

Глава 4. Расчет металлоконструкции в APM Studio

Задание

Выполнить статический расчет и подбор толщины основных элементов опоры навеса (рис. 4.1). Провести расчет на устойчивость.

Исходные данные:

- Материал: Ст3пс
- Толщина пластин: 10 мм
- Нагрузка: равномерно распределенная 12 кН/м.

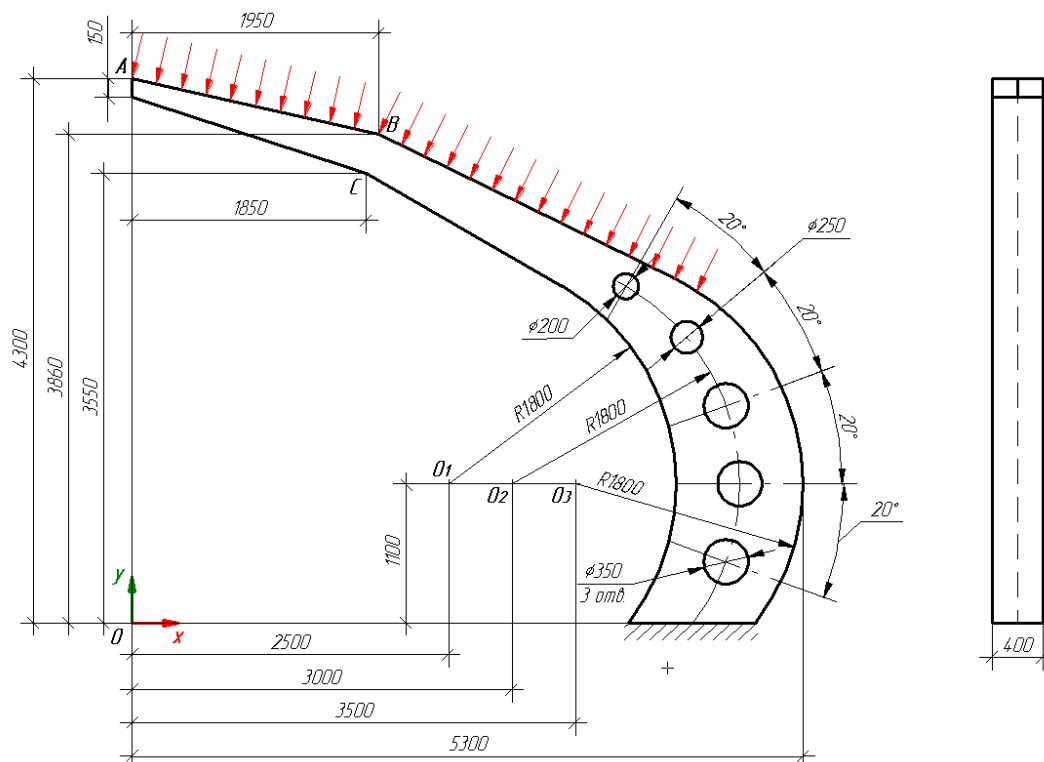



Рис. 4.1. Расчетная схема опоры навеса

Общий порядок расчета

1. Построение главного вида опоры в режиме эскиза
 - 1.1. Нижняя линия, отрезки AB, BC и CD
 - 1.2. Окружности из точек O_1 , O_2 , O_3
 - 1.3. Касательные линии из точек C и D к окружностям
 - 1.4. Построение вспомогательных осевых линий окружностей перфорации
 - 1.5. Построение окружностей перфорации
 - 1.6. Удаление вспомогательных линий
2. Построение контурной плоскости
3. Выталкивание контура
4. Сшивка поверхностей контура
5. Пересечение поверхностей
6. Удаление лишних поверхностей
7. Сшивка поверхностей
8. Присвоение материала
9. Присвоение толщины поверхностной модели
10. Задание закреплений
11. Задание нагрузок
 - 11.1. Распределенная нагрузка
 - 11.2. Силы тяжести
12. Генерация конечно-элементной сетки
13. Выполнение расчета и просмотр результатов
14. Передача конечно-элементной сетки в модуль APM Structure3D





1. Построение главного вида опоры в режиме эскиза

После запуска модуля *APM Studio* следует убедиться, что он находится в режиме поверхностного моделирования – режим указан в заголовке открытого окна. Для перехода в режим поверхностного моделирования необходимо нажать кнопку  **Создать поверхностную модель** панели инструментов **Файл**, что вызовет открытие нового окна с заголовком «Поверхностное моделирование».



Построение модели проводим по следующему плану:

1. Нижняя линия, отрезки AB, BC и CD.
2. Окружности с центрами в точках O_1 , O_2 , O_3 .
3. Касательные линии из точек C и D к окружностям.
4. Прямоугольник по габаритным размерам модели.
5. Построение вспомогательных осевых линий окружностей перфорации
6. Операция полярный массив для осевых линий
7. Построение окружностей перфорации
8. Удаление вспомогательных элементов построения

Рассмотрим все этапы построения модели подробно. Прежде всего, необходимо в режиме эскиза построить главный вид расчетной модели. По умолчанию при запуске *APM Studio* уже находится в режиме эскиза плоскости XY. Удобно в этом же эскизе и начать построение.

 **Замечание:** Характерным признаком режима эскиза является наличие на панели **Управление** нажатой кнопки  **Новый эскиз**. Если вы вышли из режима эскиза, в **Дереве операций** откройте папку «Геометрия», затем нажмите кнопку  **Новый эскиз** на инструментальной панели **Управление**, подведите курсор к надписи «Плоскость XZ» в **Дереве операций** и однократно щелкните на этой надписи левой клавишей мыши. Для того чтобы плоскость эскиза совпадала с плоскостью экрана, нажимаем кнопку  **Показать плоскость** на панели инструментов **Вид**.



1.1. Нижняя линия, отрезки AB, BC и CD



Создаем отрезок **AB**, используя команду  **Рисовать отрезок**. Переводим курсор в рабочее окно редактора. На панели инструментов **Ручной ввод** задаем координаты точки **A**: $X = 0$ и $Y = 4300$. Щелкаем левой кнопкой мыши в поле, чтобы зафиксировать введенные величины. Далее по умолчанию программа предлагает задать конечную точку по длине L и углу A , что в рассматриваемом случае нас не устраивает. Поэтому последовательным нажатием кнопки , расположенной на панели инструментов **Ручной ввод**, переходим в режим задания координат и вводим координаты точки **B**: $X = 1950$, $Y = 3860$. Далее переводим курсор в рабочее окно редактора и щелкаем левой кнопкой мыши, тем самым, фиксируя вторую точку отрезка. После ввода отрезка команда остается активной. Для прерывания команды нажмите ПРАВУЮ кнопку мыши.

Аналогичным образом строим отрезок **CD** по координатам **C**(0; 4150) и **D**(1850; 3550). Создаем вспомогательный нижний отрезок по координатам (0; 0) и (5300; 0).





Соединим точки **A** и **C** отрезком используя привязки. По умолчанию привязка к контрольным точкам, которыми являются концы отрезка, включена.

1.2. Окружности из точек O_1 , O_2 , O_3


Чертим окружность из точки **O1**, используя команду  **Рисовать окружность по центру и радиусу**. Для этого переводим курсор в рабочее окно редактора. В поле ввода панели инструментов **Ручной ввод** записываем координаты центра **O1**: $X = 2500$; $Y = 1100$. Затем нужно указать радиус окружности $R = 1800$ мм. Для этого переходим к панели инструментов **Ручной ввод**, последовательным нажатием кнопки  добиваемся активации следующего режима –



 $R: 1800$, и в поле ввода записываем с клавиатуры значение 1800 (заметим, что нажатием кнопки  можно перейти в режим задания не только величины радиуса, но и диаметра или координаты одной из точек окружности). Далее переводим курсор в рабочее окно редактора и щелкаем левой кнопкой мыши, таким образом, фиксируя построенную окружность. Аналогичным образом создаем все остальные окружности с центрами **O2**(3000; 1100), **O3**(3500; 1100).

1.3. Касательные линии из точек С и D к окружностям

Вначале выбираем из группы кнопок  **Привязки**, расположенных на панели инструментов **Эскиз**, кнопку  **Касательная** и нажимаем ее. Включим также привязку к пересечению . Используя команду  **Рисовать отрезок** начинаем строить новый отрезок, привязываясь сначала к точке **B**, а затем к точке касания на окружности с центром **O3**. При срабатывании привязки «Касательная» окружность окрашивается в красный цвет. Нажимаем кнопку мыши и фиксируем вторую точку отрезка. После ввода отрезка команда остается активной. Для прерывания команды нажмите ПРАВУЮ кнопку мыши. Аналогичным образом строим отрезок из точки **D** касательный к окружности с центром **O1**.

1.4. Построение вспомогательных осевых линий окружностей перфорации

Начертим вспомогательную осевую линию для окружности 4 используя команду  **Рисовать отрезок**. Переводим курсор в рабочее окно редактора. На панели инструментов **Ручной ввод** задаем координаты точки **O2**: $X = 3000$ и $Y = 1100$. Щелкаем левой кнопкой мыши в поле, чтобы зафиксировать введенные величины. Далее вводим координаты второй точки: $X = 5300$, $Y = 1100$. Переводим курсор в рабочее окно редактора и щелкаем левой кнопкой мыши, тем самым, фиксируя вторую точку отрезка.

Воспользуемся операцией **Массив** для получения осевых линий для всех окружностей перфорации. Прежде чем непосредственно перейти к операции **Массив объектов** необходимо заранее выделить те объекты, которые станут основой массива. Для выделения необходимо активировать  **Режим выбора** панели инструментов **Управление** и щелкнуть по построенной осевой линии. Далее активируем команду  **Массив**, которая находится в последнем кнопочном меню панели инструментов **Эскиз**. В появившемся диалоговом окне (рис. 4.2) выбираем вкладку «Полярный массив» и вводим параметры операции согласно рисунка. Координаты центральной точки (3000; 1100). После задания всех параметров нажмите кнопку «Просмотр». Убедившись в правильном построении осевых линий, нажмите «Ок».

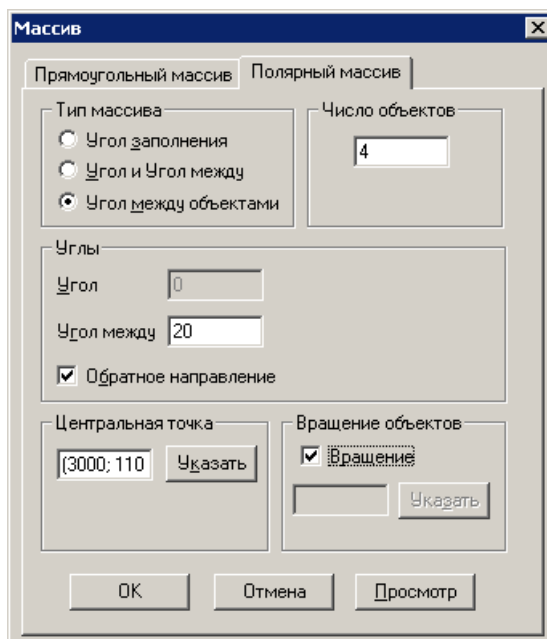



Рис. 4.2. Диалоговое окно **Полярный массив**

Аналогично можно также построить осевую линию окружности 5: активируйте  **Режим выбора**, выберете горизонтальную осевую линию окружности 4, нажмите кнопку массив и в окне введите следующие параметры (рис. 4.3).

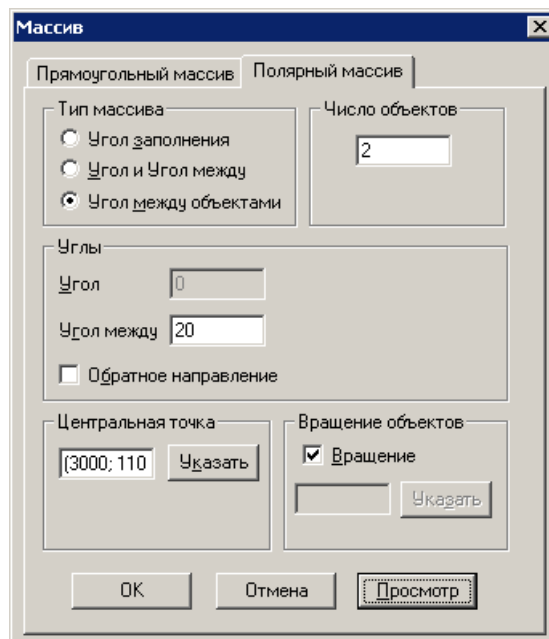



Рис. 4.3. Диалоговое окно **Полярный массив**

1.5. Построение окружностей перфорации

Для построения окружностей перфорации используем команду  **Рисовать окружность по центру и радиусу**. Переводим курсор в рабочее окно редактора и указываем центр окружности – точку пересечения. В поле ввода панели инструментов **Ручной ввод** указываем радиус окружности $R = 100$ мм. Для подтверждения построения окружности нажмите левую кнопку мыши. Аналогичным образом начертите остальные окружности перфорации (рис. 4.4) согласно заданию.

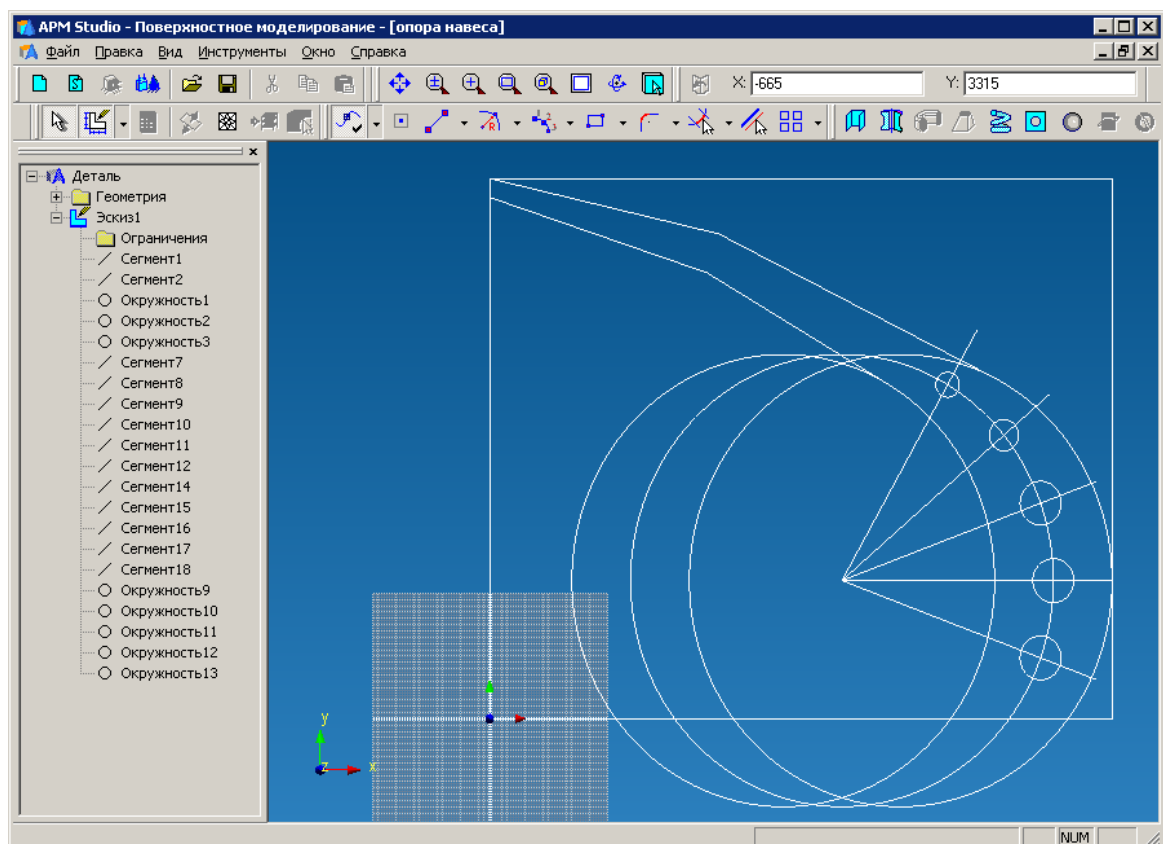




Рис. 4.4. Общий вид эскиза со вспомогательными построениями

1.6. Удаление вспомогательных линий

Удаление «лишних» частей окружностей и линий удобно выполнить с помощью команды  **Усечь**, которая находится в кнопочном меню панели инструментов **Эскиз**. Операция усечения позволяет удалить участок линии между двумя пересечениями. После активации команды укажите «лишние» участки эскиза, оставив следующие (рис. 4.5).

2. Построение контурной плоскости

Для построения контурной плоскости необходимо выполнить построение прямоугольника, немного выходящего за габаритные размеры опоры. Для этого удобно воспользоваться командой  **Прямоугольник по диагональным точкам** панели инструментов **Эскиз**. Переводим курсор в рабочее окно редактора и указываем нижний левый угол прямоугольника, а затем верхний правый. Точные координаты точек прямоугольника значения не имеют (рис. 4.5).

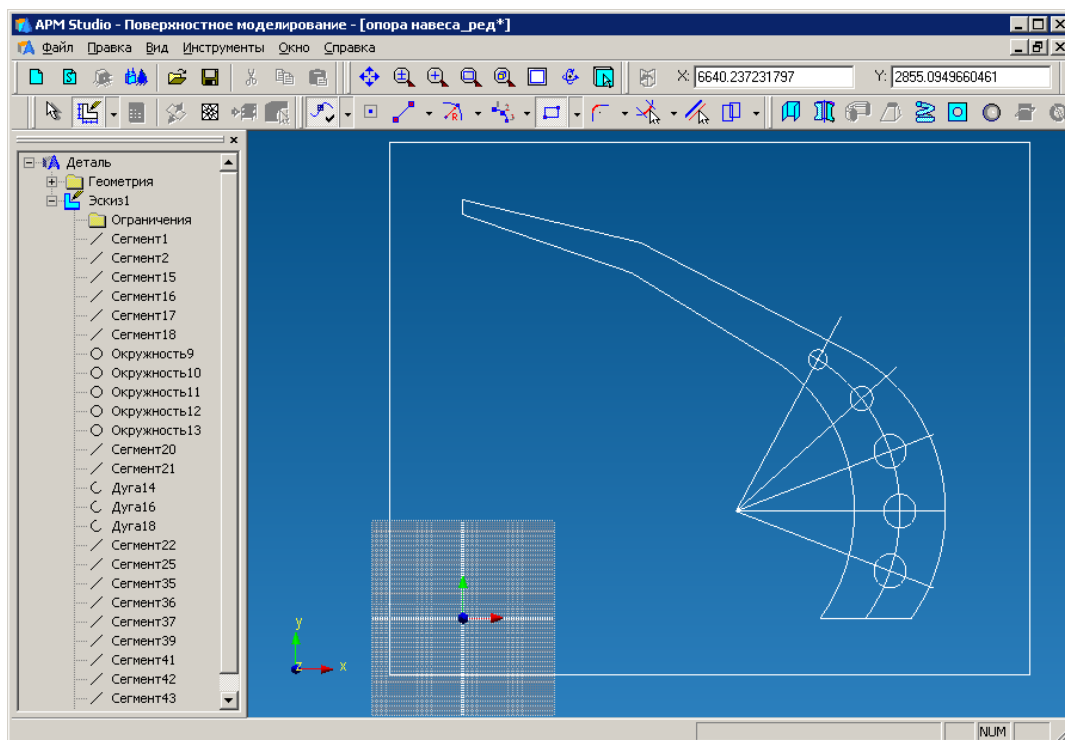




Рис. 4.5. Общий вид эскиза без вспомогательных построений

Нажимаем кнопку  **Контурная плоскость** на панели инструментов **Операции**, после чего открывается одноименное диалоговое окно. В рабочем поле нужно указать сначала внешний, а затем все внутренние контуры, между которыми будет построена контурная плоскость. Для выделения контура следует щелкнуть на нем левой кнопкой мыши. Вначале выделяем наружный контур – построенный прямоугольник, а затем все внутренние – окружности перфорации. При выделении контур окрашивается в зеленый цвет. Создание контурной плоскости завершаем нажатием кнопки «Ок» в диалоговом окне «Контурная плоскость».

3. Вытапливание контура

Следующим этапом необходимо вытолкнуть внешний контур опоры в обе стороны от эскиза. Для этого нажимаем кнопку  **Вытапливание** на панели инструментов **Операции**, после чего открывается одноименное диалоговое окно (рис. 4.6). Далее в рабочем поле модели необходимо с помощью мыши указать контур для вытапливания. Указываем линии внешнего контура левой кнопкой мыши. Выделенные элементы окрашиваются в зеленый цвет.

В диалоговом окне вводим параметры вытапливания: «в оба направления» на 400 мм (по 200 мм в каждую сторону) и нажимаем кнопку «Ок». Вытапливание осуществляется в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза.

*✍ **Замечание:** Выполнять операцию вытапливания можно отдельно для каждой линии или дуги контура или для группы соединенных между собой объектов.*

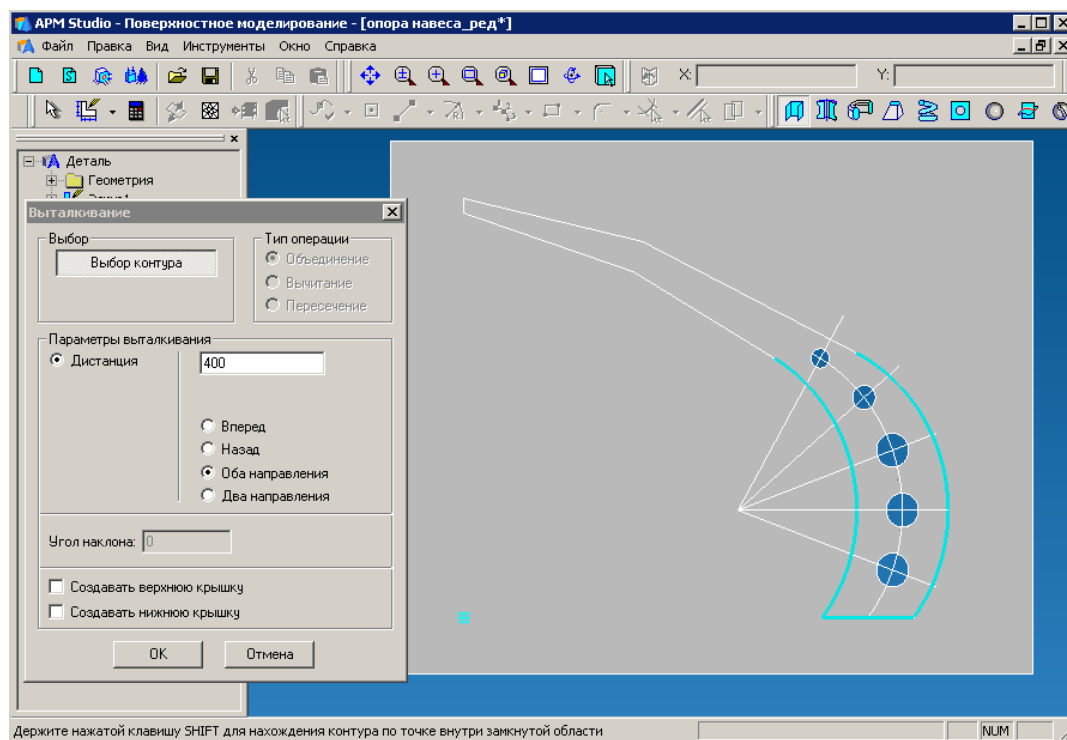




Рис. 4.6. Операция выталкивания

✎ **Замечание:** Поворот вида осуществляется с помощью мыши при удержании нажатой клавиши «Пробел» на клавиатуре.

Для того, чтобы построенная плоская поверхность не закрывала выбор объектов ее удобно скрыть. Для этого переходим в режим выбора, активируя команду  **Выбор** панели инструментов **Управление**. Затем наводим мышью на плоскость в рабочем поле или дереве так, чтобы она выделилась цветом, и нажимаем ПРАВОЮ клавишу мыши. В контекстном меню выбираем пункт «Скрыть». Скрытые объекты в дереве отмечены серым цветом.

4. Сшивка поверхностей контура

Далее необходимо сшить поверхности контура для последующего пересечения со скрытой плоской поверхностью. Переход в режим сшивания осуществляется нажатием кнопки  **Сшивка поверхностей**, которая находится на панели инструментов **Операции**. В этом режиме переводим указатель мыши в рабочее окно редактора и подводим его к одному из вытолкнутых элементов и однократно щелкаем левой клавишей мыши. Далее перемещаем указатель мыши на соседний вытолкнутый элемент и снова щелкаем левой клавишей мыши. В итоге после выполнения операции сшивания выделение сшитых элементов происходит совместно, как одной поверхности (рис. 4.7).

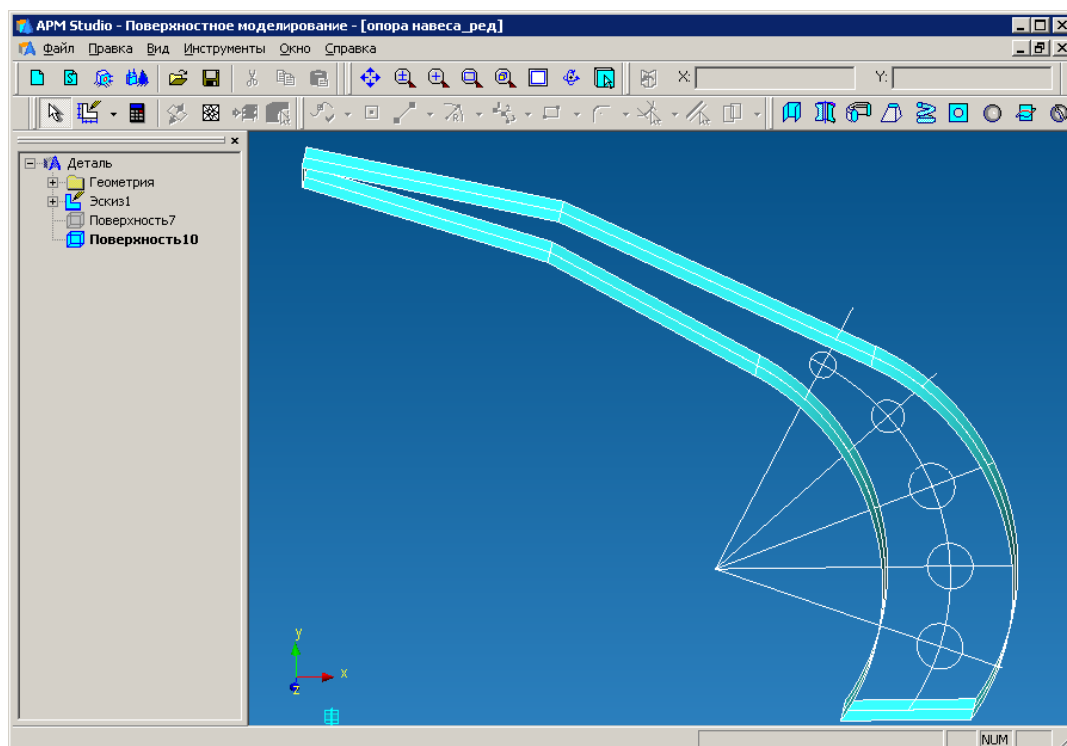





Рис. 4.7. Поверхность, полученная выталкиванием контура

5. Пересечение поверхностей

Для отображения скрытой плоской поверхности перейдите в режим выбора, активировав команду  **Выбор** панели инструментов **Управление**. Выберите в **Дереве операций** скрытую плоскую поверхность и нажмите ПРАВУЮ клавишу мыши. В появившемся контекстном меню выберите пункт «Показать».


Для пересечения поверхности, полученной выталкиванием с плоской поверхностью, нажимаем кнопку  **Пересечение поверхностей** панели инструментов **Операции** и переводим указатель мыши в рабочее поле редактора, подводим к поверхности, полученной выталкиванием, и однократно щелкаем левой клавишей мыши. Далее перемещаем указатель мыши на плоскую поверхность и снова щелкаем левой клавишей мыши. Вследствие пересечения в **Дереве** вместо двух появится целый набор поверхностей.


6. Удаление лишних поверхностей

Для удаления лишних поверхностей необходимо поступить следующим образом: в режиме выбора элементов (т. е. при нажатой кнопке  **Выбор** на панели инструментов **Управление**) подвести указатель мыши к той поверхности, которую предполагается удалить (поверхность выделится зеленоватым цветом), и щелчком ПРАВОЙ кнопки мыши вызвать контекстное меню, указав в нем пункт «Удалить». После подтверждения операции выбранная поверхность будет удалена.

7. Сшивка поверхностей

В данном случае сшивка поверхностей модели необходимо для того, чтобы сгенерированная впоследствии конечно-элементная сетка (КЭ-сетка) была связанной, т. е. различные пересекающиеся поверхности имели бы общие узлы по линии пересечения.

Переход в режим сшивания осуществляется нажатием кнопки  **Сшивка поверхностей** панели инструментов **Операции**. В этом режиме переводим указатель мыши вначале в рабочее окно редактора, а затем подводим его к одному объекту и однократно щелкаем ЛЕВОЙ кнопкой мыши. Далее перемещаем указатель мыши на соседний объект и снова щелкаем ЛЕВОЙ кнопкой мыши. В итоге после выполнения операции сшивания выделение сшитых элементов происходит совместно, как одной поверхности. Аналогичным образом производим сшивание всех остальных элементов до образования единой поверхности (рис. 4.8).

На этом создание поверхностной модели закончено. Рекомендуется сохранить ее в файл нажатием кнопки  **Сохранить** панели инструментов **Файл** (команда меню **Файл / Сохранить...**).

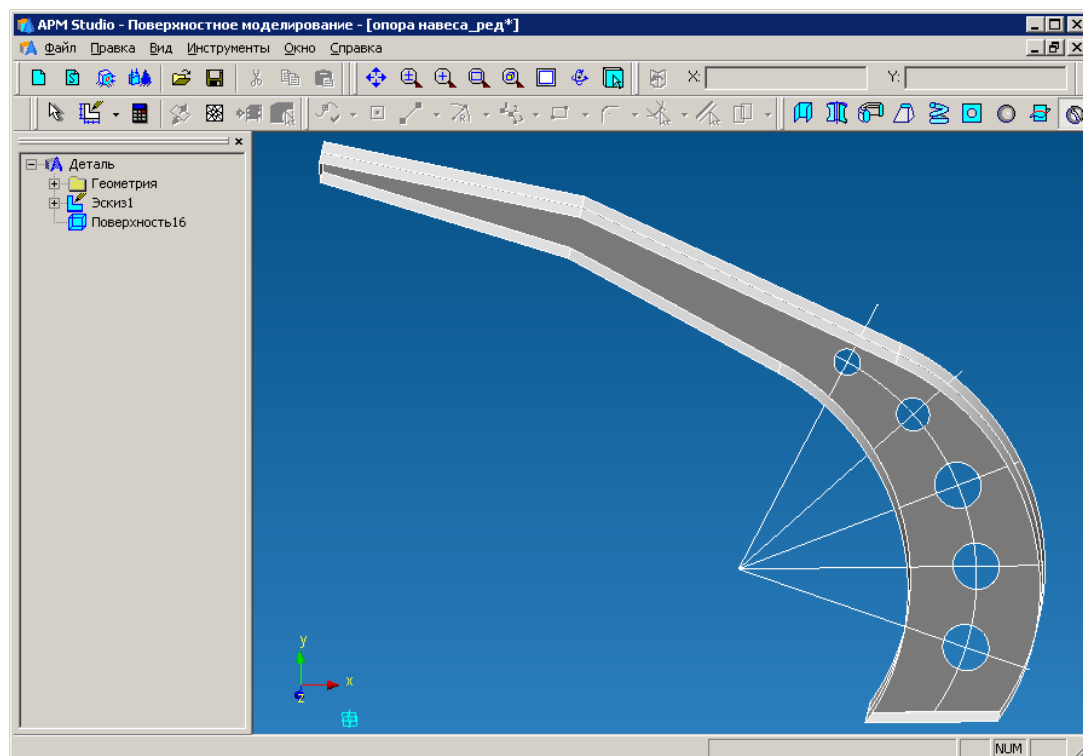




Рис. 4.8. Поверхностная модель опоры

8. Присвоение материала

Прежде всего, нажатием кнопки  **Конечно-элементный анализ** панели инструментов **Файл** следует перейти в соответствующий режим. После выполнения этой операции созданная ранее модель откроется в окне «Конечно-элементный анализ». Все дальнейшие операции с созданной ранее моделью будем производить именно в этом окне.

Материал, используемый по умолчанию, Сталь соответствует – Ст3кп. Для задания материала нажмите кнопку  **Материал** панели инструментов **Управление**. В диалоговом окне **Материал** (рис. 4.9) нажмите кнопку «Добавить». В появившемся диалоговом окне (рис. 4.10) можно ввести параметры материала или воспользоваться базой данных, нажав кнопку «DB».

Выберем в базе данных материал Ст3пс (рис. 4.10). Далее в диалоговом окне (рис. 4.9) выберем в выпадающем списке материал Ст3пс, нажмите сначала кнопку «Задать всем», затем «Ок». Операция **Материал** будет добавлена в **Дерево**.

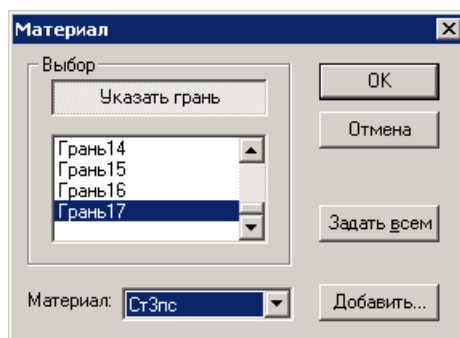



Рис. 4.9. Диалоговое окно задания материала

Материал	
Название	Ст3пс
Параметры материала	
Предел текучести по сжатию, [МПа]	245
Модуль Юнга, [МПа]	210000
Коэффициент Пуассона, [-]	0.3
Плотность, [кг/м ³]	7800
Коэффициент температурного расширения, [1/°C]	1.2e-005
Коэффициент теплопроводности, [Вт/(мК)]	1
Предел прочности по сжатию, [МПа]	370
Предел усталостной прочности (н), [МПа]	190
Предел усталостной прочности (к), [МПа]	93
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Отмена"/> <input type="button" value="DB..."/>	

Рис. 4.10. Параметры материала Ст3пс


9. Присвоение толщины поверхностной модели

Толщина поверхностной модели, используемая по умолчанию – 1 мм. Для перехода в режим присвоения толщины нажмите кнопку  **Толщина пластин** панели инструментов **Управление**. При этом откроется соответствующее диалоговое окно (рис. 4.11), с помощью которого можно задать *толщину* выбранным граням. Выбор грани, как обычно, производится щелчком ЛЕВОЙ кнопкой мыши после предварительного наведения указателя мыши на объект. Поскольку в рассматриваемом примере все грани имеют одинаковую толщину (10 мм), то в поле толщина введем 10 мм, нажмем кнопку «Задать всем» и «Ок». Операция **Толщина** будет добавлена в **Дерево**.

Толщина пластин	
Выбор	<input type="button" value="ОК"/>
<input type="button" value="Указать грань"/>	<input type="button" value="Отмена"/>
Грань14 Грань15 Грань16 Грань17	<input type="button" value="Задать всем"/>
Толщина 10 мм	

Рис. 4.11. Диалоговое окно **Толщина пластин**

10. Задание закреплений

Для задания закрепления нажмите кнопку  **Закрепление** панели инструментов **Нагрузки**. Убедитесь, что в появившемся диалоговом окне (рис. 4.12) зафиксированы все линейные и угловые перемещения. Для создания закрепления на каком-либо объекте (грани или ребре) необходимо привести указатель мыши на этот объект и щелкнуть на нем ЛЕВОЙ кнопкой, после чего выбранный объект будет занесен в соответствующий список.

В рассматриваемом примере закрепление осуществляется по поверхности основания опоры. В результате этих действий на выбранной поверхности появятся специальные значки, показывающие, что заданы соответствующие закрепления, а сама операция **Закрепление** будет добавлена в **Дерево**.

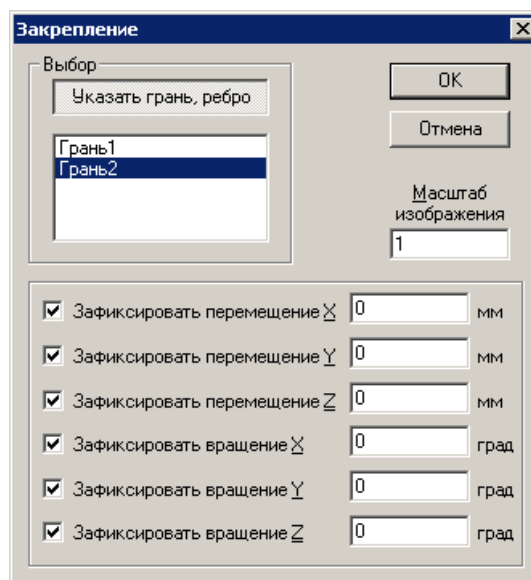



Рис. 4.12. Диалоговое окно **Закрепление**

11. Задание нагрузок

11.1. Распределенная нагрузка

По условию задания распределенная нагрузка составляет: 12 кН/м. Данная нагрузка равномерно распределяется по ширине поверхности: 400 мм. При этом давление на поверхность составит: $12/0,4 = 30 \text{ кН/м}^2 = 0,03 \text{ МПа}$.

Для перехода в режим задания распределенной нагрузки нажимаем кнопку  **Давление** панели инструментов **Нагрузки**. Далее необходимо указать грани, к которым приложена нагрузка. Выделение, как обычно, производится щелчком ЛЕВОЙ кнопкой мыши по грани.

В диалоговом окне **Давление** (рис. 4.13) необходимо ввести значение 0,03 Н/мм² (МПа). Направление силы контролируем по стрелкам, которые появляются в поле окна конечно-элементного анализа, и при необходимости меняем направление изменением знака величины силы.

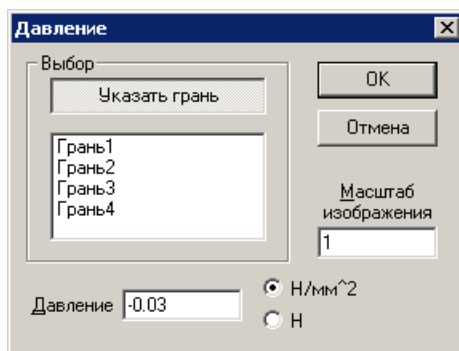



Рис. 4.13. Диалоговое окно **Давление**

11.2. Силы тяжести

Моделирование действия сила тяжести может быть осуществлено заданием линейного ускорения. Для его задания нажимаем кнопку  **Линейное ускорение** панели **Нагрузки** и в появившемся диалоговом окне (рис. 4.14) вводим значение ускорения по направлению Y. Для более крупного отображения вектора ускорения на модели введем масштаб изображения: 100.

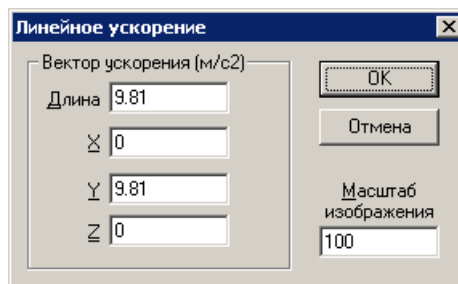


Рис. 4.14. Диалоговое окно **Линейное ускорение**

На этом подготовка модели к расчету заканчивается (рис. 4.15). Для редактирования толщины, материала, нагрузок или закреплений воспользуйтесь командой **Выбор**. Затем в **Дереве** на соответствующей операции нажмите ПРАВУЮ кнопку мыши и выберите пункт меню **Редактировать**....

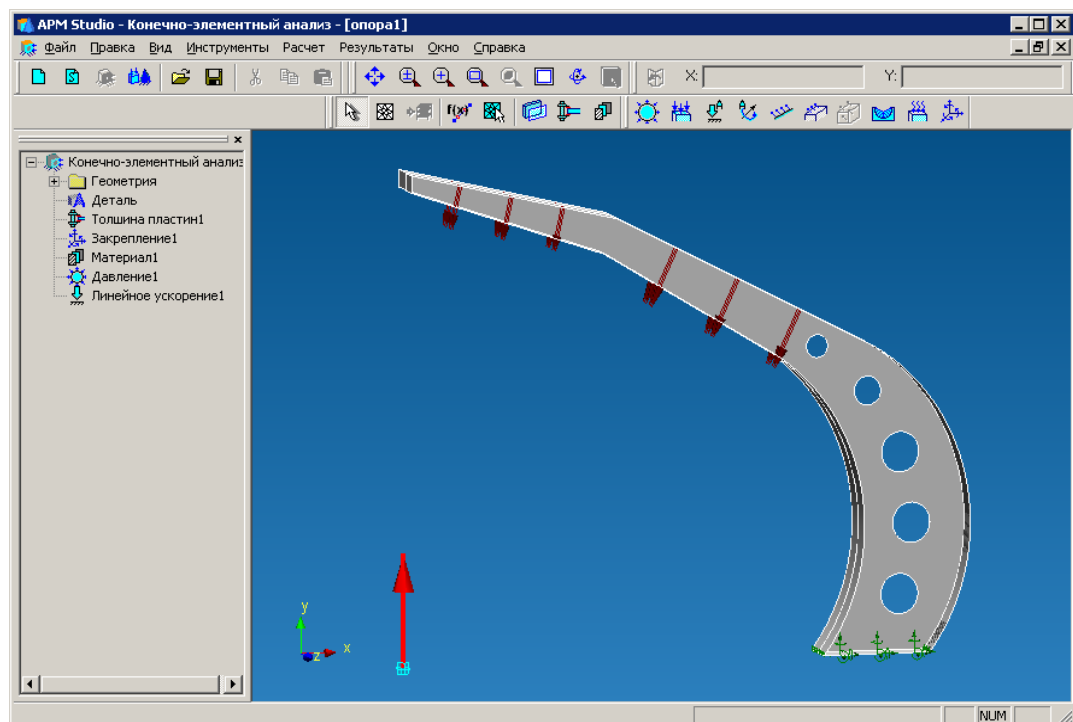


Рис. 4.15. Модель с нагрузками и закреплениями

12. Генерация конечно-элементной сетки

Нажимаем кнопку **КЭ сетка** панели инструментов **Управление** и в поле ввода **Максимальная длина стороны элемента** диалогового окна **Параметры разбиения** указываем величину шага – например, **100 мм**, для корректного разбиения всех поверхностей модели. После нажатия кнопки «Ok» начинается процедура разбиения. Сгенерированная КЭ-сетка открывается в отдельном окне, и если по каким-либо параметрам она не устраивает пользователя, то это окно может быть закрыто, а разбиение произведено заново.

13. Выполнение расчета и просмотр результатов

Для расчета модели следует выбрать команду меню **Расчет / Расчет...** и в открывшемся диалоговом окне отметить флажком типы расчета, которые необходимо выполнить – **Статический расчет** и **Устойчивость**. После выполнения расчета можно визуализировать его результаты в графическом виде. Команда **Результаты / Карта результатов...** позволяет выбрать параметр для просмотра. В качестве примера представлена карта эквивалентных напряжений, возникающих в модели (рис. 4.16). Команда меню **Результаты / Устойчивость** выводит коэффициент запаса устойчивости (рис. 4.17).

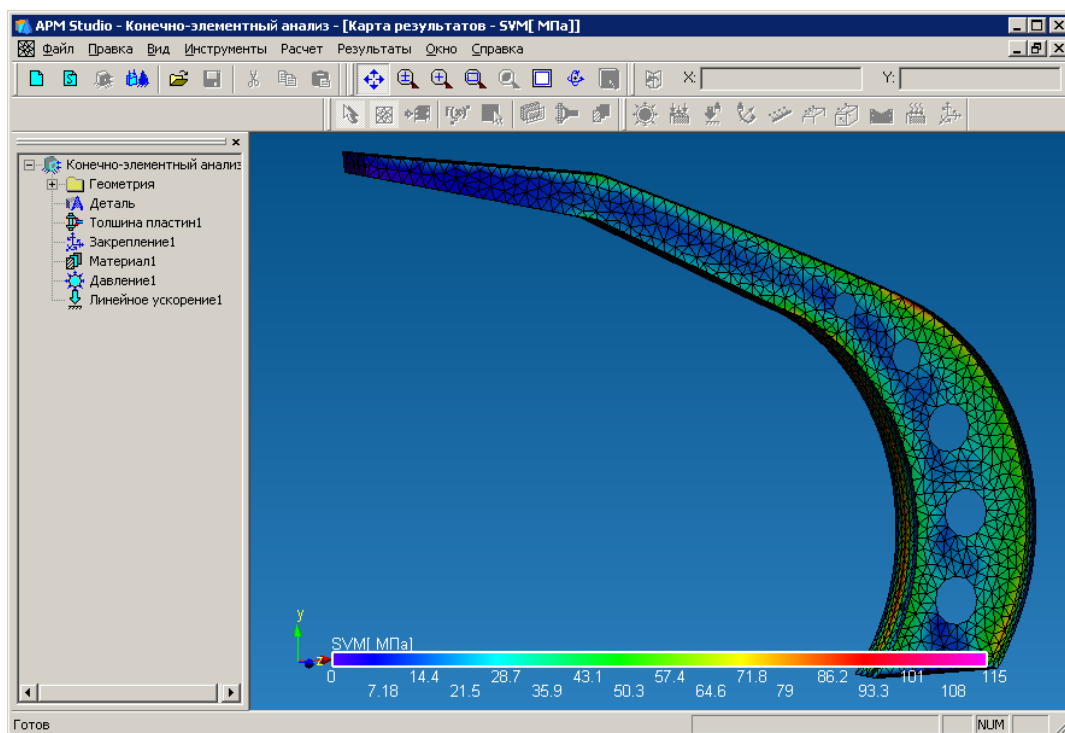


Рис. 4.16. Карта эквивалентных напряжений

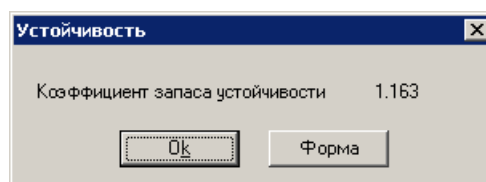




Рис. 4.17. Результаты расчета устойчивости

Для сохранения расчетной модели и результатов необходимо свернуть окно КЭ-сетки, перейти в окно КЭ-анализа и нажать кнопку  **Сохранить** панели инструментов **Файл** (команда меню **Файл / Сохранить...**).

14. Передача конечно-элементной сетки в модуль APM Structure3D

Необходимость передачи модели в *APM Structure3D* может возникнуть, например, для расчета комбинированных конструкций, включающих стрелевые, пластинчатые и твердотельные элементы. Созданная КЭ-сетка вместе с действующими на модель нагрузками и заданными опорами (или без них) может быть сохранена в отдельном файле, а затем импортирована в модуль прочностного расчета *APM Structure3D*. Можно также передать построенную модель непосредственно в *APM Structure3D* без ее промежуточного сохранения.

Для передачи КЭ-сетки в модуль *APM Structure3D* нажимаем кнопку  **Передать КЭ сетку в APM Structure3D**, расположенную на панели инструментов **Управление**. Вслед за этим запускается модуль *APM Structure3D* с открытой в нем КЭ-сеткой модели с приложенными нагрузками и установленными опорами.