

Глава 2. Прочностной расчет металлоконструкции пролета моста в модуле APM Structure3D

2.1. Статический расчет стержневой модели пролета моста

Задание

Выполнить прочностной расчет модели металлоконструкции пролета моста, изображенной на рис. 2.1.1. Размеры стержневых элементов модели приведены на рис. 2.1.2.

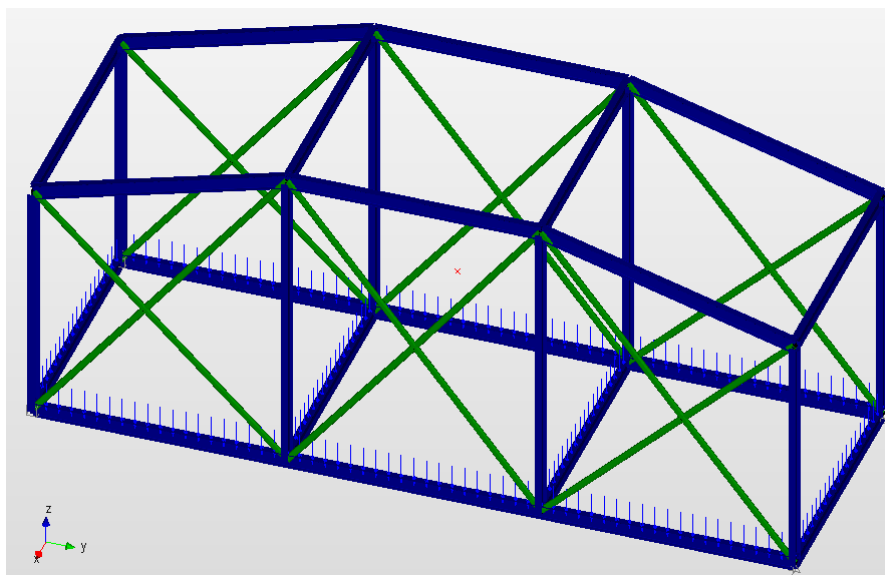


Рис. 2.1.1. 3D-модель металлоконструкции пролета моста

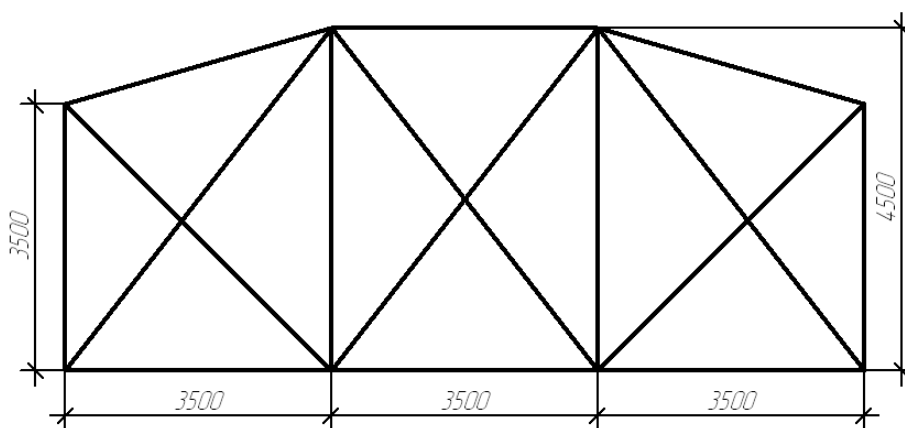


Рис. 2.1.2. Основные размеры расчетной модели (в мм)

Вертикальные и горизонтальные стержневые элементы модели имеют поперечное сечение типа **Двутавр № 20 с уклоном полок по ГОСТ 8239-89**, а наклонные стержневые элементы — нестандартное поперечное сечение, чертеж которого изображен на рис. 2.1.3. Материал всех стержней — сталь Ст3кп. Соединение стержневых элементов друг с другом жесткое (сварка или болтовое). Ширина пролета моста 3500 мм.

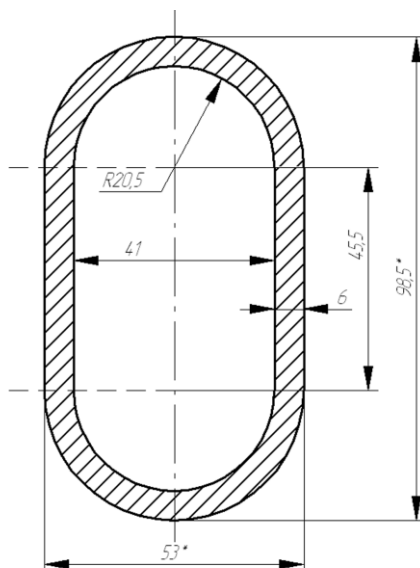


Рис. 2.1.3. Чертеж сечения раскосов

Пролет моста установлен на четырех шарнирных опорах, располагающихся по углам нижнего основания. На одном из концов моста опоры неподвижные, а на другом могут смещаться в продольном направлении.

На нижний ярус модели (горизонтальные стержни в количестве 10 шт.) действует направленная вертикально вниз распределенная нагрузка, удельная величина которой равна 20 Н/мм.

При расчете следует учесть действие силы тяжести.



Общий порядок расчета

1. Создание плоской стержневой модели рамы моста.
 - 1.1. Активация режима отмены операций.
 - 1.2. Установка единиц измерения.
 - 1.3. Создание базового (начального) узла.
 - 1.4. Построение вертикальных и горизонтальных стержней.
 - 1.5. Построение наклонных и пересекающихся стержней.
 - 1.6. Создание общего узла в точке пересечения двух стержней.
2. Вытапливание (умножение) плоской рамы с целью создания трехмерной стержневой модели.
 - 2.1. Выделение элементов модели.
 - 2.2. Вытапливание элементов.
 - 2.3. Удаление лишних элементов.
3. Присвоение стержневым элементам модели поперечного сечения и задание параметров материала.
 - 3.1. Создание нестандартного поперечного сечения и внесение его в библиотеку.
 - 3.2. Присвоение поперечного сечения стержневым элементам модели.
 - 3.3. Проверка ориентации сечения и его поворот.
 - 3.4. Задание параметров материала.
4. Закрепление модели с помощью опор.
5. Задание силовых факторов, действующих на элементы модели.
 - 5.1. Учет собственного веса конструкции.
 - 5.2. Задание распределенной нагрузки, действующей на стержневые элементы модели.
6. Выполнение расчета.
7. Просмотр результатов расчета.
 - 7.1. Просмотр карты результатов.
 - 7.2. Просмотр внутренних силовых факторов в узлах элементов.
 - 7.3. Просмотр напряжений в поперечном сечении стержня.
8. Проверка несущей способности стержневых элементов по СНиП II-23-81 и подбор поперечных сечений.
 - 8.1. Общие принципы расчета по СНиП II-23-81 «Стальные конструкции».
 - 8.2. Создание конструктивных элементов.
 - 8.3. Выполнение расчета и просмотр результатов.
9. Вывод результатов на печать и в формат *.rtf.


Решение

1. Создание плоской стержневой модели рамы моста

1.1. Активация режима отмены операций

Перед началом построения рекомендуется активировать режим отмены операций. Включить/выключить этот режим можно с помощью флажка **Отмена операций** меню **Редактирование**. При включенном флажке кнопки  **Отменить** и  **Повторить** панели инструментов **Файл** активны.


1.2. Установка единиц измерения

Текущие единицы измерения показываются в строке состояния, располагающейся в нижней части основного окна программы. Для установки других единиц нужно перейти в соответствующий режим нажатием кнопки  **Единицы измерения** (меню **Вид/Единицы измерения...**) и во вкладке **Единицы** открывшегося диалогового окна **Установки** выбрать нужные единицы – в рассматриваемом случае это **Миллиметры**.


1.3. Создание базового (начального) узла

Для построения и редактирования расчетной модели конструкции предназначены инструменты панели **Нарисовать** (меню **Рисование/Узел/По Координатам**), которая расположена вертикально в левой части основного окна редактора.

Расчетную модель можно создавать в окне любого вида, при этом она автоматически отображается на всех остальных видах. Построение рекомендуется выполнять в окне вида, который наиболее удобен для изображения плоских повторяющихся элементов (рамы). При этом процесс создания модели следует спланировать таким образом, чтобы как можно большая ее часть могла быть получена путем умножения плоской рамы в определенном направлении.

В рассматриваемом случае построение ведем в окне **Вид спереди**. Создание модели начинаем с установки в произвольном месте выбранного окна начального (базового) узла: вначале нажимаем кнопку  **Новый узел** панели **Нарисовать** (меню **Рисование/Узел/По координатам**), а затем щелкаем левой кнопкой мыши в произвольной точке поля окна, фиксируя тем самым начальный узел. Предположим, что это левый нижний узел модели.

1.4. Построение вертикальных и горизонтальных стержней


Нажимаем на панели инструментов **Нарисовать** кнопку  **Стержень по длине и углу** (меню **Рисование/Стержень/По длине и углу**) и щелкаем левой кнопкой мыши в области чувствительности привязки к узлу. Затем, смещая курсор, «вытягиваем» динамический объект в вертикальном направлении и по щелчку правой кнопки мыши вызываем диалоговое окно **Добавить стержень** для задания координат стержня, в рассматриваемом случае – длины и значения угла. В соответствующие поля ввода этого диалога записываем:

- **Угол, град** — 90;
- **Длина, мм** — 3500.

Угол отсчитывается от положительного направления оси ординат в направлении против часовой стрелки.


Аналогичным образом строим нижний горизонтальный стержень с началом в базовом узле, затем вертикальный стержень длиной 4500 мм с началом в конечной точке предыдущего стержня и т. д., вплоть до получения плоской рамы, состоящей из вертикальных и горизонтальных стержней.

1.5. Построение наклонных и пересекающихся стержней

Если положение концов наклонных стержней точно определено, то при построении целесообразно воспользоваться режимом  **Новый стержень**, который включается одноименной кнопкой панели **Нарисовать** (меню **Рисование/Стержень/По координатам**). Для создания нового стержня вначале щелкаем левой кнопкой мыши в области чувствительности привязки к узлу, который будет служить началом этого стержня, а затем, смещая курсор, щелкаем в области узла, находящегося на конце стержня. Между этими узлами появится новый стержень. Таким же образом строим стержни, соединяющие части верхнего пояса плоской рамы, а также пересекающиеся стержни.

1.6. Создание общего узла в точке пересечения двух стержней

Для того чтобы создать узел в точке пересечения двух стержней, следует вначале на каждом из стержней отметить по одному узлу, находящемуся вблизи точки пересечения, а затем объединить их в единый узел. Делается это следующим образом.

Переходим в режим создания узла на стержне (кнопка  **Новый узел на стержне** на панели инструментов **Нарисовать** или меню **Рисование/Узел/На стержне**) и щелчком левой кнопки мыши выделяем один из стержней. При этом в поле окна редактора появляются две динамические прямые, одна из которых совпадает с выделенным стержнем, а другая перпендикулярна к нему и «привязана» к указателю мыши. Смещая указатель мыши к видимой точке пересечения стержней, щелкаем левой кнопкой мыши. В полях ввода открывшегося диалогового окна **Узел на стержне** можно записать координаты создаваемого узла. Однако в рассматриваемой задаче положение узла легко определяется визуально, и уточнять его положение изменением числовых параметров нет необходимости.

Итак, мы зафиксировали узел на первом стержне вблизи точки его пересечения со вторым стержнем. Аналогичным образом создаем узел на втором стержне. В результате на пересекающихся стержнях получаем два близкорасположенных узла, которые должны быть объединены.




Для объединения близкорасположенных узлов выбираем пункт меню **Инструменты/Соединить узлы...** и записываем значение интервала совмещения узлов в поле ввода открывшегося диалогового окна **Совместить узлы**. Например, выберем значение интервала равным 20 мм. Если заданного значения интервала недостаточно, то после нажатия кнопки **ОК** программа выдаст сообщение **«Объединено 0 узлов»**, и операцию следует повторить, выбрав большее значение.

Точно таким же образом создаем общие узлы на всех пересекающихся стержнях.

2. Выталкивание (умножение) плоской рамы с целью создания трехмерной стержневой модели

После выполнения всех описанных выше операций получаем плоскую раму, соответствующую боковой секции моста. Для того чтобы преобразовать плоскую модель в трехмерную, нужно произвести операцию выталкивания (умножения секций), предварительно выделив участвующие в ней элементы.


2.1. Выделение элементов модели

Для выделения отдельных элементов модели можно воспользоваться кнопкой  **Выбрать** панели инструментов **Нарисовать** (меню **Редактирование/Выбрать элемент**) или  **Выбрать группу** (меню **Редактирование/Выбрать группу элементов**). В рассматриваемой задаче необходимо выделить всю плоскую раму целиком, поэтому удобнее воспользоваться режимом выделения группы элементов. После перехода в режим  **Выбрать группу** (меню **Редактирование/Выбрать группу элементов**) следует, нажав левую кнопку мыши, создать прямоугольник, в который вписывается плоская рама. Элементы рамы выделяются и окрасятся в красный цвет.

Снятие выделения производится щелчком правой кнопкой мыши в свободном месте поля редактора в одном из режимов выбора элементов.

2.2. Выталкивание элементов

Операцию выталкивания (умножения) удобнее всего производить в окне **Вид сверху**, поскольку на этом виде вектор умножения отображается в натуральную величину, но возможно использовать и любой другой вид.

Переход в режим выталкивания осуществляется нажатием кнопки  **Вытолкнуть** на панели инструментов **Инструменты** (меню **Инструменты/Вытолкнуть**). Направление выталкивания указывается с помощью **вектора умножения**. Схематическое изображение вектора строится двумя щелчками левой кнопки мыши; нажатие правой кнопки позволяет отменить начатое построение. После второго щелчка появляется диалоговое окно **Выталкивание** (рис. 2.1.4), в полях ввода которого задаются координаты вектора умножения в глобальной системе координат (параметры **X**, **Y** и **Z** группы **Вектор Умножения**).

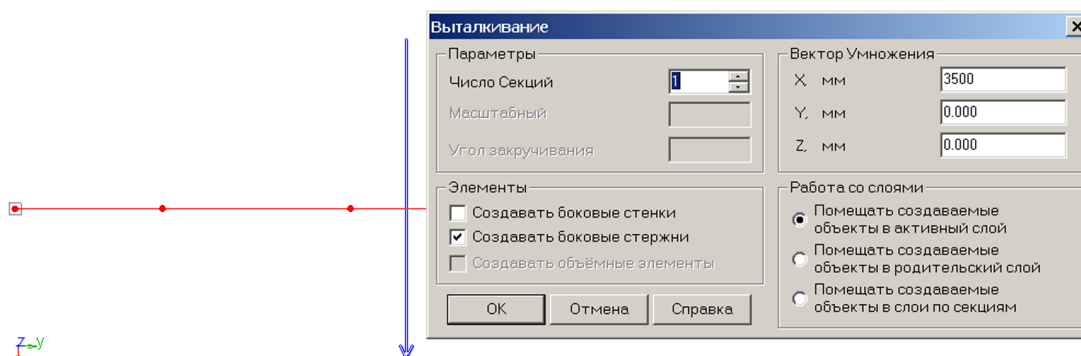


Рис. 2.1.4. Операция **Выталкивание**


В поля ввода этого диалогового окна записываем следующие параметры выталкивания:


- **Число секций** — 1;
- **Вектор Умножения по X, мм** — 3500;
- **Y, мм и Z, мм** — оставляем нулевыми.

Затем включаем флажок **Создавать боковые стержни** и устанавливаем переключатель группы параметров **Работа со слоями** в положение **Помещать создаваемые объекты в активный слой**.

2.3. Удаление лишних элементов

Включенный флажок **Создавать боковые стержни** означает, что к КАЖДОМУ из узлов плоской рамы присоединяется дополнительный стержень в направлении вектора умножения (в данном случае – оси X); заметим, что при этом в модели могут появиться лишние стержни, которые необходимо *удалить*. В рассматриваемом случае таковыми являются стержни, начальные точки которых расположены в находящихся в местах пересечения диагональных стержней узлах.

Выделяем эти элементы, нажав кнопку  **Выбрать** панели инструментов **Нарисовать** (меню **Редактирование/Выбрать элемент**) и щелкнув левой кнопкой мыши на одном из стержней. Для выделения группы элементов нужно держать нажатой клавишу **Shift** на клавиатуре, в противном случае при выделении последующего элемента со всех предыдущих выделение снимается.

Удаление выделенных элементов производится нажатием кнопки  **Удалить выбранное** на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Рисование/Удалить выбранное**) или нажатием клавиши **Delete** на клавиатуре.

3. Присвоение стержневым элементам модели поперечного сечения и задание параметров материала

Стержневые элементы модели могут иметь как *стандартное*, так и *нестандартное* поперечное сечение. Если сечение *нестандартное*, то оно должно быть предварительно создано (или импортировано) и помещено в одну из библиотек сечений (см. далее п. 3.1).

Поперечное сечение в APM Structure3D может быть импортировано из двух источников: **библиотеки сечений** и **базы данных**. Обращение к базе данных позволяет выбрать из нее сечение как параметрическую модель, при необходимости изменить его параметры и сразу добавить выбранное сечение в список сечений создаваемой модели, минуя библиотеку. Если же поперечное сечение выбирается из библиотеки, то предварительно его нужно создать и поместить в эту библиотеку.



При использовании **библиотеки сечений** поперечное сечение существует как самостоятельный объект в отдельном файле библиотеки, который можно сохранить на диске, переслать по электронной почте и т.п. Кроме того, такое сечение может быть присвоено стержневым элементам другой модели.

При работе с **базой данных** без привлечения библиотеки поперечное сечение добавляется непосредственно в список сечений модели и как самостоятельный объект не идентифицируется. Оно может быть присвоено только элементам рассматриваемой модели, и если потребуется присвоить такое сечение стержням другой модели, то его необходимо добавить в список сечений заново либо скопировать стержень с таким сечением из одной модели в другую.

В рассматриваемом случае поперечное сечение имеет нестандартный вид, поэтому целесообразно построить его средствами редактора поперечных сечений APM Graph и поместить в библиотеку сечений.

3.1. Создание нестандартного поперечного сечения и внесение его в библиотеку

3.1.1. **Создание чертежа поперечного сечения с помощью библиотеки сечений.** Создать чертеж поперечного сечения с использованием библиотеки сечений можно несколькими способами:

- построить в редакторе поперечных сечений APM Graph;
- открыть файл редактора поперечных сечений с расширением *.wsg (команда меню **Файл/Загрузить...**);
- импортировать в редактор поперечных сечений файл собственного формата модуля APM Graph с расширением *.agr или сторонний файл формата *.dxf (команда меню **Файл/Импорт...**);
- импортировать сечение в режиме  **Вставка блока** из библиотеки простых блоков APM Graph *.agl или параметрических моделей *.agr (команда **Файл/Рисовать/Блок/Вставить блок**);
- импортировать параметрическую модель сечения из базы данных APM Base, нажав кнопку  панели инструментов **Рисование** (команда **Файл/Рисовать/Блок/Вставить объект из базы данных**).

В рассматриваемом случае, воспользовавшись командой меню **Файл/Импорт**, импортируем в редактор поперечных сечений созданный ранее чертеж поперечного сечения (см. гл. 1.1), сохраненный в файле формата *.agr или *.dxf.

3.1.2. **Выделение контуров поперечного сечения.** Для того чтобы подготовленный чертеж стал поперечным сечением, в нем необходимо выделить внешний и внутренние контуры. С этой целью панель **Контур** содержит специальные кнопки –  **Простой контур** (команда **Контур/Простой контур**) и  **Набираемый контур** (команда **Контур/Набираемый контур**). После нажатия кнопки **Простой контур** следует щелкнуть сначала на любом из элементов наружного контура, а затем на каждом из внутренних контуров (если они есть). Замкнутые контуры при этом окрашиваются в синий цвет. После выделения всех контуров нужно нажать кнопку **ОК** открывшегося диалогового окна **Выбор контура** (можно также нажать правую кнопку мыши или клавишу **Пробел** на клавиатуре). При этом область между выделенными контурами, т. е. собственно поперечное сечение, окрасится в серый цвет (рис. 2.1.5).

Режим **Набираемый контур** используется при неоднозначности определения замкнутости контура. В этом случае, войдя в режим, нужно поочередно щелкать левой кнопкой мыши на элементах контура, добиваясь их выделения; если же предыдущий элемент выделился, а последующий – нет, то между этими элементами нет связи, т. е. в этом месте контур незамкнут.

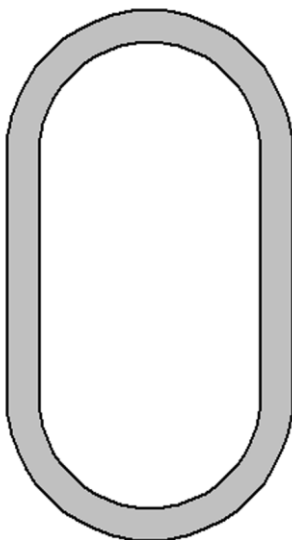


Рис. 2.1.5. Поперечное сечение после задания внешнего и внутреннего контуров

3.1.3. **Внесение нового сечения в библиотеку сечений.** Созданное поперечное сечение нужно внести в библиотеку сечений. Переходим в соответствующий режим выбором в меню **Библиотека** опции **Добавить в библиотеку**, после чего на экране появляется окно **Добавить сечение в библиотеку** (рис. 2.1.6). Затем нажимаем кнопку **Загрузить библиотеку...**, выбираем из открывшегося списка нужную библиотеку, указывая тем самым путь к ней – в рассматриваемом случае это библиотека **deflib.slb** – и записываем в поле **Имя сечения** название сечения, т. е. имя, под которым оно будет внесено в выбранную библиотеку. После нажатия кнопки **Ок** про-

грамма начинает расчет геометрических параметров сечения, по окончании которого это сечение добавляется в соответствующую библиотеку под указанным именем.

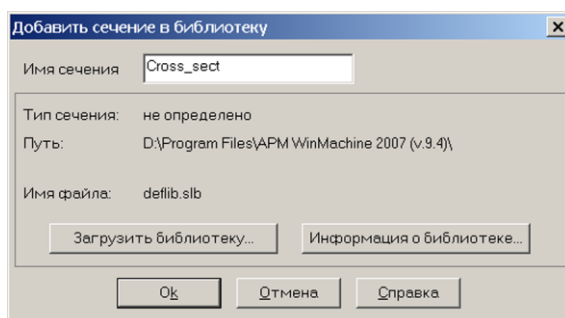



Рис. 2.1.6. Диалоговое окно **Добавить сечение в библиотеку**

3.2. Присвоение поперечного сечения стержневым элементам модели

Отдельным элементам или группам элементов модели могут быть присвоены как одинаковые, так и различные поперечные сечения; можно также присвоить одно и то же сечение всем стержневым элементам. В случае присвоения сечения группе элементов эта группа должна быть предварительно выделена (см. п. 2.1).

Если элементы (или группы элементов) модели имеют различные поперечные сечения, то целесообразно вначале присвоить всем элементам то сечение, которое имеет большинство элементов модели, а затем последовательно выделить группы элементов с другими сечениями и присвоить им эти сечения.

Для присвоения одного и того же поперечного сечения всем элементам модели используем режим  **Сечения всем** панели инструментов **Свойства** (меню **Свойства/Сечения всей конструкции**), не прибегая к процедуре выделения всей совокупности элементов. Нажатие этой кнопки приведет к открытию диалогового окна задания сечения из библиотеки **Библиотека:...** (рис. 2.1.7). Затем необходимо загрузить нужную библиотеку. Для этого нажимаем кнопку **Загрузить** и указываем путь к этой библиотеке. Стандартные библиотеки, которые поставляются вместе с модулем APM Structure3D, располагаются в той же директории, где установлена система APM Civil Engineering.

В рассматриваемом случае после загрузки библиотеки выбираем из списка **Имя сечения** нужное по условию сечение — **Двутавр с уклоном № 20...** — и нажимаем кнопку **Ок**. После этого в открывшемся диалоговом окне подтверждаем намерение присвоить выбранное сечение всем стержням. Ориентация сечения производится программой автоматически.

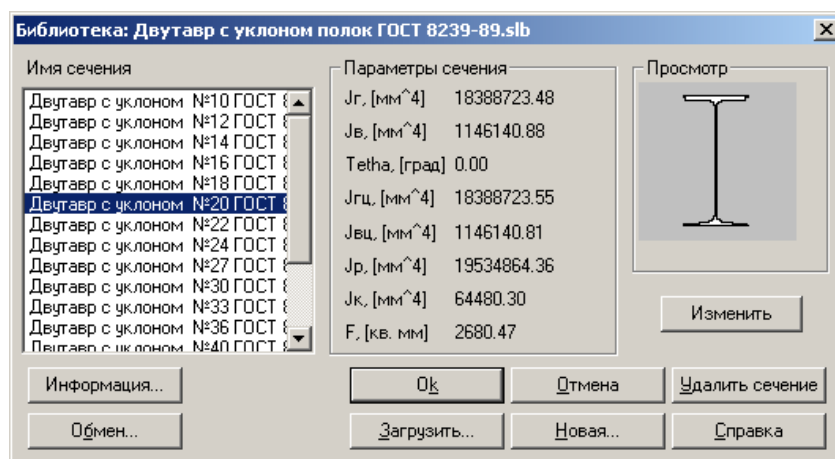




Рис. 2.1.7. Библиотека сечений: **Двутавр с уклоном полок ГОСТ 8239-89**

Для присвоения поперечного сечения выделенным элементам нажимаем на панели инструментов **Свойства** кнопку  **Сечения выделенным** (меню **Свойства/Сечения Выделенным стержням**), после чего действуем точно так же, как в предыдущем случае.

После того как всем стержневым элементам модели присвоены поперечные сечения, стержни окрасятся в различные цвета, соответствующие присвоенным сечениям.


3.3. Проверка ориентации сечения и его поворот

Для того чтобы визуализировать ориентацию поперечного сечения группы стержней, выделите эти стержни и нажмите на панели инструментов **Свойства** кнопку  **Ориентация сечения** (меню **Свойства/Ориентация сечения**). На каждом из выделенных стержней появится схематическое изображение его ориентированного сечения. Если сечение слишком маленькое/большое, то увеличить/уменьшить его показ можно с помощью кнопки «+»/«—» на клавиатуре. Точно так же можно визуализировать поперечное сечение единичного стержня.

В этом же режиме можно поворачивать сечение отдельного стержня (или группы предварительно выделенных стержней) вокруг собственной оси. Делается это следующим образом. Вначале щелкаем указателем мыши в непосредственной близости от стержня, после чего сечение приобретает зеленый цвет. Перемещение мыши по полю вида в горизонтальном направлении сопровождается поворотом сечения вокруг собственной оси. Внизу, в строке состояния, появится числовое значение угла поворота рассматриваемого сечения, выраженное в градусах. Шаг угла поворота равен шагу курсора в угловом направлении, по умолчанию принимаемому за 1 град. Щелчком правой кнопкой мыши в процессе поворота вызывается диалоговое окно, в поле которого можно задать угол поворота сечения.

3.4. Задание параметров материала


Всем элементам модели конструкции по умолчанию присваиваются свойства того материала, который в настоящий момент является текущим. При первоначальном обращении к программе таким материалом является **Сталь Ст3кп**, что и соответствует условию рассматриваемой задачи. Для того чтобы в этом убедиться, нажмите на панели инструментов **Свойства** кнопку

 **Материалы** (меню **Свойства/Материалы...**) и посмотрите, выделен ли текущий материал (**Сталь**) в открывшемся диалоговом окне **Материалы**. Именно этот материал станет присваиваться всем вновь создаваемым элементам модели. Нажатием кнопки **Изменить...** можно визуализировать параметры выбранного материала и при необходимости изменить их — вручную или с помощью базы данных по материалам, вызываемой нажатием кнопки **ДВ**.

4. Закрепление модели с помощью опор

По условию задачи пролет моста установлен на четырех шарнирных опорах. Две из них на одном из концов моста абсолютно жесткие во всех направлениях, а две опоры на другом конце подвижны в продольном направлении. Поэтому на одной стороне модели поставим шаровые шарниры, а с противоположной стороны — шарниры с разрешением перемещения вдоль направления оси моста.

Шарниры устанавливаются в узлах. Для установки шаровых шарниров выделим два узла в левой нижней части модели моста. Затем нажимаем на панели инструментов **Нарисовать** кнопку

 **Опора** (меню **Рисование/Опора**) и щелкаем на одном из выделенных узлов. Открывается диалоговое окно **Установка опоры** (рис. 2.1.8), в полях ввода которого задаем тип устанавливаемых опор.

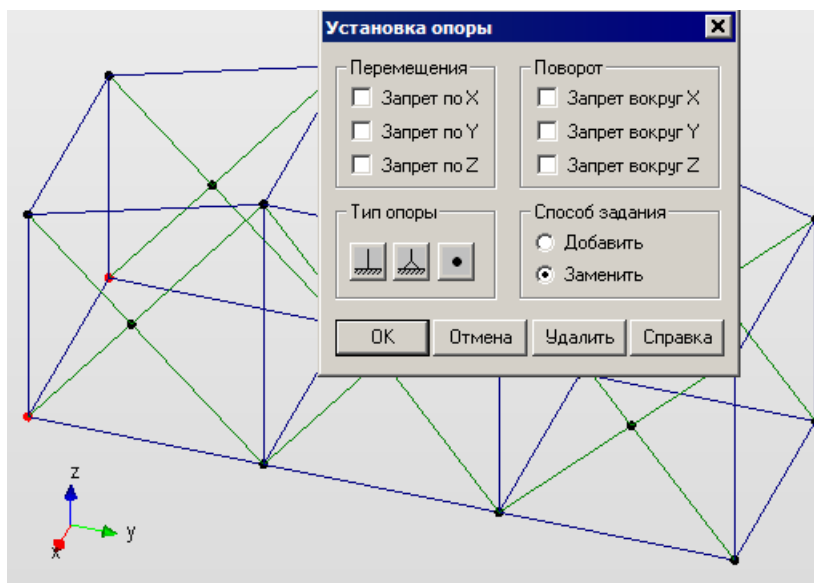



Рис. 2.1.8. Установка опор

В рассматриваемом случае для установки шарнирных шаровых опор достаточно запретить все перемещения, т. е. поставить флажки **Запрет по X**, **Запрет по Y** и **Запрет по Z** или же нажать кнопку  **Шарнирная опора**, в результате чего флажки запретов перемещения по всем координатам появятся автоматически. В узлах с другой стороны модели устанавливаем такой же тип опоры, но отключаем флажок **Запрет по Y**. На этом установка опор завершается.

5. Задание силовых факторов, действующих на элементы модели

Мост находится под действием двух силовых факторов:

- собственного веса;
- распределенной нагрузки, действующей на нижние горизонтальные стержни.

5.1. Учет собственного веса конструкции

Собственный вес конструкции — это распределенная сила, действующая на все элементы модели в направлении, противоположном оси Z глобальной системы координат.

Для перехода в режим учета собственного веса обращаемся к меню **Нагрузки** и выбираем пункт **Загрузки...** В открывшемся диалоговом окне **Загрузки** по умолчанию имеется единственное загрузке — **Загрузка 0** (рис. 2.1.9). Оно активно, о чем свидетельствует расположенный слева от его названия флажок, и включено, т. е. в окнах редактора отображаются находящиеся в этом загрузке нагрузки. В рассматриваемом случае **Загрузка 0** содержит все действующие на модель силовые факторы. В этом загрузке, как и в любом другом, есть числовой коэффициент, который называется **множитель собственного веса**. По умолчанию этот коэффициент равен нулю, так что вес конструкции при расчете не учитывается. Для учета собственного веса множителю собственного веса следует задать отличное от нуля значение.

В рассматриваемом случае в качестве множителя собственного веса необходимо использовать коэффициент надежности по нагрузке γ_f , который, согласно п. 2.2 СНиП 2.01.07-85* **Нагрузки и воздействия**, для строительных металлоконструкций составляет 1,05. Выделяем **Загрузка 0**, щелкнув на нем левой кнопки мыши, и нажимаем кнопку **Изменить** (см. рис. 2.1.9). В поле ввода появившегося диалога **Загрузка** (рис. 2.1.10) записываем значение 1,05.

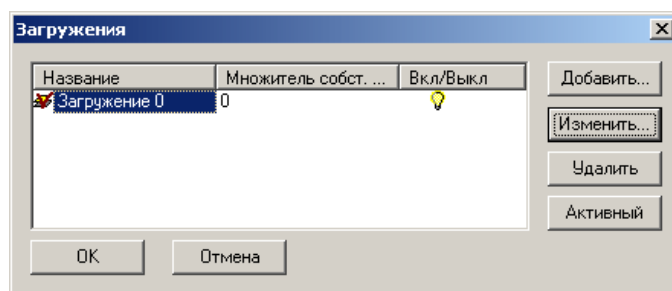


Рис. 2.1.9. Диалоговое окно **Загрузки**

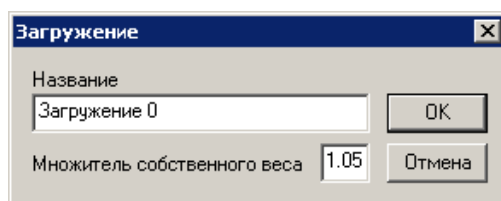


Рис. 2.1.10. Редактирование загрузки

Внимание! Если в модели создано несколько загрузок и расчет проводится для составленной из них комбинации, то для учета действия собственного веса соответствующий множитель необходимо учитывать только в одном загрузке из входящих в комбинацию.

5.2. Задание распределенной нагрузки, действующей на стержневые элементы модели

Выделяем стержни, на которые действует распределенная нагрузка, и нажимаем кнопку



Нагрузка на стержень на панели инструментов **Нагрузки** (меню **Нагрузки/Локальная на Стержень**). Затем щелкаем на одном из выделенных стержней, после чего появляется диалоговое окно **Нагрузка на стержни** (рис. 2.1.11). В нижней части этого окна показывается участок модели с выбранным стержнем, а в верхней — схематическое изображение этого же стержня, оди-

наковое для любого стержневого элемента модели. Соответствующая локальная система координат стержня изображается в обеих частях окна.

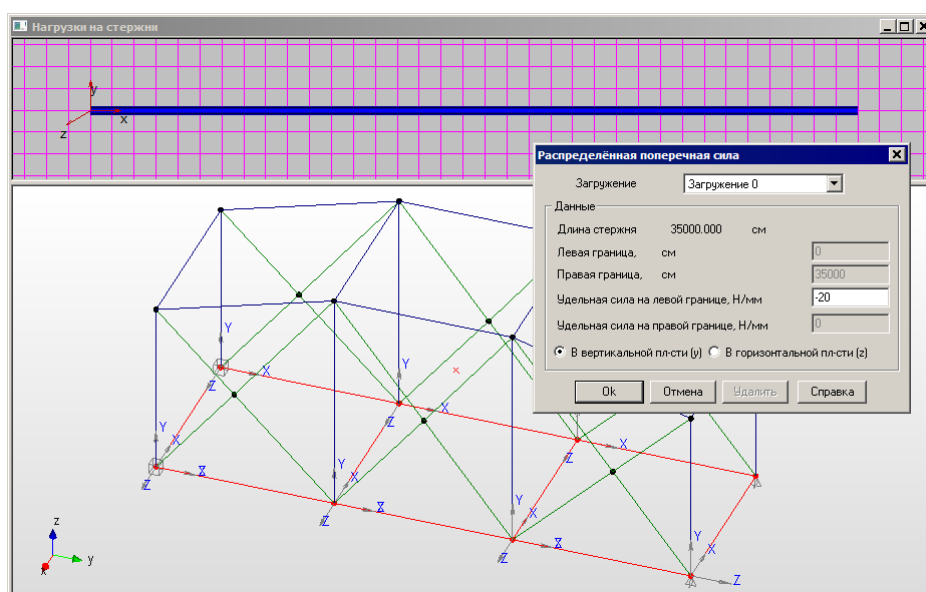


Рис. 2.1.11. Задание распределенной нагрузки на стержни

Для задания действующей на стержень распределенной нагрузки следует в меню **Нагрузка/Тип нагрузки на стержень** выбрать тип нагрузки — **Радиальная распределенная сила**, а затем занести в поля открывшегося диалогового окна **Распределенная поперечная сила** необходимые числовые данные.

Внимание! По отношению к отдельному (невыделенному) стержню можно задать как постоянную, так и линейно изменяющуюся силу, которая к тому же может действовать не только на весь стержень, но и на любой из его участков. Если же речь идет о группе выделенных стержней, то нагрузка, во-первых, может быть только постоянной, а во-вторых, действовать только по всей длине стержня.

Распределенную нагрузку можно задать в горизонтальной (по оси Z) или в вертикальной (по оси Y) плоскостях локальной системы координат стержня. Выбор плоскости происходит с помощью соответствующего переключателя диалогового окна **Распределенная поперечная сила** (см. рис. 2.1.11).

В рассматриваемом случае по условию на выделенные стержни действует постоянная сила величиной -20 Н/мм в вертикальной плоскости (знак « $-$ » говорит о том, что нагрузка направлена противоположно положительному направлению оси Y локальной системы координат). Следовательно, в поле **Удельная сила на левой границе, Н/мм** записываем « -20 Н/мм», переключатель **Распределенная поперечная сила** устанавливаем в положение **В вертикальной (Y) плоскости** и нажимаем кнопку **Ок**.

6. Выполнение расчета

Для запуска модели на расчет выбираем в меню **Расчет** пункт **Расчет...** и в открывшемся диалоговом окне **Расчет** отмечаем флажком необходимый тип расчета — в данном случае это **Статический расчет**.

7. Просмотр результатов расчета

После выполнения расчета можно визуализировать следующие результаты:

- распределение эквивалентных напряжений и их составляющих, а также главных напряжений;
- распределение линейных, угловых и суммарных перемещений;
- распределение деформаций по элементам модели;
- карты распределения и эпюры внутренних усилий;
- распределение усилий в контактной зоне;
- коэффициент запаса устойчивости и форма потери устойчивости;
- распределение коэффициентов запаса и числа циклов по критерию усталостной прочности;
- распределение коэффициентов запаса по критериям текучести и прочности;

- распределение температурных полей и термонапряжений;
- реакции в опорах, а также суммарные реакции, приведенные к центру тяжести модели.

Анализ результатов расчета проиллюстрируем на примере просмотра следующих карт: распределения напряжений по стержням модели, распределения напряжений в произвольном поперечном сечении одного из стержней, распределения величин силовых факторов для стержневого элемента в узле, а также эпюры силовых факторов для выбранного стержня.

7.1. Просмотр карты результатов

Выбираем в меню **Результаты** пункт **Карта результатов...**, что приводит к появлению диалогового окна **Параметры вывода результатов** (рис. 2.1.12).

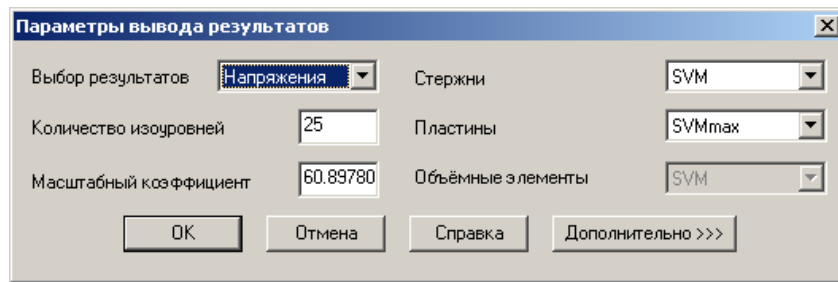


Рис. 2.1.12. Диалоговое окно **Параметры вывода результатов**

Из выпадающего списка **Выбор результатов** выбираем тип карты результатов, а в выпадающем списке **Стержни** отмечаем вид представления результатов расчета выбранного параметра (например, это могут быть эквивалентные напряжения, нормальные и касательные компоненты напряжения и т. д.). Если поля окна **Параметры вывода результатов** заполнены так, как показано на рис. 2.1.12, то на экране монитора появится карта напряжений, на которой с помощью различных цветов показываются максимальные величины эквивалентных напряжений в стержневых элементах модели конструкции (рис. 2.1.13).

Важно, что на карте напряжений с помощью соответствующего цвета отображается максимальный уровень эквивалентных напряжений в стержнях. Карта напряжений построена на деформированной модели, но на ней черным цветом показывается также и исходная недеформированная модель. Максимальное число на шкале напряжений соответствует наибольшему значению возникшего в модели напряжения.

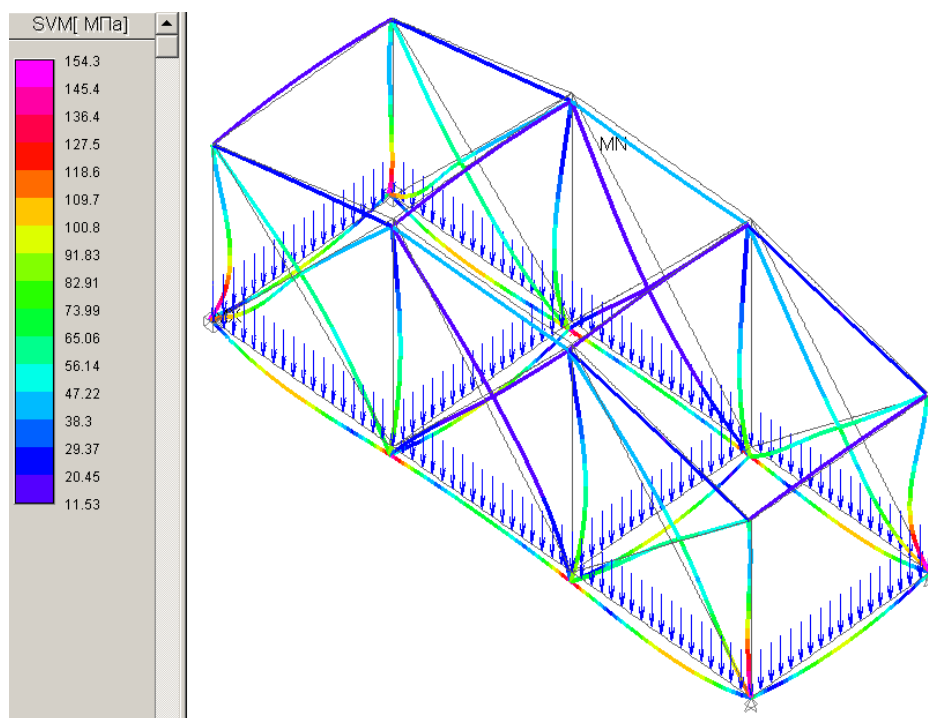


Рис. 2.1.13. Карта эквивалентных напряжений

7.2. Просмотр внутренних силовых факторов в узлах элементов

Для просмотра внутренних нагрузок в узлах элементов выбираем в меню **Результаты** пункт **Нагрузки...** Затем в открывшемся диалоговом окне **Результаты** указываем элемент, результаты расчета которого необходимо проанализировать (рис. 2.1.14). Выбор элемента можно осуществить с помощью списка элементов либо простым щелчком на этом элементе в режиме выбора элементов.

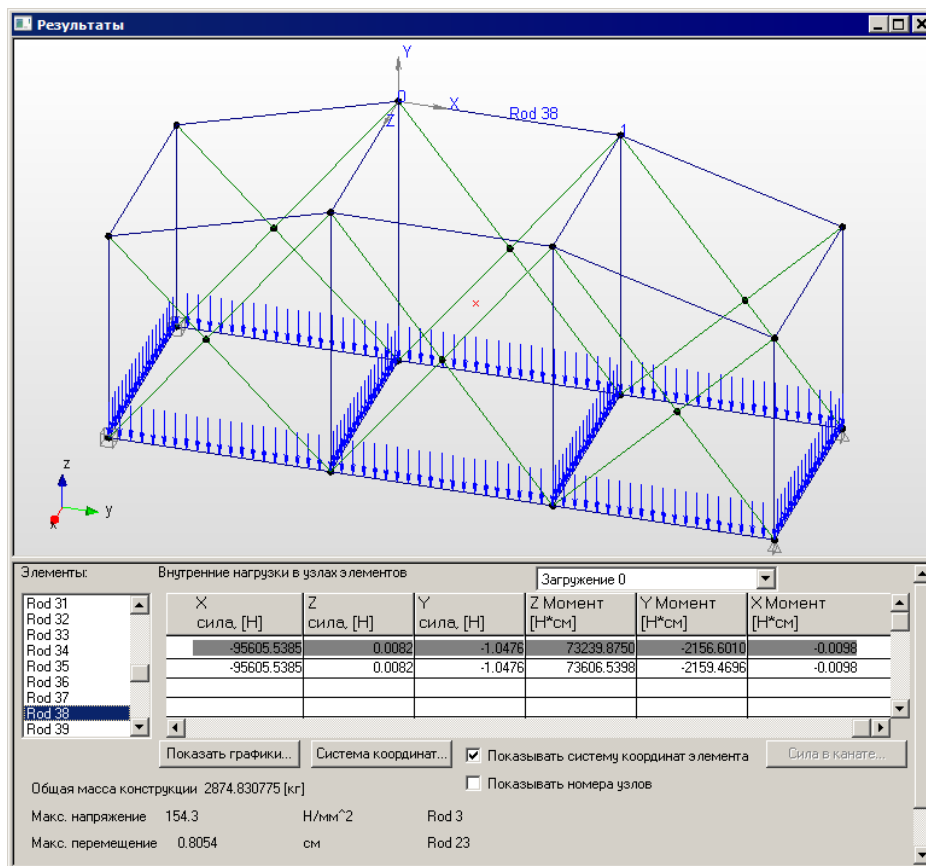


Рис. 2.1.14. Просмотр внутренних нагрузок в узлах элементов

В окне **Результаты** показываются: общая масса модели, величины максимальных напряжений и перемещений, а также номера элементов, в которых наблюдаются максимальные напряжения и перемещения.

В таблице **Внутренние нагрузки в узлах элементов** показываются: координаты и смещения узлов, угловые перемещения, а также силы и моменты в узлах в локальной системе координат для каждого из стержневых элементов.

Для того чтобы визуализировать эпюры силовых факторов выбранного стержня, нажимаем кнопку **Показать графики...** и в открывшемся диалоговом окне **Графики** отмечаем для просмотра один из перечисленных графиков (рис. 2.1.15).

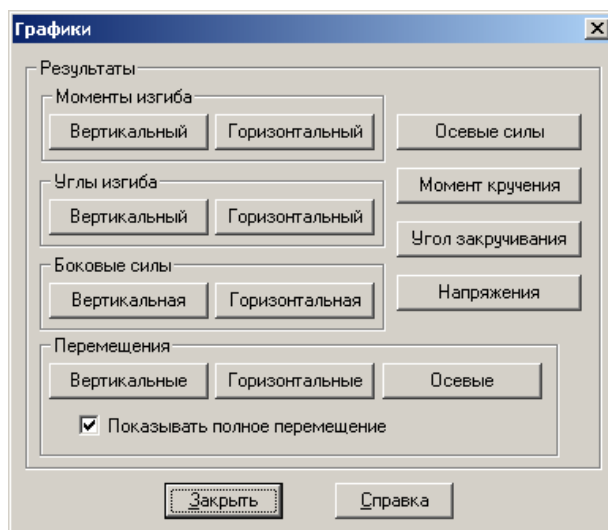


Рис. 2.1.15. Диалоговое окно выбора графика для просмотра

В качестве примера нажмем кнопку **Вертикальный** группы параметров **Моменты изгиба**. Открывается окно **Графики**, в поле которого отображается выбранный график (рис. 2.1.16).

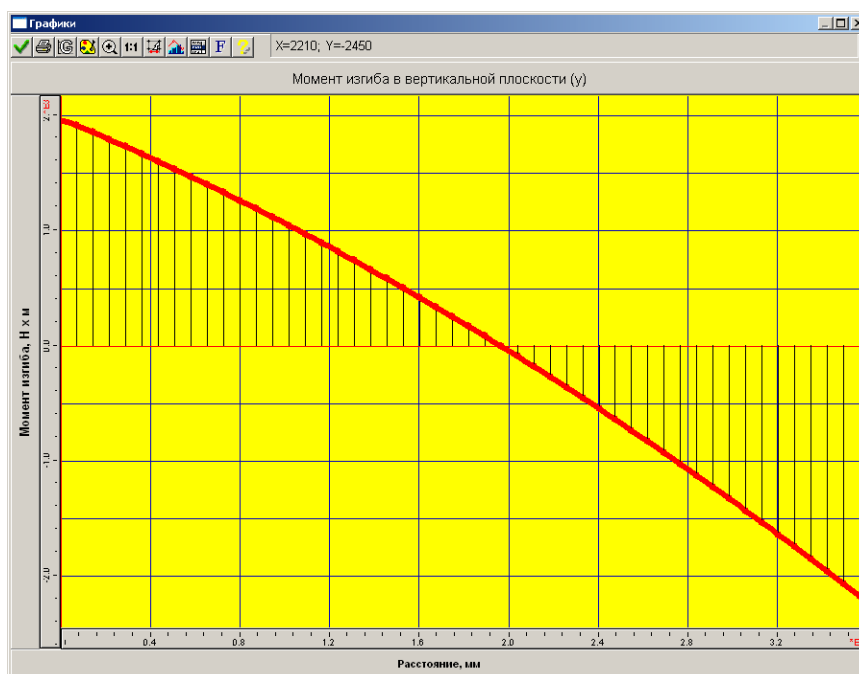


Рис. 2.1.16. График момента изгиба в вертикальной плоскости

Крайняя левая точка графика соответствует узлу 0 выбранного стержня, т. е. его началу, а крайняя правая — узлу 1 (концу стержня). Указав с помощью мыши произвольную точку кривой, получим в верхней части окна значения ее координат X и Y в указанных на координатных осях единицах.

7.3. Просмотр напряжений в поперечном сечении стержня

В APM Structure3D предусмотрена возможность визуализации картины распределения напряжений в поперечном сечении любого из стержневых элементов. Для этого необходимо войти в меню **Результаты/Напряжения в сечении...** и указать нужный стержень, щелкнув на нем левой кнопкой мыши. На стержне появится небольшая стрелка, которая при движении указателя мыши перемещается по выбранному стержню. С помощью этой стрелки следует указать положение сечения на стержне. Щелчок левой кнопки мыши вызывает появление диалога для задания положения выбранного поперечного сечения, после чего откроется соответствующая ему карта напряжений (рис. 2.1.17). Расположенная слева вертикальная шкала показывает диапазон напряжений в этом поперечном сечении.

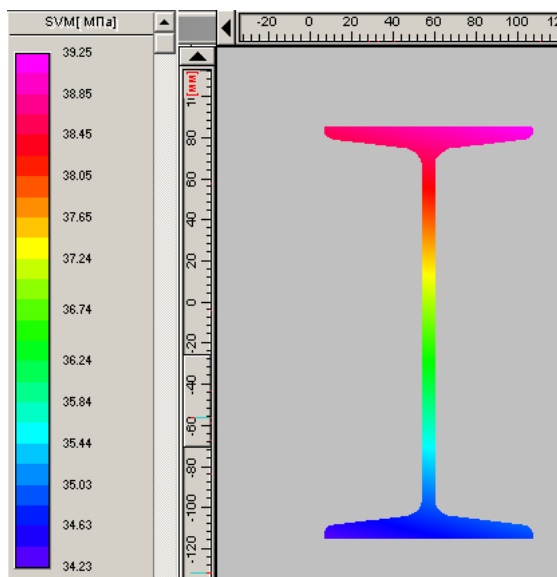


Рис. 2.1.17. Карта эквивалентных напряжений в сечении

8. Проверка несущей способности стержневых элементов по СНиП II-23-81 и подбор поперечных сечений

8.1. Общие принципы расчета по СНиП II-23-81 «Стальные конструкции»

APM Structure3D позволяет выполнить проверку несущей способности стержней по **СНиП II-23-81 «Стальные конструкции»** и осуществить автоматизированный подбор поперечных сечений, обеспечивающих прочность рассматриваемой конструкции.

Прежде чем сделать вывод о несущей способности анализируемой конструкции, необходимо выполнить предварительный прочностной расчет, статический или деформационный, так называемой базовой модели, элементы которой имеют первоначально выбранное базовое сечение. Такой расчет позволит определить действующие на элементы модели нагрузки.


Внимание! Автоматизированный подбор оптимального сечения при расчете нагрузочной способности элемента модели выполняется из той же библиотеки, к которой принадлежит базовое сечение.

В качестве примера рассмотрим проверку несущей способности наиболее нагруженного стержня, а именно крайней вертикальной стойки моста (см. рис. 2.1.13). Максимальное эквивалентное напряжение, действующее в этом элементе, составляет 154 МПа. Первоначально назначаемое сечение — **Двутавр № 20 с уклоном полок по ГОСТ 8239-89**.

8.2. Создание конструктивных элементов

Стержневые конечные элементы, входящие в **конструктивный элемент**, должны обладать следующими свойствами:

- располагаться на одной прямой без разрывов;
- иметь одинаковый тип сечения и одинаково ориентированные оси локальной системы координат;
- быть изготовленными из одного и того же материала;
- каждый из стержней может входить только в один конструктивный элемент;
- шарниры и опоры могут присутствовать только в начале и конце группы стержней.

Выбираем тип конструктивных элементов с помощью команды меню **Проектирование/Типы конструктивных элементов/✓ Стальные элементы**. Затем с помощью команды **Выбрать** выделяем один из стержневых элементов — в данном случае это наиболее нагруженный стержень — после чего становится активной кнопка  **Выделенные объекты в конструктивный элемент** панели инструментов **Конструктивные элементы** (меню **Проектирование/Выделенные объекты в конструктивный элемент**). Нажимаем эту кнопку.

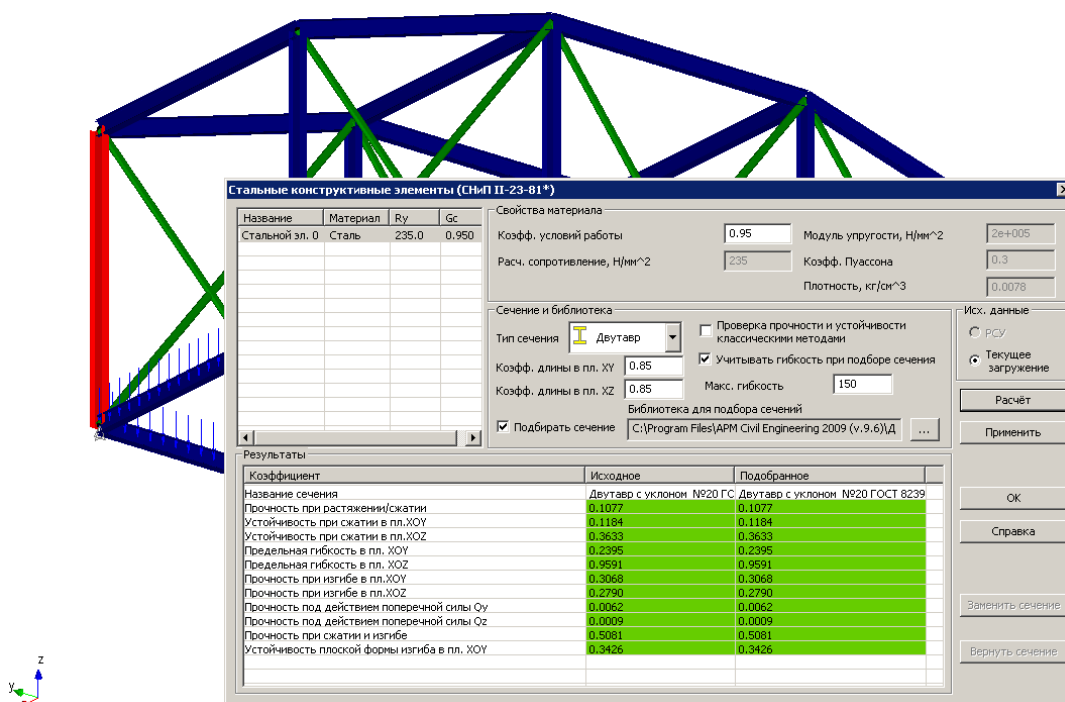



Рис. 2.1.18. Стальной конструктивный элемент

Для перехода в режим задания параметров конструктивного элемента нажимаем кнопку  **Конструктивные элементы** панели инструментов **Конструктивные элементы** (меню **Проектирование/Конструктивные элементы...**). В списке конструктивных элементов открывшегося диалогового окна **Конструктивные элементы** присутствует конструктивный элемент с названием **Стальной эл. 0** (см. рис. 2.1.18). Если выделить этот элемент в списке, то соответствующий стержень модели приобретет красный цвет.

Теперь необходимо задать свойства выбранного конструктивного элемента.

1. В группе **Свойства материала** расчетное сопротивление, модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность зависят от заданного материала конструктивного элемента и не доступны для редактирования.

2. Коэффициент условий работы зависит от назначения конструкции и выбирается из таблицы **6* СНИП II-23-81**. По умолчанию $\gamma_c = 1$. В рассматриваемом примере вертикальный стержень является колонной, поэтому $\gamma_c = 0,95$.

3. СНИП предписывают проводить различные проверки для сечений разных типов, поэтому для каждого конструктивного элемента необходимо задать один из предлагаемых программой типов сечения. Подходящий тип выбирается из выпадающего списка **Тип сечения**. По условию стержневые элементы модели имеют поперечное сечение **Двутавр № 20**, следовательно, из выпадающего списка **Тип сечения** выбираем тип сечения **Двутавр**. При необходимости можно выбрать пункт **Другое** – тогда задается сечение произвольного вида.

4. В активные поля **Коэфф. длины в пл. XY** и **Коэфф. длины в пл. XZ** записываются величины, равные отношению эффективной длины конструктивного элемента к его реальной длине. По умолчанию оба этих коэффициента равны единице. Согласно **п. 6.7 СНИП II-23-81**, для структурных конструкций коэффициенты длины неразрезных элементов равны 0,85, поэтому в соответствующих полях записываем 0,85.

Замечание 1. Эффективная длина конструктивного элемента используется при расчёте на устойчивость в двух плоскостях, проходящих через ось элемента и главные центральные оси сечения. Реальная длина этого элемента выбирается согласно рекомендациям **пп. 6.1-6.7, 5.13-5.16 СНИП II-23-81**.

5. Значение величины **Макс. гибкость**, по умолчанию равное 80, задаётся в соответствии с **пп.6.15, 6.16 СНИП II-23-81**. Так, для основных колонн предельная гибкость сжатых элементов определяется по формуле $180 - 60\alpha$, где $\alpha \geq 0,5$. В рассматриваемом случае для предельной гибкости имеем $180 - 60 \cdot 0,5 = 150$.

6. В качестве исходных данных (силовых факторов) могут быть использованы сведения из текущего нагружения или расчетные сочетания усилий (PCY).

7. Нажатием кнопки **Загрузить библиотеку** задаем путь к библиотеке, из которой будет подбираться сечение для конкретного конструктивного элемента: **C:\Program Files\APM Civil Engineering\Двутавр с уклоном полок ГОСТ 8239-89.slb**.

Для учета гибкости установите флаг ☒ **Учитывать гибкость при подборе сечения**.

При желании вместо проверки по методике, изложенной в **СНиП II-23-81**, можно выполнить проверку прочности и устойчивости классическими методами, поставив флажок напротив соответствующей опции.

Замечание 2. После того как все параметры конструктивного элемента заданы или отредактированы, их значения нужно сохранить нажатием кнопки **Применить**.

8.3. Выполнение расчета и просмотр результатов

Для выполнения расчета на несущую способность нажмите кнопку **Расчет** в диалоговом окне **Конструктивные элементы** (меню **Расчет/Проверка несущей способности**). После завершения расчета его результаты по каждому из критериев представляются в виде таблицы. В первой колонке таблицы перечислены параметры, по которым производился расчет несущей способности, а во второй приведены характеристики исходного сечения стержня (в рассматриваемом случае это **Двутавр с уклоном полок по ГОСТ 8239-89**).


Критерием проверки несущей способности стержневых элементов является сравнение полученного в результате расчета значения с единицей. Если полученное расчетным путем значение хотя бы одного из параметров превышает единицу, то исходное сечение считается не прошедшим проверку по данному параметру.

Параметры, величины которых по результатам проведенной проверки оказались не соответствующими заданным условиям работы, выделяются в таблице красным цветом; кроме того, в таблице появляется третья колонка, в которой содержатся характеристики сечения, предлагаемого программой на основе выполненного расчета. Нажатием кнопки **Заменить сечение** исходное сечение конструктивного элемента заменяется на предлагаемое. С помощью кнопки **Вернуть сечение** можно произвести обратную операцию.

В рассматриваемом примере, как следует из рис. 2.1.18, в качестве базового выбрано достаточно «прочное» сечение, все характеристики которого вполне удовлетворяют требованиям по несущей способности. Именно поэтому программа не предлагает никаких новых вариантов. Базовое сечение, кроме того, является оптимальным, т. к. параметр **Предельная гибкость в плоскости XOZ**, равный 0,9591, близок к единице.

Замечание 3. Если проводилась операция замены сечения, то после проверки по СНиП и замены сечений необходимо выполнить повторный статический расчет, на основании которого можно с уверенностью сделать окончательный вывод о работоспособности проектируемой конструкции.

9. Вывод результатов на печать и в формат *.rtf

Нажмите в основном окне программы кнопку  **Печать** (меню **Файл/Печать...**) и в открывшемся окне **Выбор данных для печати** отметьте флажками те данные и результаты, которые требуется вывести на печать. Вывод результатов расчета осуществляется на принтер (кнопка **Печать**) либо в текстовый файл формата *.rtf (кнопка **RTF**), который может быть открыт и отредактирован с помощью большинства современных текстовых редакторов. Возможность редактирования особенно удобна в том случае, когда результаты расчета нужно представить в виде отчета заданной формы.

Практическое задание

Выполнить статический расчет модели металлоконструкции, изображенной на рис. 2.1.20.

В качестве поперечного сечения стержней верхней части модели использовать равнополочный уголок 50х4 ГОСТ 8509-93, взяв его из соответствующей библиотеки. Поперечное сечение вертикальных опор создать в соответствии с рис. 2.1.3 (см. п. 3.1).

Предусмотреть такую ориентацию сечения стержней верхнего яруса, которая обеспечит возможность последующего заполнения наклонной поверхности пластинчатыми конечными элементами.

Приложить к верхнему поясу модели направленную вертикально вниз нагрузку, равную 200 кгс/м². Учесть действие силы тяжести.

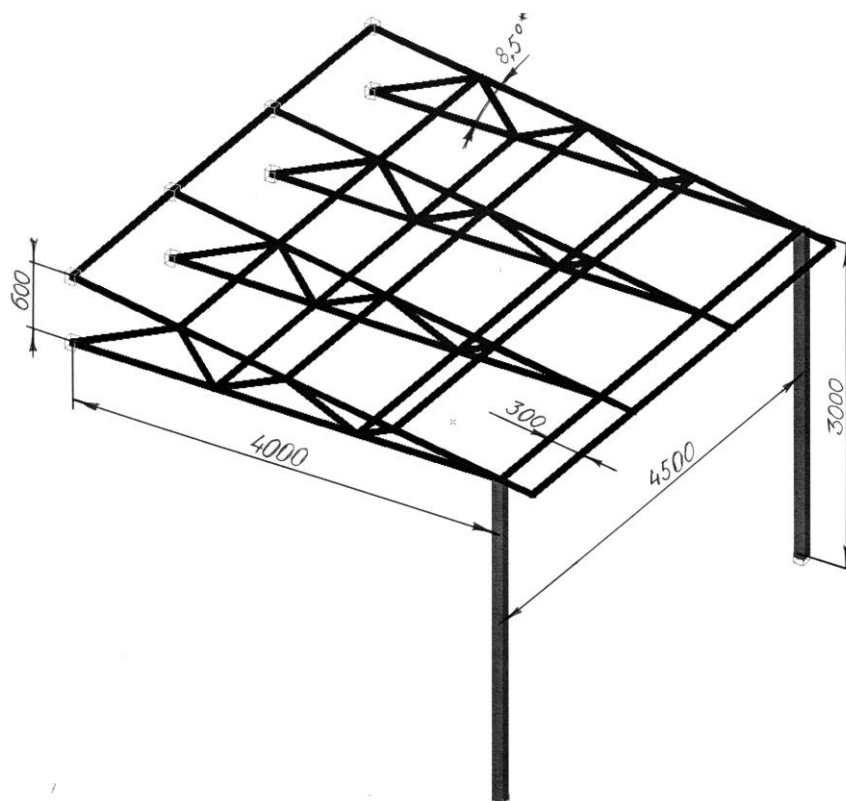


Рис. 2.1.19. Практическое задание

2.2. Статический расчет стержнево-пластинчатой модели пролета моста

Задача

Выполнить статический расчет стержнево-пластинчатой модели металлоконструкции пролета моста, изображенной на рис. 2.2.1. Стержневая модель (ее размеры и поперечные сечения стержневых элементов, а также тип закрепления) полностью соответствует условиям, сформулированным в главе 2.1.

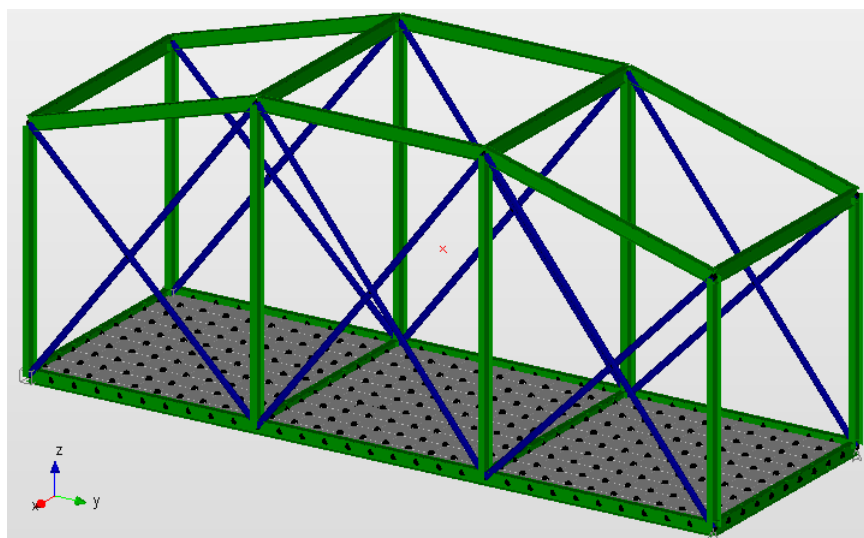


Рис. 2.2.1. 3D-модель пролета моста

Материал всех элементов (стержней и пластин) — сталь Ст3кп. Толщина пластинчатых элементов 4 мм. Соединение пластин со стержневыми элементами осуществляется сваркой по длине. Пластины нагружены нормальной распределенной силой (давлением) величиной 0,8 кПа. Кроме того, следует учесть действие на мост силы тяжести.

Общий порядок расчета

1. Создание плоской стержневой модели рамы моста.
2. Создание пластинчатых элементов модели и их разбиение на отдельные конечные элементы.
 - 2.1. Основные правила создания и разбиения пластин.
 - 2.2. Создание пластинчатых элементов.
 - 2.3. Разбиение пластин на конечные элементы.
3. Соединение пластинчатых элементов со стержневыми.
4. Присвоение пластинчатым параметров материала.
5. Задание силовых факторов, действующих на пластинчатые элементы модели.
6. Выполнение расчета.
7. Просмотр результатов расчета.
8. Вывод результатов расчета на печать и в файл формата *.rtf.

Решение

1. Создание плоской стержневой модели рамы моста

Построение рамы производим в соответствии с алгоритмом, приведенным в главе 2.1. В рассматриваемом случае можно воспользоваться уже готовой моделью (см. гл. 2.1), нагруженной и закрепленной, но тогда потребуются удалить действующую на стержни распределенную нагрузку. Для этого выделяем соответствующие стержни и выбираем в меню **Нагрузки** пункт **Удалить нагрузки на стержень**.


2. Создание пластинчатых элементов модели и их разбиение на отдельные конечные элементы

2.1. Основные правила создания и разбиения пластин

При создании и разбиении пластинчатых элементов следует придерживаться нескольких правил.


- Если пластина должна «закрывать» несколько контуров стержневой модели, то для упрощения процесса соединения пластины со стержневыми элементами целесообразно в каждом из контуров создавать отдельную пластину.
- При создании нескольких пластин нужно действовать *однотипно*, т. е. щелкать левой кнопкой мыши на узлах стержневой модели в определенной последовательности – по часовой стрелке или против нее. От этой последовательности зависит ориентация *локальной системы координат* создаваемой пластины. К пластинам с одинаково ориентированной локальной системой координат может быть применен принцип работы с группой объектов: разбиение на конечные элементы, задание нагрузок и т. п.
- Все пластины должны быть разбиты на отдельные конечные элементы. В большинстве случаев достаточно, чтобы в направлении максимальной стороны пластины имелось 10 элементов разбиения, а в направлении минимальной стороны — как минимум 2.
- Для того чтобы созданные при разбиении конечные элементы не служили источниками дополнительной погрешности, например, необоснованными концентраторами напряжений, они не должны быть сильно вытянутыми. Оптимальное соотношение длин их сторон — не более чем 1:2,5, диапазон углов — $30^\circ < \alpha < 150^\circ$.

2.2. Создание пластинчатых элементов


Переходим в режим **Четырехугольная прямоугольная пластина** нажатием  кнопки на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Рисование/Пластина/Четырехугольная прямоугольная**). Далее последовательно щелкаем левой кнопкой мыши на трех узлах из тех, к которым необходимо «привязать» пластину; определение положения четвертого узла и привязка к нему осуществляются автоматически. Построение каждой из пластин начинаем с левого переднего узла пластины, а узлы обходим по часовой стрелке.

2.3. Разбиение пластин на конечные элементы

Поскольку пластины создавались однотипно, то их локальные системы координат ориентированы одинаково, следовательно, все три пластины после выделения одновременно могут быть разбиты на конечные элементы.

Для выделения пластины нужно щелкнуть на ней левой кнопкой мыши, предварительно нажав кнопку  **Выбрать** панели инструментов **Нарисовать** (меню **Редактирование/Выбрать**

элемент). При выделении группы элементов нужно удерживать клавишу **Shift** на клавиатуре нажатой, в противном случае после выделения последующего элемента со всех предыдущих оно снимается.

Для перехода в режим разбиения пластин нажимаем кнопку  **Разбить пластину** на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Рисование /Пластина/Разбить пластину**) и щелкаем на одной из выделенных пластин. При этом открывается диалоговое окно **Параметры разбиения** (рис. 2.2.2), а на пластинах появляется схематическое изображение их локальной системы координат. Поскольку, по условию задачи, пластины следует «приварить» к стержням, а для моделирования сплошного сварного шва соединяемые элементы необходимо разбивать не менее чем на 10 частей, то в обоих полях ввода диалогового окна **Параметры разбиения** (**Направление X** и **Направление Y**) записываем по 10. Переключатель **Тип элемента** ставим в положение **4-хугольная пластина**. Задаем толщину для новых пластин 4 мм. После этого нажимаем кнопку **ОК**.

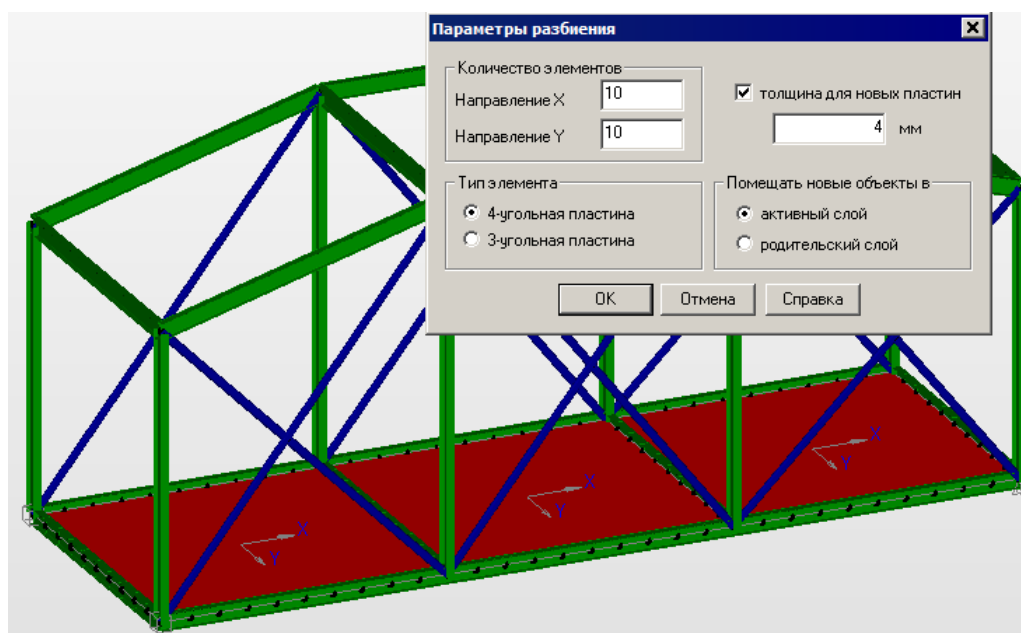




Рис. 2.2.2. Разбиение пластин

3. Соединение пластинчатых элементов со стержневыми

При моделировании сплошного сварного шва необходимо обеспечить соединение пластин со стержнями общими узлами, причем не только по углам, но и по длине стержня. С этой целью стержень следует разбить на такое же количество частей, на которое была разбита пластина. Тогда узлы на стержне появятся в местах расположения узлов пластины, и благодаря привязке эти пары узлов объединятся.

Поскольку в рассматриваемом случае все соединяемые с пластинами стержни необходимо разбить на одинаковое количество частей, то их можно выделить и работать с группой стержней. Для разбиения выделенной группы стержней нажимаем на панели инструментов **Нарисовать** кнопку  **Разбить стержень** (меню **Рисование/Стержень/Разбить стержень**), щелкаем указателем мыши на одном из выделенных стержней, в поле ввода **Число стержней** открывшегося диалогового окна **Разбить стержень** записываем число 10 и нажимаем кнопку **ОК**.

4. Присвоение пластинчатым элементам параметров материала


Для присвоения пластинам свойств материала нужно их выделить, затем нажать на панели инструментов **Свойства** кнопку  **Материалы** (меню **Свойства/Материалы...**) и с помощью полей открывшегося диалогового окна **Материалы** задать свойства материала. По умолчанию новым элементам присваиваются свойства материала, который является текущим. Таким материалом при первоначальном запуске программы служит сталь Ст3кп, что и соответствует условию рассматриваемой задачи.

5. Задание силовых факторов, действующих на пластинчатые элементы модели

Пролет моста находится под действием двух силовых факторов:

- собственного веса;
- распределенной нагрузки, приложенной к стальным пластинам.

Моделирование собственного веса подробно рассмотрено в гл. 2.1, п. 5.1. Здесь мы остановимся на задании нормальной распределенной нагрузки.

Выделяем пластинчатые элементы модели, на которые действует распределенная нагрузка, нажимаем кнопку  **Нагрузка на пластину** на панели инструментов **Нагрузки** (меню **Нагрузки/ Нагрузка на пластину**) и щелкаем левой кнопкой мыши на одной из выделенных пластин.

В полях ввода появившегося диалогового окна **Распределенная нагрузка** необходимо записать величину и направление (знак) действующей удельной силы (рис. 2.2.3). Распределенная нагрузка на пластину может быть задана как в локальной системе координат (ЛСК), так и в глобальной (ГСК). В рассматриваемом примере задаем нагрузку в ЛСК. Нормалью к пластине является орт оси Z ЛСК, значит, нагрузка действует в направлении вектора нормали и имеет знак «+». Следовательно, в поле ввода **Z, Н/мм²** записываем взятую с положительным знаком величину распределенной нагрузки, выраженную в МПа ($1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$), а именно число 0,0008, что соответствует действующему по условию давлению 0,8 кПа.

После того как процесс задания распределенной нагрузки завершается, на соответствующих элементах появляется ее схематическое изображение.

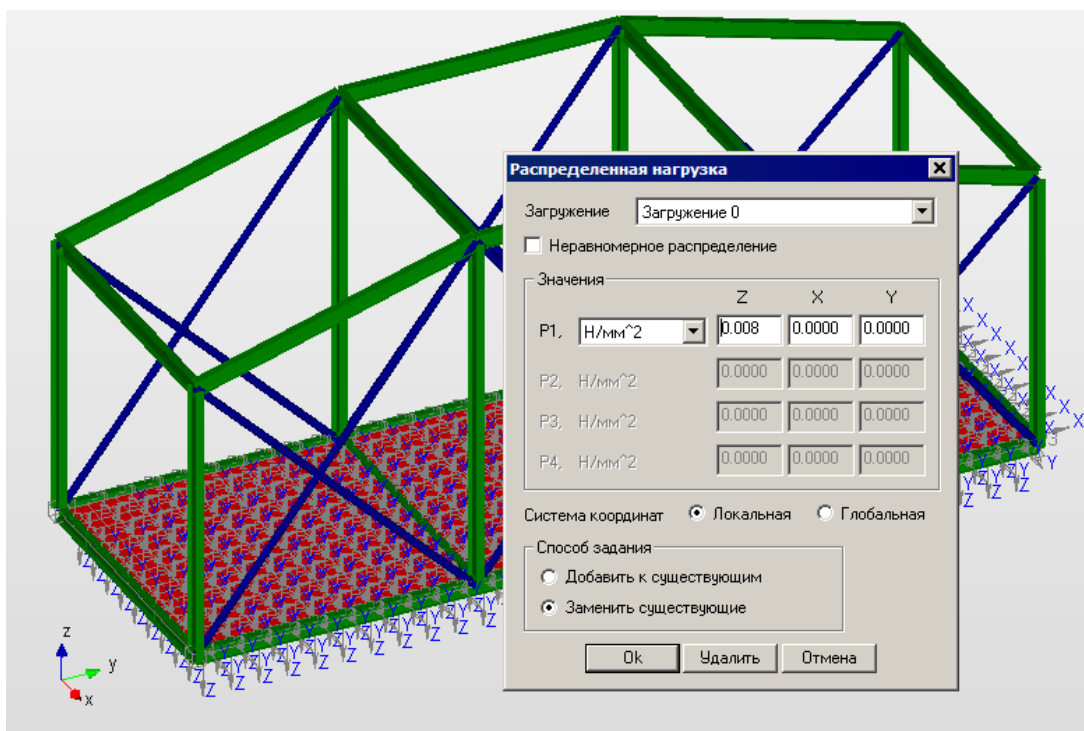


Рис. 2.2.3. Задание нормальной распределенной нагрузки, действующей на пластины

6. Выполнение расчета

Для запуска модели на расчет выбираем в меню **Расчет** пункт **Расчет...** и в открывшемся диалоговом окне **Расчет** отмечаем флажком необходимый тип расчета — в рассматриваемом случае это **Статический расчет**.

7. Просмотр результатов расчета

После выполнения расчета можно проанализировать его результаты. Визуализация результатов расчета стержневых элементов подробно рассмотрена ранее (см. гл. 2.1, п. 7), поэтому здесь остановимся только на результатах расчета пластин. Анализ результатов расчета проиллюстрируем на примере особенностей карты напряжений в пластинах.

7.1. Особенности карты результатов расчета для пластин

Выбираем в меню **Результаты** пункт **Карта результатов...**, что приводит к появлению диалогового окна **Параметры вывода результатов**. Это окно можно развернуть нажатием кнопки **Дополнительно >>>** (рис. 2.2.4).

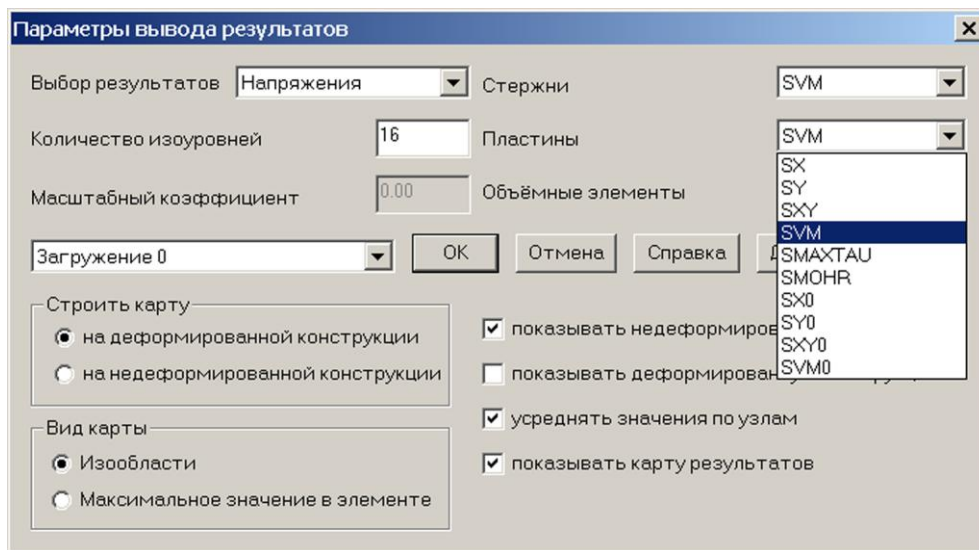


Рис. 2.2.4. Параметры вывода результатов

Из выпадающего списка **Пластины** выбираем компоненты напряжений, результаты расчета которых нас интересуют. Обозначения, применяемые для описания компонент напряжений в выпадающем списке, вводятся по следующим правилам.

Нормальные напряжения обозначаются двумя буквами, одна из которых — заглавная S (от англ. *stress* — напряжение), другая — первая буква названия той координатной оси, вдоль которой действует этот компонент. Например, «SY» обозначает напряжение, действующее на положительной или отрицательной поверхности пластины в направлении оси Y. Подчеркнем, что для каждой из поверхностей пластины (положительной и отрицательной) формируются отдельные карты напряжений.

Для обозначения напряжений сдвига (касательных напряжений) используются три буквы: первая по-прежнему S (или T), а две другие указывают на плоскость, в которой действует данное напряжение. Например, «SXY» — это касательные напряжения в плоскости XOY пластины на ее положительной или отрицательной поверхности.

Эквивалентные напряжения (по Мизесу), как и в стержнях, обозначаются SVM и показываются на каждой из поверхностей пластины.

Эквивалентное напряжение по теории максимальных касательных напряжений обозначается как SMAXTAU, эквивалентное напряжение по теории Мора — SMOHR. Эти напряжения вычисляются по формулам:

$$S_{\text{MAXTAU}} = S_1 - S_3; \quad S_{\text{MOHR}} = S_1 - kS_3,$$

где S_1 и S_3 — первое и третье главные напряжения; k — отношение предела текучести на растяжение к пределу текучести на сжатие для материала пластины.

Аналогичные компоненты напряжений с индексом 0 (SX0, SXY0, SVM0 и т.д.) — это соответствующие компоненты напряжений для срединной поверхностей пластины, т. е. поверхности, эквидистантной по отношению к внешним.

Нормальные и касательные напряжения могут быть как положительными, так и отрицательными — в отличие от всегда положительных эквивалентных напряжений, рассчитанных по теориям Мизеса и Мора, а также теории максимальных касательных напряжений. Напомним, что положительными считаются растягивающие напряжения, а отрицательными — сжимающие.

После нажатия кнопки **ОК** на экране монитора открывается карта напряжений, на которой с помощью различных цветов показываются максимальные величины эквивалентных напряжений в стержневых и пластинчатых элементах модели конструкции (рис. 2.2.5).

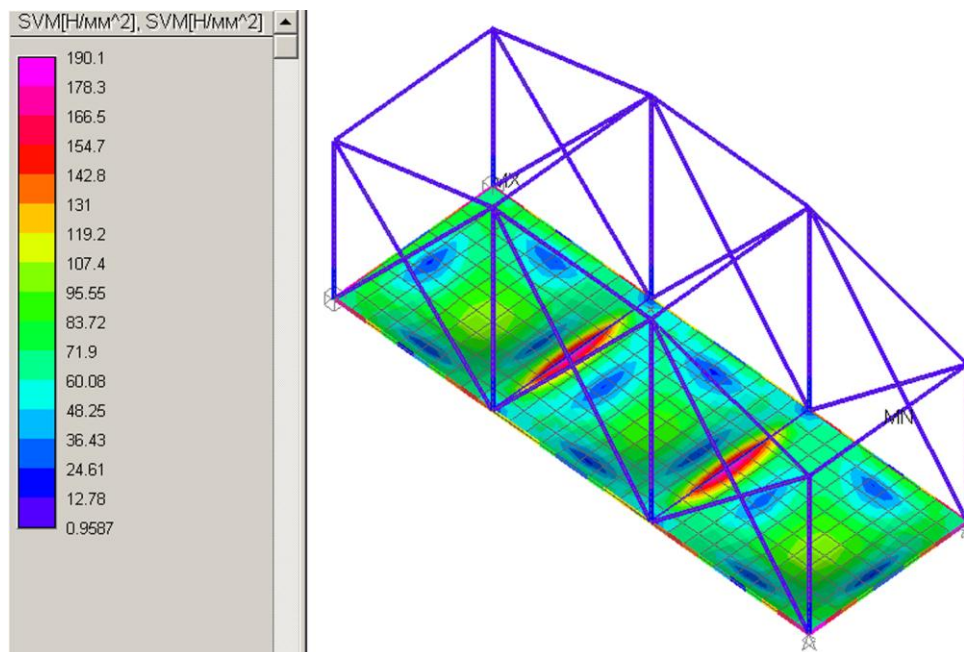


Рис. 2.2.5. Карта эквивалентных напряжений

По умолчанию карта напряжений показывается в виде **Изообластей**, кроме того, включена опция **Усреднять значения по узлам**. В этом случае узловое значение соответствующего параметра (в данном случае напряжения) рассчитывается как среднее арифметическое его значений, вычисленных во всех примыкающих к данному узлу конечных элементах, для которых узел является общим, и в области этого узла присутствует только один цвет. Такой режим наиболее точно отражает реальное распределение значений рассматриваемого параметра.

Если карта напряжений строится по **Максимальным значениям в элементе**, то весь конечный элемент окрашивается в цвет, соответствующий максимальному значению напряжения.

7.2. Просмотр результатов расчета внутренних силовых факторов в узлах пластинчатых элементов

Для просмотра внутренних нагрузок в узлах пластин выбираем в меню **Результаты** пункт **Нагрузки....** Затем в открывшемся диалоговом окне **Результаты** (рис. 2.2.6) указываем нужный элемент, выбор которого можно осуществить с помощью списка элементов либо простым щелчком на нем в режиме выбора элементов.

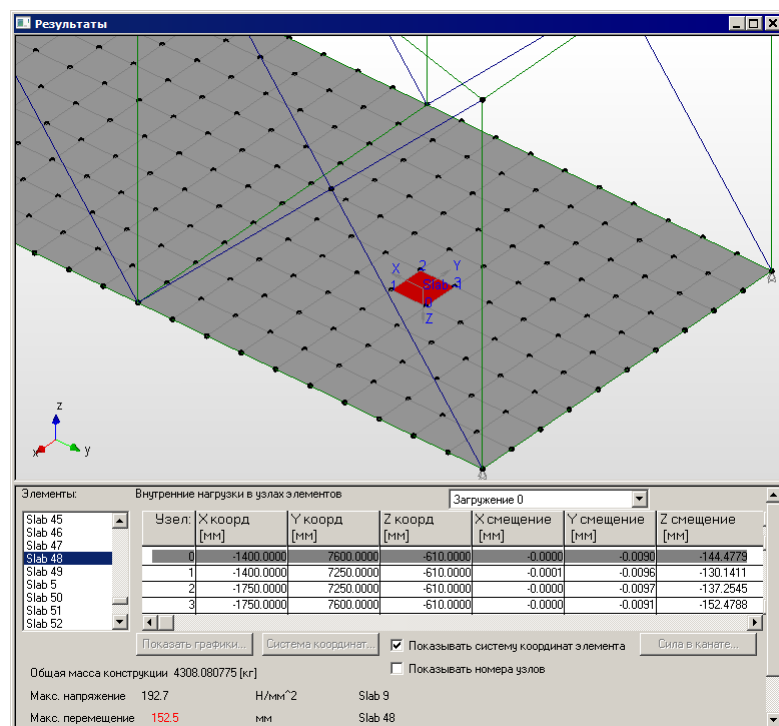



Рис. 2.2.6. Силовые факторы в узлах пластинчатого элемента

В нижней части окна **Результаты** приводятся сведения об общей массе модели конструкции и максимальных величинах напряжения и перемещения с указанием номеров элементов, в которых они наблюдаются.

Если из списка **Элементы** выбрать некоторый пластинчатый элемент, то для него в таблице **Внутренние нагрузки в узлах элементов** можно посмотреть: номера и координаты узлов, смещения узлов, угловые перемещения, а также силы и моменты в узлах. На самом выбранном элементе (см. верхнюю часть окна) визуализируется его локальная система координат.

Заметим, что для пластин, в отличие от стержневых элементов, нельзя визуализировать эпюры силовых факторов и картину распределения напряжений в поперечном сечении.

8. Вывод результатов на печать и в формат *.rtf.

Нажмите в основном окне программы кнопку  **Печать** (меню **Файл/Печать...**) и в открывшемся окне **Выбор данных для печати** отметьте флажками те данные и результаты, которые требуется вывести на печать. Вывод результатов расчета осуществляется на принтер (кнопка **Печать**) либо в текстовый файл формата *.rtf (кнопка **RTF**), который может быть открыт и отредактирован с помощью большинства текстовых редакторов. Возможность редактирования особенно удобна в том случае, когда результаты расчета нужно представить в виде отчета заданной формы.

Практическое задание

Произвести статический расчет модели металлоконструкции (см. рис. 2.1.20), дополненной наклонной крышей из пластинчатых конечных элементов. Толщину пластин крыши взять равной 2 мм. Обеспечить соединение крыши со стержневыми элементами по всей их длине.

Приложить к верхнему поясу модели направленную вертикально вниз нагрузку, равную 2000 кгс/м^2 , предварительно удалив ее со стержней.