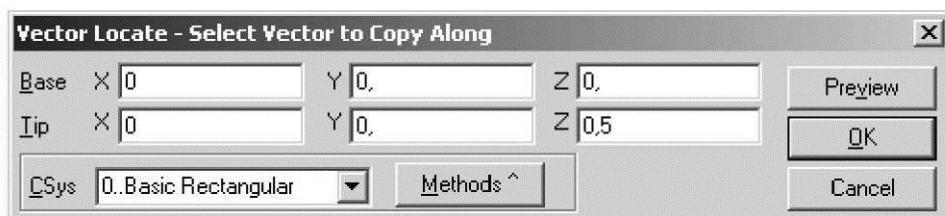


Рис. 5.21

6) Уменьшим контуры нервюр пропорционально сужению крыла:

Modify / Scale / Curve... / указываем линии второго профиля, Ok / указываем первую точку (носик) профиля / Ok / задаём масштабные коэффициенты по осям координат (рис. 5.22) / Ok. **View / Redraw**.

Аналогично уменьшаем остальные 3 копии (с масштабными коэффициентами, равными: 0.75; 0.625; 0.5).

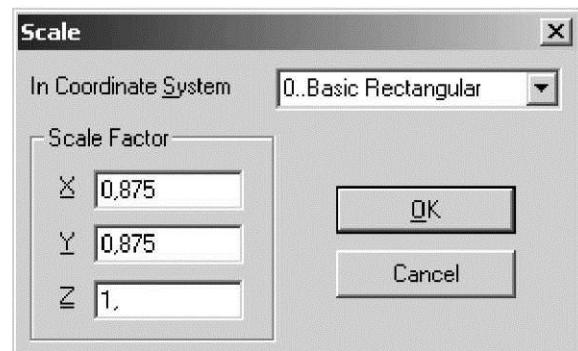


Рис. 5.22

7) Создадим поверхности нервюр:

Geometry / Boundary Surface... / укажите две линии профиля / **Ok** / аналогично для остальных нервюр / **Cancel**.

8) Создадим поверхности обшивки.

Geometry / Surface / Ruled... / укажите две линии соседних нервюр / **Ok** / аналогично остальные поверхности (четыре из них образуют верхнюю поверхность крыла, и другие четыре – нижнюю) / **Cancel** (рис. 5.23).

v1

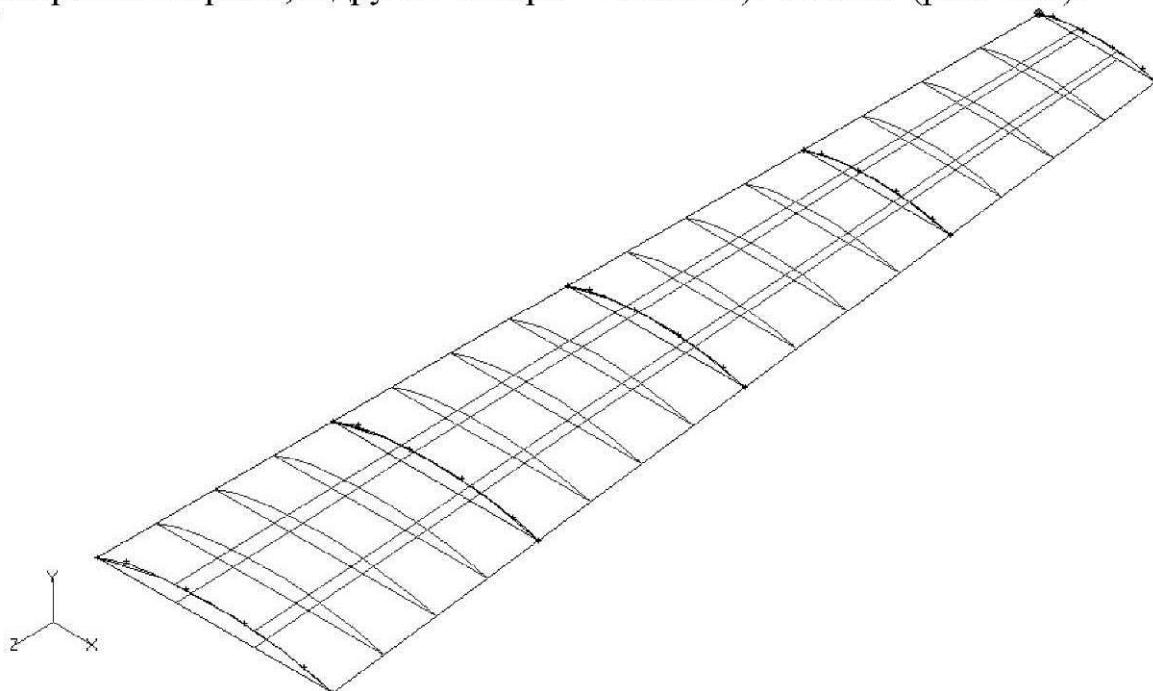


Рис. 5.23

9) Зададим материал – алюминиевый сплав:

Model / Material... / укажите параметры материала (рис. 5.24) / **Ok** / **Cancel**.

10) Зададим свойства пластинчатых элементов крыла:

Model / Property... / укажите параметры пластин (рис. 5.25) / **Ok** / **Cancel**.

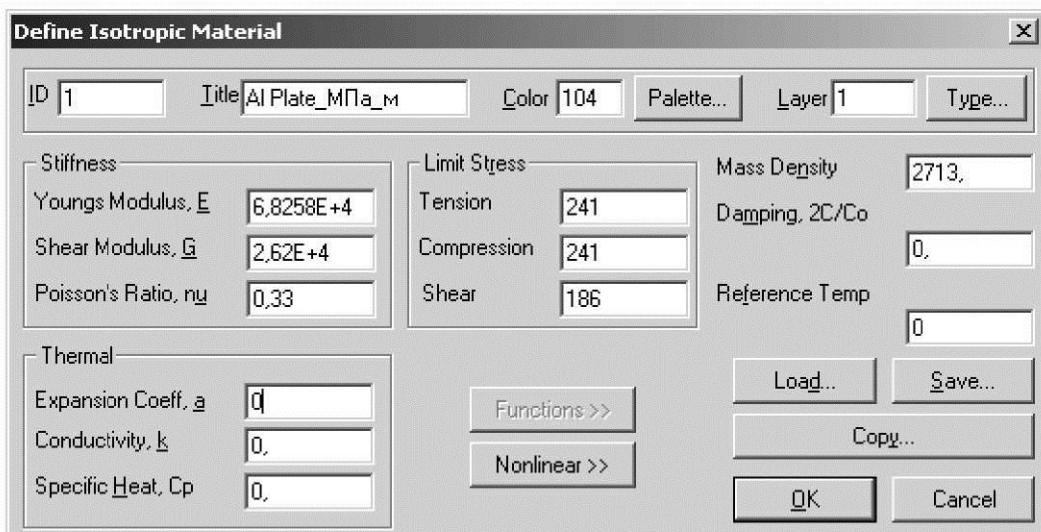


Рис. 5.24

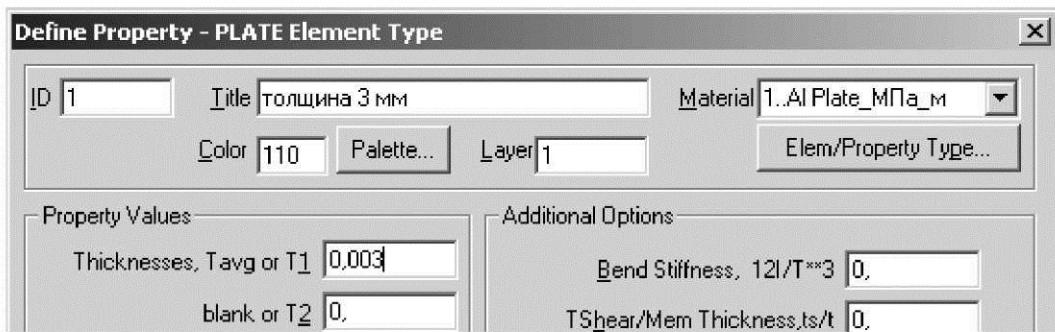


Рис. 5.25

11) Зададим количество конечных элементов по поверхностям обшивки:

Mesh / Mesh Control / Mapped Divisions on Surface.../ укажите поверхности обшивки / **Ok / Number of Elements** (число элементов): **10** (по направлению *s*); **10** (по направлению *t*).

12) Выполним разбивку на элементы:

Mesh / Geometry / Surface.../ Select All / Ok / Да / указать **Property / Ok.**

13) Зададим закрепление в виде заделки на торце крыла:

Model / Constraint / Set ... / в разделе **Title** напишите название варианта закрепления, например: **консоль / Ok.**

Model / Constraint / On Curve / щёлкните мышью на двух линиях крайнего (наибольшего) профиля / **Ok /** пометьте вид закрепления: **Fixed** (по всем узловым степеням свободы) / **Ok / Cancel .**

14) Зададим нагрузку в виде распределённого по нижней кромке крыла давления величиной 0.01 МПа.

Model / Load / Set ... / в разделе **Title** напишите название варианта нагрузки, например: **10 кПа / Ok.**

Model / Load / On Surface / щёлкните мышью на четырёх нижних поверхностях / на появившейся форме слева в списке выберите вид нагрузки: **Pressure** и в поле **Value** введите значение **0.01 / Ok / Cancel .**

15) Таким образом, модель готова. Выполним расчёт:

File/ Analyze... / укажите: **Analyze Type: 1.. Static ; Loads:** укажите вариант нагрузки; **Constraints:** укажите вариант закреплений / **Ok.**

16) После расчёта выберите **View / Select** (или **F5**) / **Deformed Style: Deform;** **Contour Style: Contour;** далее можете подробнее настроить вид выводимых результатов: **Deformed and Contour Data / Ok.**

Оформление графического вывода настраивается также командами: **View / Options.** На рис. 5.26 приведена картина напряжённо-деформированного состояния крыла.

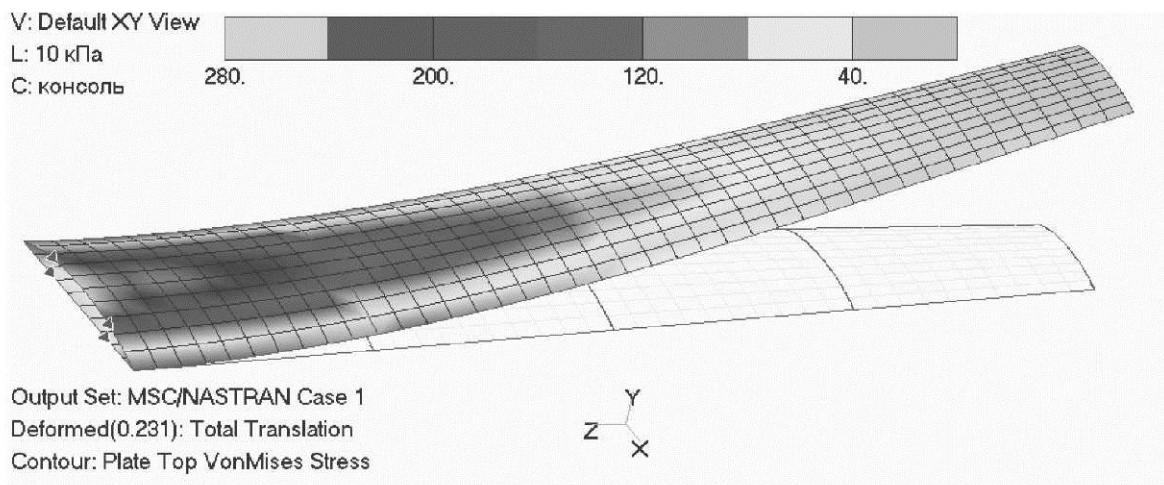


Рис. 5.26

5.4. Варианты заданий для лабораторных работ

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- значения перемещений и напряжений в наиболее характерных точках (не менее трех точек), в том числе и наибольшие значения;
- сделать заключение о прочности конструкции, дать предложения по увеличению прочности и жесткости конструкции.

5.4.1. Лабораторная работа 1

Схемы поперечных сечений представлены на рис. 5.27, варианты заданий – в табл. 5.2, а основные свойства материалов – в табл. 5.1. Параметр s означает толщину пластины. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы необходимо все размерности перевести в систему СИ.

Таблица 5.1

| Марка материала | Предел текучести, МПа | Модуль упругости, МПа | Коэффициент Пуассона | Плотность, кг/м ³ | Коэффициент линейного расширения, 1/°C |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|--|
| Ст. 3 | 235 | $2,0 \cdot 10^5$ | 0,30 | 7850 | $1,12 \cdot 10^{-5}$ |
| 09Г2 | 315 | $2,0 \cdot 10^5$ | 0,28 | 7820 | $1,36 \cdot 10^{-5}$ |
| 10ХСНД | 390 | $2,1 \cdot 10^5$ | 0,26 | 7800 | $1,40 \cdot 10^{-5}$ |
| Д16 | 280 | $7,0 \cdot 10^4$ | 0,30 | 2800 | $2,40 \cdot 10^{-5}$ |
| АМг-6 | 170 | $7,2 \cdot 10^4$ | 0,32 | 2650 | $2,30 \cdot 10^{-5}$ |

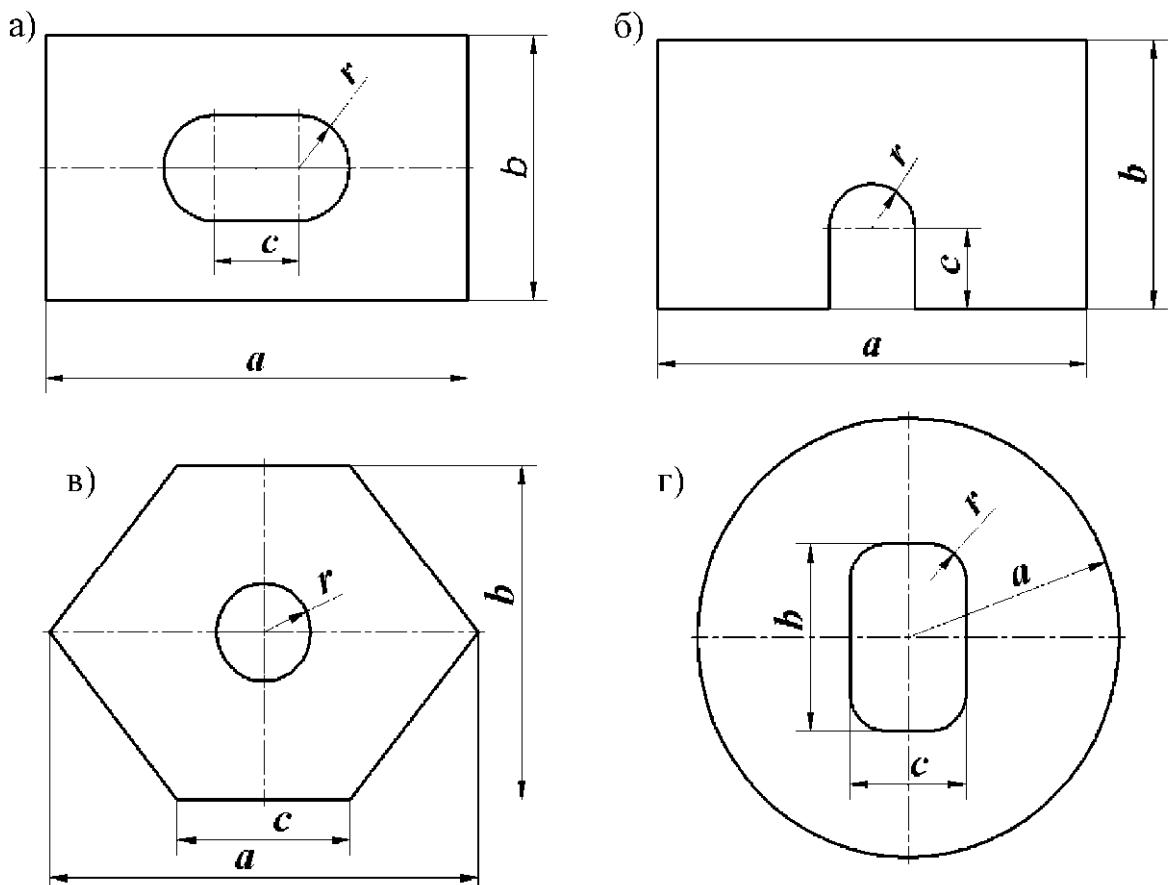


Рис. 5.27

Таблица 5.2

| н/п | схема | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | матер-иал |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------------------|---|-----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | a | 2000 | 1000 | 0 | 50 | 12 | жёсткая заделка по внешним кромкам | $p = 100 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 2 | a | 1500 | 1000 | 200 | 20 | 12 | | | 09Г2 |
| 3 | a | 2100 | 900 | 500 | 200 | 10 | | | Ст. 3 |
| 4 | a | 1800 | 700 | 500 | 175 | 10 | | | Ст. 3 |
| 5 | a | 500 | 400 | 0 | 50 | 16 | | | 10ХСНД |
| 6 | a | 160 | 50 | 10 | 10 | 1 | жёсткая заделка по левой кромке | $F_y = 10 \text{ кН}$ по линии правой кромки | 09Г2 |
| 7 | a | 200 | 60 | 100 | 15 | 2 | | | 09Г2 |
| 8 | a | 180 | 80 | 100 | 5 | 3 | | | Ст. 3 |
| 9 | a | 100 | 50 | 25 | 13 | 2 | | | Ст. 3 |
| 10 | б | 2000 | 1000 | 0 | 80 | 14 | жёсткая заделка по внешним кромкам | $p = 100 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 11 | б | 1800 | 900 | 200 | 20 | 12 | | | 10ХСНД |
| 12 | б | 1700 | 800 | 0 | 80 | 14 | | | Ст. 3 |
| 13 | б | 1900 | 1000 | 200 | 20 | 12 | шарнирная опора по внешним кромкам | $p = 50 \text{ кПа}$ | Ст. 3 |
| 14 | б | 1500 | 800 | 0 | 200 | 10 | | | Ст. 3 |
| 15 | б | 200 | 300 | 0 | 5 | 5 | | | 10ХСНД |
| 16 | б | 250 | 200 | 10 | 5 | 5 | жёсткая заделка по левой кромке | $F_x = 10 \text{ кН}$ по линии правой кромки | 09Г2 |

Продолжение табл. 5.2

| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|--|-----------|
| 17 | б | 200 | 100 | 10 | 5 | 2 | жёсткая заделка по левой кромке | $F_y = 1 \text{ кН}$ по линии правой кромки | Ст. 3 |
| 18 | б | 300 | 150 | 30 | 20 | 4 | | | Ст. 3 |
| 19 | б | 150 | 250 | 100 | 30 | 4 | | | 09Г2 |
| 20 | б | 50 | 40 | 0 | 20 | 3 | шарнир. опора по левой и правой кромкам | $p = 500 \text{ кПа}$ | Д16 |
| 21 | б | 50 | 50 | 0 | 20 | 4 | | | АМг-6 |
| 23 | в | 100 | 70 | 50 | 5 | 1 | шарнирная опора по внешним кромкам | $p = 20 \text{ кПа}$ | АМг-6 |
| 24 | в | 50 | 35 | 25 | нет | 1 | | | АМг-6 |
| 25 | в | 30 | 21 | 15 | 6 | 2 | жёсткая заделка по окружности | $p = 500 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 26 | в | 200 | 150 | 100 | 40 | 4 | | | Ст. 3 |
| 27 | в | 300 | 210 | 150 | 30 | 2 | жёсткая заделка по нижней кромке | $F_y = 10 \text{ кН}$ по линии верхней кромки | Ст. 3 |
| 28 | в | 150 | 150 | 100 | 60 | 5 | | | АМг-6 |
| 29 | в | 500 | 200 | 100 | 60 | 1 | шарнирная опора по верхней и нижней кромкам | $a_z = 50 \text{ м/с}^2$ $F_x = 10 \text{ кН}$ по линии окруж. | 09Г2 |
| 30 | в | 200 | 140 | 100 | 20 | 2 | | | Д16 |
| 31 | в | 180 | 140 | 90 | 60 | 4 | | | Ст. 3 |
| 32 | г | 250 | 40 | 40 | 20 | 10 | жёсткая заделка по внешней кромке | $p = 100 \text{ кПа}$ $p = 10 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 33 | г | 250 | 40 | 40 | 0 | 10 | | | 10ХСНД |
| 34 | г | 250 | 100 | 20 | 10 | 10 | | | 09Г2 |
| 35 | г | 250 | 100 | 20 | 0 | 10 | | | 09Г2 |
| 36 | г | 15 | 16 | 16 | 8 | 2 | жёсткая заделка по внутренним кромкам | $p = 10 \text{ кПа}$ | Ст. 3 |
| 37 | г | 15 | 16 | 16 | 0 | 2 | | | АМг-6 |
| 38 | г | 50 | 20 | 5 | 2,5 | 2 | шарнирная опора по внешней кромке | $F_x = 1 \text{ кН}$ по правой линии внутр. выреза | Ст. 3 |
| 39 | г | 50 | 10 | 10 | 0 | 2 | | | Ст. 3 |
| 40 | г | 70 | 30 | 10 | 0 | 3 | | | 10ХСНД |
| 41 | г | 50 | 10 | 10 | 5 | 1 | шарнирная опора по внутренним кромкам | $F_y = 1 \text{ кН}$ в крайнем нижнем узле | Ст. 3 |
| 42 | г | 50 | 20 | 20 | 10 | 1 | | | Ст. 3 |

5.4.2. Лабораторная работа 2

Схемы поперечных сечений представлены на рис. 5.28, а варианты заданий – в табл. 5.3, где параметр a означает длину, а s – толщину оболочки. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы необходимо все размерности перевести в систему СИ.

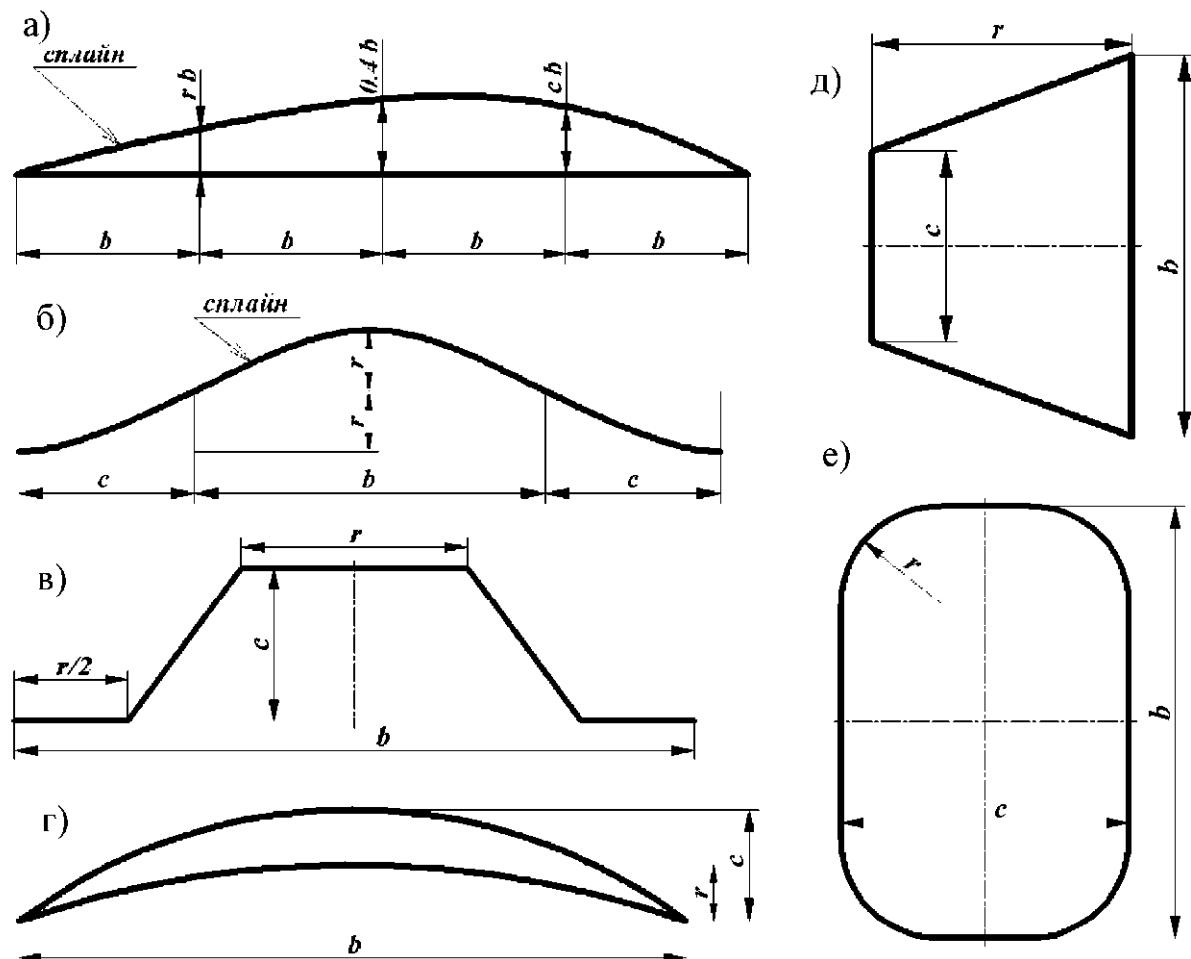


Рис. 5.28

Таблица 5.3

| н/п | схема | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | матер-иал | | | |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 1 | a | 1000 | 110 | 0,34 | 0,27 | 3 | торцы шарнирно закреплены | $p = 3 \text{ кПа}$ на нижнюю поверхность | АМг-6 | | | |
| 2 | a | 1000 | 100 | 0,36 | 0,26 | 2 | | | | | | |
| 3 | a | 1000 | 150 | 0,36 | 0,36 | 3 | торцы жёстко закреплены | | | | | |
| 4 | a | 900 | 140 | 0,36 | 0,25 | 4 | $p = 1 \text{ кПа}$ на верхнюю поверхность | | | | | |
| 5 | a | 900 | 90 | 0,34 | 0,27 | 3 | | | | левый торец жёстко закреплен | | |
| 6 | a | 1200 | 100 | 0,36 | 0,26 | 4 | | | | | | |
| 7 | б | 2000 | 500 | 250 | 100 | 10 | торцы жёстко закреплены, продольные кромки симметричны | $p = 110 \text{ кПа}$ | 09Г2 | | | |
| 8 | б | 2400 | 400 | 200 | 100 | 10 | один торец жёстко закреплен | | Ст. 3 | | | |
| 9 | б | 2100 | 300 | 150 | 50 | 12 | | $p = 80 \text{ кПа}$ | Ст. 3 | | | |
| 10 | б | 300 | 100 | 50 | 15 | 1 | | $p = 10 \text{ кПа}$ | 10ХСН | | | |
| 11 | б | 250 | 90 | 45 | 15 | 1 | | $p = 8 \text{ кПа}$ | 10ХСН | | | |

Продолжение табл. 5.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 12 | б | 270 | 100 | 30 | 12 | 2 | | | Д16 |
| 13 | в | 2000 | 500 | 250 | 100 | 10 | торцы жёстко закреплены, продольные кромки симметричны | $p = 110 \text{ кПа}$ | 09Г2 |
| 14 | в | 2400 | 400 | 200 | 100 | 10 | | | Ст. 3 |
| 15 | в | 2100 | 300 | 150 | 50 | 12 | один торец жёстко закреплен | $p = 80 \text{ кПа}$ | Ст. 3 |
| 16 | в | 300 | 100 | 50 | 15 | 1 | | | 10ХСН |
| 17 | в | 250 | 90 | 45 | 15 | 1 | | $p = 8 \text{ кПа}$ | 10ХСН |
| 18 | в | 270 | 100 | 30 | 12 | 2 | | | Д16 |
| 19 | г | 2000 | 100 | 100 | 20 | 4 | торцы шарнирно закреплены | $p = 1 \text{ кПа}$ на верхнюю поверхность | Д16 |
| 20 | г | 1000 | 100 | 50 | 10 | 3 | | | АМг-6 |
| 21 | г | 1000 | 80 | 40 | 0 | 3 | | | АМг-6 |
| 22 | г | 1000 | 70 | 60 | 20 | 3 | торцы жёстко закреплены | $p = 1 \text{ кПа}$ на нижнюю поверхность | АМг-6 |
| 23 | г | 1500 | 120 | 100 | 20 | 4 | | | Д16 |
| 24 | г | 1200 | 80 | 80 | 40 | 3 | | | Д16 |
| 25 | д | 300 | 100 | 0 | 50 | 1 | торцы жёстко закреплены | $p = 2 \text{ кПа}$ на накл. грань | Ст. 3 |
| 26 | д | 300 | 110 | 50 | 60 | 1 | | | АМг-6 |
| 27 | д | 300 | 70 | 70 | 40 | 1 | один торец жёстко закреплен | $F_y = 1 \text{ кН}$ по линии короткой кромки свободного торца | 09Г2 |
| 28 | д | 280 | 100 | 0 | 50 | 2 | | | Д16 |
| 29 | д | 320 | 100 | 0 | 50 | 1 | | | Ст. 3 |
| 30 | д | 260 | 60 | 40 | 30 | 1 | | | 10ХСН |
| 31 | е | 500 | 500 | 300 | 150 | 2 | торцы шарнирно закреплены | давление изнутри $p = 100 \text{ кПа}$ | 10ХСН |
| 32 | е | 400 | 300 | 300 | 100 | 1 | | | 09Г2 |
| 33 | е | 600 | 300 | 150 | 75 | 1 | | | 09Г2 |
| 34 | е | 2000 | 1000 | 900 | 200 | 10 | торцы жёстко закреплены | давление снаружи $p = 20 \text{ кПа}$ | Ст. 3 |
| 35 | е | 1600 | 900 | 900 | 100 | 8 | | | АМг-6 |
| 36 | е | 1800 | 1000 | 700 | 350 | 10 | | | Ст. 3 |

5.4.3. Лабораторная работа 3

Изображения конструкций представлены на рис. 5.29 – 5.33, а варианты заданий – в табл. 5.4, где параметр S означает толщину всех элементов оболочек. Размеры приведены в миллиметрах. Число поперечных связей на рис. 5.29 и 5.32 может быть различным и определяется размерами в табл. 5.4.

Обратите внимание, что некоторые конструкции имеют симметрию. Отбрасывание симметричных частей позволит сделать более густую сетку конечных элементов при меньших вычислительных затратах. Более того, это необходимо для задания закреплений типа условий симметрии.

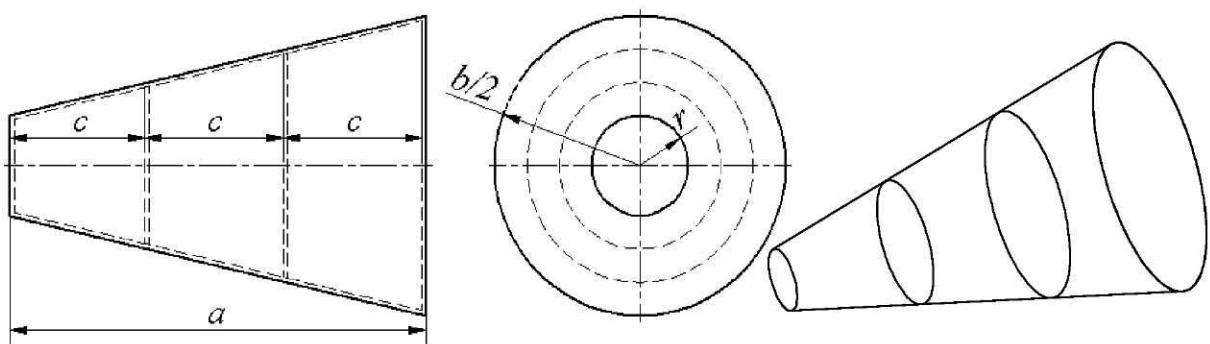


Рис. 5.29

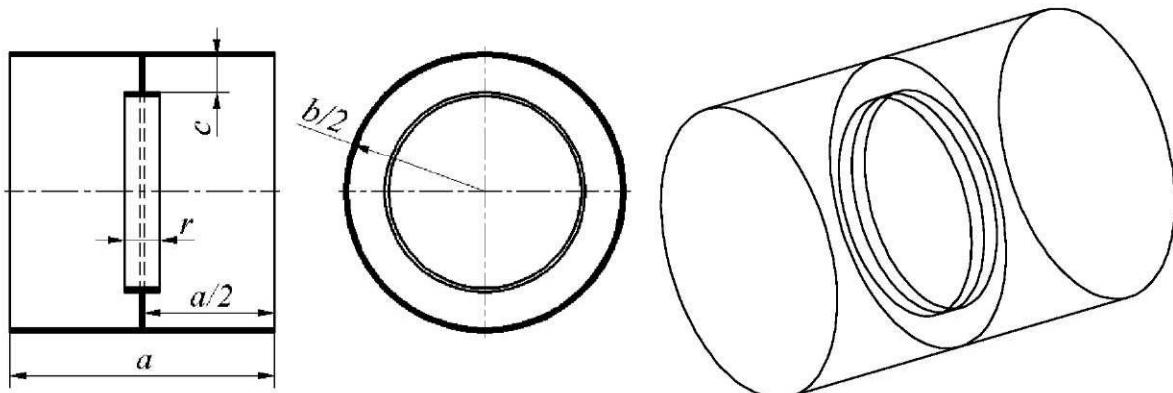


Рис. 5.30

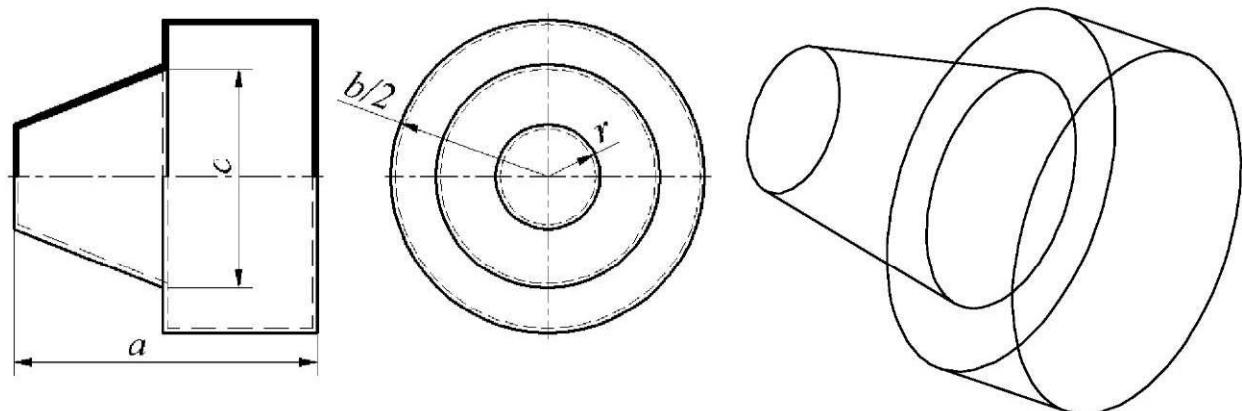


Рис. 5.31

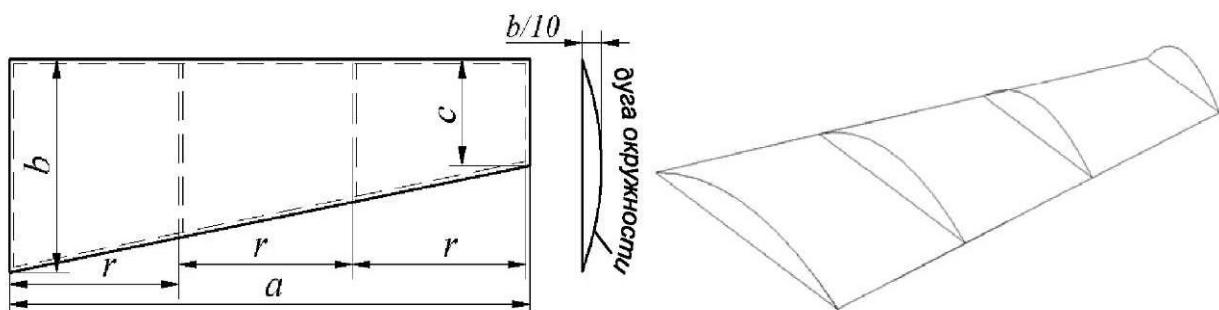


Рис. 5.32

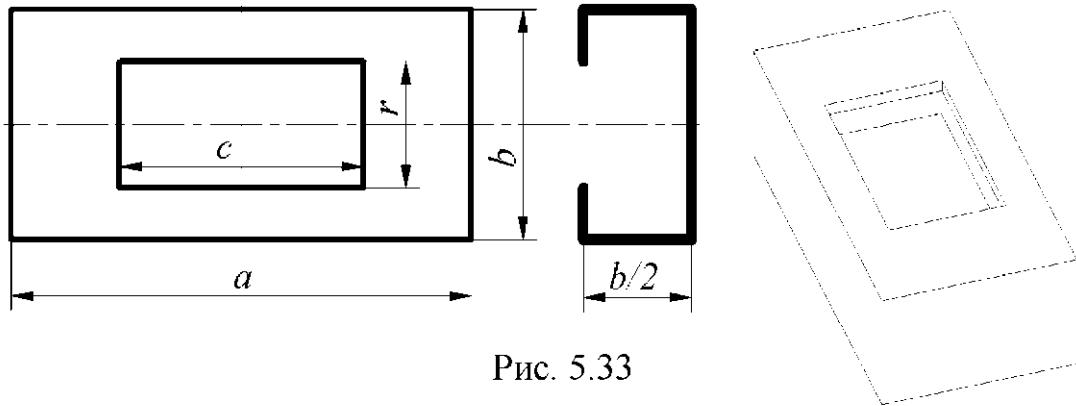


Рис. 5.33

Таблица 5.4

| н/п | Рис. 5.* | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|--|-----------|
| 1 | 29 | 900 | 800 | 300 | 200 | 3 | правый торец жёстко закреплён | $p = 60 \text{ кПа внутри правого отсека}$ | АМг-6 |
| 2 | 29 | 800 | 500 | 200 | 250 | 2,5 | | | |
| 3 | 29 | 500 | 400 | 250 | 50 | 2 | левый торец жёстко закреплён | $p = 100 \text{ кПа внутри левого отсека}$ | 10ХСНД |
| 4 | 29 | 600 | 300 | 200 | 100 | 2 | | | |
| 5 | 30 | 600 | 3000 | 400 | 200 | 30 | условия симметрии на торцах и относительно продольной оси | $p = 1 \text{ МПа снаружи}$ | 10ХСНД |
| 6 | 30 | 600 | 4000 | 300 | 0 | 40 | | | |
| 7 | 30 | 300 | 1000 | 200 | 60 | 20 | | $p = 1 \text{ МПа изнутри}$ | |
| 8 | 30 | 1200 | 800 | 300 | 0 | 10 | | $p = 110 \text{ кПа изнутри}$ | 09Г2 |
| 9 | 31 | 2000 | 1500 | 900 | 200 | 10 | линия окружности правого торца шарнирно закреплена | $p = 90 \text{ кПа на правый торец снаружи}$ | Ст. 3 |
| 10 | 31 | 200 | 150 | 120 | 20 | 2 | | $p = 90 \text{ кПа на правый торец снаружи}$ | Ст. 3 |
| 11 | 31 | 200 | 800 | 400 | 200 | 2 | | $F_y = 1 \text{ кН на короткое ребро правого торца}$ | 09Г2 |
| 12 | 31 | 500 | 400 | 250 | 150 | 10 | нижние рёбра шарнирно закреплены | $p = 10 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 13 | 32 | 1500 | 500 | 200 | 500 | 2 | | $p = 8 \text{ кПа}$ | 10ХСНД |
| 14 | 32 | 500 | 120 | 100 | 250 | 1 | | $p = 15 \text{ кПа}$ | Д16 |
| 15 | 32 | 2000 | 800 | 200 | 500 | 3 | | $p = 20 \text{ кПа изнутри на дно коробки}$ | АМг-6 |
| 16 | 32 | 2400 | 700 | 700 | 600 | 4 | левый торец жёстко закреплен | $p = 20 \text{ кПа изнутри на дно коробки}$ | 09Г2 |
| 17 | 33 | 2000 | 800 | 900 | 500 | 2 | | $p = 20 \text{ кПа изнутри на дно коробки}$ | Ст. 3 |
| 18 | 33 | 2000 | 1000 | 500 | 400 | 3 | | $F_y = 1 \text{ кН на короткое ребро правого торца}$ | Ст. 3 |
| 19 | 33 | 1000 | 700 | 800 | 500 | 2 | левый торец жёстко закреплен | $F_y = 1 \text{ кН на короткое ребро правого торца}$ | 10ХСНД |
| 20 | 33 | 900 | 500 | 900 | 300 | 2 | | $F_y = 1 \text{ кН на короткое ребро правого торца}$ | 10ХСНД |
| 21 | 33 | 500 | 200 | 400 | 100 | 1 | | | |

6. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЁМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

6.1. Пример расчёта планки с вырезами

Рассмотрим пример расчета напряженно-деформированного состояния планки с вырезами и вставкой (рис. 6.1).

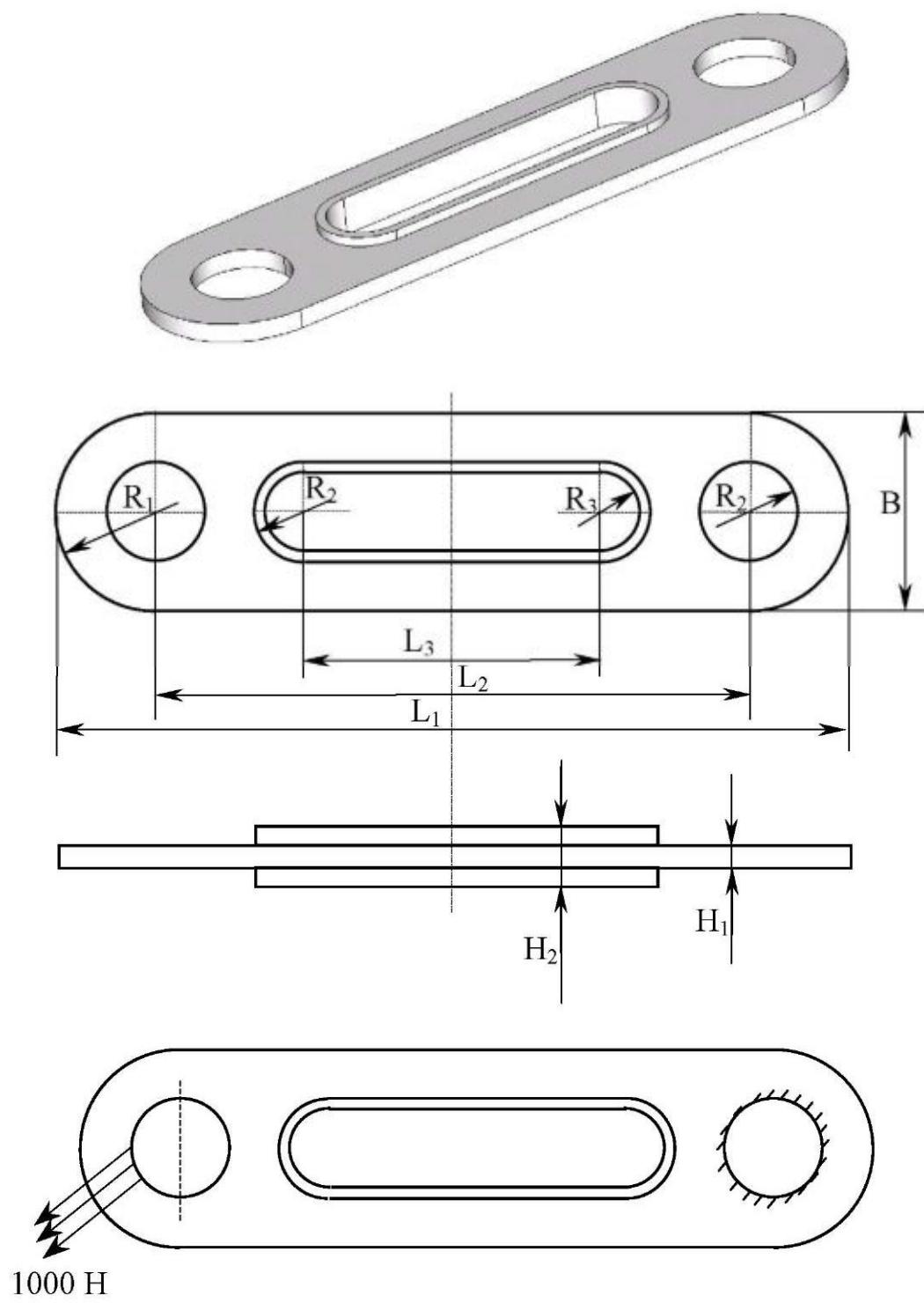


Рис. 6.1

Материал: сталь (St3) $E = 2.1e11$ Н/м²; $\nu_u = 0.3$; предел текучести $Tension = 235 e6$ Н/м².

Размеры: $L_1 = 400$ мм; $L_2 = 300$ мм; $L_3 = 150$ мм; $B = 100$ мм; $R_1 = 50$ мм; $R_2 = 25$ мм; $R_3 = 20$ мм; $H_1 = 10$ мм; $H_2 = 20$ мм.

Нагрузка: сила $F = 1000$ Н в плоскости XY под углом 45° к оси X и действующая на половину поверхности левого отверстия.

Закрепление: жесткое защемление поверхности правого отверстия.

Опишем действия, необходимые для решения данной задачи.

Создание точек. Выберите пункт меню **Geometry** (геометрия). В появившемся подменю выберите **Point** (точка). Далее введите последовательно координаты всех концевых точек в метрах (табл. 6.1).

Таблица 6.1

| н/п | X | Y | Z | н/п | X | Y | Z |
|-----|--------|-------|-------|-----|--------|-------|-------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 9 | -0.025 | 0.225 | 0.000 |
| 2 | 0.050 | 0.000 | 0.000 | 10 | 0.020 | 0.225 | 0.000 |
| 3 | -0.050 | 0.000 | 0.000 | 11 | -0.020 | 0.225 | 0.000 |
| 4 | 0.000 | 0.300 | 0.000 | 12 | 0.000 | 0.075 | 0.000 |
| 5 | 0.050 | 0.300 | 0.000 | 13 | 0.025 | 0.075 | 0.000 |
| 6 | -0.050 | 0.300 | 0.000 | 14 | -0.025 | 0.075 | 0.000 |
| 7 | 0.000 | 0.225 | 0.000 | 15 | 0.020 | 0.075 | 0.000 |
| 8 | 0.025 | 0.225 | 0.000 | 16 | -0.020 | 0.075 | 0.000 |

Создание границ и поверхностей. Прежде чем приступить к созданию поверхностей, нам необходимо соединить концевые точки отрезками и кривыми (дугами и окружностями). Вначале соединим отрезками прямолинейные участки, выбрав команду **Geometry** → **Curve-Line** → **Points...** и вводя последовательно пары точек. Окружности построим, выбрав команду **Geometry** → **Curve-Circle** → **Center...** В появившемся окне выберите **Methods** → **On Point** и укажите мышкой центр окружности, **OK**. В следующем оконце укажите радиус (в метрах), **OK**. После построения окружностей (их у нас две) строим дуги (их у нас шесть). Для построения дуг выберите команду **Geometry** → **Curve-Arc** → **Center-Start-End...** и в следующем окне укажите центр дуги – **OK**, затем начальную точку дуги - **OK** и конечную – **OK**. Обратите внимание на то, что дуги строятся, указывая начальную и конечную точки, против часовой стрелки.

Теперь приступаем к созданию границ и поверхностей. Выберите команду **Geometry Boundary Surface...** (определение границ сетки). В появившемся окне (рис. 6.2) следует пометить идентификационные номера (ID) линий, образующих границу поверхности. Для этого, двигая мышью, указывайте курсором на каждую линию и отмечайте ее щелчком левой кнопки (при этом отмеченная линия будет помечена кружком). На рис. 6.3 указаны все пять граничных поверхностей (отмечены штриховкой), которые нам понадобятся для дальнейшей работы.



Рис. 6.2

Сохранение модели. Для сохранения модели в меню выберите **File Save as ...** и введите имя файла модели. Назовем его braketa. Не забывайте далее сохранять вашу модель по мере ее формирования с помощью команды **Save**.

Создание твердого тела. Прежде всего, для удобства, с помощью команды **View → Rotate** повернем конструкцию в диметрию.

Создавать твердое тело будем способом выдавливания граничной поверхности. Для этого выберите команду **Geometry → Solid → Extrude**. В появившемся окне (рис. 6.4), прежде всего, необходимо определиться, какую поверхность будем выдавливать, для этого нажмите кнопку **Surface** (поверхность) и выберите поверхность, указанную на рис. 6.3, а.

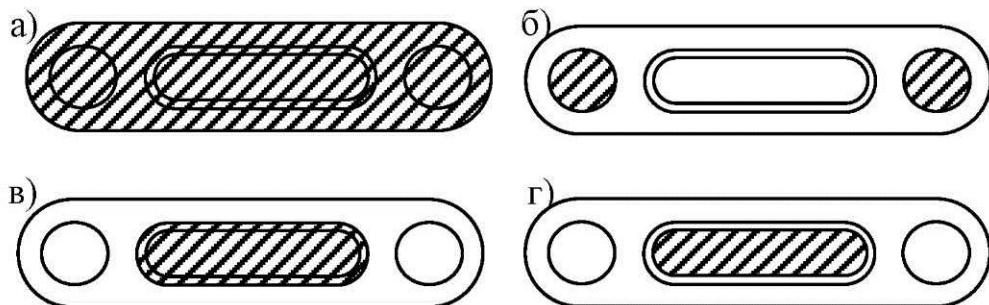


Рис. 6.3

В разделе **Material** по умолчанию будет выбрано **New Solid**, т.к. еще никаких твердых тел нет.

В разделе **Direction** выберите **Both Direction** (выдавливание по нормали к поверхности в двух направлениях), при этом стрелками будут показаны эти направления.

В разделе **Length** выберите **To Depth** (глубина) и укажите глубину выдавливания 0.005 м, т.к. выдавливание будет проходить в двух направлениях, то общая глубина (или толщина) будет составлять 10 мм.

Далее выберите **OK**, в результате чего первое твердое тело (основание) будет создано.

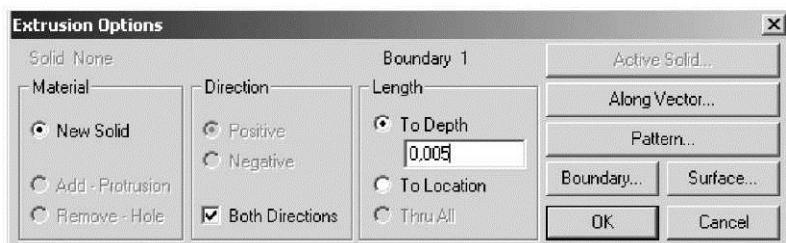


Рис. 6.4

Далее "изготовим" вставку.

Для этого вновь выберите команду **Geometry → Solid → Extrude**. В появившемся окне (рис. 6.5) определимся с поверхностью, которую будем выдавливать, для этого нажмите кнопку **Surface** (поверхность) и выберите поверхность, указанную на рис. 6.3, в.

В разделе **Material** выберите **Add - Protrusion** (добавление дополнительных элементов для уже существующего тела).

В разделе **Direction** выберите **Both Direction** (выдавливание по нормали к поверхности в двух направлениях), при этом стрелками будут показаны эти направления.

В разделе **Length** выберите **To Depth** (глубина) и укажите глубину выдавливания 0.01 м, т.к. выдавливание будет проходить в двух направлениях, то общая глубина (или толщина) будет составлять 20 мм. Далее выберите **OK**.

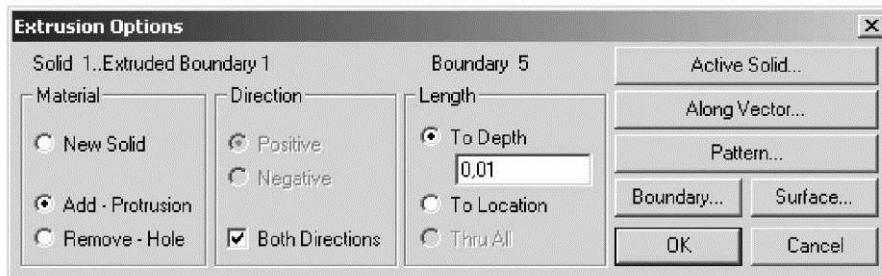


Рис. 6.5

Теперь займемся отверстиями.

Для этого вновь выберите команду **Geometry → Solid → Extrude**. В появившемся окне (рис. 6.6) определимся с поверхностью, которую будем выдавливать, для этого нажмите кнопку **Surface** (поверхность) и выберите поверхность одного из отверстий, указанных на рис. 6.3, б.

В разделе **Material** выберите **Remove - Hole** (отверстие).

В разделе **Direction** выберите **Both Direction** (выдавливание по нормали к поверхности в двух направлениях), при этом стрелками будут показаны эти направления.

В разделе **Length** выберите **Thru All** (сквозное отверстие через все тело).

Далее выберите **OK**, в результате чего первое отверстие в теле будет создано.

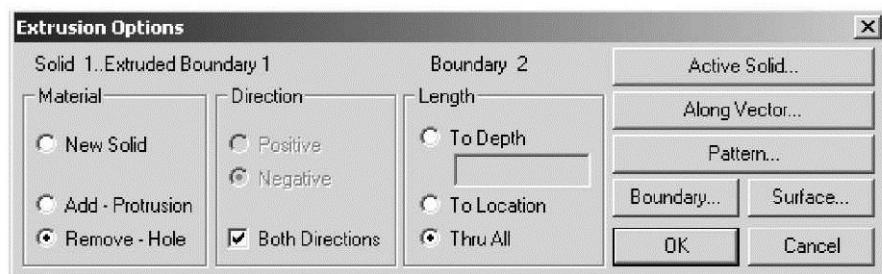


Рис. 6.6

Для создания второго отверстия (рис. 6.3, б) и отверстия, указанного на рис. 6.3, г, необходимо повторить все команды, описанные выше для создания отверстий.

Полностью сформированная твердотельная конструкция представлена на рис. 6.7 в виде граничных поверхностей и в твердотельном на рис. 6.1.



Рис. 6.7

Для получения конструкции в твердотельном представлении выберите на панели инструментов кнопку . И в появившемся меню (рис. 6.8) выберите **Rendered Solid**.

В процессе построения твердотельной конструкции существует возможность скруглять кромки. В качестве примера сделаем скругление радиусом 2 мм на внешней кромке планки. Выберите команду **Geometry → Solid → Fillet**. В появившемся окне укажите сначала все линии по внешней кромке планки и нажмите **OK**. В появившемся окне укажите радиус скругления кромки 0.002 м.

Увеличенная часть детали со скруглением представлена на рис. 6.9.

Рис. 6.8

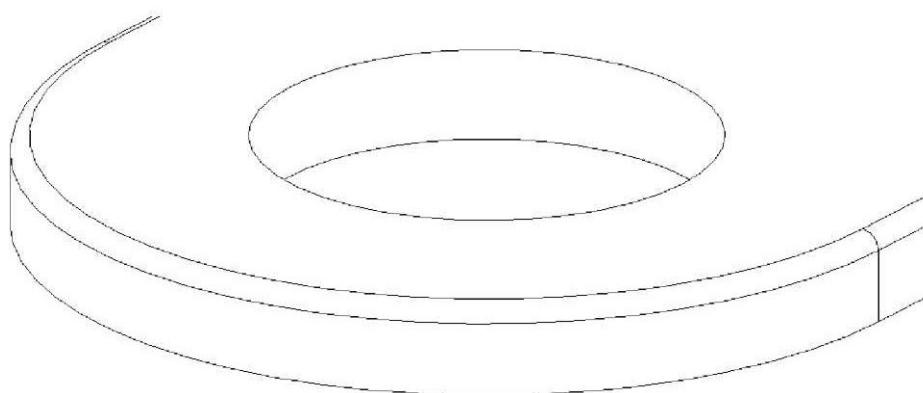


Рис. 6.9

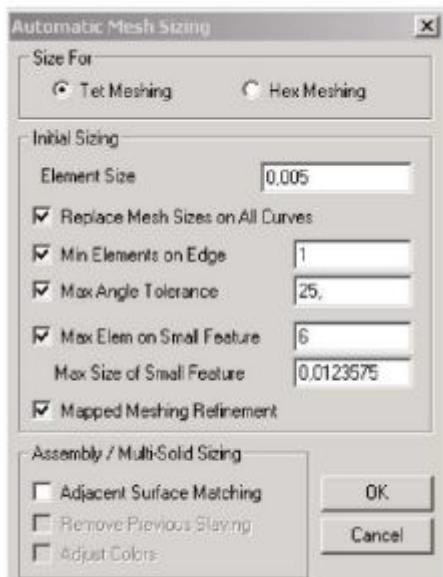


Рис. 6.10



Рис. 6.11

Процесс формирования сетки элементов может занять несколько секунд. Конечноэлементная модель детали представлена на рис. 6.12.



Рис. 6.12

Задание граничных условий. Сформируем условия жесткого защемления по внутренней поверхности одного из концевых отверстий (рис. 6.1). Выберите в меню команду задания варианта закрепления: **Model →**

Constraint → On Surface... В возникшем диалоговом окне для варианта закрепления ID = 1 введите его название (**Title**), например «Fixed» (необязательно), после чего укажите **OK**.

Далее появится окно, в котором следует отметить номера закрепляемых поверхностей (рис. 6.13). Это можно сделать, отметив щелчком левой кнопки мыши каждую из двух поверхностей (при выделении они меняют цвет). После указания граничных поверхностей выберите **OK**.

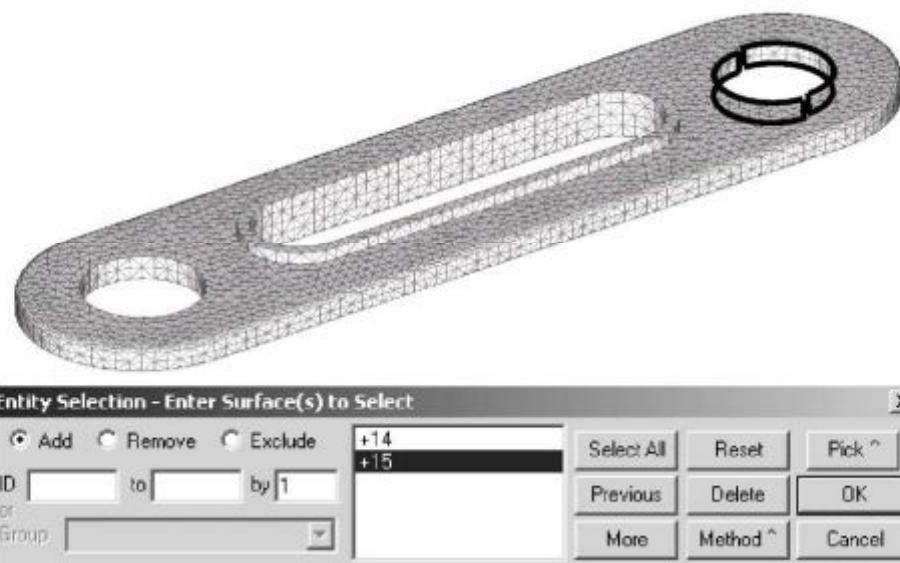


Рис. 6.13

Появится новое диалоговое окно - для закрепления поверхности по степеням свободы (рис. 6.14). В блоке **DOF - Degrees Of Freedom** (степени свободы) следует мышью отметить **Fixed** (жесткое защемление), а затем - **OK**. Выберите далее кнопку **Cancel** для выхода из окна задания закреплений.

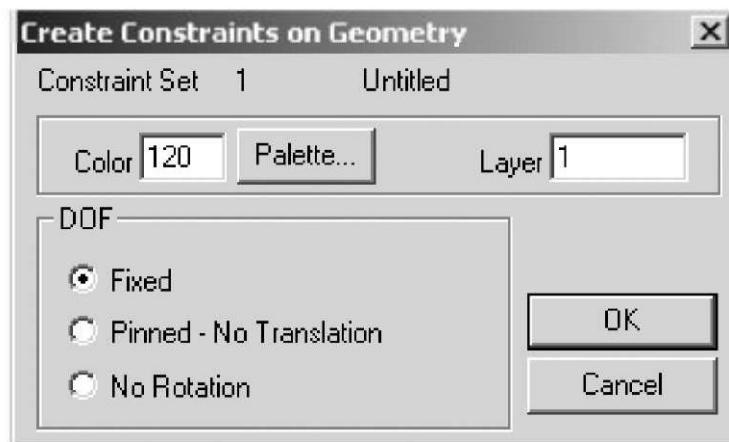


Рис. 6.14

Задание нагрузления. Выберите в меню команду **Model Load On Surface** (нагрузка по поверхности). Появится окно, в котором следует указать вариант нагружения, например "Нагрузка", **OK**.

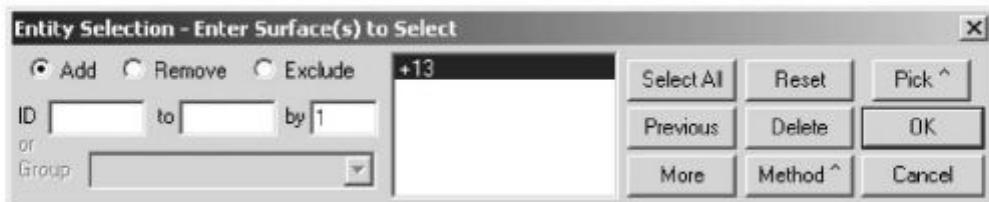
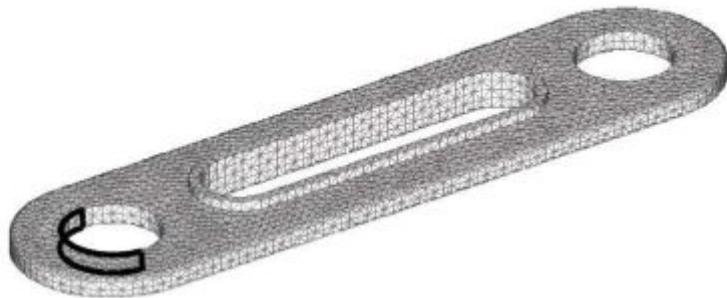


Рис. 6.15

Далее появится диалоговое окно, изображенное на рис. 6.15. Отметьте поверхность щелчком левой кнопки мыши (поверхности при выделении отмечаются цветом), **OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 6.16.

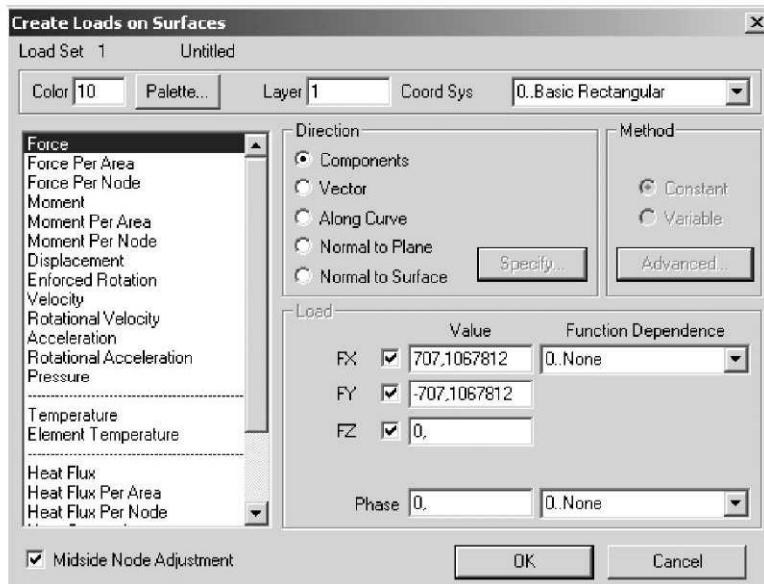


Рис. 6.16

В этом окне необходимо выбрать **Force** (усилие), а в окошке **Load Value** укажите величину нагрузки $F_x = 707.107$ Н и $F_y = -707.107$ Н (при этом результирующая сила будет составлять 1000 Н). Далее выберите **OK** и **Cancel**. Таким образом, нагрузка задана.

Сохраните окончательную модель (задайте команду **File Save**).

Выполнение расчета. Выберите в меню команду **File Analyze...** для установки параметров и запуска вычислительного процесса. Выберите **OK**.

В процессе расчета (который может занять до нескольких минут времени, в зависимости от быстродействия компьютера) информация о выполняемых действиях отражается в окне **MSC/NASTRAN Manager**.

После завершения вычислений появляется окно **Message Review**, в котором отражается количество ошибок, выявленных в процессе вычислений (**Errors**), предупреждений о возможной потере точности (**Warnings**) и прочая информация. Из этого окна можно сразу выйти (**Continue**) либо, если имеются ошибки и предупреждения, просмотреть более подробные сообщения.

Просмотр результатов анализа. Выберите команду **View Select...**

или нажмите кнопку  на панели инструментов, позволяющую выбрать в диалоговом окне (рис. 6.17) стиль графического изображения модели и результатов расчетов.

В столбце **Contour Style** выберите стиль **Contour**. Он представляет собой изображение полей (напряжений, перемещений и прочее) в виде изохром - цветных участков, цвет которых означает определенное значение интересующей величины. Выбор параметров, подлежащих рассмотрению, производится в диалоговом окне, которое вызывается кнопкой **Deformed and Contour Data...**

Деформацию можно наглядно представить, выбрав в столбце **Deformed Style** пункт **Deform**.

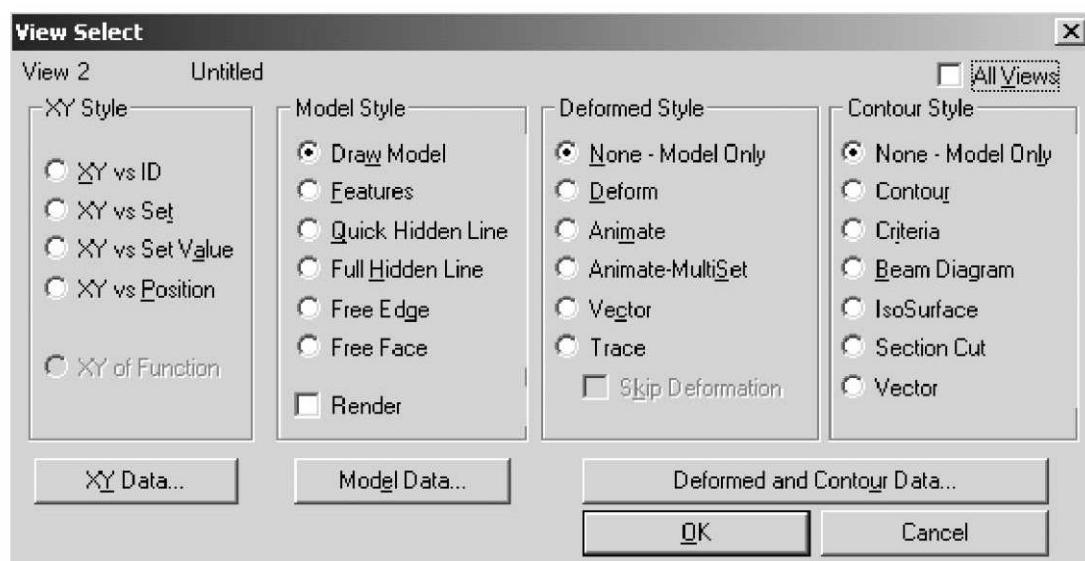


Рис. 6.17

На рис. 6.18 показано напряженно-деформированное состояние с полями напряжений.

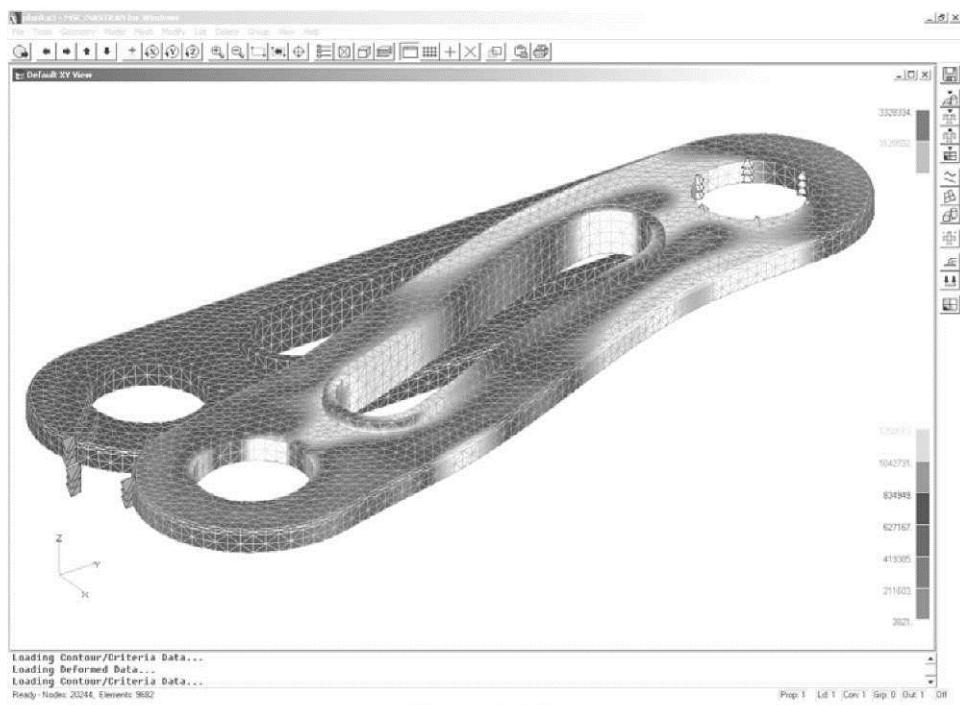


Рис. 6.18

6.2. Варианты заданий для лабораторных работ по анализу объёмных деталей

6.2.1. Лабораторная работа 1

Изображения деталей представлены на рис. 6.19 – 6.20, а варианты заданий – в табл. 6.2 – 6.3. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы все размерности переведите в систему СИ.

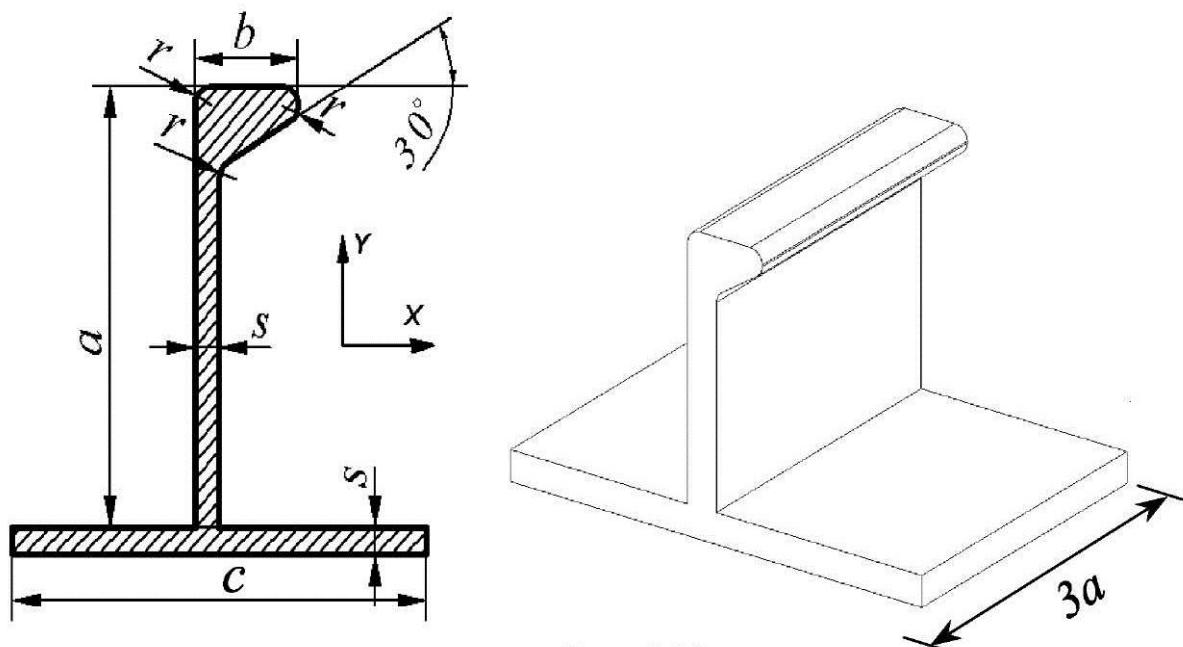


Рис. 6.19

Таблица 6.2

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|---|-----------|
| 1 | 60 | 19 | 80 | 3,5 | 5 | жёстко закреплён один торец | Сила $F_y = 10$ кН распределена по нижней кромке свободного торца | 09Г2 |
| 2 | 70 | 21 | 30 | 3,5 | 5 | | | 09Г2 |
| 3 | 160 | 38 | 40 | 7 | 10 | | | Ст. 3 |
| 4 | 100 | 38 | 100 | 7 | 10 | | | Ст. 3 |
| 5 | 80 | 22 | 80 | 4 | 5 | жёстко закреплены две нижние продольные кромки | давление $p = 50$ кПа на нижнюю грань | 09Г2 |
| 6 | 70 | 21 | 30 | 3,5 | 5 | | | 09Г2 |
| 7 | 160 | 38 | 60 | 7 | 10 | | | 09Г2 |
| 8 | 100 | 38 | 100 | 7 | 10 | | | Ст. 3 |
| 9 | 120 | 38 | 50 | 7 | 10 | шарнирно закреплены две нижние продольные кромки | давление $p = 100$ кПа на верхнюю грань бульба | Ст. 3 |
| 10 | 110 | 38 | 90 | 7 | 10 | | | 10ХСНД |
| 11 | 80 | 22 | 30 | 4 | 5 | | | 10ХСНД |
| 12 | 70 | 21 | 80 | 3,5 | 5 | | | Ст. 3 |

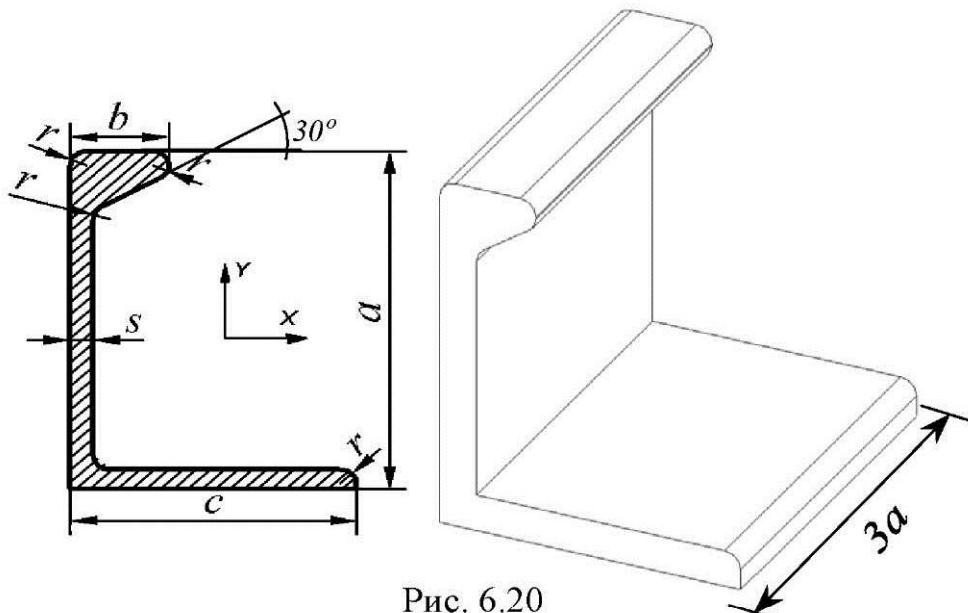


Рис. 6.20

Таблица 6.3

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 13 | 25 | 8 | 20 | 2 | 2 | жёстко закреплён один торец | давление $p = 80$ кПа на стенку с обратной стороны от бульба | АМг-6 |
| 14 | 60 | 15 | 35 | 5 | 6 | | | АМг-6 |
| 15 | 75 | 18 | 50 | 5 | 7 | | | АМг-6 |
| 16 | 50 | 13 | 0 | 5 | 6 | | | АМг-6 |
| 17 | 25 | 8 | 15 | 2 | 2 | жёстко закреплены две нижние продольные кромки | давление $p = 100$ кПа на верхнюю грань бульба | АМг-6 |
| 18 | 60 | 15 | 25 | 5 | 6 | | | АМг-6 |
| 19 | 75 | 18 | 40 | 5 | 7 | | | АМг-6 |
| 20 | 50 | 13 | 25 | 5 | 6 | | | АМг-6 |
| 21 | 25 | 8 | 10 | 2 | 2 | шарнирно закреплены две нижние поперечные кромки | давление $p = 90$ кПа на нижнюю грань | АМг-6 |
| 22 | 60 | 15 | 30 | 5 | 6 | | | АМг-6 |
| 23 | 75 | 18 | 45 | 5 | 7 | | | АМг-6 |
| 24 | 50 | 13 | 50 | 5 | 6 | | | АМг-6 |

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- значения перемещений и напряжений в наиболее характерных точках (не менее трех точек), в том числе и наибольшие значения;
- сделать заключение о прочности конструкции, дать предложения по увеличению прочности и жесткости конструкции.

6.2.2. Лабораторная работа 2

Изображения деталей представлены на рис. 6.21 – 6.22, а варианты заданий – в табл. 6.4 – 6.5. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы все размерности переведите в систему СИ.

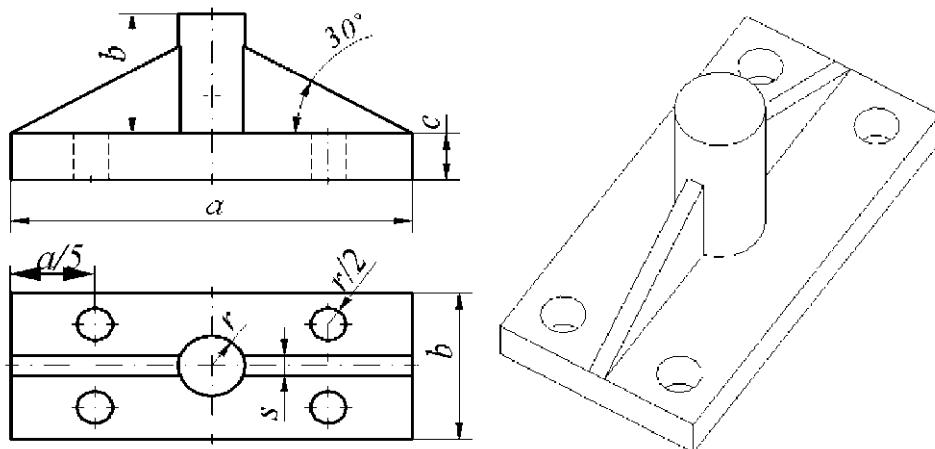


Рис. 6.21

Таблица 6.4

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | матер-иал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 1 | 25 | 20 | 5 | 5 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям отверстий | давление $p = 100 \text{ кПа}$ на торец цилиндра | АМг-6 |
| 2 | 60 | 30 | 5 | 8 | 5 | | | 09Г2 |
| 3 | 200 | 150 | 20 | 40 | 15 | | | 09Г2 |
| 4 | 120 | 36 | 15 | 4 | 8 | | | Ст. 3 |
| 5 | 30 | 18 | 5 | 5 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям трёх отверстий | давление $p = 80 \text{ кПа}$ на торец цилиндра | Ст. 3 |
| 6 | 80 | 30 | 5 | 8 | 5 | | | АМг-6 |
| 7 | 160 | 150 | 20 | 40 | 15 | | | 10ХСНД |
| 8 | 100 | 44 | 15 | 6 | 10 | | | Ст. 3 |
| 9 | 35 | 15 | 5 | 5 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям двух ближайших отверстий | растяжение $p = 90 \text{ кПа}$ на грань основания, наиболее удалённую от закреплённых вырезов | АМг-6 |
| 10 | 90 | 30 | 5 | 8 | 5 | | | АМг-6 |
| 11 | 180 | 150 | 20 | 40 | 15 | | | 10ХСНД |
| 12 | 140 | 90 | 15 | 10 | 15 | | | Ст. 3 |

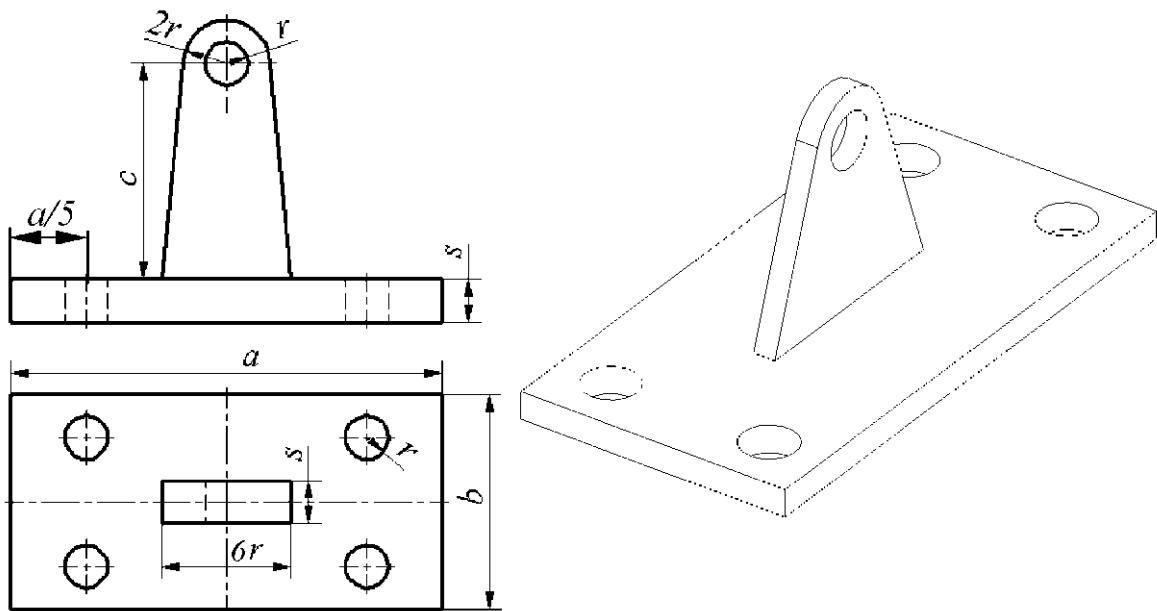


Рис. 6.22

Таблица 6.5

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 13 | 45 | 21 | 50 | 3 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям нижних отверстий | сила $F_x = 1 \text{ кН}$ на узлы отверстия в проушине | АМг-6 |
| 14 | 80 | 50 | 40 | 6 | 8 | | | 09Г2 |
| 15 | 200 | 150 | 90 | 10 | 14 | | | 09Г2 |
| 16 | 120 | 56 | 35 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |
| 17 | 45 | 32 | 60 | 3 | 6 | жёсткое закрепление по поверхностям трёх нижних отверстий | сила $F_y = 1 \text{ кН}$ на узлы отверстия в проушине | Ст. 3 |
| 18 | 80 | 60 | 50 | 6 | 8 | | | АМг-6 |
| 19 | 200 | 140 | 200 | 10 | 14 | | | 10ХСНД |
| 20 | 120 | 90 | 100 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |
| 21 | 45 | 40 | 70 | 3 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям двух ближайших отверстий | сила $F_z = 1 \text{ кН}$ на узлы отверстия в проушине | АМг-6 |
| 22 | 80 | 50 | 80 | 6 | 10 | | | АМг-6 |
| 23 | 200 | 120 | 110 | 10 | 14 | | | 10ХСНД |
| 24 | 120 | 60 | 150 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- значения перемещений и напряжений в наиболее характерных точках (не менее трех точек), в том числе и наибольшие значения;
- сделать заключение о прочности конструкции, дать предложения по увеличению прочности и жесткости конструкции.

6.2.3. Лабораторная работа 3

Изображения деталей представлены на рис. 6.23 – 6.24, а варианты заданий – в табл. 6.6 – 6.7. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы все размерности переведите в систему СИ.

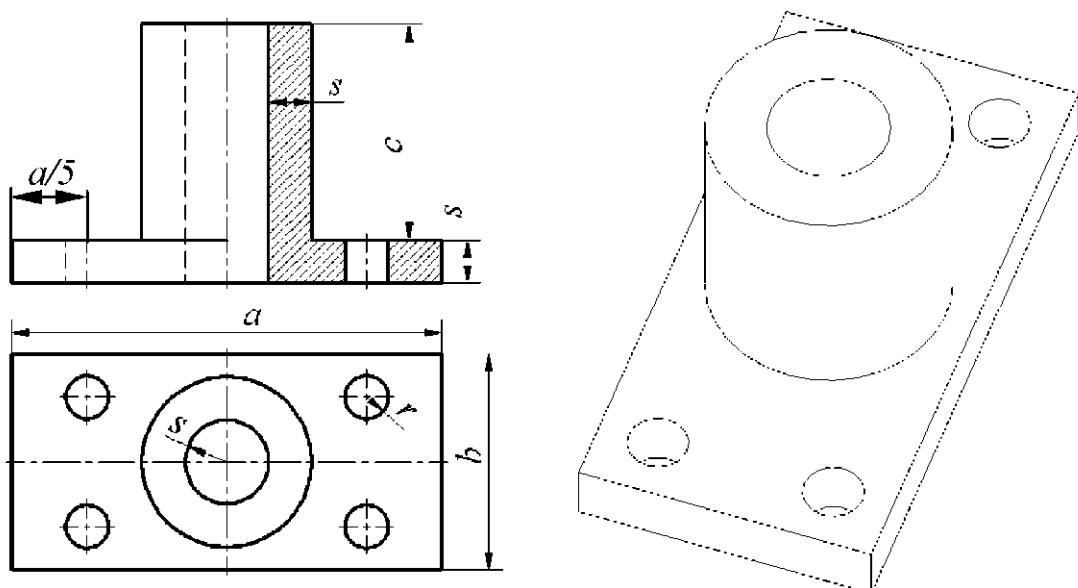


Рис. 6.23

Таблица 6.6

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 1 | 48 | 28 | 40 | 3 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям нижних отверстий | давление $p = 200 \text{ кПа}$ изнутри цилиндра | АМг-6 |
| 2 | 80 | 50 | 80 | 5 | 7 | | | 09Г2 |
| 3 | 200 | 150 | 90 | 10 | 13 | | | 09Г2 |
| 4 | 120 | 56 | 35 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |
| 5 | 45 | 32 | 60 | 3 | 6 | жёсткое закрепление по поверхностям трёх нижних отверстий | давление $p = 80 \text{ кПа}$ на торец цилиндра | Ст. 3 |
| 6 | 80 | 65 | 50 | 6 | 8 | | | АМг-6 |
| 7 | 195 | 144 | 170 | 10 | 14 | | | 10ХСНД |
| 8 | 130 | 90 | 100 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |
| 9 | 45 | 45 | 70 | 3 | 4 | жёсткое закрепление по поверхностям двух ближайших отверстий | сила $F_x = 1 \text{ кН}$ на узлы двух отверстий, симметричных закреплённым отверстиям | АМг-6 |
| 10 | 80 | 55 | 80 | 6 | 10 | | | АМг-6 |
| 11 | 205 | 120 | 110 | 10 | 14 | | | 10ХСНД |
| 12 | 122 | 60 | 150 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |

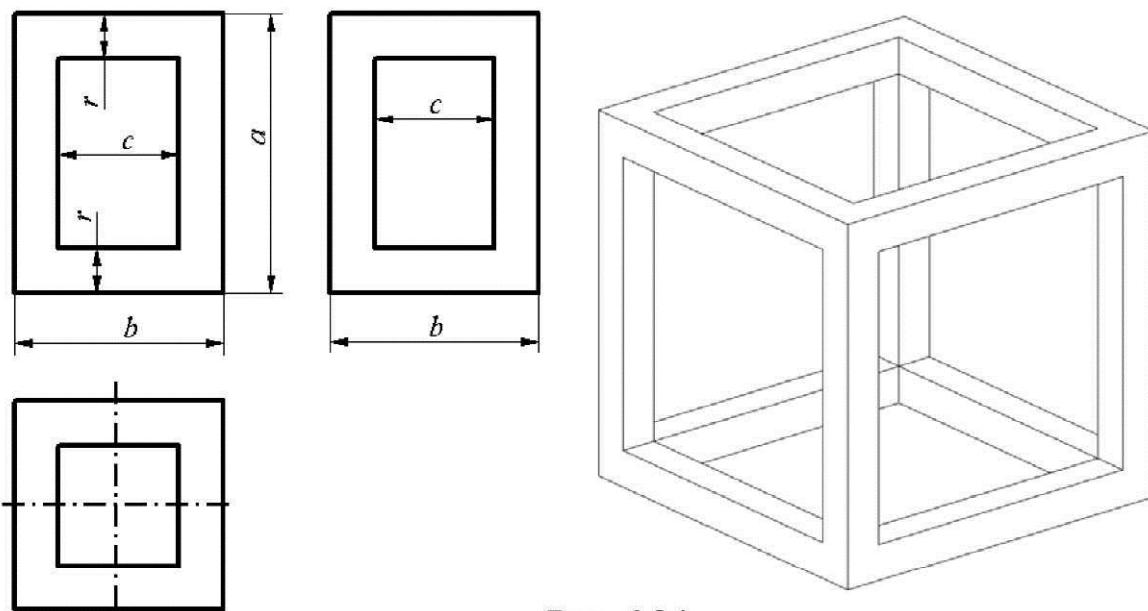


Рис. 6.24

Таблица 6.7

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|---|--|-----------|
| 13 | 48 | 28 | 12 | 8 | шарнирное закрепление в четырёх нижних наружных углах | давление $p = 100 \text{ кПа}$ на одну боковую грань | АМг-6 |
| 14 | 80 | 50 | 30 | 20 | | | 09Г2 |
| 15 | 200 | 150 | 90 | 15 | | | 09Г2 |
| 16 | 120 | 60 | 40 | 40 | | | Ст. 3 |
| 17 | 48 | 28 | 6 | 6 | шарнирное закрепление двух противолежащих нижних наружных рёбер | давление $p = 200 \text{ кПа}$ на верхнюю грань | Ст. 3 |
| 18 | 80 | 50 | 0 | 10 | | | АМг-6 |
| 19 | 200 | 150 | 110 | 30 | | | 10ХСНД |
| 20 | 120 | 60 | 40 | 40 | | | Ст. 3 |
| 21 | 48 | 28 | 10 | 8 | шарнирное закрепление двух смежных нижних наружных рёбер | сила $F_z = 1 \text{ кН}$ на боковое ребро, наиболее удалённое от закреплённых рёбер | АМг-6 |
| 22 | 80 | 50 | 25 | 15 | | | АМг-6 |
| 23 | 210 | 150 | 90 | 15 | | | 10ХСНД |
| 24 | 125 | 60 | 40 | 15 | | | Ст. 3 |

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- значения перемещений и напряжений в наиболее характерных точках (не менее трех точек), в том числе и наибольшие значения;
- сделать заключение о прочности конструкции, дать предложения по увеличению прочности и жесткости конструкции.

6.2.4. Лабораторная работа 4

Изображения деталей представлены на рис. 6.25 – 6.26, а варианты заданий – в табл. 6.8 – 6.9. Размеры приведены в миллиметрах. Для выполнения работы все размерности переведите в систему СИ.

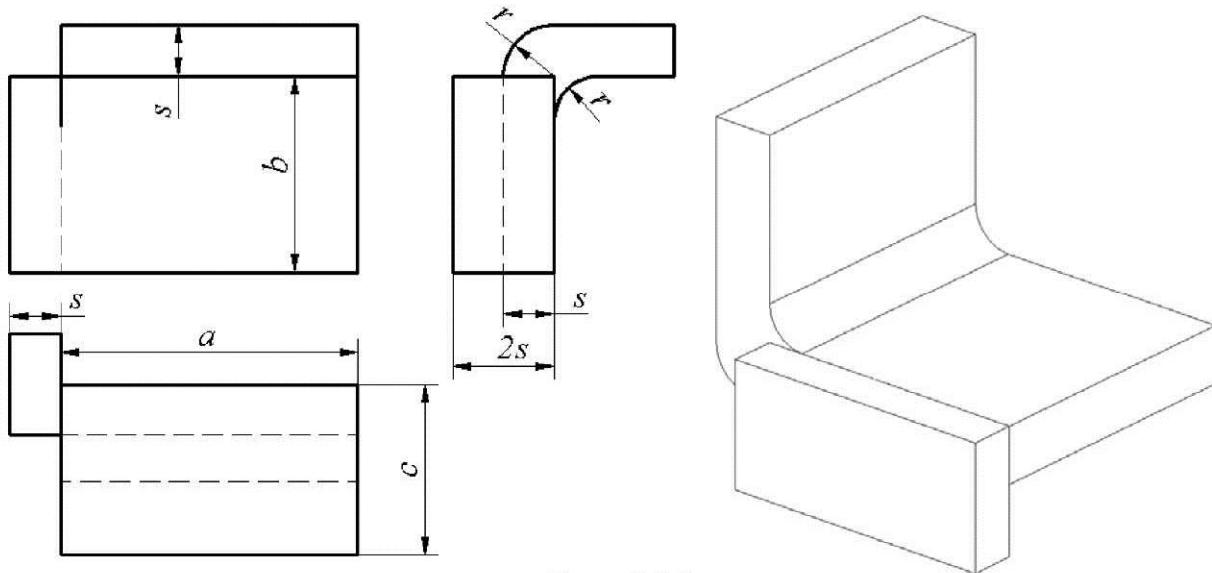


Рис. 6.25

Таблица 6.8

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|---|--|-----------|
| 1 | 300 | 200 | 60 | 15 | 20 | жёсткое закрепление нижней грани | давление $p = 100\text{кПа}$ на верхнюю грань | АМг-6 |
| 2 | 80 | 80 | 30 | 10 | 15 | | | 09Г2 |
| 3 | 200 | 100 | 70 | 0 | 30 | | | 09Г2 |
| 4 | 120 | 60 | 40 | 6 | 16 | | | Ст. 3 |
| 5 | 45 | 32 | 60 | 3 | 6 | жёсткое закрепление нижней грани и ус- ловие симметрии по правой грани | давление $p = 200\text{кПа}$ на верхнюю грань | Ст. 3 |
| 6 | 80 | 65 | 50 | 6 | 8 | | | АМг-6 |
| 7 | 195 | 144 | 170 | 10 | 14 | | | 10ХСНД |
| 8 | 130 | 90 | 100 | 0 | 16 | | | Ст. 3 |
| 9 | 45 | 45 | 70 | 10 | 6 | жёсткое закрепление правой грани | давление $p = 200\text{кПа}$ на крайнюю левую грань | АМг-6 |
| 10 | 80 | 55 | 80 | 6 | 10 | | | АМг-6 |
| 11 | 205 | 120 | 110 | 10 | 30 | | | 10ХСНД |
| 12 | 122 | 60 | 150 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |

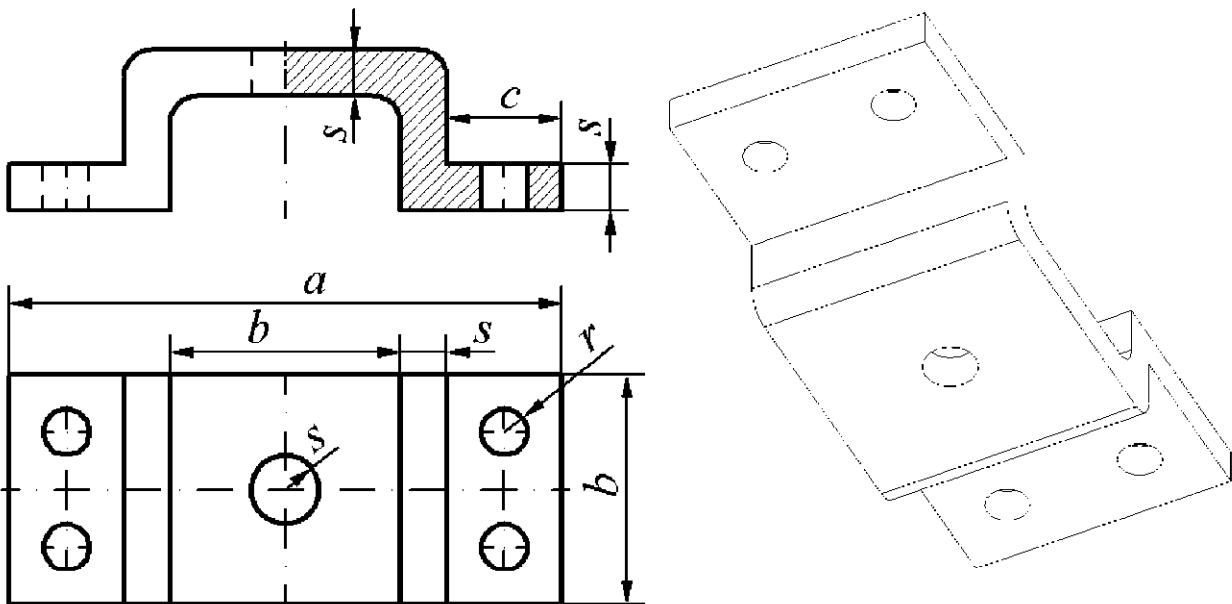


Рис. 6.26

Таблица 6.9

| н/п | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>r</i> | <i>s</i> | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|-----------|
| 13 | 360 | 200 | 60 | 20 | 20 | жёсткое закрепление нижних граней | давление $p = 100 \text{ кПа}$ на верхнюю грань | АМг-6 |
| 14 | 170 | 80 | 30 | 8 | 15 | | | 09Г2 |
| 15 | 230 | 70 | 50 | 10 | 30 | | | 09Г2 |
| 16 | 180 | 60 | 40 | 10 | 40 | | | Ст. 3 |
| 17 | 360 | 200 | 60 | 20 | 20 | жёсткое закрепление по поверхностям трёх нижних отвер- стий | сила $F_z = -1 \text{ кН}$ на линию верхней ок- ружности централь- ного отверстия | Ст. 3 |
| 18 | 170 | 80 | 30 | 10 | 15 | | | АМг-6 |
| 19 | 230 | 70 | 50 | 8 | 30 | | | 10ХСНД |
| 20 | 172 | 60 | 40 | 8 | 16 | | | Ст. 3 |
| 21 | 360 | 200 | 60 | 20 | 20 | жёсткое закрепление по поверхностям двух ближайших отверстий | сила $F_x = 1 \text{ кН}$ на уз- лы двух отверстий, симметричных за- креплённым отвер- стиям | АМг-6 |
| 22 | 170 | 80 | 30 | 10 | 15 | | | АМг-6 |
| 23 | 230 | 70 | 50 | 12 | 30 | | | 10ХСНД |
| 24 | 172 | 60 | 40 | 6 | 16 | | | Ст. 3 |

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- значения перемещений и напряжений в наиболее характерных точках (не менее трех точек), в том числе и наибольшие значения;
- сделать заключение о прочности конструкции, дать предложения по увеличению прочности и жесткости конструкции.

7. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ

7.1. Пример расчёта на устойчивость оболочки

Рассмотрим пример анализа устойчивости цилиндрической оболочки (рис. 7.1).

Материал: St3 ($E=2.1 \times 10^11$ Н/м²); $\nu_u=0.3$; $\sigma_t=235 \times 10^6$ Па.

Размер: $L=1$ м; $d=1$ м; толщина пластины $t_{pl}=0.01$ м.

Границные условия – шарнир (отсутствие изгибающих моментов)
по торцам оболочки.

Нагрузка – давление на поверхность $P=100$ кН.

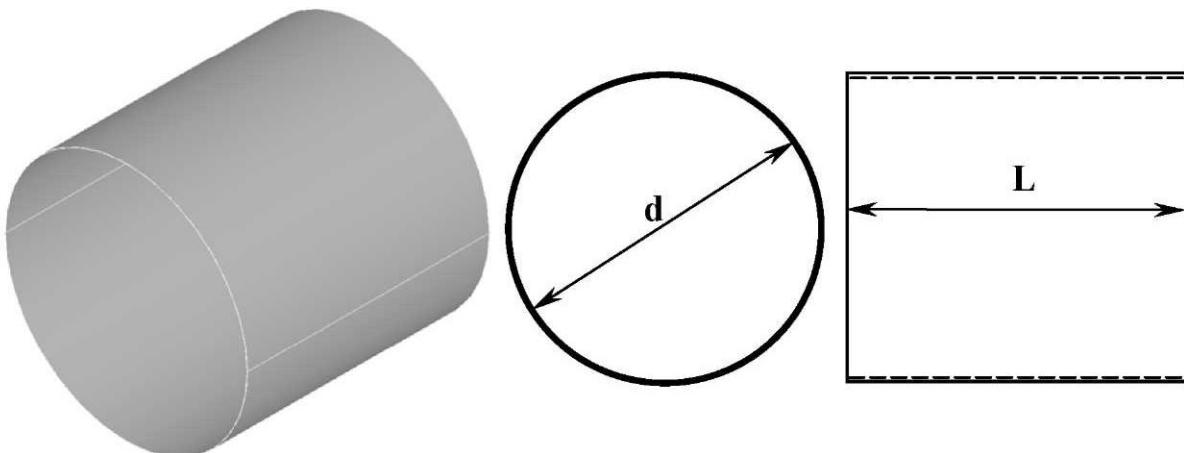


Рис. 7.1

Опишем действия, необходимые для решения данной задачи.

Создание окружности. Выберите пункт меню **Geometry Curve-Circle Center**. В появившемся окне введите координаты центра окружности, в нашем случае ($x=0$, $y=0$, $z=0$), **OK**. Во вновь появившемся окне укажите радиус =0.5 м, **OK** и **Cancel**.

Так как исследуемая конструкция трехмерна, удобно ее расположить в изометрии, выбрав **View Rotate Isometric**.

Далее необходимо создать поверхность оболочки, используя способ выдавливания окружности. Выполните команду **Geometry Surface Extrude**. В появившемся окне выберите мышкой выдавливаемый примитив – окружность. Во вновь появившемся окне выберите **Methods** и далее **Global Axis**. В окне, указанном на рис. 7.2, выберите направление выдавливания - по оси **Z** и длину выдавливания 1 м, нажмите **OK** и **Cancel**.

Для лучшего изображения оболочки выберите **View Autoscale** и - **Rendered Solid**.

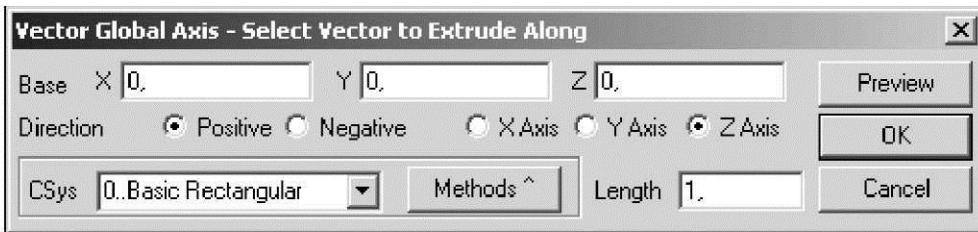


Рис. 7.2

Сохранение модели. Для сохранения модели в меню выберите **File Save as ...** и введите имя файла модели. Назовем его truba.mod. Не забывайте далее сохранять вашу модель по мере ее формирования с помощью команды **Save**.

Задание свойств материала. Определим свойства материала. Выберем в меню **Model Material** (создать материал). В результате появится диалоговое окно для задания материала (рис. 7.3).

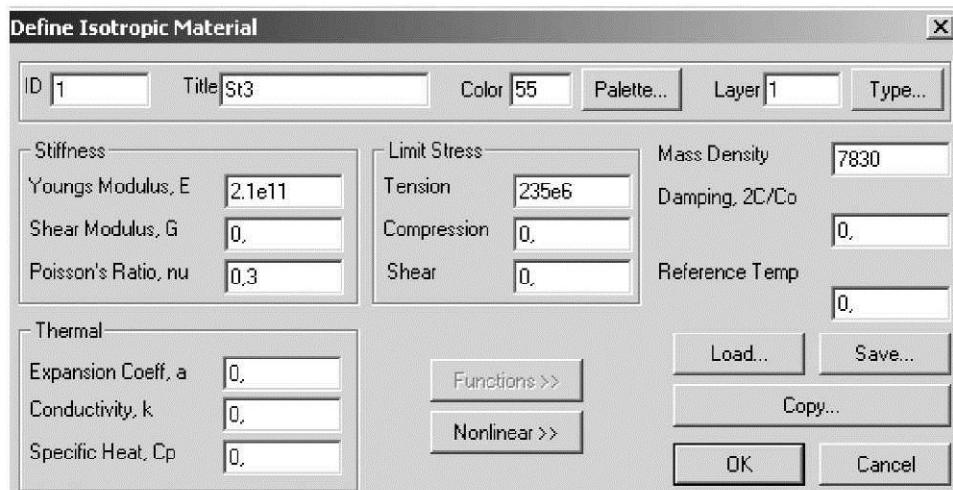


Рис. 7.3

По умолчанию материал полагается изотропным. Если тип материала другой, например ортотропный, то щелкните по кнопке **Type**. В графе **Title** задайте метку материала, например St3. В разделе **Stiffness** определим: модуль упругости $E = 2.1e11 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. В разделе **Limit Stress** можно определить допускаемые напряжения на растяжение, сжатие и сдвиг. Для выполнения расчета на устойчивость остальные свойства можно не задавать.

После ввода свойств материала выберите пункт **OK**. Далее будет предложено задать свойства следующего материала (**ID = 2**). Так как в этом нет необходимости, то выберите **Cancel**.

Задание свойств элементов конструкции. Выберем команду **Model Property**. Появится диалоговое окно (рис. 7.4). По умолчанию окно настроено на ввод характеристик пластины. Кнопкой **Elem / Property Type...** можно настроить окно на другие типы конструкций (например, балки, мембранны, трубы и пр.).

Выберите в данном окне материал (**Material St3**). В разделе **Property Values** введите значение 0.01 м для свойства **T1** - это толщина пластины. В разделе **Title** введите имя **plate**. Остальные свойства в данном примере можно принять по умолчанию.

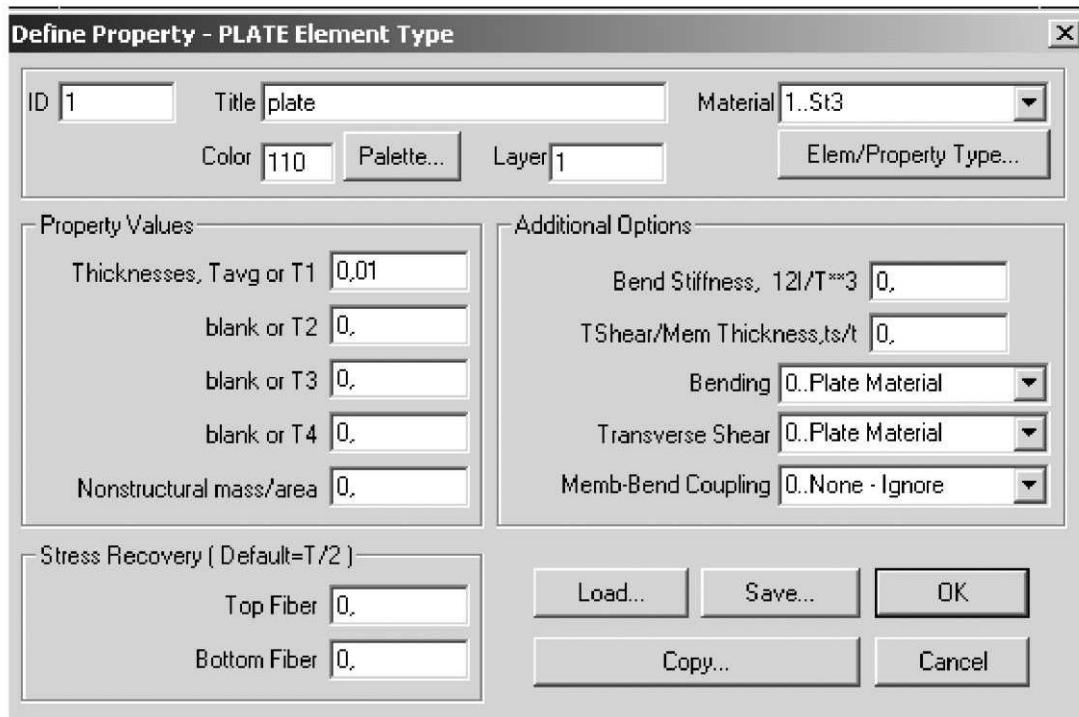


Рис. 7.4

После задания свойств выберите **OK**, а затем - **Cancel** (для выхода из данного диалогового окна).

Дискретизация. Вначале зададим команду **Mesh - Mesh Control - Default Size...** (задание размера элементов сетки). В появившемся диалоговом окне задайте ориентировочный характерный размер (длину) конечных элементов сетки (**Size = 0.05 м**).

Далее выберите команду **Mesh Geometry Surface...** (формирование сетки). В появившемся окне указания границы сетки выберите две составные части оболочки и щелкните по кнопке **OK**, после чего возникнет окно формирования сетки (Autodesk Mesh Surfaces). Здесь следует в разделе **Property** (свойства элементов конструкции) с помощью кнопки выбора задать **1..plate**, в блоке **Element Shape** (форма элементов) выбрать **Quads** (четырехугольные), а затем указать **OK**.

В результате получим разбивку оболочки на конечные элементы (рис. 7.5). Для удобства просмотра модели выберите **Rendered Solid**.

Процесс формирования сетки элементов может занять несколько секунд в зависимости от степени дискретизации.

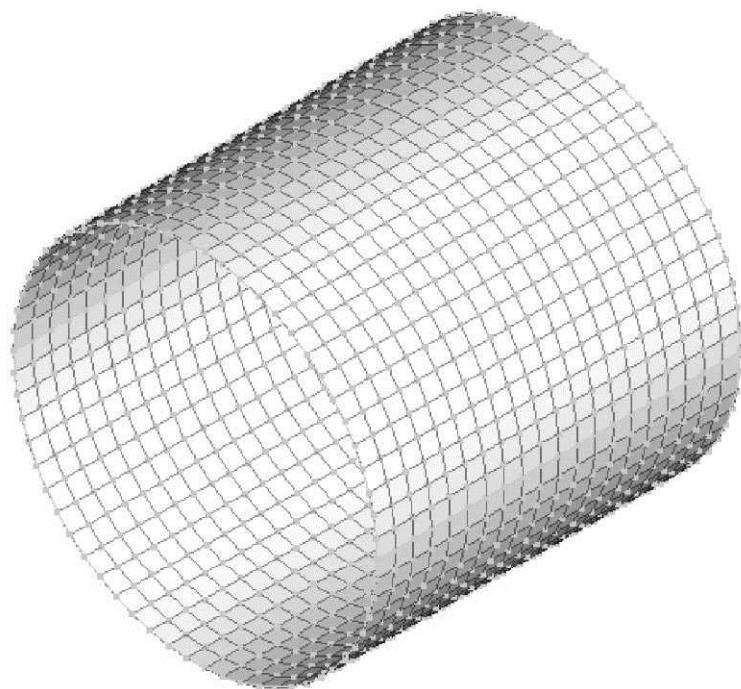


Рис. 7.5

Задание граничных условий. Сформируем условия шарнирного опирания на торцевых кромках оболочки. Выберите в меню команду задания варианта закрепления: **Model Constraint On Curve...** В возникшем диалоговом окне для варианта закрепления ID = 1 введите его название (Title), например «Pinned» (необязательно), после чего укажите **OK**.

Далее появится окно, в котором следует отметить номера закрепляемых дуг окружности (всего четыре). Сделайте это, отметив щелчком левой кнопки мыши каждую из четырех дуг. После введения всех номеров граничных отрезков выберите **OK**.

Появится новое диалоговое окно - для закрепления группы отмеченных дуг по степеням свободы (рис. 7.6). В блоке DOF - Degrees Of Freedom (степени свободы) следует мышью отметить **Pinned-No Translation** (шарнирное опирание без перемещений), а затем – **OK**. Выберите далее кнопку **Cancel** для выхода из окна задания закреплений.

Задание нагрузжения. Выберите в меню команду **Model / Load On Surface** (нагрузка по поверхности). Появится окно (рис. 7.7), в котором следует указать вариант нагружения, например "Нагрузка", **OK**.

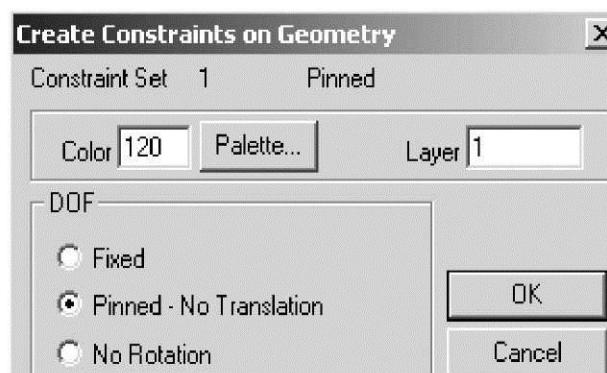


Рис. 7.6

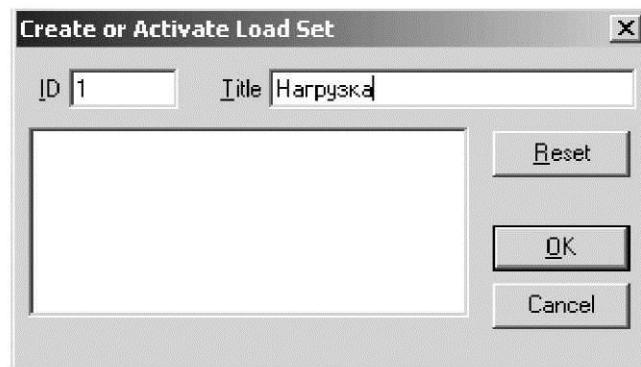


Рис. 7.7

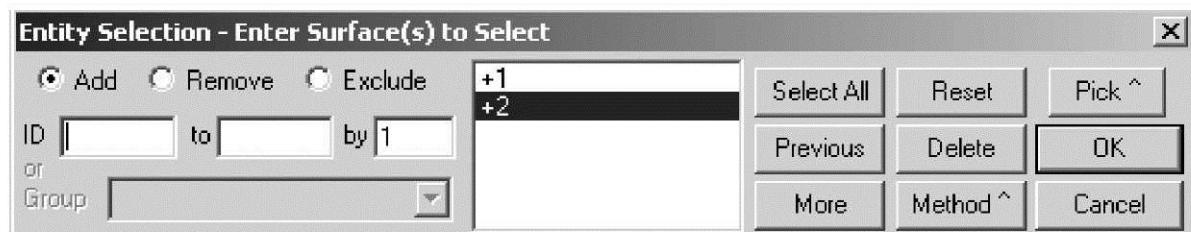


Рис. 7.8

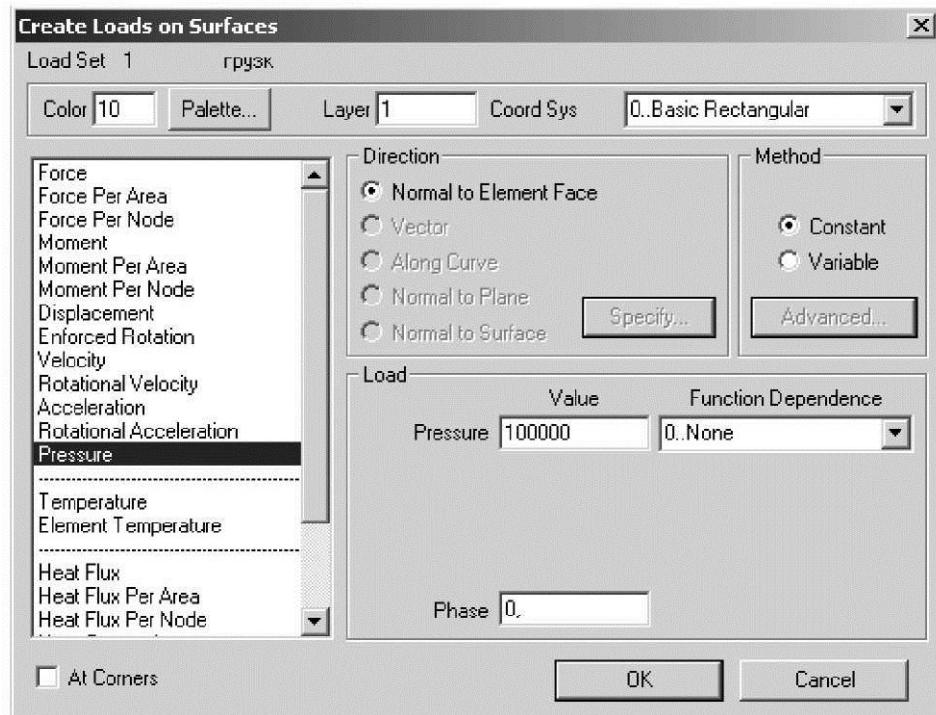


Рис. 7.9

Далее появится диалоговое окно, изображенное на рис. 7.8. Отметьте щелчком левой кнопки мыши две составные части поверхности (верхний и нижний полуцилиндры), **OK**. Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 7.9.

В этом окне необходимо выбрать **Pressure** (давление), а в окошке Load Value укажите величину нагрузки, равную 100000Н/м^2 . После этого выберите **OK** и **Cancel**. Таким образом, нагрузка задана (рис. 7.10).

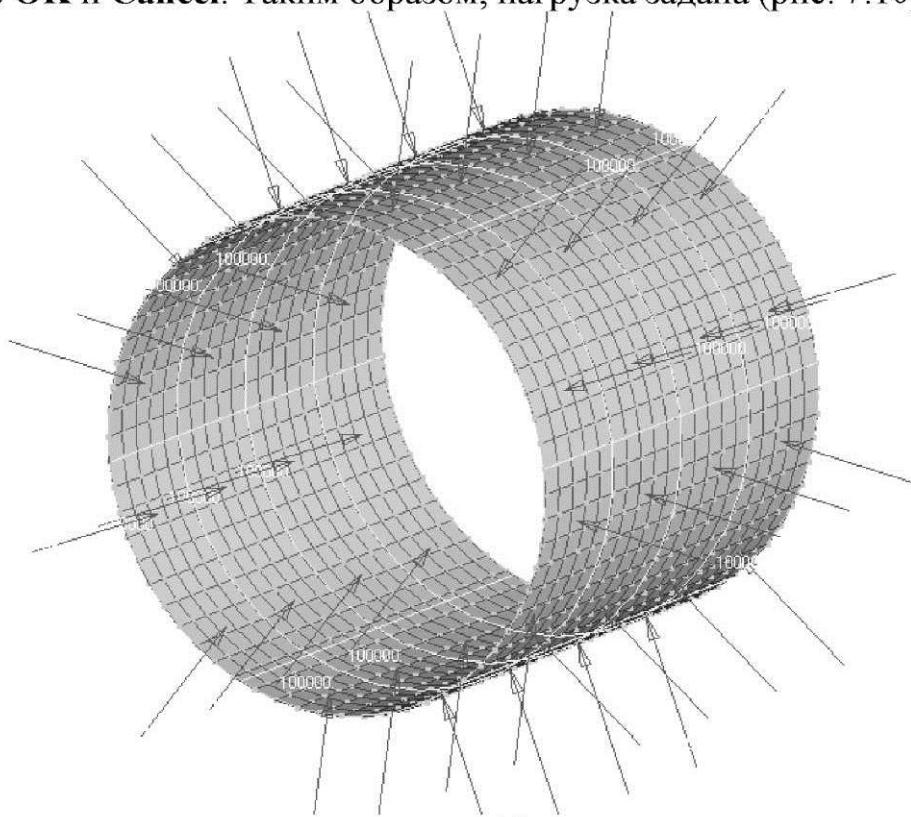


Рис. 7.10

Теперь не забудьте сохранить модель (задайте команду **File Save**).

Выполнение расчета. Выберите в меню команду **File Analyze**, - появится окно **MSC/NASTRAN Analysis Control** (рис. 7.11). В окне **Analysis Type** выберите **7..Buckling** (устойчивость), а в окне **Number of Eigenvalues** укажите число рассчитываемых форм потери устойчивости (например, 3). В окне **Output Types** выберите интересующую нас форму результата **2..Displacements and Stresses** (перемещения и напряжения) и нажмите **OK**.

Результатом вычислений будут три собственных значения критической нагрузки и соответствующие формы потери устойчивости.

Результаты расчета лучше всего наблюдать в изометрии, для этого выберите команду **View Rotate**. В появившемся окне нажмите на кнопку **Isometric**, а затем **OK**.

НДС цилиндра и первая форма потери устойчивости представлены на рис. 7.12.

Левое окно показывает нам картину НДС, при этом $\sigma_{\max}=5.26$ МПа.

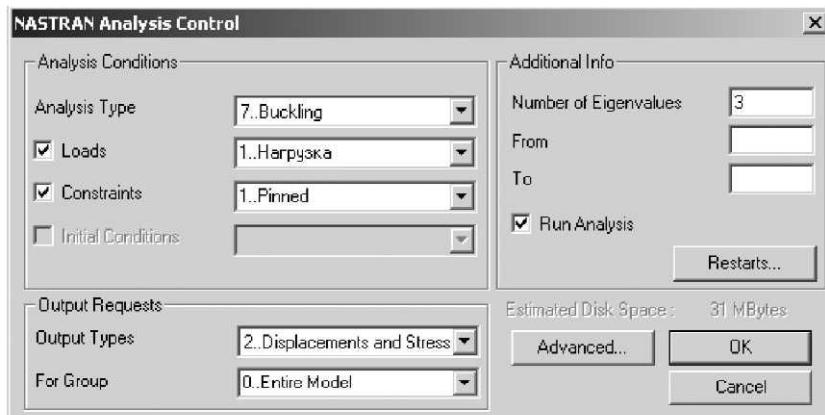


Рис. 7.11

Коэффициент запаса прочности по напряжениям

$$\alpha = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} = \frac{235}{5.26} = 44.65 .$$

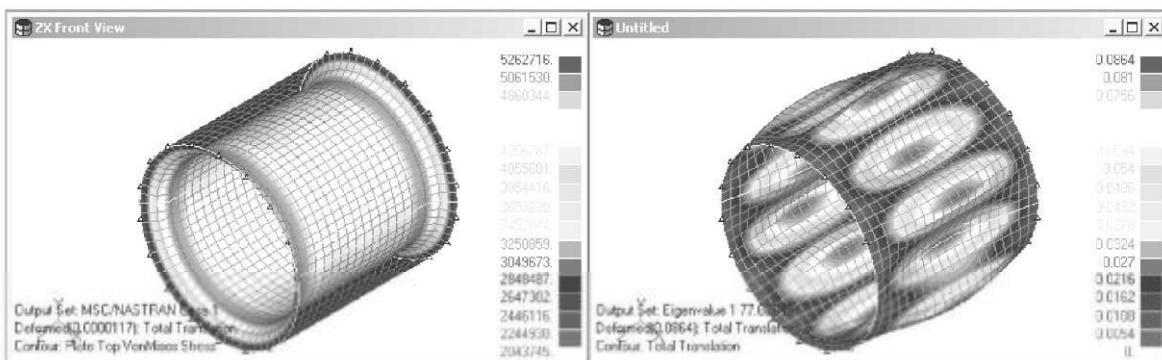


Рис. 7.12



Рис. 7.13

Оценивают устойчивость по так называемому коэффициенту запаса по критической нагрузке η . Он указывает, во сколько раз может быть увеличена прилагаемая нагрузка до получения потери устойчивости.

Первая форма (правое окно), $\eta_1 = 77.62$, шесть полуволн (рис. 7.13).

7.2. Варианты заданий для лабораторных работ по анализу устойчивости

7.2.1. Лабораторная работа 1

Изображение конструкции представлено на рис. 7.14, а варианты заданий – в табл. 7.1. Размеры приведены в миллиметрах. Толщина всех элементов конструкции равна s .

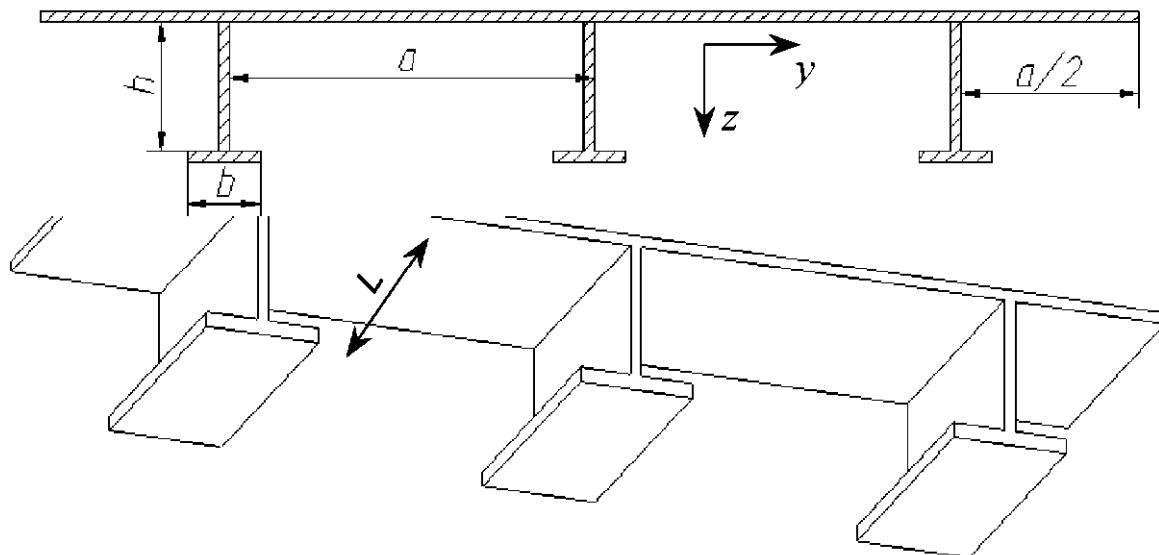


Рис. 7.14

Таблица 7.1

| н/п | a | b | h | L | s | закрепление | нагрузка | мате-риал |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|--|-----------|
| 1 | 80 | 20 | 40 | 150 | 2 | жёстко закреплён один торец | Сила сжатия F_x рав- номерно распределе- на по свободному торцу | 09Г2 |
| 2 | 500 | 60 | 140 | 520 | 5 | | | Ст. 3 |
| 3 | 500 | 60 | 140 | 480 | 5 | | | Ст. 3 |
| 4 | 600 | 38 | 100 | 800 | 7 | | | 09Г2 |
| 5 | 80 | 0 | 40 | 150 | 2 | жёстко закреплён оба торца | равномерное давле- ние сверху на лист настила | Ст. 3 |
| 6 | 500 | 40 | 150 | 900 | 5 | | | 09Г2 |
| 7 | 500 | 40 | 100 | 900 | 5 | | | 09Г2 |
| 8 | 500 | 0 | 100 | 900 | 5 | | | 09Г2 |
| 9 | 80 | 20 | 40 | 200 | 2 | шарнирно закре- плен по торцам лист настила | равномерное давле- ние снизу на пояски балок | Ст. 3 |
| 10 | 600 | 40 | 200 | 800 | 5 | | | 10ХСНД |
| 11 | 600 | 140 | 200 | 800 | 5 | | | 10ХСНД |
| 12 | 600 | 40 | 50 | 800 | 5 | | | Ст. 3 |

В отчете по лабораторной (самостоятельной) работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;

- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- форму потери устойчивости;
- заключение об устойчивости конструкции;
- предложения по увеличению устойчивости конструкции.

7.2.2. Лабораторная работа 2

Изображения поперечных сечений конструкций представлены на рис. 5.28, а варианты заданий – в табл. 5.3 (кроме колонок «закрепление» и «нагрузка»), где параметр a означает длину, а s – толщину оболочки. Размеры приведены в миллиметрах. Один из торцов оболочки следует жёстко закрепить, а к другому торцу приложить равномерную сжимающую нагрузку.

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- исходные данные;
- расчетную модель с разбивкой на КЭ, указанием номеров узлов, линий и участков, закреплений, нагрузки;
- форму потери устойчивости;
- заключение об устойчивости конструкции;
- предложения по увеличению устойчивости конструкции.

8. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

8.1. Особенности динамического анализа конструкций

Наиболее часто в практике расчётов динамики конструкций встречаются три основные задачи:

- анализ собственных частот и форм колебаний (для заключения о возможности резонансных колебаний);
- анализ вынужденной вибрации (то есть определение динамической реакции конструкции на периодическое воздействие, иногда с построением амплитудно-частотной характеристики вибрации);
- анализ нестационарных (так называемых переходных) процессов при кратковременном воздействии (ударе).

Для первого вида анализа численная модель создаётся на основе данных только о размерах и материалах конструкции. В некоторых случаях дополнительно задаются неконструктивные массы, «присоединённые» к основной конструкции и распределённые по элементам (*Nonstructural mass*) либо сосредоточенные в узлах (в виде элементов типа *Mass* или *Mass Matrix*).

Для расчётов вынужденной вибрации дополнительно необходимо иметь информацию о демпфирующих свойствах материалов и конструкции, а также амплитуду и частоту внешней нагрузки.

Для анализа переходного процесса внешняя нагрузка задаётся в виде функции от времени. Кроме этого может потребоваться задание начальных условий (*Initial Conditions*): перемещений и скоростей в начальный момент времени (если они в этот момент не равны нулю).

Проблема задания демпфирующих свойств конструкций является наиболее сложной, так как зачастую требует предварительных экспериментальных исследований, стендовых испытаний опытных образцов. Однако во многих случаях бывает достаточно учитывать демпфирование приближённо. Оно наиболее существенно проявляется при колебаниях в зонах резонанса, когда частоты воздействующих сил близки к частотам собственных колебаний, а также при расчетах переходных процессов, в течение которых конструкция совершают несколько колебаний. В остальных случаях демпфированием, как правило, можно пренебречь.

В системе MSC/NASTRAN рассеяние энергии в динамической системе может быть определено заданием следующих параметров [9]:

- демпфирующих свойств материалов, задаваемых коэффициентом демпфирования $Damping = 2C/C_0$, где C — коэффициент пропорциональности между силой вязкого демпфирования и скоростью; C_0 - критическое демпфирование (значение коэффициента C , при котором колебательная форма движения сменяется монотонно затухающей по экспоненте). Для осциллятора с одной степенью свободы $C_0 = 2\omega_0 m$, где m - масса осциллятора, ω_0 - его собственная частота колебаний, определяемая выражением $\omega_0^2 = k/m$, где k - жесткость осциллятора;

- коэффициентов демпфирования $Damping$ специальных элементов типа пружины (*Spring*, *DOF Spring*) и многослойной пластины (*Laminate*). Упругий демпфер можно определить, например, с помощью двух параллельных элементов типа *Spring*, один из которых обладает жесткостью, а второй - демпфированием;

- с помощью общего коэффициента демпфирования конструкции, обозначаемого в MSC/NASTRAN как G .

Законы демпфирования сложны, так как обусловлены различными физическими процессами. При исследовании динамики и колебаний механических систем различные виды диссипативных сил заменяют эквивалентным вязким демпфированием, связанным с коэффициентом демпфирования конструкции G соотношением $C = Gk/\omega$, где ω - частота колебаний, или $2C/C_0 = G\omega_0/\omega$. Коэффициент эквивалентного вязкого трения в данном случае зависит от частоты. При частоте собственных колебаний $\omega = \omega_0 \longrightarrow G = 2C/C_0$.

Для исследования нестационарных процессов используются два основных метода:

- непосредственное численное интегрирование по времени уравнений движения;
- разложение вектора узловых смещений в ряд по низшим формам собственных колебаний [5, 9].

Первый метод, рассмотренный на примере в п. 8.5, более точно определяет местные деформации и напряжения, однако может потребовать существенно большего времени вычислений при анализе больших систем (порядка десятков тысяч и более узлов).

Решающим при моделировании колебаний является выбор размеров конечных элементов, а при анализе переходных процессов – ещё и шага по времени. Здесь большое значение имеет опыт и искусство расчётчика, особенно при анализе сложных конструкций. Грубая сетка элементов и большой шаг по времени могут привести к совершенно неверному результату, а излишнее «измельчение» модели потребует больших вычислительных затрат и приведёт к «торможению» при графическом просмотре результатов на компьютере с небольшим быстродействием. Приведём некоторые общие рекомендации по выбору пространственной и временной сеток.

При анализе установившихся колебаний рекомендуется следующий критерий: $l_{max}/\lambda_{min} < 0.1$, где l_{max} – наибольший размер наибольшего элемента, λ_{min} – наименьшая длина волны. Так, например, при анализе вибрации балки по форме первого тона колебаний, когда по её длине l , укладывается одна полуволна: $l_{max} = 0.1 \cdot 2l$, т.е. балку следует разделить не менее чем на 5 элементов. При расчёте более высокочастотных колебаний расчётная сетка должна быть гуще.

При расчёте переходных процессов выбор шага по времени Δt должен быть увязан с размерами конечных элементов. Если конечноэлементная сетка грубая, то уменьшение шага по времени не приведёт к уточнению результата (и наоборот). Грубый шаг по времени может привести к потере устойчивости вычислений и неверному результату. При его выборе можно использовать следующий ориентировочный критерий: $\Delta t \leq k/\omega_{max}$, где ω_{max} – наивысшая собственная частота элемента (её можно определить отдельным расчётом одного элемента на собственные колебания). При расчёте на удар балок $k \approx 0.3$. В других случаях коэффициент k либо Δt определяются путём анализа и сопоставления результатов расчётов с данными аналитических тестовых расчётов и экспериментов.

Более подробные рекомендации по выбору параметров динамических расчётов можно найти в [2, 5, 9, 10].

8.2. Пример расчёта собственных колебаний балки

Определим собственные частоты и формы свободно опёртой стальной однопролётной балки длиной 1 м с прямоугольным сечением высотой 4 см и шириной 1 см (рис. 8.1).



Рис. 8.1

Последовательность действий выглядит следующим образом.

1) **Geometry/ Point.../** (укажите координаты $(0,0,0)$, $(1,0,0)$ – длина балки = 1 м по оси X) – создание точек – концов балки.

2) **Geometry / Curve-Line/ Points...** - создание линии балки

3) **Model/ Material/ (Load: Carbon_Steel_SI** – углеродистая сталь с размерностями параметров в системе СИ). Обратите внимание, что при задании свойств материала необходимо указывать плотность материала ρ , которая определяется в окне **Mass Density** (для стали $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$).

4) Задание свойств:

Model / Property/ задать тип: **Elem / Property Type.../ Beam / Ok.**

Далее, нажав кнопку **Shape...**, перейдём к определению сечения балки, - заполните форму в соответствии с рисунком 8.2. Нажав **Ok** и вернувшись в окно **Define Property**, заполните поля **Title** и **Material**, как показано на рис. 8.3.

5) Задание размеров сетки (количество элементов):

Mesh / Mesh Control/ Size Along Curve.../ выберите линию / **Ok**. В поле **Number of Elements** задайте число элементов: **5 / Ok.**

6) Создание элементов и узлов:

Mesh / Geometry/ Curve.../ выберите линию / **Ok**. На появившейся панели **Geometry Mesh Option:** укажите **Property; Generate – Elements and Nodes / Ok**. На форме **Vector Locate** задайте вектор ориентации сечения балки, определяющий соответствие систем координат элемента и всей модели: $(0, 0, 0)$; $(0, 1, 0)$ – (подробнеесмотрите в **Help** раздел **Element Reference**).

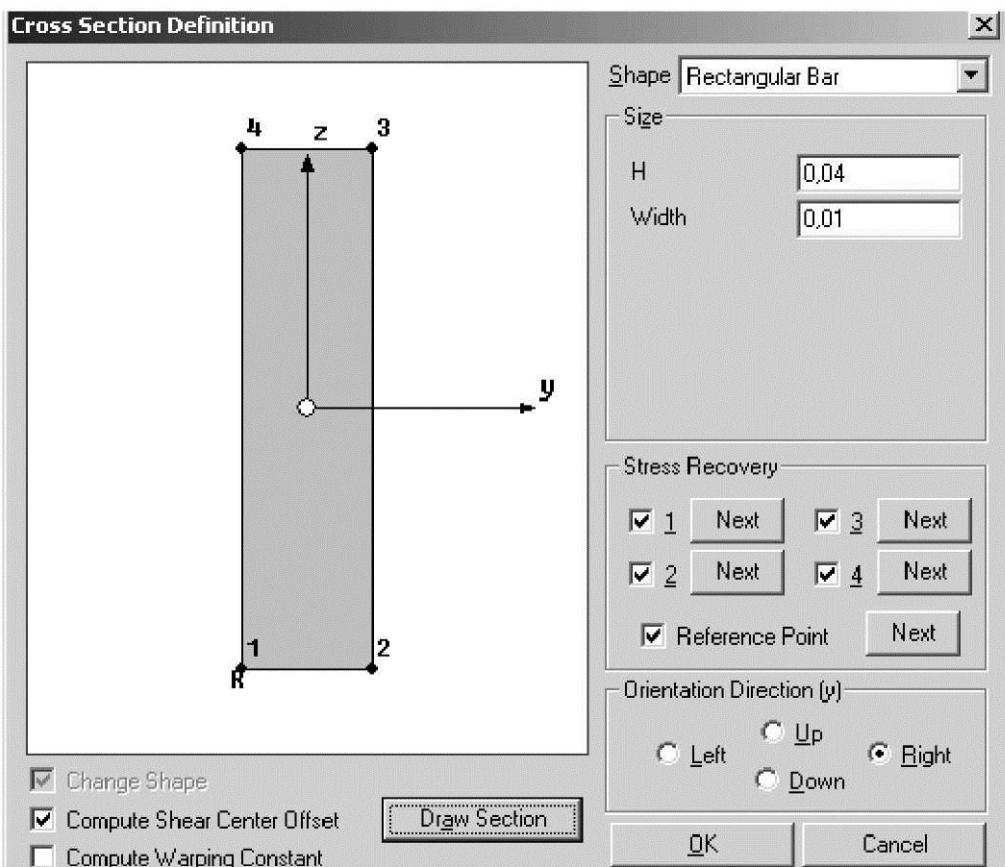


Рис. 8.2

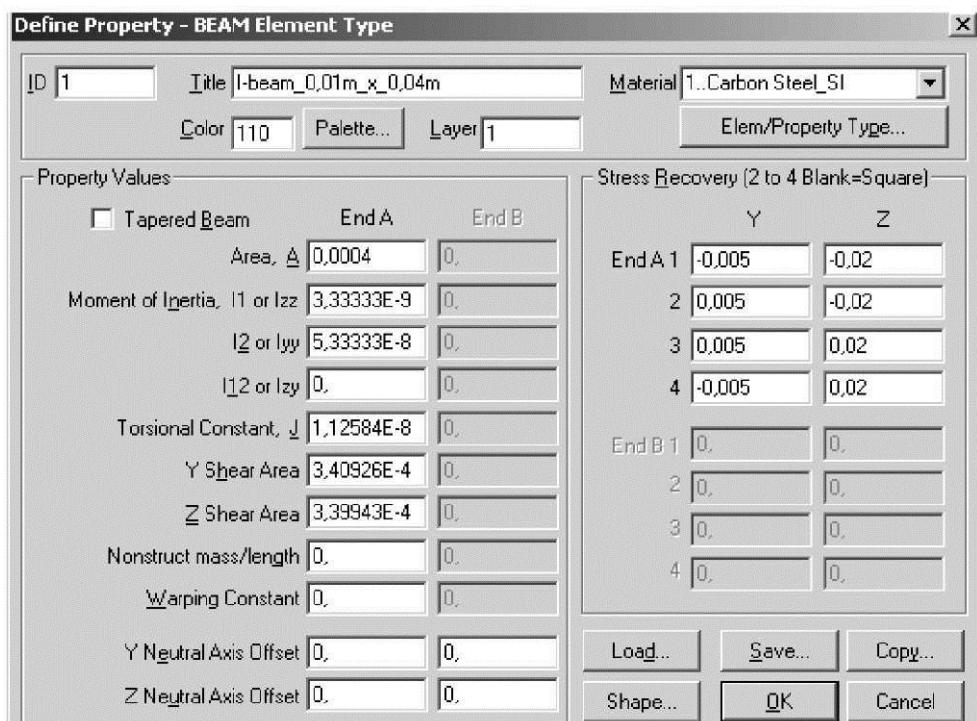


Рис. 8.3

7) Задание закреплений:

Model / Constraint/ Set.../ напишите имя варианта закреплений (можно создать несколько разных закреплений для одной задачи).

Model / Constraint/ Nodal.../ укажите первый узел /Ok/ пометьте закрепления по степеням свободы (DOF): pinned (TX, TY, TZ) и RX / Ok. Далее укажите шестой узел /Ok / и пометьте DOF: pinned. Введённые закрепления соответствуют свободно опёртой балке.

Таким образом, модель создана. Запуск задачи на расчёт выполняется следующим образом:

File/ Analyze... / укажите: **Analyze Type: 2. Normal Modes / Eigenvalues;** **Number of Modes** (число определяемых низших собственных тонов): **10;** **Constraints:** укажите вариант закреплений / Ok.

Перед началом расчёта будет предложено сохранить модель.

После расчёта выберите **View / Select** (или **F5**) / **Deformed and Contour Data.** На панели **Select PostProcessing Data** выберите тон колебаний (**Mode**) в списке **Output Set.** Для просмотра формы колебаний в списке **Deformation** выберите **1. Total Translation.** После нажатия **Ok** и возврата в окно **View Select** отметьте просмотр формы колебаний (**Deformed Style**): **Deform** или **Animate**.

На рис. 8.4 приведены первые 4 собственные формы, а в табл. 8.1 - сопоставление результатов расчёта с результатами, полученными аналитически (см. справочники по строительной механике, например [6, том 3]).

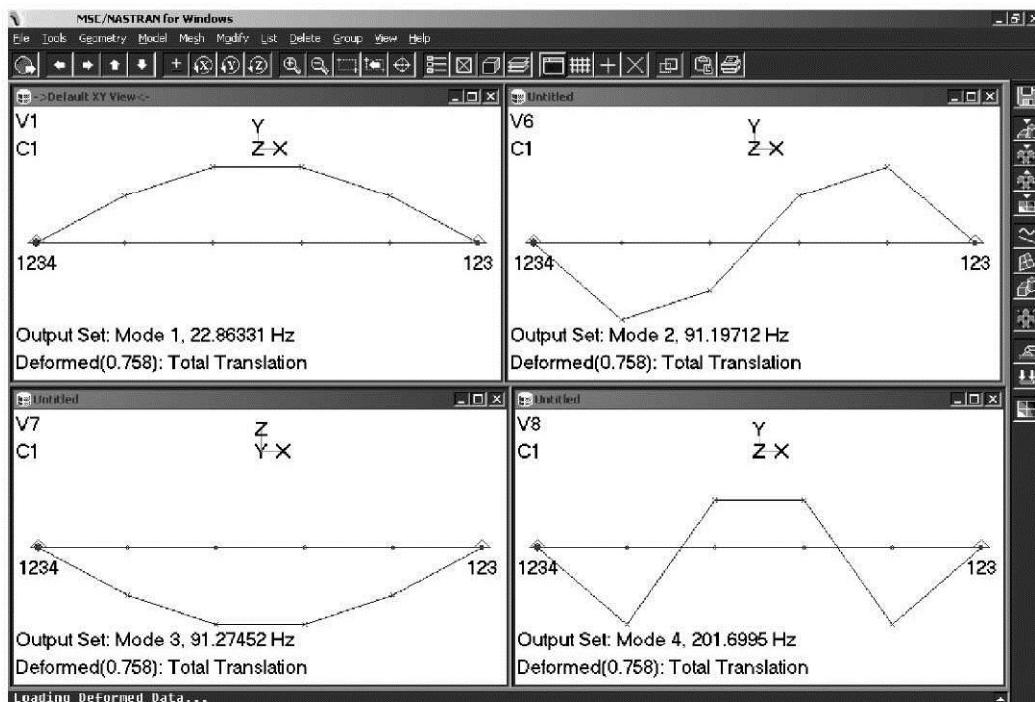


Рис. 8.4

Таблица 8.1

| Собственная частота, Гц | Аналитические расчёты | Модель с 5 КЭ | Модель с 10 КЭ |
|-------------------------|-----------------------|---------------|----------------|
| 1 тон в плоскости ZX | 22,88 | 22,86 | 22,85 |
| 2 тон в плоскости ZX | 91,47 | 91,30 | 91,38 |
| 3 тон в плоскости ZX | 205,9 | 201,6 | 205,4 |
| 1 тон в плоскости YX | 91,55 | 91,16 | 91,32 |
| 2 тон в плоскости YX | 366,2 | 362,2 | 363,3 |
| 1 тон - кручение | 1384 | 1377 | 1377 |
| 2 тон - кручение | 4152 | 3997 | |

8.3. Пример расчёта собственных колебаний пластины с ребром

Рассмотрим пример анализа собственных колебаний пластины с ребром (рис. 8.5).

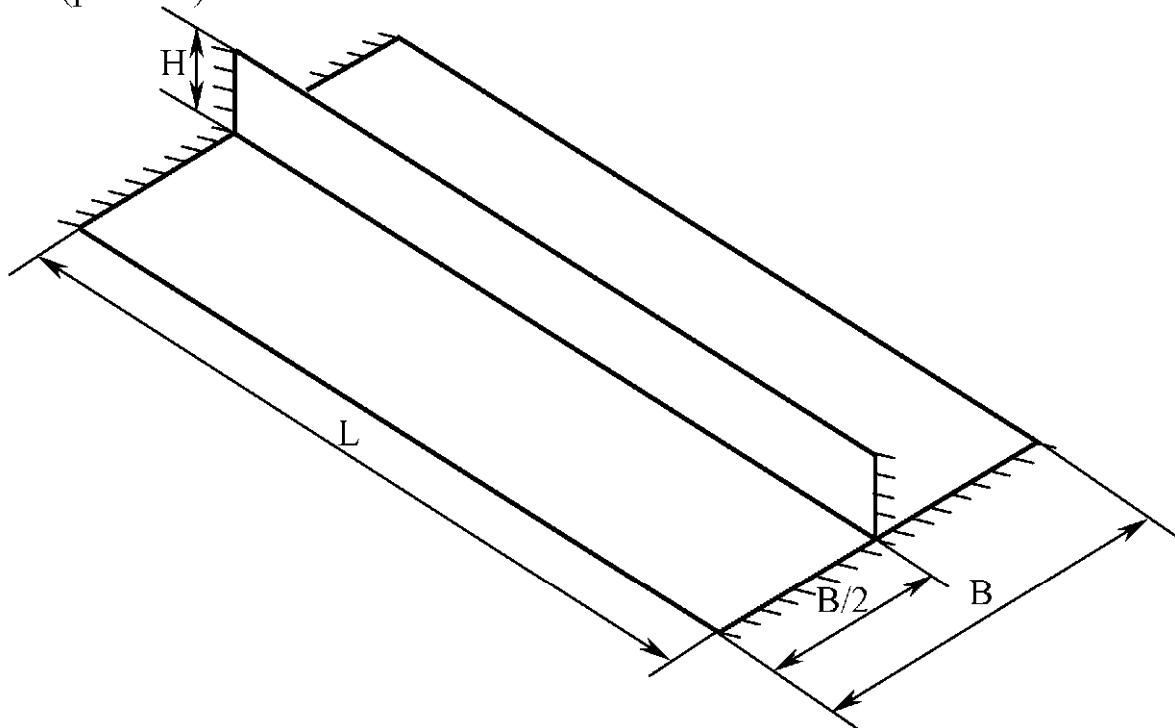


Рис. 8.5

Материал: St3 $E=2.1e11 \text{ Н/м}^2$; $\nu=0.3$; $\rho=7830 \frac{\text{Кг}}{\text{м}^3}$.

Размер: $L=2 \text{ м}$; $B=1 \text{ м}$; $H=0.25 \text{ м}$; толщина пластины $t_{\text{пл}}=0.01 \text{ м}$; толщина ребра $t_{\text{реб}}=0.02 \text{ м}$.

Опишем действия, необходимые для решения данной задачи.

Создание точек. Выберите пункт меню **Geometry** (геометрия). В появившемся подменю выберите **Point** (точка). В появившемся окне введите последовательно координаты всех концевых точек

$(x=0, y=0, z=0), (x=2, y=0, z=0),$
 $(x=2, y=0.5, z=0), (x=2, y=0.5, z=0.25),$
 $(x=2, y=1, z=0), (x=0, y=1, z=0),$
 $(x=0, y=0.5, z=0), (x=0, y=0.5, z=0.25).$

Созданные точки могут оказаться не по центру графического окна. Удобно их расположить можно командой **View Autoscale** (показать с автоматическим масштабированием), и выбрав **View Rotate Dimetric** (поворнуть в диметрию).

Далее соединим концевые точки отрезками с помощью команды **Geometry / Curve-Line / Points ...**, вводя последовательно пары точек.

Сохранение модели. Для сохранения модели в меню выберите **File Save as ...** и введите имя файла модели. Назовем его plate1.mod. Не забывайте далее сохранять вашу модель по мере ее формирования с помощью команды **Save**.

Задание свойств материала. Определим свойства материала пластины. Выберем в меню **Model Material** (создать материал). В результате появится диалоговое окно для задания материала (рис. 8.6).

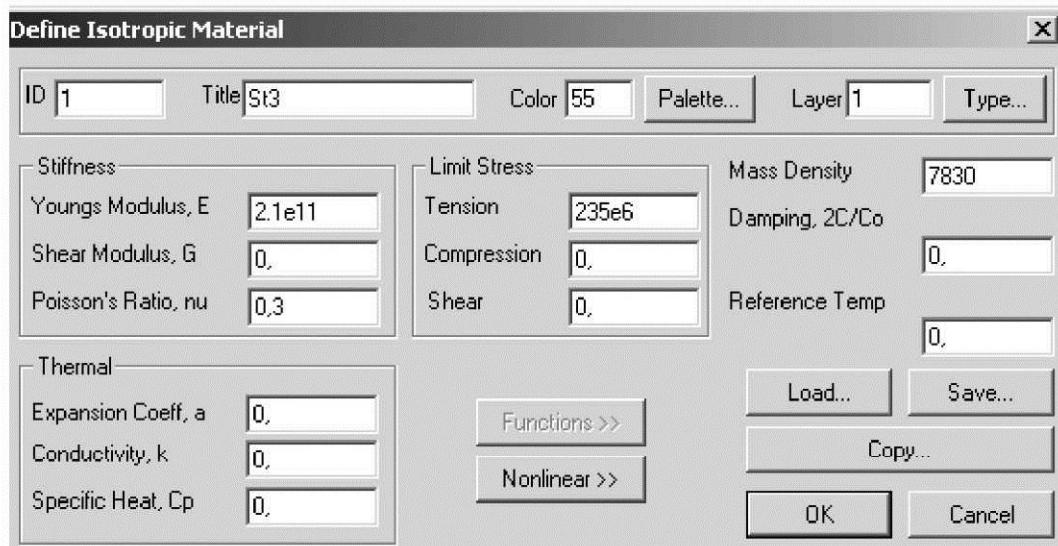


Рис. 8.6

По умолчанию материал полагается изотропным. Если тип материала другой, например ортотропный, то щелкните по кнопке **Type**. В графе **Title** задайте метку материала, например St3. В разделе **Stiffness** определим: модуль упругости $E = 2.1e11 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. В разделе **Limit Stress** можно определить допускаемые напряжения на растяжение, сжатие и сдвиг. Так как расчет будем выполнять на анализ собственных частот - зададим плотность материала: $\text{Mass Density} = 7830 \text{ кг/м}^3$. Для выполнения данного расчета остальные свойства можно не задавать.

Свойства материала можно сохранить в библиотеке материалов с целью его использования в других расчетах. Для этого служит кнопка **Save...**

данного диалогового окна. Можно использовать в расчетах материалы из библиотеки с помощью кнопки **Load...**. После ввода свойств материала выберите пункт **OK**. Далее будет предложено задать свойства следующего материала (ID = 2). Так как в этом нет необходимости, то выберите **Cancel**.

Задание свойств элементов конструкции. Анализируемая конструкция имеет разные толщины пластины и ребра, поэтому описываемая ниже операция должна быть проделана дважды. Для этого в меню выберем команду **Model Property**. Появится новое диалоговое окно (рис. 8.7). По умолчанию окно настроено на ввод характеристик пластины. Кнопкой **Elem / Property Type...** можно настроить окно на другие типы конструкций (например, балки, мембранные, трубы и пр.).

Выберите в данном окне материал (**Material St3**). В разделе **Property Values** введите значение 0.01 м для свойства **T1** - это толщина пластины. В разделе **Title** введите имя **plate**. Остальные свойства в данном примере можно принять по умолчанию.

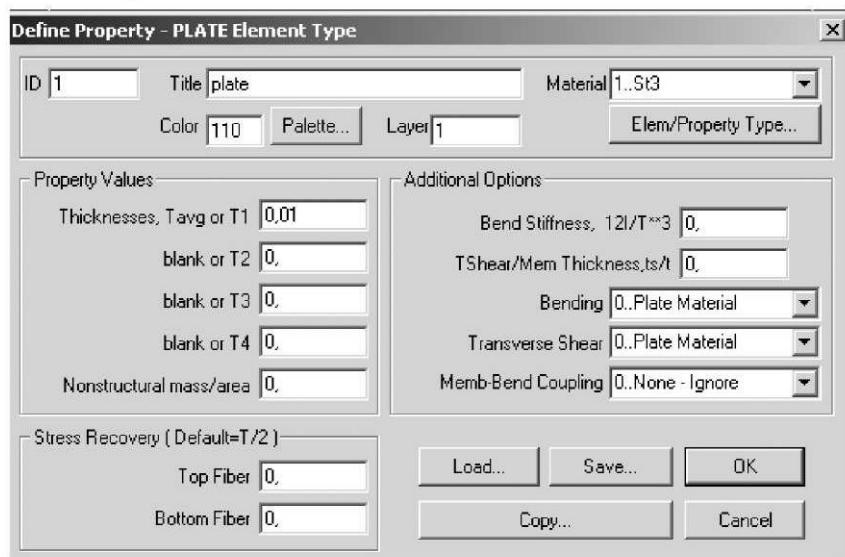


Рис. 8.7

Далее выберите пункт **OK**. Появится новое диалоговое окно для второго варианта свойств ID2 (рис. 8.8). Выберите в данном окне материал (**Material St3**). В разделе **Property Values** введите значение 0.02 м для свойства **T1** - это толщина ребра. В разделе **Title** введите имя **rebro**. Остальные свойства в данном примере можно принять по умолчанию.

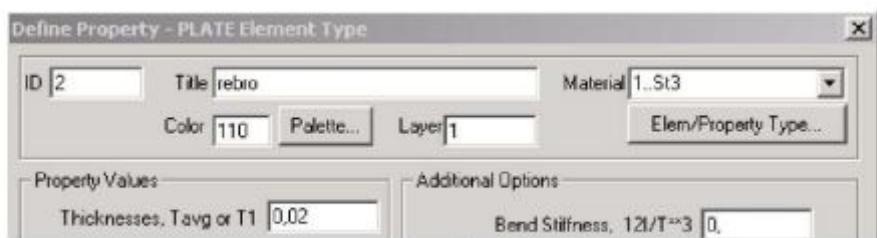


Рис. 8.8

Далее выберите пункт **OK**, а затем - **Cancel** (для выхода из данного диалогового окна).

Дискретизация. В большинстве случаев произвести разбиение конструкции на конечные элементы в системе MSC/NASTRAN можно способом автоматического построения сетки. Для этого вначале зададим команду **Mesh - Mesh Control - Default Size...** (задание размера элементов сетки). В появившемся диалоговом окне задайте ориентировочный характерный размер (длину) конечных элементов сетки (**Size = 0.25 м**).

Далее выберите команду **Geometry Boundary Surface...** (определение границ сетки). В появившемся окне (рис. 8.9) следует пометить идентифи-

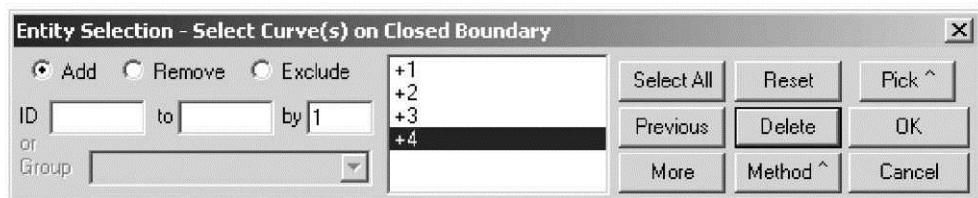


Рис. 8.9

кационные номера (ID) линий - сторон пластины и ребра, образующих границу сетки. Для нашего случая (рис. 8.10) выберите последовательно (1,2,3,4), (3,5,6,7), (3,8,9,10) двигая мышью и указывая курсором на каждую линию щелчком левой кнопки (при этом отмеченная линия будет помечена кружком). После указания всех линий *одной* границы выберите **OK**.

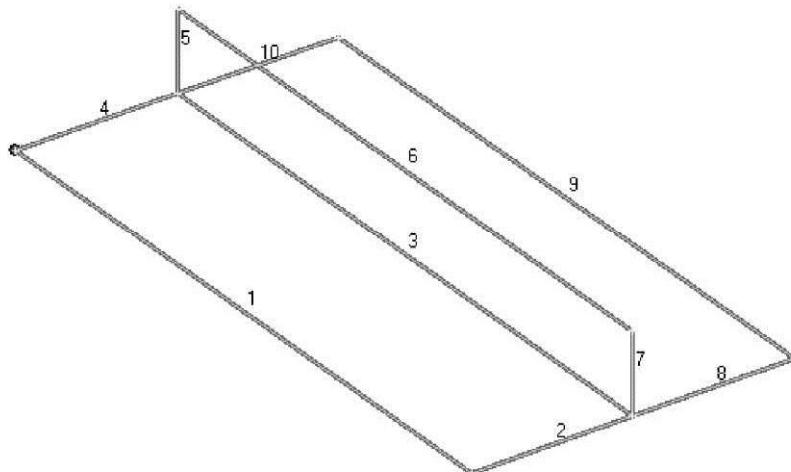


Рис. 8.10

После указания всех линий границы выберите **Cancel**. Теперь вся граница сетки выделится новым цветом.

Далее выберите команду **Mesh Geometry Surface...** (формирование сетки). В появившемся окне указания границы сетки выберите две составные части пластины и щелкните по кнопке **OK**, после чего возникнет окно формирования сетки (**Automesh Surfaces**). Здесь следует в разделе

Property (свойства элементов конструкции) с помощью кнопки выбора задать 1..plate, в блоке **Element Shape** (форма элементов) выбрать **Quads** (четырехугольные), а затем указать **OK** (рис. 8.11).

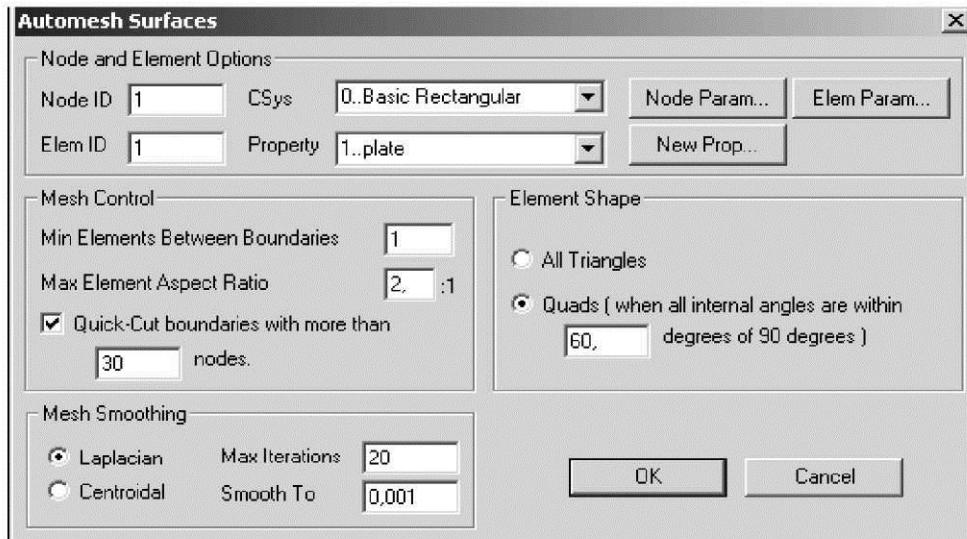


Рис. 8.11

В результате получим разбивку пластины на конечные элементы (рис. 8.12).

Для разбивки на конечные элементы ребра – необходимо повторить указанную выше операцию. Выберите команду **Mesh Geometry Surface...**

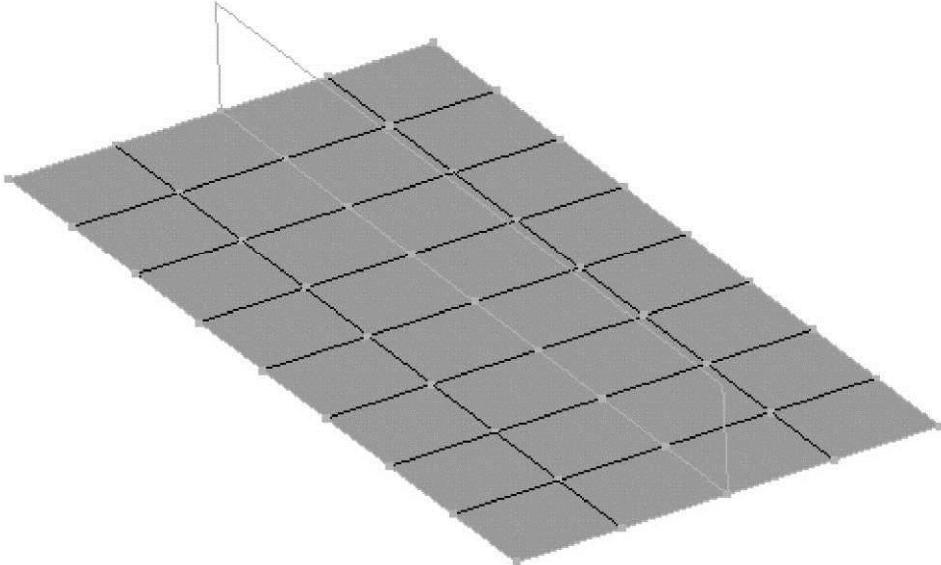


Рис. 8.12

(формирование сетки). В появившемся окне указания границы сетки выберите ребро и щелкните по кнопке **OK**, после чего возникнет окно формирования сетки (**Automesh Surfaces**). Здесь следует в разделе **Property** (свойства элементов конструкции) с помощью кнопки выбора задать

2..rebro, в блоке **Element Shape** (форма элементов) выбрать **Quads** (четырехугольные), а затем указать **OK**.

В результате получим разбивку всей конструкции на конечные элементы (рис. 8.13).

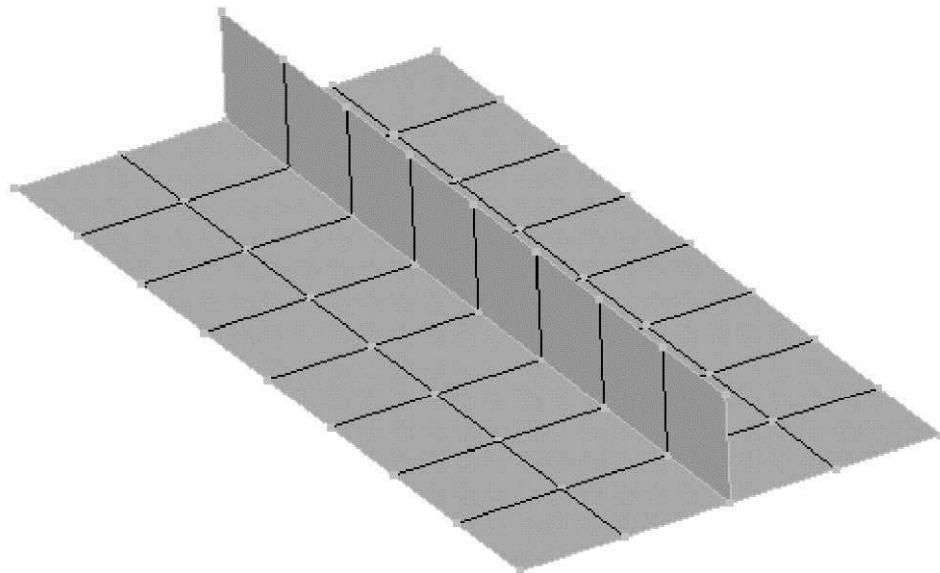


Рис. 8.13

Процесс формирования сетки элементов может занять несколько секунд.

После окончания разбивки на конечные элементы не забудьте объединить совпадающие узлы командой **Tools Check Coincident_Nodes** (контроль совпадающих узлов). В появившемся окне (**Entity Selection - Enter Node(s) to Check**) выберите **Select All** (выбрать все) и нажмите **OK**. В появившемся диалоговом окне ответьте на вопрос **Нет**.

Далее появится окно **Check / Merge Coincident** (объединение совпадающих узлов), изображенное на рис. 8.14. Поставьте флажок в окошке **Merge Coincident Entities** и нажмите **OK**.

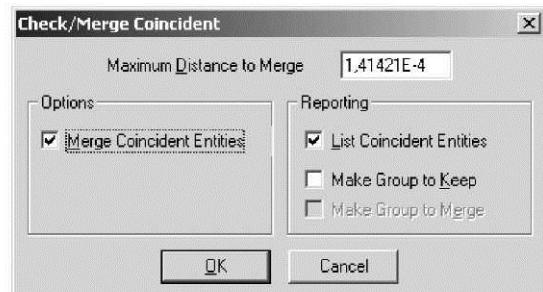


Рис. 8.14

В результате получаем по одному узлу в каждой точке по линии стыковки пластины и ребра. Не забывайте обновлять рабочий стол, два раза щелкнув левой кнопкой мыши в рабочую область.

Задание граничных условий. Сформируем условия жесткого защемления на торцевых кромках пластины и ребра (рис. 8.5). Выберите в меню команду задания варианта закрепления: **Model / Constraint / On Curve...** В возникшем диалоговом окне для варианта закрепления ID = 1 введите его название (**Title**), например «**Fixed**» (необязательно), после чего укажите **OK**.

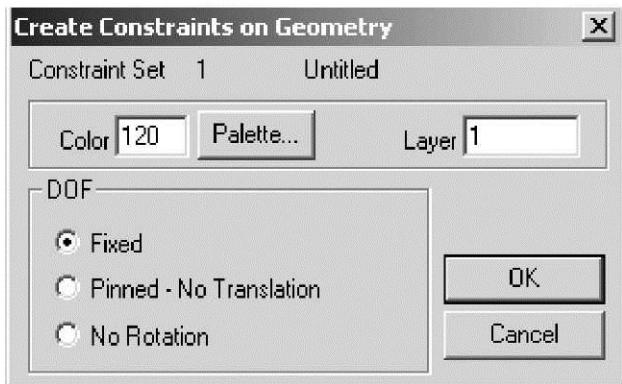


Рис. 8.15

Далее появится окно, в котором следует отметить номера закрепляемых отрезков. Это можно сделать, отметив щелчком левой кнопки мыши каждый из шести отрезков. После введения всех номеров граничных отрезков выберите **OK**.

Появится новое диалоговое окно - для закрепления группы отмеченных отрезков по степеням

свободы (рис. 8.15). В блоке **DOF - Degrees Of Freedom** (степени свободы) следует мышью отметить **Fixed** (жесткое защемление), а затем - **OK**. Условия закрепления отобразятся следующим образом (рис. 8.16). Выберите далее кнопку **Cancel** для выхода из окна задания закреплений.

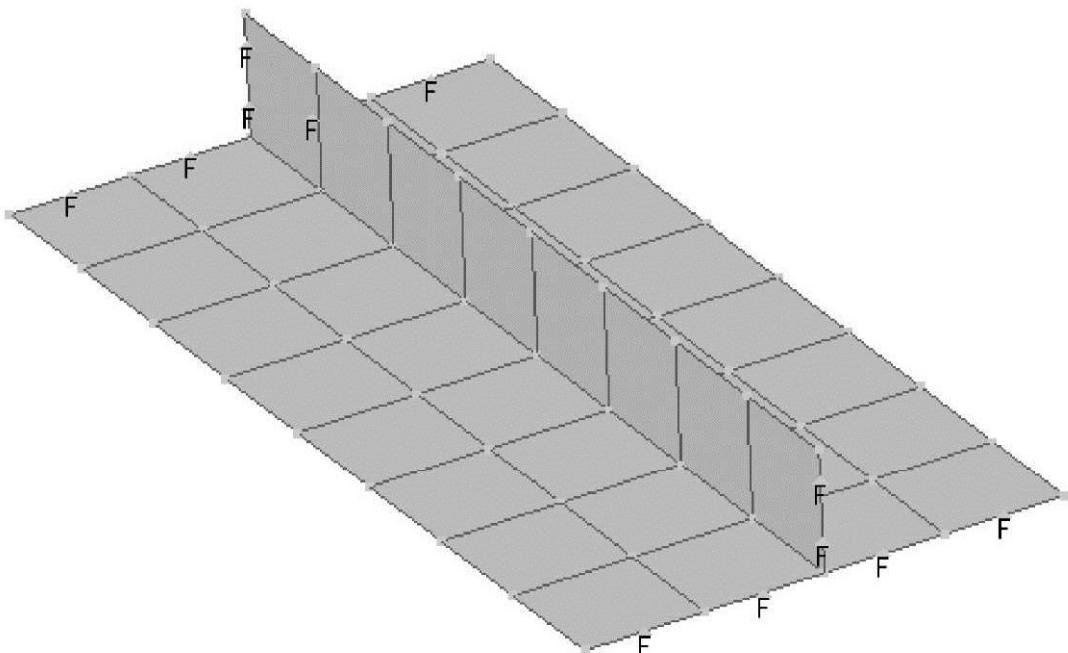


Рис. 8.16

При решении задачи о свободных колебаниях внешняя нагрузка не задается. Поэтому после разбиения системы на конечные элементы и формирования условий закрепления можно сразу перейти к расчету.

Выберите команду **File Analyze**, появится окно **MSC/NASTRAN Analysis Control** (рис. 8.17). В оконце **Analysis Type** выберите **2..Normal Modes/Eigenvalue**, а в оконце **Number of Modes** укажите число рассчитываемых частот (например, 3) и нажмите **OK**.

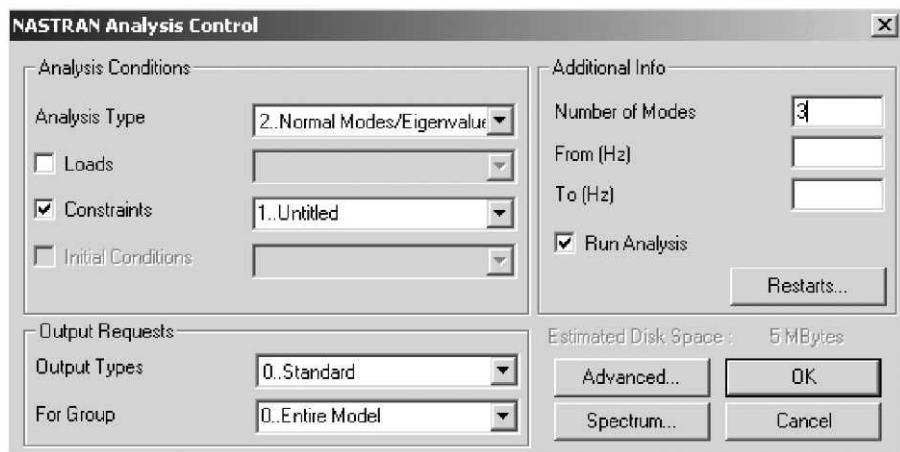


Рис. 8.17

В качестве примера рассмотрим возможность вывода всех трех форм свободных колебаний одновременно. Для этого прежде удалим существующее рабочее окно, нажав нижнюю кнопку **X**.

Далее с помощью команды **View New** выведем диалоговое окно (рис. 8.18), в котором выберем четвертый вариант расположения окон, **OK**.

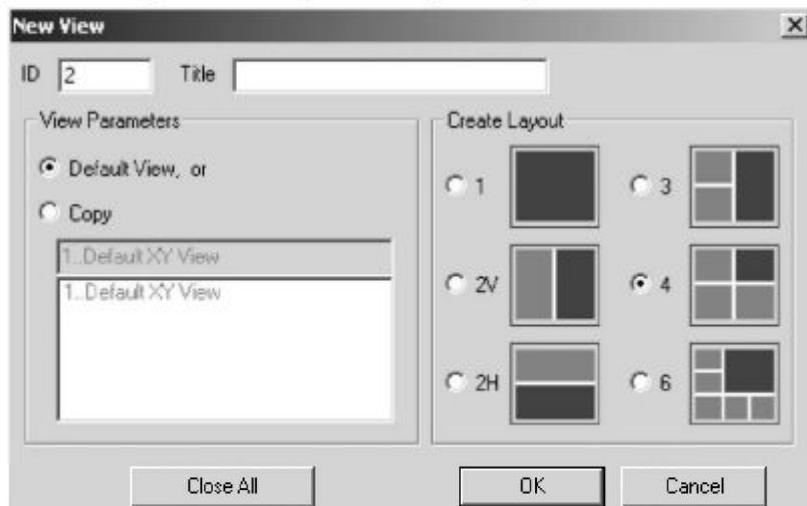


Рис. 8.18

Далее необходимо настроить вид каждого окна.

Результаты расчета лучше всего наблюдать в диметрии, так как формы колебаний могут выходить из плоскости YOX, для этого выберите команду **View Rotate**. В появившемся окне (рис. 8.19) нажмите на кнопку **Dimetric**, а затем **OK**.



Рис. 8.19

В результате всех проделанных выше операций получаем три формы колебаний (рис. 8.20).

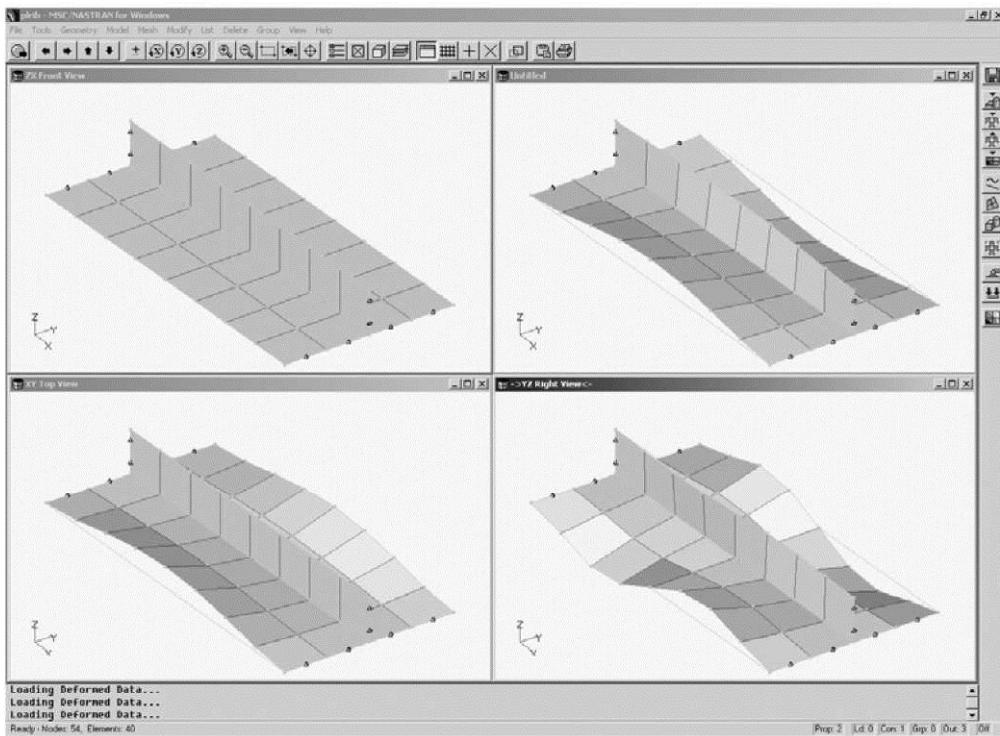


Рис. 8.20

1 форма (верхнее правое окно) – 27.37 Hz.

2 форма (нижнее левое окно) – 37.97 Hz.

3 форма (нижнее правое окно) – 54.79 Hz.

8.4. Пример расчёта собственных колебаний перекрытия

Расчётная схема и пример аналитического расчёта перекрытия приведены в [11] (рис. 8.21).

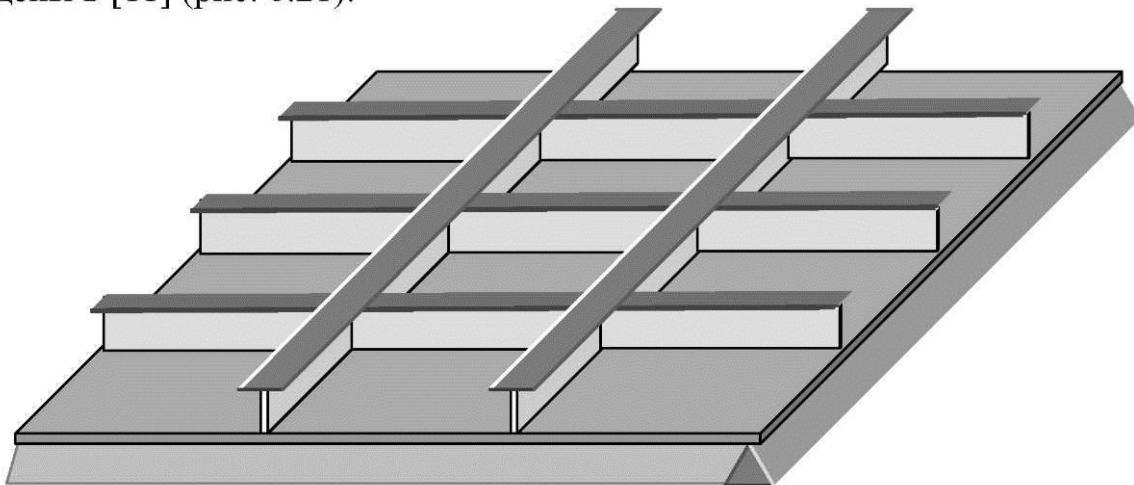


Рис. 8.21

Формирование модели производится в следующем порядке.

1) Создание точек- концов балок:

Geometry/ Point.../ - укажите координаты (табл. 8.2, размерности – в системе СИ). Для просмотра точек выполните **View / AutoScale**.

Табл. 8.2

| Номер точки | X | Y | Z |
|-------------|-------|-------|---|
| 1 | 2.225 | 0 | 0 |
| 2 | 4.45 | 0 | 0 |
| 3 | 6.675 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 2.667 | 0 |
| 5 | 8.9 | 2.667 | 0 |
| 6 | 0 | 5.333 | 0 |
| 7 | 8.9 | 5.333 | 0 |
| 8 | 2.225 | 8 | 0 |
| 9 | 4.45 | 8 | 0 |
| 10 | 6.675 | 8 | 0 |

2) **Geometry / Curve-Line/ Points...** - создание 5 линий балок. Отмечайте мышью (щёлкните левой кнопкой) точки начала и конца линии (рис. 8.22).

3) **Model / Material / (Load:**

Carbon_Steel_SI – углеродистая сталь с размерностями в системе СИ).

4) Задание свойств:

Model / Property/ задайте тип:

Elem/Property Type.../ Beam.

Затем заполните бланки, приведенные на рис. 8.23 и 8.24.

5) Задание размеров сетки (количества элементов):

Mesh / Mesh Control / Size Along

Curve.../ щёлкните мышью на перекрёстных связях (по оси X) / **Ok** / укажите: **Number of Elements Along Curve – 16 / Ok**.

Аналогично задайте по 12 элементов для балок главного направления.

6) Задание элементов и узлов:

Для каждой линии отдельно:

Mesh / Geometry/ Curve.../ выберите линию / **Ok**. В окне **Geometry Mesh Option** укажите **Property; Generate – Elements and Nodes; Node Param...**

– пометьте «галочками» закрепляемые степени свободы (для перекрёстных связей – TX, TY, RX, RZ; для балок главного направления - TX, TY, RY, RZ) / **Ok / Ok** /. Закрепляемые степени свободы можно не устанавливать – но тогда нужно следить, чтобы характеристики сечения (**Property**), определяющие жёсткость по направлениям возможных перемещений, не были нулевыми. В окне **Vector Locate** (вектор ориентации элемента) за-

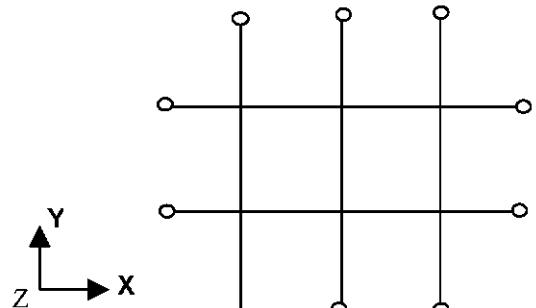


Рис. 8.22

дайте начало вектора (**Base**) – на линии балки (например на её конце), конец вектора (**Tip**) – перпендикулярно по оси Z (Z – любое число, например равное 1). Подробнее об ориентации системы координат балочного элемента можно посмотреть в разделе **Help: Element Conventions/ Beam**.



Рис. 8.23

7) Соединение балок в пересечениях (путём проверки наличия совпадающих узлов и их объединения):

Tools / Check / Coincident Nodes... / Select All / Ok / ...to Merge? / Да / Select All / Ok / пометьте **Merge Coincident Nodes (Max Distance to Merge** – это расстояние, в пределах которого близлежащие узлы будут объединены) / **Ok** /.

Объявленные ранее закрепления (**Permanent Constraint**) в объединённых узлах сохранились полностью (в том числе и **RX**, и **RY**). Но повороты **RX** и **RY** следует оставить, поэтому сделаем соответствующую корректировку.

8) Корректировка закреплений в местах пересечения балок:

Modify / Update Other/ Perm Constraint... / отметьте мышью все 6 узлов пересечений балок (щёлкнув левой кнопкой) / **Ok** / уберите закрепления по **RX** и **RY** (останутся помеченными **TX**, **TY** и **RZ**) / **Ok**.

9) Задание закреплений:

Model / Constraint/ Set.../ напишите имя варианта закреплений.

Model / Constraint/ Nodal.../ укажите мышью концы перекрёстных связей (по оси **X**) / **Ok** / пометьте закрепления по степеням свободы (**DOF**): **TX**, **TY**, **TZ**, **RX** и **RZ** (все кроме **RY**) / **Ok** / укажите мышью концы балок главного направления (по оси **Y**) / **Ok** / пометьте все закрепления кроме **RX** / **Ok** /.

Введённые закрепления соответствуют свободно опёртым концам балок перекрытия.

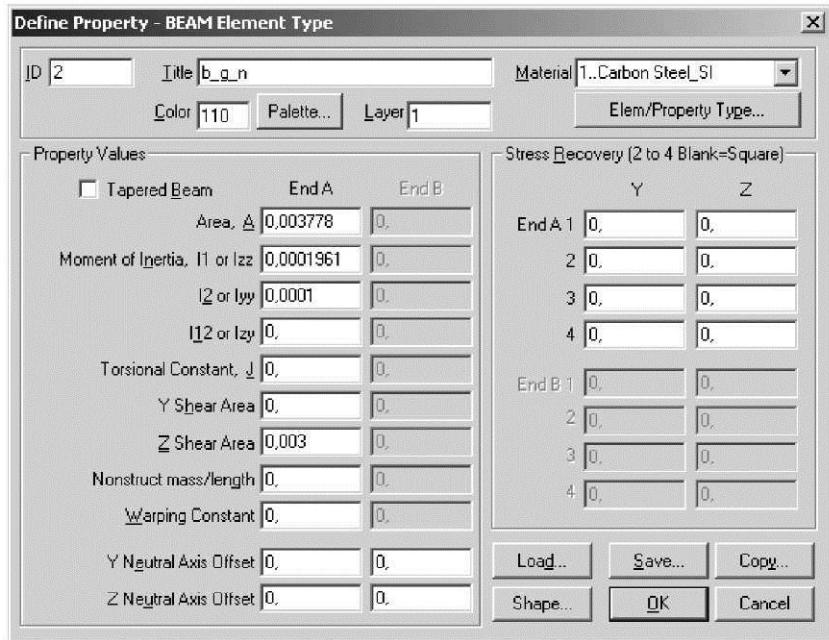


Рис. 8.24

Теперь модель создана. Осталось выполнить расчёт:
File / Analyze... / укажите: **Analyze Type: 2. Normal Modes/Eigenvalues;**
Constraints: укажите вариант закреплений.

Результаты расчётов просматриваем, выбирая **View / Select / Deformed and Contour Data... / Output Set: ...**

Полученная в результате расчёта собственная частота 1 тона составляет 26,109 Гц. По расчётом в книге [4, с. 247] получаем: $164 \text{ c}^{-1} / 2\pi = 26,101 \text{ Гц}$.

8.5. Пример динамического расчёта балки

Рассчитаем свободно опёртую стальную однопролетную балку длиной 0,762 м с квадратным сечением 1,27 x 1,27 см (рис. 8.1) на удар сосредоточенной силой посередине пролёта. Ударная сила распределена во времени по закону:

$$F = \begin{cases} F_0 \sin(\pi t/\tau) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau; \\ 0 & \text{при } t \geq \tau. \end{cases}$$

Амплитуда силы $F_0 = 4530 \text{ Н}$, время удара $\tau = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Последовательность начальных действий по созданию модели такая же, как в разделе 8.2. Однако для достижения достаточной точности расчёта число конечных элементов модели должно быть на порядок больше (50).

Для задания нагрузки вначале определим функцию $F(t)$:

Model / Function.../ На появившейся панели определите:
Title: F **Type: 1..vs.Time** (это означает, что функция от времени)
 В блоке **Data Entry** укажите **Equation** (уравнение).

Далее задаём функцию $Y(x)$ (которая будет соответствовать функции $F(t)$): **Delta X: 1e-6** (шаг по времени, - по поводу его выбора смотрите п. 8.1); **X: 0.0;** **To X: 20e-6** (начальный и конечный моменты времени); **Y: 4530*sin(!x*180/20e-6)** (формула нагружения: ! x означает, что x является переменной; углы необходимо задавать в градусах). Заполнив указанные поля, нажмите кнопку **More**. В результате появится массив из 20 значений **X (Time)** и **Y (Factor)**, соответствующий времени действия ударной силы.

Для задания нагрузки в последующие моменты времени укажите: **Linear Ramp** (линейная функция). Далее задаём: **Delta X: 20e-6** (шаг по времени); **X: 20e-6;** **To X: 40e-6** (последующий отрезок времени); **Y: 0.0;** **To Y: 0.0**. Заполнив поля, нажмите кнопку **More**. После задания функции нагружения нажмите: **Ok**.

Для контроля посмотрим график созданной функции $F(t)$: **View / Select / XY of Function / Model Data**. В появившемся окне в разделе **Function** из списка **Select** выберите **1..F / Ok / Ok** (рис. 8.25).

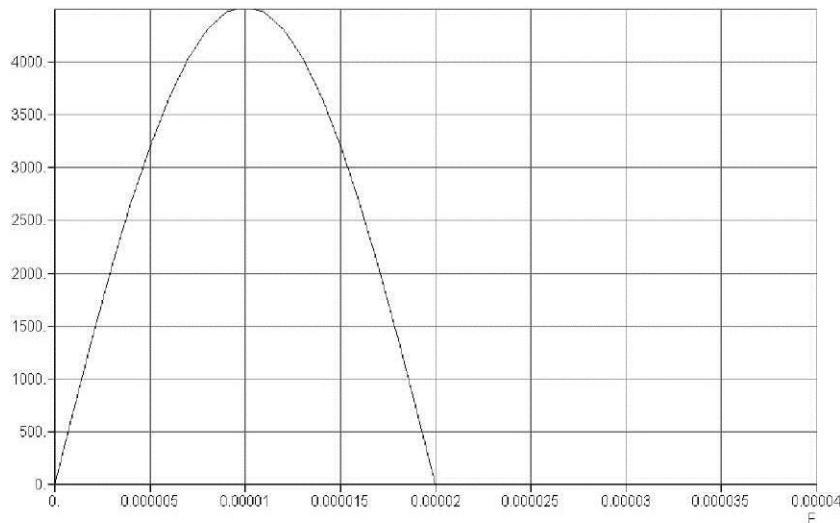


Рис. 8.25

Теперь задаём непосредственно нагрузку:

Model / Load / Set.../- - напишите имя варианта нагрузки: **Force1**; **Model / Load / Nodal.../-** - укажите номер узла посередине пролёта: **26**. Далее, нажав **Ok**, на панели **Create Loads on Nodes** в списке слева выберите: вид нагрузки **(Force/Moment)**; **Method: Variable** (переменная); **Function Dependence** (зависимость от функции): **1..F**. В поле **Value** (значение силы) для **FY** введите **1.0** (это масштабный коэффициент: {сила} = {функция $F(t)$ } * FY).

Чтобы правильно задать параметры для динамического анализа системы желательно предварительно рассчитать её основные собственные частоты: **File/ Analyze... / Analyze Type: 2. Normal Modes / Eigenvalues; Number of Modes: 5 / Ok**. При запросе сохраните модель. После расчёта

посмотрите значение первой собственной частоты: **View / Select / Draw Model / Deformed and Contour Data / Output Set**. Она составляет 50 Гц. Период колебаний первого тона равен $1/50 = 0.02$ с.

Далее зададим параметры динамического анализа:

Model / Load / Dynamic Analysis.../ - укажите вид анализа: **Direct Transient** (прямой шаговый по времени анализ).

Ведите: общий коэффициент структурного демпфирования **Overall Structural Damping Coeff : 0.001**. Для вычисления коэффициента эквивалентного вязкого демпфирования следует задать частоту, которую примем равной первой собственной частоте – **Frequency for System Damping: 50**.

Число шагов (**Number of Steps**): 100; шаг по времени (**Time per Step**): 1e-6. В этом случае расчётный интервал времени будет составлять $100 * 1e-6 = 0.0001$ с, то есть в пять раз больше времени действия ударной силы. Выводить результаты будем в каждый расчётный момент времени: **Output Interval: 1 / Ok**.

Приступим к выполнению расчёта:

File/ Analyze... / укажите: **Analyze Type: 3. Transient Dynamic; Loads:** укажите вариант нагрузки (**Force1**); **Constraints:** укажите вариант закреплений.

По умолчанию для такого анализа вычисляются только перемещения. Чтобы вычислялись и напряжения укажите тип выводимых результатов – **Output Types: 2.. Displacements and Stresses**.

При динамическом анализе может потребоваться задание начальных условий (**Initial Conditions**). В данном случае в начальный момент времени перемещения и скорости во всей модели нулевые, поэтому начальные условия можно просто не задавать. Если же начальные перемещения или (и) скорости не нулевые, то их необходимо задать в новом наборе нагрузок: **Model / Load / Set ... ; Model / Load ...** (задать несиловые нагрузки типа **Displacement** либо **Velocity**); а далее указать данный набор нагрузок перед расчётом: **File/ Analyze... / Initial Conditions /**

После расчёта можно посмотреть разнообразные результаты:

1) Просмотр динамической деформации балки.

View / Select / В колонке **Deformed Style** укажите **Animate-MultiSet / Deformed and Contour Data... /**. На появившейся панели укажите:

Output Set: 1. Case 1 ...; Deformation: Total Translation ; Contour: Total Translation ; Final Output Set: 101. Case 101... ; Increment: 2 ; Ok / Ok /

2) График изменения прогиба от времени в середине балки:

View / Select / В колонке **XY Style** укажите **XY vs Set Value;**

XY Data... / Output Set: 1. ... ; Output Vector: 1. Total Translation Node: 26 From: 1 To: 101

(Можно задать несколько кривых (например, прогибы в узлах 22, 24 и 26) – для этого в колонке **Curve** изменяйте номер кривой и задавайте соответствующие ей параметры); **/ Ok / Ok**.

3) График изменения напряжений в узле от времени:
задаётся аналогично, только в позиции **Output Vector** следует указать:

3139. Beam EndA Pt1 Comb Stress

4) График изменения напряжений по длине балки в момент $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с:
View / Select / В колонке XY Style укажите XY vs Position; XY Data.../
Output Set: 31. Case 31 Time 0.000030
Output Vector: 3139. Beam EndA Pt1 Comb Stress

8.6. Варианты заданий для лабораторных работ по динамическому анализу

8.6.1. Лабораторная работа 1

Цель работы: Провести анализ собственных колебаний конструкций.

Исходные данные приведены в п. 5.4.3.

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- 1) исходные данные;
- 2) расчетную модель с указанием номеров узлов, конечных элементов, закреплений;
- 3) собственные формы и частоты первых 3 тонов.

8.6.2. Лабораторная работа 2

Цель работы: Провести анализ собственных колебаний конструкции.
Путём изменения толщин пластин добиться увеличения собственной частоты первого тона конструкции на 20 %.

Исходные данные приведены в п. 7.2.1. Толщины в изменённой конструкции могут быть разными для настила, стенок и поясков балок.

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- 1) исходные данные;
- 2) исходную расчетную модель с разбивкой на конечные элементы и закреплениями;
- 3) собственные формы и частоты первых 3 тонов исходной конструкции;
- 4) собственные формы и частоты первых 3 тонов модернизированной конструкции.

8.6.3. Лабораторная работа 3

Цель работы: Провести анализ колебаний балки при ударе по ней поперечной сосредоточенной силой F .

Варианты расчётных схем представлены на рис. 8.26, а варианты заданий – в табл. 8.3. Размеры приведены в миллиметрах, сила – в кН. Сечение балки: пустотелый прямоугольник высотой h , шириной b и толщиной s .

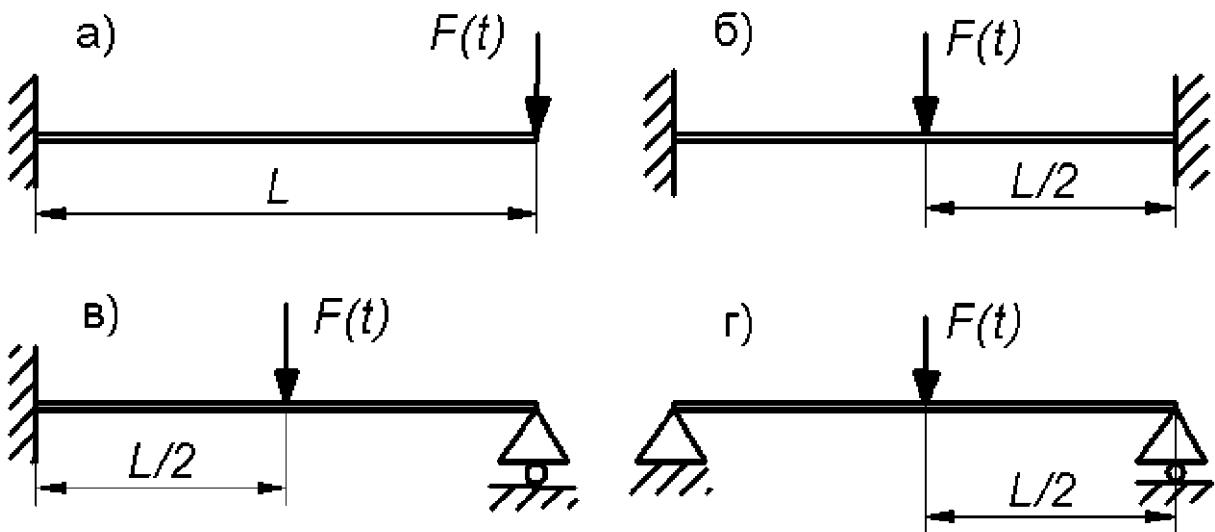


Рис. 8.26

Табл.ица 8.3

| н/п | L | b | h | s | F_A | схема | материал | формула нагружения |
|-----|------|-----|-----|-----|-------|-------|----------|---|
| 1 | 1500 | 100 | 200 | 6 | 30 | а | 09Г2 | при $0 < t < 0.01 \text{ с}$: $F = 100 F_A t;$ |
| 2 | 1000 | 100 | 200 | 6 | 50 | | Ст. 3 | |
| 3 | 1000 | 80 | 120 | 5 | 20 | | Ст. 3 | |
| 4 | 1500 | 100 | 200 | 6 | 30 | б | 09Г2 | при $t > 0.01 \text{ с}$: $F = F_A$ |
| 5 | 1000 | 100 | 200 | 6 | 50 | | Ст. 3 | |
| 6 | 1000 | 80 | 120 | 5 | 20 | | 09Г2 | |
| 7 | 1500 | 100 | 200 | 6 | 30 | в | 09Г2 | при $0 < t < 0.03 \text{ с}$: $F = 50 F_A t;$ |
| 8 | 1000 | 100 | 200 | 6 | 50 | | 09Г2 | |
| 9 | 1000 | 80 | 120 | 5 | 20 | | Ст. 3 | |
| 10 | 1500 | 100 | 200 | 6 | 30 | г | 10ХСНД | при $0.03 < t < 0.06$: $F = 50 F_A (0.06 - t);$ |
| 11 | 1000 | 100 | 200 | 6 | 50 | | 10ХСНД | |
| 12 | 1000 | 80 | 120 | 5 | 20 | | Ст. 3 | |

В отчете по лабораторной работе необходимо отразить следующее:

- 1) исходную расчетную модель;
- 2) собственную форму и частоту первого тона;
- 3) функцию прогиба балки от времени в месте приложения силы;
- 4) эпюры напряжений и прогибов балки в моменты времени, когда они достигают экстремума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в пособии проблемы численных методов анализа представляют собой основу или первые шаги к пониманию численных методов решения инженерных задач. Многие из численных методов, применяемых в инженерных расчетах, берут свои начала именно из задач рассмотренных в этом пособии. Так, например, на разностных структурах, применяемых в численном дифференцировании или при построении интерполяционных полиномов, основан метод конечных разностей. Метод конечных элементов, метод редуцированных элементов, вариационные методы и другие, также опираются на численные методы анализа математических задач.

Поэтому можно заключить, что изучение глав данного пособия будет полезным для студентов технических специальностей, изучающих курсы численных методов решения инженерных задач.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ВИДЫ АНАЛИЗА И ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЭПЮР

Виды анализа

- 1..Static – статический
- 2..Normal Modes/Eigenvalues – нормальные формы/собственные частоты
- 3..Transient Dynamic/Time History – переходный динамический/процесс во времени
- 4..Frequency/Harmonic Response – частотный/гармонический отклик
- 5..Response Spectrum – спектр отклика
- 7..Buckling – устойчивость
- 10..Nonlinear Static – нелинейный статический

Основные типы эпюр

| | |
|----------------------------------|--|
| 1..Total Translation | Суммарное перемещение |
| 2..T1 Translation | Перемещение вдоль оси X |
| 3..T2 Translation | Перемещение вдоль оси Y |
| 4..T3 Translation | Перемещение вдоль оси Z |
| 5..Total Rotation | Суммарный поворот |
| 6.. R1 Rotation | Поворот вокруг оси X |
| 7.. R2 Rotation | Поворот вокруг оси Y |
| 8.. R3 Rotation | Поворот вокруг оси Z |
| 41..Total Applied Force | Суммарные приложенные силы |
| 42.. T1 Applied Force | Приложенные силы вдоль оси X |
| 43.. T2 Applied Force | Приложенные силы вдоль оси Y |
| 44.. T3 Applied Force | Приложенные силы вдоль оси Z |
| 45.. Total Applied Moment | Суммарный приложенный момент |
| 46.. R1 Applied Moment | Приложенный момент относительно оси X |
| 47.. R2 Applied Moment | Приложенный момент относительно оси Y |
| 48.. R3 Applied Moment | Приложенный момент относительно оси Z |
| 51.. Total Constraint Force | Суммарные реактивные усилия (реакции опор) |
| 52.. T1 Constraint Force | Реакции опор по оси X |
| 53.. T2 Constraint Force | Реакции опор по оси Y |
| 54.. T3 Constraint Force | Реакции опор по оси Z |
| 55..Total Constraint Moment | Суммарный реактивный момент в опоре |
| 56.. R1 Constraint Moment | Реактивный момент в опоре относительно оси X |
| 57.. R2 Constraint Moment | Реактивный момент в опоре относительно оси Y |
| 58.. R3 Constraint Moment | Реактивный момент в опоре относительно оси Z |
| 3014.. Beam AndA Plane1 Moment | Изгибающие моменты |
| 3018.. Beam AndA Pl1 Shear Force | Перерезывающие усилия |
| 3139.. Beam EndA Pt1 Comb Stress | Напряжения изгиба |
| 7033.. Plate Top VonMises Stress | Эквивалентные напряжения по гипотезе энергии формоизменения (Мизеса) на верхней стороне пластины |
| 7433.. Plate Bot VonMises Siress | Эквивалентные напряжения по гипотезе энергии формоизменения (Мизеса) на нижней стороне пластины |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ

РАЗДЕЛ *FILE* (РАБОТА С ФАЙЛАМИ)

- Загрузка, сохранение, экспорт, импорт и печать моделей, запись и выполнение программ

| | |
|-----------------------|---|
| <u>New</u> | Создание новой модели и работа с ней. |
| <u>Open</u> | Загрузка существующей модели и работа с ней. |
| <u>Save</u> | Сохранение текущей модели. |
| <u>Save As</u> | Сохранение текущей модели под новым именем. |
| <u>Timed Save</u> | Автоматическое сохранение модели через заданные промежутки времени. |
| <u>Page Setup</u> | Оформление страницы для вывода рисунков. |
| <u>Print</u> | Вывод на принтер или графопостроитель. |
| <u>Printer Setup</u> | Выбор принтера и его настройка. |
| <u>Picture</u> >> | Копирование или сохранение рисунков. |
| <u>Copy</u> | Копирование активного окна в ячейку обмена информацией (clipboard). |
| <u>Save</u> | Запись активного окна в графический файл. |
| <u>Save Desktop</u> | Запись всего экрана в графический файл. |
| <u>Replay</u> | Отображение на экране графического файла. |
| <u>Messages</u> >> | Копирование или сохранение выбранных сообщений. |
| <u>Copy</u> | Копирование сообщений в ячейку обмена информацией (clipboard). |
| <u>Save</u> | Запись сообщений в файл. |
| <u>Import</u> | Импорт и экспорт модели (связь с внешними системами). |
| <u>Export</u> | Выполнение анализа текущей модели. |
| <u>Analyze</u> | |
| <u>Program</u> >> | Работа с программами. |
| <u>Run</u> | Запуск файла с программой. |
| <u>Record</u> | Включение записи программы (действий пользователя) в файл. |
| <u>Stop Recording</u> | Выключение записи программы. |
| <u>Convert Units</u> | Настройка системы единиц измерения. |
| <u>Rebuild</u> | Проверка и исправление испорченных или неполных моделей. |
| <u>Preferences</u> | Изменение исходных параметров для моделей и программ. |
| <u>Exit</u> | Возврат в среду <i>Windows</i> . |

РАЗДЕЛ TOOLS (ИНСТРУМЕНТАРИЙ)

- Управление параметрами рабочей плоскости, курсора, модели; команды *uUNDO* и *REDO*

| | |
|---------------------------|--|
| <u>Undo</u> | Отмена последней выполненной команды. |
| <u>Redo</u> | Отмена последней команды Undo. |
| <u>Advanced Geometry</u> | Твердотельная геометрия. |
| <u>Cursor Position</u> | Включение/выключение окна с указанием текущих координат графического курсора. |
| <u>Toolbox</u> | Включение/выключение графической панели, дублирующей главное меню. |
| <u>Parameters</u> | Изменение значений, принимающихся по умолчанию для идентификаторов, приращений, цвета и т.д. |
| | Преобразование размерностей |
| <u>Convert Units</u> | |
| <u>Variables</u> | Переменные |
| <u>Layers</u> | Слои |
| <u>Text</u> | Текст |
| <u>Distance</u> | Расстояние |
| <u>Angles</u> | Углы |
| <u>Mass Properties</u> | Массовые характеристики |
| <u>Section Properties</u> | Свойства сечений |
| <u>Check</u> | Контроль |

РАЗДЕЛ GEOMETRY (ГЕОМЕТРИЯ)

- Построение модели и управление формированием выходных данных (результатов расчета) для их дальнейшей обработки

| | |
|----------------------------|---|
| <u>Point</u> | Формирование точки. |
| <u>Curve-Line >></u> | Формирование прямой линии. |
| <u>Project Points</u> | Прямая в рабочей плоскости между проекциями двух точек на эту плоскость. |
| <u>Horizontal</u> | Прямая вдоль оси X рабочей плоскости. |
| <u>Vertical</u> | Прямая вдоль оси Y рабочей плоскости. |
| <u>Perpendicular</u> | Прямая в рабочей плоскости, перпендикулярная к указанной кривой. |
| <u>Parallel</u> | Прямая в рабочей плоскости, параллельная указанной прямой. |
| <u>Midline</u> | Прямая в рабочей плоскости, равноудаленная от двух указанных линий. |
| <u>At Angle</u> | Прямая под заданным углом к оси X рабочей плоскости. |
| <u>Angle to Curve</u> | Прямая в рабочей плоскости, под заданным углом к выбранной кривой. |
| <u>Point and Tangent</u> | Прямая в рабочей плоскости, касательная к указанной кривой и проходящая через заданную точку. |
| <u>Tangent</u> | Прямая в рабочей плоскости, касательная к двум заданным кривым. |

| | |
|-------------------------------------|---|
| <u>Rectangle</u> | Прямоугольник в рабочей плоскости, определяемый двумя противоположными углами. |
| <u>Continuous</u> | Построение незамкнутых и замкнутых ломаных кривых на основе отрезков прямых линий. |
| <u>Points</u> | Прямая между двумя существующими точками. |
| <u>Coordinates</u> | Формирование прямой линии с указанием координат ее краев. |
| <u>Offset</u> | Прямая, смещенная в направлении заданного вектора на указанное расстояние от выбранной прямой. |
| <u>Offset</u> | Прямая вдоль заданного вектора. |
| <u>Vectored</u> | |
| <u>Curve-Arc >></u> | Формирование дуги. |
| <u>Center-Start-End</u> | Дуга в рабочей плоскости, определяемая центром, а также начальной и конечной точками. |
| <u>Radius-Start-End</u> | Дуга в рабочей плоскости, определяемая начальной и конечной точками и радиусом. |
| <u>Angle-Start-End</u> | Дуга в рабочей плоскости, определяемая углом, а также начальной и конечной точками. |
| <u>Angle-Center-Start</u> | Дуга в рабочей плоскости, определяемая центром, углом и начальной точкой. |
| <u>Chord-Center-Start</u> | Дуга в рабочей плоскости, определяемая центром, начальной точкой и длиной хорды. |
| <u>Points</u> | Дуга, определяемая тремя точками. |
| <u>Center and Points</u> | Дуга, определяемая центром и двумя конечными точками. |
| <u>Start-End-Direction</u> | Дуга, определяемая двумя конечными точками и начальным касательным вектором. |
| <u>Curve-Circle >></u> | Формирование окружности. |
| <u>Radius</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая центром и точкой на окружности. |
| <u>Diameter</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая двумя точками по краям диаметра. |
| <u>Center</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая центром и заданным радиусом. |
| <u>Two Points</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая двумя точками и радиусом. |
| <u>Point-Tangent</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая центром и являющаяся касательной к указанной кривой. |
| <u>Tangent to Curves</u> | Окружность в рабочей плоскости, определяемая радиусом и являющаяся касательной к двум указанным кривым. |
| <u>Concentric</u> | Окружность в рабочей плоскости, концентрическая относительно другой окружности или дуги. |
| <u>Point to Arc</u> | Окружность, определяемая тремя точками. |
| <u>Center and Points</u> | Окружность, определяемая центром и двумя точками. |

| | |
|-------------------------------|--|
| Curve-Spline >> | |
| Project Control Points | Формирование сплайна. |
| Project Points | Сплайн в рабочей плоскости, определяемый четырьмя управляющими точками (control points). |
| Ellipse | Сплайн в рабочей плоскости, определяемый четырьмя точками, через которые он проходит (thru points). |
| Parabola | Формирование эллипса на основе сплайна. |
| Hyperbola | Формирование параболы. |
| Control Points | Формирование гиперболы. |
| Points | Сплайн, определяемый четырьмя управляющими точками (control points). |
| Equation | Сплайн, определяемый четырьмя точками, через которые он проходит (thru points). |
| Tangents | Сплайн, определяемый коэффициентами параметрического уравнения. |
| Blend | Сплайн, определяемый конечными точками и касательными векторами к ним. |
| Offset | Сплайн, формирующий плавный переход между двумя указанными кривыми. |
| Curve-Surface >> | Сплайн, равнодistantный от другого сплайна. |
| Corners | Формирование поверхности. |
| Edge Curves | Поверхность, определяемая координатами трех или четырех ее углов. |
| Aligned Curves | Поверхность, определяемая тремя или четырьмя ограничивающими ее кривыми. |
| Sector | Поверхность, определяемая четырьмя кривыми, установленными в одном и том же параметрическом направлении. |
| Ruled | Поверхность вращения, определяемая дугой или окружностью. |
| Extrude | Поверхность, определяемая двумя ограничивающими кривыми (остальные две ограничивающие кривые формируются автоматически на основе линейной интерполяции). |
| Revolve | Поверхность, определяемая движением ("выдавливанием") одной или нескольких кривых в направлении заданного вектора. |
| Sweep | Поверхность, определяемая движением одной или нескольких кривых вокруг заданного вектора. |
| Plane | Поверхность, определяемая движением одного или нескольких кривых вдоль заданного пути, который также может быть представлен одной или несколькими кривыми. |
| Cylinder | Поверхность, определяемая движением одной или нескольких кривых вдоль заданного пути, который также может быть представлен одной или несколькими кривыми. |
| Sphere | Плоская прямоугольная поверхность. |
| Sketch | Цилиндрическая или коническая поверхность (полная или сектор). |
| Boundary Surface | Сферическая поверхность (полная или сектор). |
| | Эскиз |
| | Границчная поверхность |

| | |
|------------------------|--|
| Surface | Поверхность |
| Midsurface | Срединная поверхность |
| Volume >> | Формирование объемного тела. |
| Corners | Объемное тело, определяемое координатами углов. |
| Surfaces | Объемное тело, определяемое ограничивающими поверхностями. |
| Between | Объемное тело между двумя поверхностями. |
| Extrude | Объемное тело, определяемое движением (“выдавливанием”) одной или нескольких поверхностей в направлении заданного вектора. |
| Revolve | Объемное тело, определяемое вращением одной или нескольких поверхностей вокруг заданного вектора. |
| Cylinder | Цилиндрическое или коническое объемное тело (полное или сектор). |
| Sphere | Сферическое объемное тело (полное или сектор). |
| Solid | Твердое тело |
| Copy | Копировать |
| Radial Copy | Радиальное копирование |
| Scale | Масштабное копирование |
| Rotate | Копирование вращением |
| Reflect | Копирование отражением |

РАЗДЕЛ MODEL (МОДЕЛЬ)

- Дополнительные команды для генерации конечноэлементных сеток и формирования геометрии.

| | |
|----------------------|---|
| Coord Sys | Координатные системы |
| Node | Формирование узла конечноэлементной сетки (КЭС). |
| Element | Формирование элемента. |
| Material | Определение свойств материала (E, G, nu и т.д.). |
| Property | Определение свойств элементов (толщина, площадь поперечного сечения, моменты инерции и т.д.). |
| Load >> | Нагружение конечноэлементной модели. |
| Set | Создание или активизация варианта нагружения, изменение заголовка варианта нагружения. |
| Body | Гравитационное, центробежное и общее температурное нагружение, принимаемое по умолчанию. |
| Nodal | Узловые силы, перемещения, ускорения и температуры. |
| Elemental | Давление и температуры в элементах. |
| Copy | Копирование активного варианта нагружения. |
| From Output | Преобразование результатов предыдущего расчета в нагрузки. |

| | |
|----------------------------|---|
| Constraint >> | Закрепление конечноэлементной модели (границные условия). |
| Set | Создание или активизация варианта закрепления, изменение его заголовка. |
| Contact | Контакт |
| Optimization | Оптимизация |
| Function | Задание временных и температурных зависимостей. |
| Output >> | Формирование наборов выходных данных (результатов расчета) и работа с ними. |
| Set | Создание, активизация или изменения заголовка варианта результатов расчета. |
| Vector | Создание, активизация или изменения заголовка вектора, входящего в состав варианта результатов расчета. |
| Define | Определение величины выходных данных в активном векторе для отдельных узлов или элементов. |
| Fill | Определение выходных данных в активном векторе на основе уравнения (возможен групповой выбор узлов или элементов). |
| Convert | Преобразование результатов расчета в узлах КЭС в результаты расчета в элементах и наоборот. |
| Copy | Копирование результатов расчета. |
| Linear | Определение нового варианта результатов расчета в виде линейной комбинации других результатов. |
| Calculate | Определение нового варианта результатов расчета на основе уравнения. |
| Envelope | Определение нового варианта результатов расчета на основе минимальных или максимальных значений указанных векторов из других вариантов. |
| Error Estimate | Оценка погрешности в результатах расчета. |
| From Load | Преобразование нагрузок в выходные данные для дальнейшей обработки их с помощью постпроцессора. |
| Transform | Перевод результатов расчета из глобальной системы координат в любые другие существующие системы. |
| Extrapolate | Линейная экстраполяция результатов, полученных в центрах тяжести оболочечных и объемных элементов, для угловых узлов этих элементов. |

РАЗДЕЛ MESH (СЕТКА)

- Дополнительные команды для генерации конечноэлементных сеток и формирования геометрии

| | |
|------------------------------|--|
| Mesh Control >> | Определение плотности конечноэлементной сетки (размера элементов) для последующей ее генерации. |
| Default | Установка размера конечного элемента, который будет в дальнейшем использоваться генераторами сетки по умолчанию. |

| | |
|--------------------------|---|
| At Point | Определение размера сетки в точке (указанный размер будет действовать на все кривые, которым принадлежит эта точка). |
| Along Curve | Определение плотности сетки (количества элементов) вдоль кривой. |
| On Surfaces | Определение плотности сетки (количества элементов) вдоль кривых, ограничивающих поверхность. |
| Geometry >> | Генерация конечноэлементной сетки на базе геометрических примитивов. |
| On Point | Генерация узлов сетки в геометрических точках. |
| Along Curve | Генерация КЭС вдоль кривой с использованием заданных размеров сетки. |
| On Surface | Генерация КЭС на поверхности с использованием заданных размеров сетки. |
| In Solids | Генерация КЭС в объемном теле с использованием заданных размеров сетки. |
| Between | Генерация конечноэлементной сетки между указанными углами (вершинами). |
| Region | Генерация конечноэлементной сетки между указанными узлами. |
| Connection | Связи |
| Transition | Обход |
| Remesh | Сгущение КЭС в указанной части модели. |
| Edge Members | Генерация линейных конечноэлементов вдоль свободных ребер указанных элементов. |
| Smooth | Улучшение (оптимизация) формы элементов (устранение искажений). |
| Copy >> | Копирование узлов, элементов и геометрических примитивов с одновременным переносом в пространстве. |
| Point | Копирование точек со смещением в направлении заданного вектора. |
| Curve | Копирование кривых и принадлежащих им точек со смещением в направлении заданного вектора. |
| Surface | Копирование поверхностей и принадлежащих им геометрических примитивов (кривые, точки) со смещением в направлении заданного вектора. |
| Volume | Копирование объемов и принадлежащих им геометрических примитивов (поверхности, кривые, точки) со смещением в направлении заданного вектора. |
| Node | Копирование узлов конечноэлементной сетки со смещением в направлении заданного вектора. |
| | Копирование элементов и принадлежащих им узлов со смещением в направлении заданного вектора. |

| | |
|-------------------------|--|
| <u>Element</u> | Радиальное копирование Копирование масштабированием Копирование узлов, элементов и геометрических примитивов с одновременным поворотом в пространстве. |
| Radial Copy | Копирование точек с поворотом вокруг заданного вектора. |
| Scale | |
| Rotate >> | Копирование кривых и принадлежащих им точек с поворотом вокруг заданного вектора. |
| <u>Point</u> | Копирование поверхностей и принадлежащих им геометрических примитивов (кривые, точки) с поворотом вокруг заданного вектора. |
| <u>Curve</u> | Копирование объемов и принадлежащих им геометрических примитивов (поверхности, кривые, точки) с поворотом вокруг заданного вектора. |
| <u>Surface</u> | Копирование узлов конечноэлементной сетки с поворотом вокруг заданного вектора. |
| <u>Volume</u> | Копирование элементов и принадлежащих им узлов с поворотом вокруг заданного вектора. |
| <u>Node</u> | Зеркальное отображение узлов, элементов и геометрических примитивов. |
| <u>Element</u> | Зеркальное отображение точек относительно указанной плоскости. |
| Reflect >> | Зеркальное отображение поверхностей и принадлежащих им геометрических примитивов (кривые, точки) относительно указанной плоскости. |
| <u>Point</u> | Зеркальное отображение кривых и принадлежащих им точек относительно указанной плоскости. |
| <u>Curve</u> | Зеркальное отображение объемов и принадлежащих им геометрических примитивов (поверхности, кривые, точки) относительно указанной плоскости. |
| <u>Surface</u> | Зеркальное отображение узлов конечноэлементной сетки относительно указанной плоскости. |
| <u>Volume</u> | Зеркальное отображение элементов и принадлежащих им узлов относительно указанной плоскости. |
| <u>Node</u> | |
| <u>Element</u> | |
| Extrude >> | Генерация конечноэлементной сетки путем "выдавливания" геометрических примитивов или конечных элементов. |
| <u>Curve</u> | Выдавливание (движение по заданной траектории) кривых с одновременной генерацией конечноэлементной сетки заданной плотности. |

| | |
|-------------------------|---|
| <u>Element</u> | Выдавливание конечных элементов с образованием новых элементов (в процессе выполнения этой операции из линейных элементов получаются оболочечные, а из оболочечных - объемные). |
| <u>Revolve >></u> | Генерация конечноэлементной сетки путем вращения геометрических примитивов или конечных элементов вокруг указанного вектора. |
| <u>Curve</u> | Вращение кривых с одновременной генерацией конечноэлементной сетки заданной плотности. Плотность сетки предварительно задается с помощью команд "Mesh size >> Along curve". |
| <u>Element</u> | Вращение конечных элементов с одновременной генерацией новых элементов (в процессе выполнения этой операции из линейных элементов получаются оболочечные, а из оболочечных - объемные). |

РАЗДЕЛ MODIFY (МОДИФИКАЦИЯ)

- Модификация (редактирование) существующей геометрической или конечноэлементной модели

| | |
|---------------------------|--|
| <u>Trim</u> | Удаление частей кривых с использованием отсекающих кривых (подгонка выступающей кривой до точки пересечения с указанной кривой). |
| <u>Extend</u> | Продление одной или более кривых до указанного места. |
| <u>Break</u> | Разбиение кривых на две части в указанном месте. |
| <u>Join</u> | Продление кривых до точки их пересечения. |
| <u>Fillet</u> | Соединение кривых дугой окружности (скругление). |
| <u>Chamfer</u> | Построение фасок. |
| <u>Project >></u> | Проектирование геометрических точек и узлов конечноэлементной сетки на кривую или поверхность. |
| <u>Point onto Curve</u> | Проектирование с перемещением точек на указанную кривую. |
| <u>Node onto Curve</u> | Проектирование с перемещением узлов на указанную кривую. |
| <u>Point onto Surface</u> | Проектирование с перемещением точек на указанную поверхность. |
| <u>Node onto Surface</u> | Проектирование с перемещением узлов на указанную поверхность. |
| <u>Move To >></u> | Перемещение части модели в указанную позицию. |
| <u>Coord Sys</u> | Перемещение систем координат в указанное место. |
| | Перемещение точек в указанное место. |
| | Перемещение узлов в указанное место. |

| | |
|---------------------------|--|
| <u>Point</u> | Перемещение части модели вдоль заданного вектора. |
| <u>Node</u> | |
| Move By >> | Перемещение систем координат вдоль заданного вектора. |
| <u>Coord Sys</u> | Перемещение точек вдоль заданного вектора. |
| <u>Point</u> | Перемещение кривых вдоль заданного вектора. |
| <u>Curve</u> | Перемещение поверхностей вдоль заданного вектора. |
| <u>Surface</u> | Перемещение объемных тел вдоль заданного вектора. |
| <u>Volume</u> | Перемещение узлов вдоль заданного вектора. |
| <u>Node</u> | Перемещение элементов вдоль заданного вектора. |
| <u>Element</u> | Поворот части модели между двумя указанными позициями. |
| Rotate To >> | Поворот систем координат между указанными позициями. |
| <u>Coord Sys</u> | Поворот объемных тел между указанными позициями. |
| <u>Point</u> | Поворот узлов между указанными позициями. |
| <u>Curve</u> | Поворот элементов между указанными позициями. |
| <u>Surface</u> | Поворот части модели на заданный угол. |
| <u>Volume</u> | Поворот систем координат на заданный угол. |
| <u>Node</u> | Поворот точек на заданный угол. |
| <u>Element</u> | Поворот кривых на заданный угол. |
| Rotate By >> | Поворот поверхностей на заданный угол. |
| <u>Coord Sys</u> | Поворот объемных тел на заданный угол. |
| <u>Point</u> | Поворот узлов на заданный угол. |
| <u>Curve</u> | Поворот элементов на заданный угол. |
| <u>Surface</u> | Альтернативный метод перемещения и/или поворота части модели путем совмещения одного заданного вектора с другим (с помощью этой команды можно выполнить поворот и перемещение за одну операцию). |
| <u>Volume</u> | Перемещение и/или поворот систем координат. |
| <u>Node</u> | Перемещение и/или поворот точек. |
| <u>Element</u> | Перемещение и/или поворот кривых. |
| Align >> | Перемещение и/или поворот поверхностей. |
| <u>Coord Sys</u> | Перемещение и/или поворот объемных тел. |
| <u>Point</u> | Перемещение и/или поворот узлов. |
| <u>Curve</u> | Перемещение и/или поворот элементов. |
| <u>Surface</u> | Масштабирование части модели. |
| <u>Volume</u> | Масштабирование точек. |
| | Масштабирование кривых. |
| | Масштабирование поверхностей. |
| | Масштабирование объемных тел. |
| | Масштабирование узлов. |
| | Масштабирование элементов. |

| | |
|---------------------------------------|---|
| <u>Node</u> | |
| <u>Element</u> | |
| <u>Scale >></u> | |
| <u>Point</u> | |
| <u>Curve</u> | |
| <u>Surface</u> | |
| <u>Volume</u> | |
| <u>Node</u> | |
| <u>Element</u> | |
| <u>Edit >></u> | Редактирование составляющих конечноэлементной модели. |
| <u>Coord Sys</u> | Переопределение систем координат. |
| <u>Point</u> | Переопределение точек. |
| <u>Text</u> | Переопределение текста. |
| <u>Boundary</u> | Переопределение границ для генерации сеток. |
| <u>Node</u> | Переопределение узлов КЭС. |
| <u>Element</u> | Переопределение элементов. |
| <u>Material</u> | Переопределение материалов. |
| <u>Property</u> | Переопределение свойств элементов. |
| <u>Load</u> | Переопределение нагрузок. |
| <u>Constraint</u> | Переопределение закреплений. |
| <u>Function</u> | Переопределение функций. |
| <u>Color >></u> | Изменение цвета составляющих конечноэлементной модели. |
| <u>Coord Sys</u> | Изменение цветов систем координат. |
| <u>Point</u> | Изменение цветов точек. |
| <u>Curve</u> | Изменение цветов кривых. |
| <u>Surface</u> | Изменение цветов поверхностей. |
| <u>Volume</u> | Изменение цветов объемных тел. |
| <u>Text</u> | Изменение цветов текста. |
| <u>Boundary</u> | Изменение цветов границ для генерации КЭС. |
| <u>Node</u> | Изменение цветов узлов КЭС. |
| <u>Element</u> | Изменение цветов конечноэлементов. |
| <u>Material</u> | Изменение цветов материалов. |
| <u>Property</u> | Изменение цветов свойств элементов. |
| <u>Load</u> | Изменение цветов нагрузок. |
| <u>Constraint</u> | Изменение цветов закреплений. |
| <u>Layer >></u> | Установка соответствия между составляющими модели и различными слоями графического отображения. |

| | |
|------------------------------|--|
| Coord Sys | Установка принадлежности систем координат различным слоям. |
| Point | Установка принадлежности точек различным слоям. |
| Curve | Установка принадлежности кривых различным слоям. |
| Surface | Установка принадлежности поверхностей различным слоям. |
| Volume | Установка принадлежности объемных тел различным слоям. |
| Text | Установка принадлежности текстов различным слоям. |
| Boundary | Установка принадлежности границ различным слоям. |
| Node | Установка принадлежности узлов КЭС различным слоям. |
| Element | Установка принадлежности элементов различным слоям. |
| Material | Установка принадлежности материалов различным слоям. |
| Property | Установка принадлежности свойств различным слоям. |
| Load | Установка принадлежности нагрузок различным слоям. |
| Constraint | Установка принадлежности закреплений различным слоям. |
| Renumber >> | Перенумерация составляющих модели. |
| Coord Sys | Перенумерация систем координат. |
| Node | Перенумерация узлов КЭС. |
| Element | Перенумерация элементов. |
| Material | Перенумерация материалов. |
| Property | Перенумерация свойств элементов. |
| Associativity | Присоединить/отсоединить |
| Update >> | Другие способы модификации составляющих модели. |
| CSys Definition Csys | Замена типа системы координат для указанного списка существующих систем координат с сохранением места их расположения. |
| Point Definition Csys | Выбор новой системы координат для указанного списка точек. |
| Surface Divisions | Изменение густоты разбиения геометрических поверхностей для их отображения на экране. |
| Node Definition Csys | Выбор новой системы координат для указанного списка узлов КЭС. |
| Output Csys | Выбор новой системы координат вывода результатов для указанного списка узлов КЭС. |
| Perm Constraint | Изменение условий закрепления (границных условий) для указанного списка узлов. |

| | |
|------------------------------|---|
| <u>Element Type</u> | Изменение типа элементов путем выбора новых свойств. |
| <u>Property ID</u> | Выбор новых свойств для списка элементов (без смены их типа). |
| <u>Material ID</u> | Выбор нового материала для списка свойств. |
| <u>Material Angle</u> | Изменение угла ориентации свойств материала для указанного списка элементов. |
| <u>Orientation</u> | Изменение ориентации сечений для указанного списка балочных элементов (Bar, Beam, Curved Beam). |
| <u>Offsets</u> | Управление величиной сдвига узлов от нейтральной оси для указанного списка балочных элементов. |
| <u>Releases</u> | Управление степенями свободы в узлах для указанного списка балочных элементов. |
| <u>Reverse</u> | Смена направления нормали или переориентация первого ребра для указанных элементов. |
| <u>Element Order</u> | Преобразование элементов первого порядка в параболические и наоборот. |
| <u>Midside Nodes</u> | Изменение места расположения срединных узлов параболических элементов. |
| <u>Split Quads</u> | Разбиение четырехугольных элементов на треугольные. |

РАЗДЕЛ LIST (СПИСОК)

- Получение информации о различных составляющих геометрической или конечнозлементной модели в виде распечатки (списка)

| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| Tools | Средства. |
| Geometry>> | |
| <u>Point</u> | Геометрия |
| <u>Curve</u> | Список геометрических точек. |
| <u>Surface</u> | Список кривых. |
| <u>Volume</u> | Список поверхностей. |
| <u>Text</u> | Список объемных тел. |
| Model>> | Список текстов. |
| <u>Boundary</u> | Модель |
| | Список границ для генерации КЭС. |
| <u>Node</u> | |
| <u>Element</u> | Список узлов КЭС. |
| <u>Material</u> | Список элементов. |
| <u>Property</u> | Список материалов. |
| <u>Load</u> | Список свойств элементов. |
| <u>Constraint</u> | Список нагрузок. |
| | Список закреплений. |

| | |
|-----------------|---------------------------|
| Function | Список функций. |
| Variable | Список переменных. |
| Layers | Список графических слоев. |

Output >>

| | |
|--------------------|--|
| Query | Распечатка имеющихся результатов расчета. Интерактивный просмотр результатов расчета в указанных узлах или элементах. |
| Unformatted | Упрощенная распечатка указанных результатов расчета в одну или три колонки. |
| Standard | Распечатка указанных результатов расчета в стандартном формате. |
| Use Format | Распечатка указанных результатов расчета в формате, заданном пользователем. |
| Format | Список заданных пользователем форматов для вывода результатов расчета. |
| Group | Распечатка информации об указанных группах. |
| View | Распечатка информации об указанных видах. |
| Model Info | Распечатка обобщенной информации о текущей геометрической и конечноэлементной модели. |
| Destination | Управление выводом распечаток (по умолчанию все распечатки выводятся на экран в окно сообщений). |

РАЗДЕЛ DELETE (УДАЛЕНИЕ)

- Удаление различных составляющих геометрической или конечноэлементной модели

| | |
|-------------------------|--|
| All | Все |
| Tools | Средства. |
| Geometry>> | Геометрия |
| Point | Удаление геометрических точек. |
| Curve | Удаление кривых. |
| Surface | Удаление поверхностей. |
| Volume | Удаление объемных тел. |
| Text | Удаление текстов. |
| Model>> | Модель |
| Boundary | Удаление границ для генерации КЭС. |
| Node | Удаление узлов КЭС. |
| Element | Удаление элементов. |
| Material | Удаление свойств материалов. |
| Property | Удаление свойств элементов. |
| Load >> | Удаление нагрузок. |
| Set | Удаление вариантов нагружения. |
| Body | Удаление объемных нагрузок из активного варианта нагружения. |

| | |
|-----------------------------------|---|
| <u>Nodal</u> | Удаление узловых нагрузок из активного варианта нагружения. |
| <u>Elemental</u> | Удаление элементных нагрузок из активного варианта нагружения. |
| <u>Constraint >></u> | Удаление закреплений. |
| <u>Set</u> | Удаление вариантов закреплений. |
| <u>Nodal</u> | Удаление узловых граничных условий из активного варианта закреплений. |
| <u>Equation</u> | Удаление граничных условий, заданных уравнением, из активного варианта закреплений. |
| <u>Function</u> | Удаление функций. |
| <u>Variable</u> | Удаление переменных. |
| <u>Layers</u> | Удаление графических слоев. |
| <u>Output >></u> | |
| <u>Set</u> | Удаление результатов расчета. |
| <u>Vector</u> | Удаление варианта расчета со всеми входящими в него результатами (векторами). |
| <u>Entry</u> | Удаление активного вектора из активного варианта расчета. |
| <u>Format</u> | Удаление форматов, организованных пользователем для вывода результатов расчета. |
| <u>Library >></u> | |
| <u>Material</u> | Удаление данных, содержащихся в библиотеках. |
| <u>Property</u> | Удаление материала из библиотеки материалов. |
| <u>Function</u> | Удаление свойств элементов из библиотеки свойств. |
| <u>View</u> | Удаление функций из соответствующей библиотеки. |
| <u>Format</u> | Удаление видов из соответствующей библиотеки. |
| <u>Group</u> | Удаление групп. |
| <u>View</u> | Удаление видов. |

РАЗДЕЛ **GROUP** (ГРУППИРОВАНИЕ)

- Формирование различных, групп из составляющих модели и работа с ними

| | |
|-----------------------------------|---|
| <u>Set</u> | Создание или активизация группы, изменение названия группы. |
| <u>Operations >></u> | Операции с активной группой, формирование новых групп. |

| | |
|--------------------------|--|
| Evaluate | Определение всех примитивов в активной группе с учетом заданных правил и ограничений. |
| Evaluate Always | Если данная опция включена, то активная группа будет автоматически переопределяться всякий раз при ссылке на эту группу. |
| Automatic Add | Автоматическое добавление вновь создаваемых примитивов в указанные группы. |
| Copy | Копирование активной группы. |
| Condense | Копирование активной группы с использованием правил, основанных только на идентификационных номерах (ID) примитивов. |
| And | Создание новой группы путем пересечения двух существующих групп. |
| Or | Создание новой группы путем объединения двух существующих групп. |
| Exclusive Or | Создание новой группы из примитивов, не входящих одновременно в две указанные группы (объединение минус пересечение). |
| Not | Создание новой группы, которая включает в себя все примитивы, не входящие в состав активной группы. |
| Generate | Автоматическое создание новых групп путем сегментирования модели по заданным признакам. |
| Peel | Автоматическое создание новых групп путем формирования их из слоев объемных элементов. |
| Select Model | Автоматическое создание группы, включающей в себя всю модель. |
| Reset Rules | Удаление всех правил формирования из активной группы. |
| Layers | Определение графических слоев, из которых можно выбирать примитивы при формировании группы. |
| Clipping >> | Определение и редактирование ограничивающих плоскостей и координат. |
| Coordinate | Задание ограничений в указанной системе координат. |
| Screen | Задание ограничивающих плоскостей, ориентированных по нормали к экрану. |
| Plane | Задание произвольной ограничивающей плоскости. |
| Volume | Задание шестигранного ограничивающего объема. |
| Reset Clip | Удаление ограничивающих плоскостей из активной группы. |

| | |
|---------------------------|---|
| Coord Sys >> | Определение правил для отбора в активную группу систем координат. |
| ID | Отбор систем координат по их идентификатору. |
| Definition CSys | Отбор систем координат по идентификатору системы координат, относительно которой они были заданы. |
| | Отбор систем координат по их типу. |
| Type | |
| Point >> | Определение правил для отбора в активную группу геометрических точек. |
| ID | Отбор точек по их идентификатору. |
| Definition CSys | Отбор точек по идентификатору системы координат, относительно которой они заданы. |
| on Curve | Отбор точек по идентификатору кривой, которой они принадлежат. |
| Curve >> | Определение правил для отбора в активную группу кривых. |
| ID | Отбор кривых по их идентификатору. |
| using Point | Отбор кривых по идентификаторам принадлежащих им точек. |
| on Surface | Отбор кривых по идентификатору поверхности, которой они принадлежат. |
| Surface >> | Определение правил для отбора в активную группу поверхностей. |
| ID | Отбор поверхностей по их идентификатору. |
| using Curve | Отбор поверхностей по идентификаторам принадлежащих им кривых. |
| on Volume | Отбор поверхностей по идентификаторам объемных тел, которым они принадлежат. |
| Volume >> | Определение правил для отбора в активную группу объемных тел. |
| ID | Отбор объемных тел по их идентификатору. |
| using Surface | Отбор объемных тел по идентификаторам принадлежащих им поверхностей. |
| Text >> | Определение правил для отбора в активную группу текстов. |
| ID | Отбор текстов по их идентификатору. |
| Node >> | Определение правил для отбора в активную группу узлов конечноэлементной сетки. |
| ID | Отбор узлов по их идентификатору. |
| Definition CSys | Отбор узлов по системе координат, в которой они были заданы. |
| Output CSys | Отбор узлов по системе координат для вывода результатов. |
| on Element | Отбор узлов по идентификаторам элементов, с которыми они связаны. |
| Element >> | Определение правил для отбора в активную группу элементов. |

| | |
|-----------------------------------|---|
| <u>ID</u> | Отбор элементов по их идентификатору. |
| <u>Material</u> | Отбор элементов по свойствам материалов. |
| <u>Property</u> | Отбор элементов по их геометрическим свойствам. |
| <u>Type</u> | Отбор элементов по их типу. |
| <u>using Node</u> | Отбор элементов по идентификаторам узлов, с которыми они связаны. |
| <u>Material >></u> | Определение правил для отбора в активную группу свойств материалов. |
| <u>ID on Property</u> | Отбор материалов по их идентификатору. |
| <u>on Elements</u> | Отбор материалов по идентификаторам свойств элементов. |
| <u>Type</u> | Отбор материалов по идентификаторам элементов. |
| <u>Property >></u> | Отбор материалов по их типу. |
| <u>ID on Elements</u> | Определение правил для отбора в активную группу свойств элементов. |
| <u>Material</u> | Отбор свойств по их идентификатору. |
| <u>Type</u> | Отбор свойств по идентификаторам элементов. |
| <u>Material</u> | Отбор свойств по идентификаторам материалов. |
| <u>Type</u> | Отбор свойств по их типу. |
| <u>Load >></u> | Определение правил для отбора в активную группу нагрузок. |
| <u>Nodal</u> | Отбор нагрузок по номерам узлов, в которых они приложены. |
| <u>Elemental</u> | Отбор нагрузок по номерам элементов, в которых они приложены. |
| <u>Constraint >></u> | Определение правил для отбора в активную группу закреплений. |
| <u>Nodal</u> | Отбор закреплений по номерам узлов, в которых они приложены. |
| <u>Equation</u> | Отбор закреплений по уравнениям. |

РАЗДЕЛ VIEW (ВИД)

- Управление видами и настройка графических окон
-

| | |
|--------------------------|---|
| <u>Redraw</u> | Перерисовка модели. |
| <u>Regenerate</u> | Регенерация изображения. |
| <u>Show</u> | Выделение указанных примитивов. |
| <u>All View</u> | Если эта опция включена, то все выполняемые операции с изображением распространяются на все виды. |
| <u>Activate</u> | Управление отображением на экране существующих графических окон (видов). |
| <u>New</u> | Создание новых графических окон (видов). |

| | |
|--------------------------|---|
| <u>Title</u> | Автоматическое расположение видов на экране таким образом, чтобы они не перекрывали друг друга. |
| <u>Cascade</u> | Автоматическое расположение видов на экране таким образом, чтобы каждый последующий вид перекрывал предыдущий. |
| <u>Window</u> | Изменение заголовков, рамок и цветового фона графических окон. |
| <u>Layers</u> | Управление графическими слоями и выбор их для отображения на экране. |
| <u>Select</u> | Выбор типа рисунка, управление методом отображения модели и данными для обработки результатов. |
| <u>Options</u> | Управление параметрами вида. |
| <u>Animation</u> | Управление скоростью и формой активной анимации. |
| <u>Rotate</u> | Поворот изображения модели относительно ее осей или осей экрана, выбор стандартных ориентаций. |
| <u>Align By >></u> | Дополнительные возможности для ориентации и центрирования вида. |
| <u>Coord Sys</u> | Вид по направлению оси Z (плоскость XY параллельна экрану). |
| <u>Along Vector</u> | Вид по направлению указанного вектора. |
| <u>Workplane</u> | Вид по нормали к рабочей плоскости. |
| <u>Dynamic</u> | Динамический сдвиг, масштабирование и поворот изображения. |
| <u>Auto Scale</u> | Автоматическое масштабирование изображения модели таким образом, чтобы она целиком помещалась в графическом окне. |
| <u>Magnify</u> | Увеличение или уменьшение масштаба изображения. |
| <u>Zoom</u> | Увеличение и центрирование изображения в соответствии с заданной прямоугольной площадкой. |
| <u>UnZoom</u> | Возврат к предыдущему масштабу изображения. |
| <u>Center</u> | Центрирование изображения относительно указанной позиции. |
| <u>Pan</u> | Сдвиг изображения в плоскости графического окна. |

РАЗДЕЛ HELP (СПРАВКА)

- Получение справочной информации.

| | |
|-----------------|---|
| <u>Index</u> | Отображение списка основных разделов справочной информации. |
| <u>Keyboard</u> | Справочная информация по работе с клавиатурой. |

| | |
|--------------------------|---|
| Mouse Conventions | Справочная информация по работе с "мышью". |
| Analysis | Основные соглашения. |
| Using the Help | Справка по видам анализа. |
| | Правила пользования справочной информацией. |

| | |
|--------------|-------------------------|
| About | Информация о программе. |
|--------------|-------------------------|

КОМАНДЫ, НЕДОСТУПНЫЕ ИЗ МЕНЮ

- Перечисленные ниже команды можно выполнить только с помощью нажатия соответствующих комбинаций клавиш

| | |
|-----------------------------------|---|
| Ctrl+F10 | Отображение предыдущего меню. |
| Alt+F10 | Отображение предыдущей команды. |
| Ctrl+Q или Shift+F6 | Вызов меню быстрого управления отображением примитивов и меток (View Quick Options). |
| Ctrl+F6 | Перемещение верхнего графического окна в самый низ "стопки" окон. |
| Ctrl+Shift+F6 | Перемещение нижнего графического окна из "стопки" окон наверх. |

КОМАНДЫ МНЕМОНИЧЕСКОГО МЕНЮ

- Наиболее часто употребляемые команды системы сдублированы в строке мнемонического меню в виде кнопок с соответствующими изображениями.

Мнемоническое меню выглядит следующим образом:



Динамический сдвиг, масштабирование и поворот изображения.



Сдвиг изображения влево/вправо/вверх/вниз (10 % - простое нажатие, 25 % - с нажатой клавишей Shift, 50 % - с нажатой клавишей Ctrl, 100 % - с нажатой клавишей Alt).



± - переключение направлений вращения изображения; вращение вокруг осей X/Y/Z соответственно (простое нажатие - вращение относительно осей модели, с клавишей Shift - относительно осей экрана, с клавишей Ctrl - поворот на 90° относительно осей модели, с клавишей Alt - поворот на 90° относительно осей экрана).



Увеличение/уменьшение масштаба изображения (простое нажатие - 110 %, с клавишей Shift - 150 %, с клавишей Ctrl - 200 %, с клавишей Alt – автомасштабирование).



Увеличение выбранной прямоугольной области.

| | |
|--|---|
| | Возврат к предыдущему масштабу изображения. |
| | Центрирование изображения относительно указанного места. |
| | Выбор типа рисунка, управление методом отображения модели и данными для обработки результатов (команда View Select). |
| | Вызов меню быстрого управления отображением примитивов и меток (View Quick Options). |
| | Стиль |
| | Активизация меню быстрого доступа (Quick Menu). |
| | Активизация графических слоев для отображения. |
| | Выбор метода фиксации места расположения графического курсора: фиксация выключена/фиксация по ближайшей точке рабочей плоскости/по ближайшей геометрической точке/по ближайшему узлу КЭС. |
| | Копирование изображения в ячейку обмена информацией (clipboard). |
| | Печать. |

КОМАНДЫ БЫСТРОГО ДОСТУПА

- Меню быстрого доступа можно вызвать в любой момент либо по нажатию соответствующей кнопки мнемонического меню, либо нажатием правой кнопки "мыши"

| | |
|------------------------|--|
| Cancel | Отмена текущего диалогового меню или команды. |
| Snap To | Управление методом фиксации расположения графического курсора, а также управление параметрами рабочей плоскости. |
| Screen | Фиксация по ближайшей точке экрана (фиксация выключена). |
| Grid | Фиксация по ближайшей точке рабочей плоскости. |
| Point | Фиксация по ближайшей геометрической точке. |
| Node | Фиксация по ближайшему узлу КЭС. |
| Select >> | Ограничения на выбор координат. |
| | Выбирать все (X, Y и Z) координаты. |

| | |
|------------|-----------------------------------|
| <u>All</u> | Выбирать только координаты X. |
| <u>X</u> | Выбирать только координаты Y. |
| <u>Y</u> | Выбирать только координаты Z. |
| <u>Z</u> | Выбирать только координаты X и Y. |
| <u>XY</u> | Выбирать только координаты Y и Z. |
| <u>YZ</u> | Выбирать только координаты Z и X. |
| <u>ZX</u> | |

Workplane Размещение и ориентация в пространстве рабочей плоскости.

Equations Ввод уравнения.

Position Включение/выключение окна с указанием текущих координат графического курсора.

Model Data Выбор нагрузок, ограничений и групп для отображения в активном окне.

Post Data Выбор результатов расчета для обработки и отображения в активном окне.

XY Data Выбор результатов расчета для рисования графиков в активном окне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. - М.: Мир, 1975.
2. Постнов В.А. Численные методы расчёта судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1977.
3. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. - М.: Стройиздат, 1977.
4. Куликов Ю.А. Решение плоской задачи теории упругости методом конечных элементов: Учеб. пособие. – Горький: ГГУ, 1980.
5. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высш. шк., 1985.
6. Справочник по строительной механике корабля / Под ред. О.М. Палия. – Л.: Судостроение, 1982. – Т. 2.
7. Строительная механика корабля и теория упругости: Учеб. для вузов. Т. 1: Постнов В.А., Суслов В.П. Теория упругости и численные методы решения задач строительной механики корабля. – Л.: Судостроение, 1987.
8. Математика и САПР: В 2 кн. Кн. 2. / Пр. с франц. П. Жермен-Лакур, П.Л. Жорж, Ф. Пистр, П. Безье – М.: Мир, 1989.
9. Шимкович Д.Г. Расчёт конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001.
10. Ершов Н.Ф., Попов А.Н. Прочность судовых конструкций при локальных динамических нагрузлениях. – Л.: Судостроение, 1989.
11. Давыдов В.В., Маттес Н.В. Динамические расчёты прочности судовых конструкций. - Л.: Судостроение, 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| 1. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... | 4 |
| 1.1. Физические основы анализа конструкций..... | 5 |
| 1.2. Основные этапы анализа сложных конструкций..... | 8 |
| 1.3. Краткий обзор численных методов..... | 10 |
| 2. ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ..... | 13 |
| 2.1. Общие понятия о конечноэлементном расчете конструкций..... | 13 |
| 2.2. Теоретические основы метода конечных элементов..... | 15 |
| 2.3. Уравнения МКЭ для различных видов анализа..... | 18 |
| 2.4. Оценка точности численного решения..... | 20 |
| 2.5. Построения разбиений конструкций на КЭ..... | 23 |
| 3. ОСНОВЫ РАБОТЫ В MSC/NASTRAN FOR WINDOWS..... | 26 |
| 4. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... | 29 |
| 4.1. Создание модели..... | 29 |
| 4.2. Статический анализ..... | 42 |
| 4.3. Расчет на тепловые нагрузки..... | 51 |
| 4.4. Варианты заданий для лабораторных работ..... | 54 |
| 4.4.1. Лабораторная работа 1..... | 54 |
| 4.4.2. Лабораторная работа 2..... | 59 |
| 5. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... | 61 |
| 5.1. Пример расчёта пластинки с вырезом..... | 61 |
| 5.2. Пример расчёта на прочность упора..... | 68 |
| 5.3. Пример расчёта крыла..... | 73 |
| 5.4. Варианты заданий для лабораторных работ..... | 76 |
| 5.4.1. Лабораторная работа 1..... | 76 |
| 5.4.2. Лабораторная работа 2..... | 78 |
| 5.4.3. Лабораторная работа 3..... | 80 |
| 6. СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЁМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... | 82 |
| 6.1. Пример расчёта планки с вырезами..... | 82 |
| 6.2. Варианты заданий для лабораторных работ по анализу объёмных деталей..... | 92 |
| 6.2.1. Лабораторная работа 1..... | 92 |
| 6.2.2. Лабораторная работа 2..... | 94 |
| 6.2.3. Лабораторная работа 3..... | 96 |
| 6.2.4. Лабораторная работа 4..... | 98 |

| | |
|---|------------|
| 7. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ..... | 100 |
| 7.1. Пример расчёта на устойчивость оболочки..... | 100 |
| 7.2. Варианты заданий для лабораторных работ | |
| по анализу устойчивости..... | 107 |
| 7.2.1. Лабораторная работа 1 | 107 |
| 7.2.2. Лабораторная работа 2 | 108 |
| 8. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ..... | 108 |
| 8.1. Особенности динамического анализа конструкций..... | 108 |
| 8.2. Пример расчёта собственных колебаний балки..... | 111 |
| 8.3. Пример расчёта собственных колебаний | |
| пластины с ребром..... | 114 |
| 8.4. Пример расчёта собственных колебаний перекрытия..... | 122 |
| 8.5. Пример динамического расчёта балки..... | 125 |
| 8.6. Варианты заданий для лабораторных работ | |
| по динамическому анализу..... | 128 |
| 8.6.1. Лабораторная работа 1 | 128 |
| 8.6.2. Лабораторная работа 2 | 128 |
| 8.6.3. Лабораторная работа 3 | 128 |
| Приложение 1. ВИДЫ АНАЛИЗА И ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЭПЮР .. | 131 |
| Приложение 2. КОМАНДЫ ГЛАВНОГО МЕНЮ .. | 132 |
| РАЗДЕЛ <u>FILE</u> (РАБОТА С ФАЙЛАМИ)..... | 132 |
| РАЗДЕЛ <u>TOOLS</u> (ИНСТРУМЕНТАРИЙ)..... | 133 |
| РАЗДЕЛ <u>GEOMETRY</u> (ГЕОМЕТРИЯ)..... | 133 |
| РАЗДЕЛ <u>MODEL</u> (МОДЕЛЬ)..... | 136 |
| РАЗДЕЛ <u>MESH</u> (СЕТКА)..... | 137 |
| РАЗДЕЛ <u>MODIFY</u> (МОДИФИКАЦИЯ)..... | 140 |
| РАЗДЕЛ <u>LIST</u> (СПИСОК)..... | 144 |
| РАЗДЕЛ <u>DELETE</u> (УДАЛЕНИЕ)..... | 145 |
| РАЗДЕЛ <u>GROUP</u> (ГРУППИРОВАНИЕ)..... | 146 |
| РАЗДЕЛ <u>VIEW</u> (ВИД)..... | 149 |
| РАЗДЕЛ <u>HELP</u> (СПРАВКА)..... | 150 |
| КОМАНДЫ НЕДОСТУПНЫЕ ИЗ МЕНЮ..... | 151 |
| КОМАНДЫ МНЕМОНИЧЕСКОГО МЕНЮ..... | 151 |
| КОМАНДЫ БЫСТРОГО ДОСТУПА..... | 152 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 154 |