

## Глава 5. Расчет соединений в модуле APM Joint

### 5.1. Расчет группового болтового соединения

#### Задача

Выполнить проектировочный расчет группового болтового соединения, предназначенного для крепления кронштейна к плоскости (рис. 5.1.1). Расчет провести в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП, СП).

Действующие на соединение силовые факторы изображены на рисунке.

Класс прочности болтов: 5.6 (болты следует назначать по таблице Г.3 СП 53-102-2004).

Класс точности болтов: А.

Материалы: кронштейна – Сталь 25Л; основной конструкции – ВСт3пс.

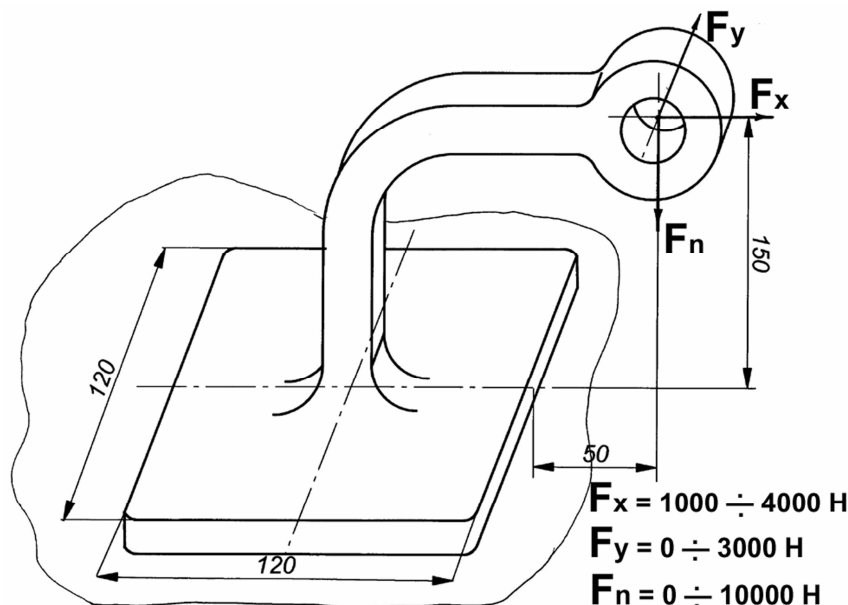


Рис. 5.1.1. Расчетная схема кронштейна

#### Общий порядок расчета

1. Выбор типа соединения
2. Построение (или импорт) контура поверхности контакта
3. Выделение наружного и внутренних контуров поверхности контакта
4. Расстановка болтов (указание мест расположения их центров)
  - 4.1. Установка болтов по координатам
  - 4.2. Установка болтов с помощью мыши
5. Задание действующих на соединение сил
  - 5.1. Задание сил, действующих перпендикулярно поверхности стыка
  - 5.2. Задание сил, действующих параллельно плоскости стыка
6. Выбор стандарта и постоянных параметров для расчета
7. Выбор типа расчета: проектировочный или проверочный
8. Выполнение расчета
9. Просмотр результатов расчета
10. Корректировка параметров по результатам расчета

#### Решение

##### 1. Выбор типа соединения

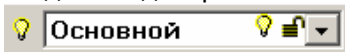
Тип соединения выбираем однократным щелчком левой кнопки мыши на схематическом изображении болта, установленного в отверстие с зазором (рис. 5.1.2). Такой режим установки болтов позволит учесть все виды действующих на стык поверхностей нагрузок – как отрывающие, так и сдвигающие (в то время как болты, установленные в отверстие без зазора, работают только на срез).



Рис. 5.1.2. Выбор типа соединения


## 2. Построение (или импорт) контура поверхности контакта

В появившемся поле окна редактора необходимо создать контур поверхности контакта. Это можно сделать одним из следующих способов: изобразить контур графическими средствами редактора, взять его как объект из базы данных или импортировать из другого редактора через файл формата \*.dxf. Но прежде чем создавать контур поверхности, нужно выбрать в редакторе тот слой, в котором будут задаваться поверхность и действующие на нее нагрузки. В различных слоях могут быть заданы различные соединения, расчет которых производится одновременно и независимо

друг от друга. Текущий слой показывается в списке слоев  **Основной** редактора; нажатием кнопки **Менеджер слоев**, расположенной слева от списка слоев (меню **Формат/Слои...**), вызывается диалоговое окно **Список слоев**, с помощью которого можно создать новый слой для другого расчета.

### 2.1. Построение контура поверхности

В рассматриваемом случае контур поверхности контакта представляет собой квадрат. Создать его можно различными способами, например, с помощью построения четырех отрезков, образующих стороны квадрата. Для построения первого горизонтального отрезка следует поступить следующим образом:

- нажать на панели инструментов **Рисование**, выпадающая панель инструментов **Отрезок**, кнопку  **Через 2 точки** (меню **Рисовать/Отрезок/Через 2 точки**);
- вывести курсор мыши на рабочее поле и нажать клавишу **Пробел** на клавиатуре; в появившемся диалоговом окне **Первая точка** ввести координаты **X = 0, Y = 0**;
- сместя курсор в горизонтальном направлении (например, вправо), нажать клавишу **Пробел** на клавиатуре для ввода параметров отрезка с клавиатуры;
- на вкладке **Длина и угол** открывшегося диалогового окна **Вторая точка** (рис. 5.1.3) задать длину создаваемого отрезка и угол его наклона относительно горизонтальной оси. При первоначальном открытии диалогового окна **Вторая точка** в его полях ввода записаны текущие значения длины и угла динамического объекта.

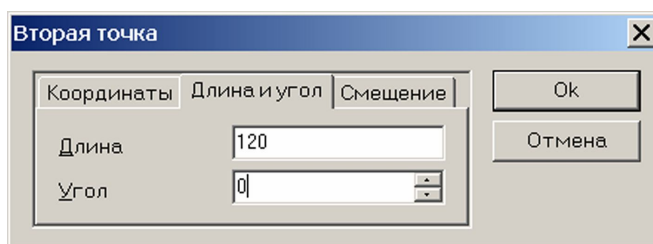





Рис. 5.1.3. Ввод параметров отрезка с клавиатуры

Нажатием кнопки **Ок** в этом диалоговом окне или клавиши **Enter** на клавиатуре завершаем создание горизонтального отрезка. Аналогичным образом создаем следующие стороны квадрата, обращая внимание на то, что конечная точка последнего отрезка должна быть привязана к начальной точке первого.

**2.2. Импорт контура поверхности.** Контур поверхности контакта может быть также импортирован через файл формата \*.dxf. Для того чтобы произвести импорт, воспользуйтесь меню **Файл/Импорт...**, а затем в стандартном диалоговом окне укажите путь к импортируемому файлу формата \*.dxf.

### 3. Выделение наружного и внутренних контуров поверхности контакта


Созданный внешний контур поверхности контакта необходимо выделить. Кроме того, следует выделить внутренние (если они есть) контуры поверхности. Для этого на панели **Контур** есть специальные кнопки –  **Простой контур** (меню **Контур/Простой контур**) и  **Набираемый контур** (меню **Контур/Набираемый контур**).

После нажатия кнопки  **Простой контур** щелкните сначала на любом из элементов наружного контура, а затем на любом из элементов каждого из внутренних контуров (если они есть). Замкнутые контуры после щелчка должны окраситься в синий цвет. Одновременно с нажатием одной из этих кнопок открывается диалоговое окно **Выбор контура**, в котором после выделения всех контуров нужно нажать кнопку **Ок** (вместо кнопки **Ок** можно нажать правую кнопку мыши или клавишу **Пробел** на клавиатуре). Область между выделенными контурами, т. е. собственно поверхность контакта, окрасится в серый цвет. Это означает, что программа адекватно «поняла» задачу, т.е. будет воспринимать выделенный объект как поверхность контакта.


### 4. Расстановка болтов (указание мест расположения их центров)

Расставить болты на поверхности контакта или вне ее можно двумя способами: с помощью мыши или указанием координат точек установки болтов.

#### 4.1. Установка болтов по координатам

Прежде всего нажимаем кнопку  **Разместить Болты** инструментальной панели **Соединительные элементы** (меню **Данные/Разместить Болты**). Далее нажимаем клавишу **Пробел** на клавиатуре и в поля открывшегося диалогового окна **Точка** записываем координаты центра будущего болта (25; 25).

**Внимание!** Координаты болтов задаются в системе координат окна редактора, а не в системе координат поверхности контакта.

Для задания группы болтов воспользуемся командой массив. Для этого нажимаем кнопку  **Массив** панели инструментов **Модификация** (меню **Модификация/Массив**). Затем выделяем охватывающей рамочкой слева направо установленный болт и нажимаем правую кнопку мыши. В появившемся диалоговом окне введем параметры массива (рис. 5.1.4).

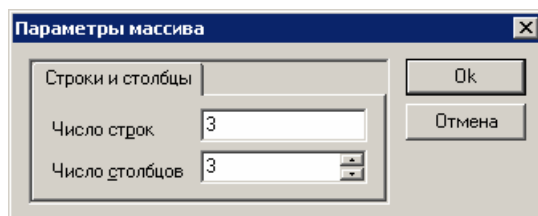


Рис. 5.1.4. Диалоговое окно **Параметры массива**

Далее укажите базовую точку – центр болта и нажмите клавишу **Пробел**. В появившемся диалоговом окне введите параметры массива – смещение по x и по y (рис. 5.1.5).

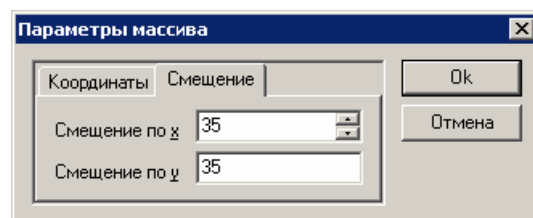




Рис. 5.1.5. Параметры массива – смещение

Группа болтов создана. Для удаления «лишнего» центрального болта необходимо после нажатия кнопки  **Удаление** панели инструментов **Модификация** (меню **Модификация/Удаление**) щелкнуть в любой точке области, ограниченной болтом.

Для изменения координат болта можно воспользоваться режимом **Редактирование**, переход в который осуществляется нажатием кнопки  на панели инструментов **Модификация** (меню **Модификация/Редактирование**). После этого нужно подвести указатель мыши к искомому

болту и, нажав левую кнопку мыши, переместить указатель в нужную точку. Величина смещения может задаваться с клавиатуры после нажатия на ней любой клавиши.


#### 4.2. Установка болтов с помощью мыши

Прежде всего нажимаем кнопку  **Разместить Болты** инструментальной панели **Соединительные элементы** (меню **Данные/Разместить Болты**). Для того чтобы отметить центр будущего болта, достаточно щелкнуть левой кнопкой мыши в том месте, где будет расположен болт.

### 5. Задание действующих на соединение сил


В общем случае к поверхности стыка могут быть приложены силы, направленные как перпендикулярно к поверхности стыка, так и параллельно этой поверхности.


#### 5.1. Задание сил, действующих перпендикулярно поверхности стыка


**5.1.1. Задание сил.** Нажатием кнопки  на панели инструментов **Силы** (меню **Данные/Нормальная сила**) переходим в режим **Нормальная сила** и щелкаем левой кнопкой мыши в том месте окна программы, которое соответствует точке приложения этой силы. После этого открывается диалоговое окно **Нормальная сила**, в поля ввода которого **Приложена по x, mm** и **Приложена по y, mm** автоматически заносятся текущие координаты курсора. Эти значения можно изменить в соответствии с условием задачи. В рассматриваемом случае в поля ввода диалогового окна **Нормальная сила** записываем:

- в поле ввода **Значение, Н** — заданное по условию максимальное значение этого силового фактора, а именно **-10000** (знак «-» показывает, что сила направлена в отрицательном направлении оси, т. е. вниз);
- в поля ввода **Обозначение** и **Индекс** — обозначение силы, например **F<sub>1</sub>** (однако эти поля могут быть и незаполненными).


Завершаем ввод нажатием кнопки **Ок**. Если сила направлена «на нас», то она изобразится в виде окружности с точкой в центре, если наоборот — в виде окружности с крестиком.

**5.1.2. Редактирование сил.** Для редактирования заданной силы нужно перейти в режим **Модификация** нажатием кнопки  на панели инструментов **Модификация** (меню **Модификация/Модификация**), а затем щелкнуть левой кнопкой мыши на установленной ранее силе. Далее необходимо в поле появившегося диалогового окна нажать кнопку **Свойства** и с помощью открывшегося диалогового окна **Нормальная сила** отредактировать параметры силы.

Для изменения координат силы можно также воспользоваться режимом **Редактирование** (кнопка  на панели инструментов **Модификация** или меню **Модификация/Редактирование**). Перейдя в этот режим, следует подвести указатель мыши к подлежащей редактированию силе и, нажав левую кнопку мыши, сместить указатель мыши в нужную точку. Величина смещения может задаваться с клавиатуры после нажатия на ней любой клавиши.

**5.1.3. Удаление сил.** Для удаления одной из нормальных сил следует воспользоваться режимом **Удаление** (см. п. 4.1.). Нажатием кнопки  **Удалить нормальные силы** (меню **Данные/Удалить нормальные силы**) можно удалить все введенные ранее нормальные силы.

#### 5.2. Задание сил, действующих параллельно плоскости стыка

**5.2.1. Задание сил.** Переход в этот режим происходит нажатием кнопки  **Касательная сила** на панели инструментов **Силы** (меню **Данные/Касательная сила**). После перехода щелкаем левой кнопкой мыши в точке приложения силы. В полях ввода **Приложена по x, mm** и **Приложена по y, mm** открывшегося диалогового окна **Касательная сила** автоматически записываются текущие координаты курсора (рис. 5.1.6). В поле ввода **Приложена по z, mm** следует записать расстояние от плоскости контактной поверхности до точки приложения силы – в рассматриваемом случае оно равно **150 мм**.

В группе параметров **Данные** выбираем способ задания – **Проекции**.

Исходя из заданной по условию схемы нагружения, в поля ввода диалогового окна **Касательная сила** вводим следующие значения:

- в поле ввода **X, Н** — **4000**;
- в поле ввода **Y, Н** — **3000**.

В поля ввода **Обозначение** и **Индекс** группы параметров **Символы** можно ввести название силы, например  $F_2$ , но они могут быть и пустыми. Завершаем ввод нажатием кнопки **Ок**. Сила отображается в виде вектора, начало которого соответствует точке приложения силы.

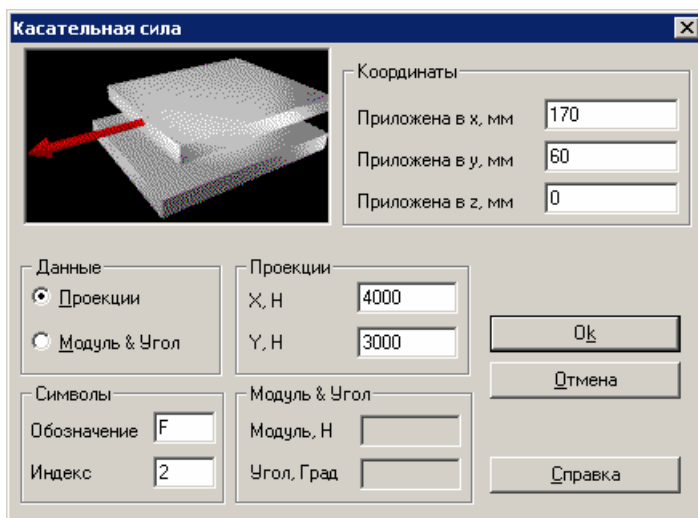





Рис. 5.1.6. Диалоговое окно **Касательная сила**

**5.2.2. Редактирование сил.** Для редактирования заданной силы нужно перейти в режим **Модификация** нажатием кнопки  на панели инструментов **Модификация** (меню **Модификация/Модификация**), а затем щелкнуть левой кнопкой мыши на установленной ранее силе. Далее необходимо в поле появившегося диалогового окна **Модификация силы** нажать кнопку **Свойства** и с помощью открывшегося диалогового окна **Касательная сила** отредактировать параметры силы.

Для изменения координат силы можно также воспользоваться режимом **Редактирование** (кнопка  на панели инструментов **Модификация** или меню **Модификация/Редактирование**). Перейдя в этот режим, нужно подвести указатель мыши к подлежащей редактированию силе и, нажав левую кнопку мыши, сместить указатель мыши в нужную точку. Величина смещения может задаваться с клавиатуры после нажатия на ней любой клавиши.

**5.2.3. Удаление сил.** Для удаления одной из касательных сил следует воспользоваться режимом **Удаление** (см. п. 4.1). Нажатием кнопки  **Удалить касательные силы** (меню **Данные/Удалить касательные силы**) можно удалить все введенные ранее касательные силы.

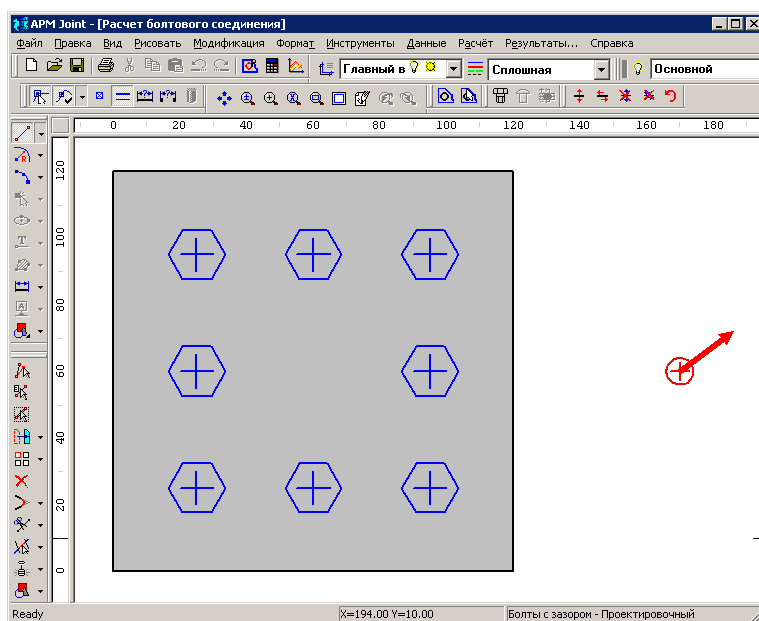


Рис. 5.1.7. Расчетная модель болтового соединения

## 6. Выбор стандарта и постоянных параметров для расчета

Расчет группового болтового соединения может быть произведен как по строительным нормам и правилам (СНиП, СП) так и по машиностроительным стандартам (ГОСТ). Изменение стандарта расчета (по умолчанию установлен ГОСТ) осуществляется с помощью в меню **Расчет/Стандарт**. Установку стандарта следует производить до задания постоянных параметров, поскольку вид диалогового окна **Постоянные параметры** и сами параметры зависят от выбранного стандарта расчета.


Для задания параметров нужно перейти в соответствующий режим, нажав кнопку  **Постоянные параметры** панели инструментов **Главная** (меню **Данные/Постоянные параметры....**). В появившемся окне введите постоянные параметры в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Постоянные параметры расчета

Наименование параметра	Выбор параметра по СП 53-102-2004
Расчетное сопротивление соединения на срез, $R_{bs} = 210$ МПа	По таблице Г.5, для болта класса точности 5.6
Расчетное сопротивление соединения на смятие, $R_{bp} = 580$ МПа	По таблице Г.6 для соединяемого материала с наименьшим временным сопротивлением (ВСтЗпс).
Расчетное сопротивление болта на растяжение, $R_{bt} = 225$ МПа	По таблице Г.6, для болта класса точности 5.8
Коэффициент условий работы, $\gamma_b \cdot \gamma_c = 0,9$	$\gamma_b = 0,9$ (п. 15.3.4 для числа болтов $5 < n < 10$ ); $\gamma_c = 1$ (таблица 1).
Коэффициент надежности, $\gamma_h = 1,2$	По таблице 39 в зависимости от нагрузки и при разности номинальных диаметров отверстий и болтов
Коэффициент трения, $\mu = 0,25$	По таблице 39 для необработанных соединяемых поверхностей
Количество поверхностей среза / трения, 1	Т.к. поверхность контакта одна

## 7. Выбор типа расчета: проектировочный или проверочный

Для выбора типа расчета (проектировочный или проверочный) следует в меню **Расчет/Тип** выбрать **Проектировочный** или **Проверочный**. По умолчанию первым выполняется **Проектировочный** расчет.

**Проектировочный расчет** позволяет определить геометрию элементов соединения (диаметр болтов) по известным по условию параметрам, таким как количество и расположение болтов, свойства материала болтов, коэффициентам условий работы, надежности, трения и величина внешней нагрузки. Расчет ведется при статическом характере нагружения.

Для **проверочного расчета** помимо всех параметров проектировочного расчета должен быть также задан диаметр болтов. Основным результатом **проверочного расчета** является коэффициента запаса по расчетному сопротивлению.

## 8. Выполнение расчета

Для запуска на расчет нужно нажать кнопку  **Расчет** на панели инструментов **Главная** (меню **Расчет/Расчет!**).

## 9. Просмотр результатов расчета

После завершения расчета на экране монитора открывается окно **Карта давлений** (рис. 5.1.8) с изображением контактной поверхности, окрашенной в различные цвета. Цветовая гамма поверхности отвечает цветовой шкале **Давление МПа**, расположенной в левой верхней части окна.

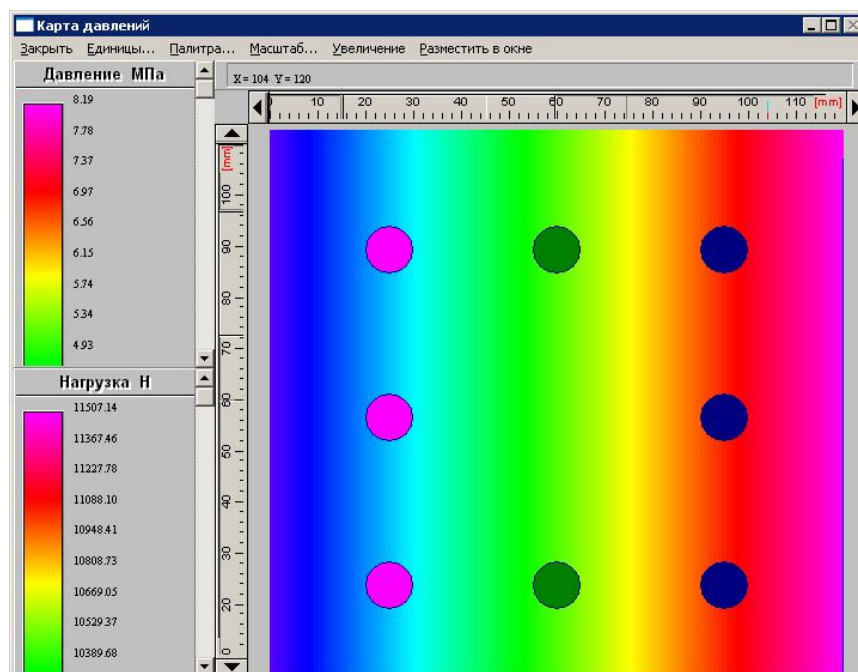



Рис. 5.1.8. Карта давлений и нагрузок на болты

Кругами обозначены места установки болтов. Диаметр каждого из кругов равен подобранному в результате расчета диаметру болта. Цвета кругов соответствуют величине нагрузки, действующей на соответствующий болт (цветовая шкала **Нагрузка Н** в нижней левой части окна). Для закрытия этого окна выберите пункт меню **Закрыть**.

Переход в режим просмотра числовых результатов расчета осуществляется нажатием кнопки  **Результаты** (меню **Результаты...**).

Соединение (слой) Основной	
<b>Геометрия</b>	
Площадь стыка [кв.мм]	14400
X координата центра масс стыка [мм]	60
Y координата центра масс стыка [мм]	60
Момент инерции стыка относит. центральных осей	
относит. горизонтальной оси [мм <sup>4</sup> ]	1.72783e+007
относит. вертикальной оси [мм <sup>4</sup> ]	1.72783e+007
Угол наклона главных центральных осей [Град]	0.0
X координата центра масс винтов [мм]	60
Y координата центра масс винтов [мм]	60
<b>Нагрузка</b>	
Сила затяжки [Н]	8238.1
Максимальная нагрузка на болт [Н]	11507.1
Максимальное давление [МПа]	8.18814
Диаметр болта [мм]	10
Момент завинчивания [Нм]	28.266
Момент трения в резьбе [Нм]	14.0527
Момент трения на торце гайки [Нм]	14.2133

Рис. 5.1.9. Числовые результаты расчета

## 10. Корректировка параметров по результатам расчета

Размещать болты следует в соответствии с таблицей 37 СП 53-102-2004. В частности, минимальное расстояние от центра болта до края элемента вдоль усилия должно быть от  $1,5d$  до  $2d$ , а минимальное расстояние между центрами отверстий  $2d$  до  $2,5d$ . В данном случае условие выполняются. Если анализ результатов показал, что необходимо провести корректировку расположения болтов, то для этого нужно вернуться к схеме расположения болтов, изменить их положение (можно добавить или удалить часть болтов) и заново произвести расчет.

### Практическое задание

Выполнить расчет группового болтового анкерного соединения с опорной поверхностью, изображенной на рис. 5.1.10. Расположение болтов в плоскости фланца, их класс прочности и материал фланца — по усмотрению пользователя.

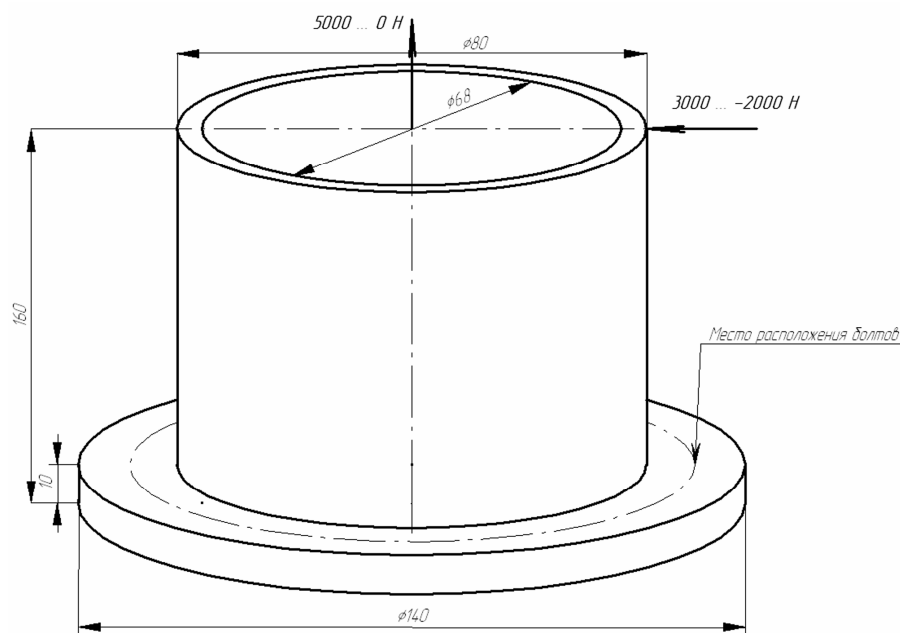


Рис. 5.1.10. Задание по расчету болтового соединения