

Метод конечных элементов на примере программного комплекса SCAD Office®

Работа №2: «Построение эпюр M и Q в шарнирной балке»

Цель работы:

Приобрести навыки в практическом применении программного обеспечения на основе метода конечных элементов. Научиться выполнять операции построения расчетной схемы, назначения необходимых параметров, анализировать полученные в ходе численного анализа результаты.

В состав задания входит:

1. Схема многопролетной балки.
2. Значения величин l и q , требуемые для расчета геометрических параметров балки и нагрузок соответственно.

Варианты заданий приведены в этом файле в приложении.

Требуется:

Результаты работы должны быть выполнены в виде текстового файла, выполненного в графическом редакторе, содержащего следующие разделы:

- исходные данные;
- краткое описание используемого программного комплекса и применяемого численного метода (метода конечных элементов);
- основные этапы создания расчетной схемы;
- изображение расчетной схемы с нагрузками;
- изображение деформированной в результате приложенных нагрузок сетки;
- изображения эпюр моментов и поперечных сил.

Представление результатов работы:

Результаты работы должны быть представлены в виде двух файлов:

- текстового файла отчета (*.doc)
- файла проекта ПК SCAD с расширением *.spr.

Последовательность выполнения работы

Рассмотрим последовательность действий по выполнению работы. Схема балки представлена на рисунке 1. Выполним построение эпюр M и Q для этой балки с помощью ПК SCAD при $l = 6$ м и $q = 10$ кН/м. По зависимостям вычислим геометрические размеры и нагрузки.

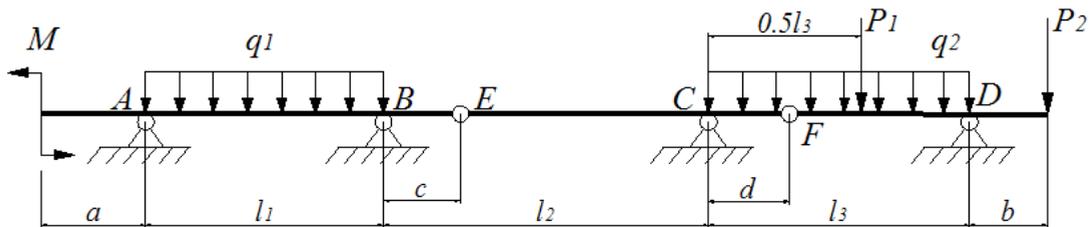


Рис.1. Расчетная схема многопролетной балки. Задание.

Балка с вычисленными размерами приведена на рисунке 2.

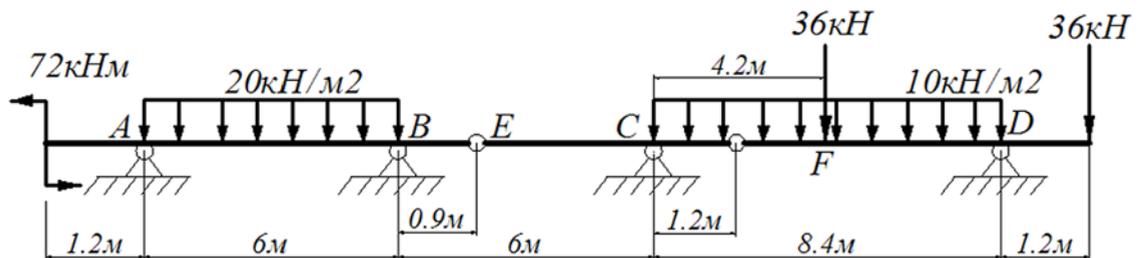


Рис.2. Расчетная схема многопролетной балки

Перед началом работы на компьютере необходимо выполнить подготовительные операции с заданной расчетной схемы балки.

Вначале требуется вручную разбить балку на конечные элементы типа 2 (стержневой элемент плоской рамы) с учетом особенностей ее конструкции и вида действующей на нее нагрузки.

Подготовка к формированию расчетной схемы МКЭ заданной балки с помощью программы SCAD:

- 1) изображаем заданную расчетную схему балки;
- 2) с учетом нагрузки, разбиваем стержни на элементы и нумеруем узлы и элементы;
- 3) выбираем начало общей системы осей координат

На рис. 3 показана подготовленная расчетная схема шарнирной балки с указанными номерами узлов (от 1 до 9), номерами элементов (от (1) до (8)) и системой координат с началом в узле №1.

Квадратиками показаны узлы, линиями (отрезками) конечные элементы – стержни. В узлах №4 и №6 расположены шарниры, соединяющие стержни. В узлах №2, №3, №5, №8 – шарнирные опоры.

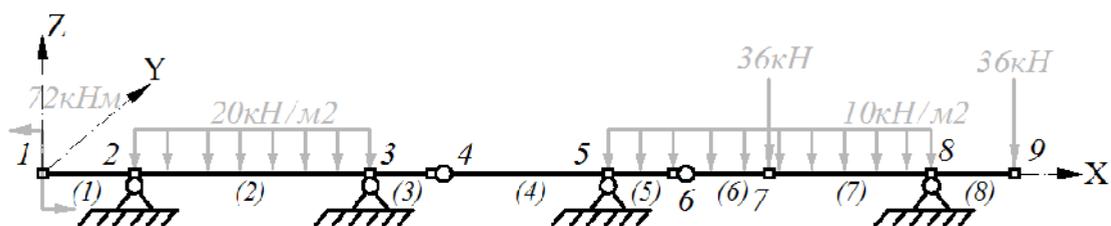


Рис.3. Предварительно подготовленная расчетная схема шарнирной балки

Создание расчетной схемы в ПК SCAD

Запустить программу SCAD, создать новый проект, указав его параметры и тип схемы (для стержневой системы выбираем тип схемы 2. *Плоская рама*), выбрать единицы измерения (или принять выбранные по умолчанию), сохранить проект. Зайти в препроцессор для создания модели (иконка *Расчетная схема*).

Для создания расчетной схемы шарнирной балки из конечных элементов типа 2 можно использовать два способа.

1) Использовать заготовку для построения расчетной схемы плоской рамы (раздел *Схема*).

2) Использовать способ построения расчетной схемы шарнирной балки с помощью последовательного введения узлов балки в общей системе координат и затем последовательного соединения этих узлов стержневыми элементами (раздел *Узлы и Элементы*).

Примерная последовательность действий при создании расчетной схемы первым способом.

Создание элементов балки и назначение жесткости

Выбрав раздел *Схема*/кнопка «Генерация прототипа рамы», откроем окно *Выбор конфигурации рамы*.

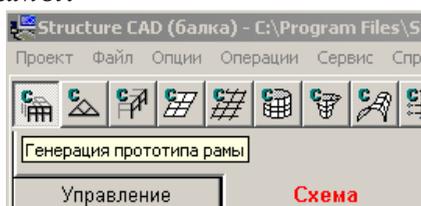


Рис.5 Кнопка *Генерация прототипа рамы* в инструментальной панели *Схема*

В соответствии с заданной на рис.3 схемой балки, выбираем конфигурацию рамы, состоящую из горизонтальных ригелей и вертикальных колонн.

В окне *Задание параметров регулярной рамы* (рис.6) назначаются геометрические параметры балки, конечные элементы которой, намеченные на расчетной схеме на начальном этапе, можно рассматривать как пролеты ригелей длиной L_p показанной в окне типовой рамы (в таблицу вводятся длины конечных элементов). Колонны в этом случае отсутствуют, оставляем графы *высота* и *количество этажей* пустыми.

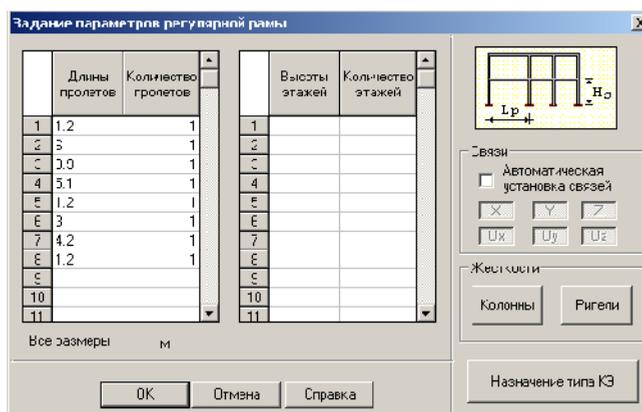


Рис.6 Окно *Задание параметров регулярной рамы*

Убираем галочку «Автоматическое задание связей», поскольку их будем назначать отдельно.

Назначаем жесткости конечным элементам (кнопка «Ригели»). В окне «Жесткость стержней» выбираем способ задания жесткости КЭ в виде «Численное описание» и переходим на вторую страницу окна, которая так и называется - «Численное описание».

В соответствующей закладке отметим тип элемента «Стержень плоской рамы» (Тип 2) и, поскольку поставлена задача определения только усилий в статически определимой балке, зададим единичные жесткости в окнах «Изгибная жесткость» и «Продольная жесткость» (рис.7).

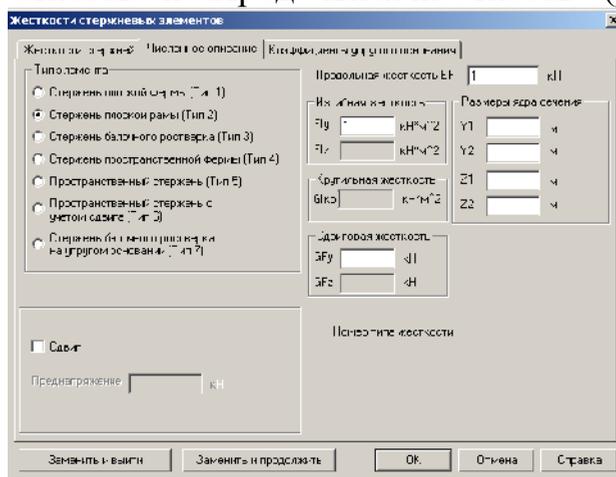


Рис.7 Назначение жесткости элементам балки

Подтверждаем выбранную жесткость нажатием кнопки ОК. Снова появится окно *Задание параметров регулярной рамы* (см. выше). Теперь можно это окно закрыть, нажав в нем кнопку ОК. Появится окно с расчетной схемой балки для МКЭ.

Чтобы в окне препроцессора отобразились составные части расчетной схемы (узлы, номера узлов, элементов, и др.) нужно на панели *Фильтры отображения* нажать соответствующие кнопки. Построенная расчетная схема будет выглядеть примерно так, как показано на рисунке 8. На расчетной схеме балки отображены: узлы элементов, их номера (верхние числа выше оси балки) номера КЭ (выше оси посередине отрезков), номера

типа заданной для расчета жесткости КЭ (цифра 1 ниже оси), тип КЭ (цифра 2 ниже оси).

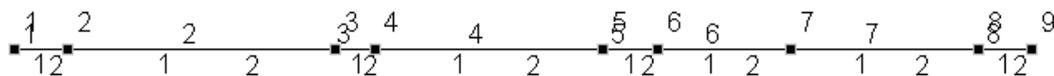


Рис.8. Расчетная схема в препроцессоре SCAD

Установка связей

Связями в программе СКАД называется ограничение перемещений и поворотов по различным направлениям осей системы координат. В рассматриваемой задаче связи назначаются в тех узлах, в которых на расчетной схеме находятся шарнирные опоры – этих узлов четыре. При назначении связей при создании шарнирной опоры необходимо запретить возможность перемещений по горизонтальной и вертикальной осям, но разрешить поворот вокруг оси, направленной на пользователя (оси Y). В этом случае будет смоделирована шарнирная опора.

Для установки связей в опорных узлах плоской стержневой системы нажмем кнопку «Установка связей в узлах» инструментальной панели раздела *Назначения*. В диалоговом окне *Связи* предусмотрено назначение связей для пространственного узла (6 связей в соответствии с 6 степенями свободы жесткого узла в пространственной задаче). В плоской стержневой системе, расчетная схема которой находится в плоскости XOZ (тип расчетной схемы 2 – для рассматриваемой задачи), для закрепления жесткого узла используются следующие три связи:

- связь X для закрепления узла от линейных смещений в направлении оси X;
- связь Z для закрепления узла от линейных смещений в направлении оси Z;
- связь UY для закрепления узла от поворота вокруг оси Y.

Назначим связи (ограничение перемещений) по направлениям X и Z.

Назначение шарниров

В рассматриваемой задаче требуется назначить только 2 шарнира в узлах №4 и №6 (см. расчетную схему).

Под шарниром в программе СКАД понимается условие примыкания стержней друг к другу. К опорам это не имеет отношения.

Назначение шарниров выполняется в разделе *Назначения* (кнопка «Установка шарниров» - рис.9). В окне «Условия примыкания стержней» зададим освобождение требуемых связей.

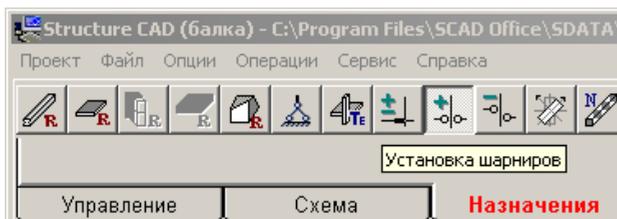


Рис.9. Кнопка *Установка шарниров* на инструментальной панели *Назначения*

Поскольку шарнир в шарнирной балке позволяет подходящим к нему сечениям элементов балки поворачиваться вокруг оси Y , то его постановка в каком-то узле балки означает освобождение в этом узле угловой связи, которая в программе SCAD обозначена UY . Постановка одиночного шарнира в узле может быть выполнена или в элементе слева от узла, или в элементе справа от него.

Отобразить шарниры на схеме можно, нажав соответствующую кнопку панели фильтров.

Ввод нагрузок

Для задания узловых нагрузок (сосредоточенных сил и моментов) используем кнопку «Ввод узловых нагрузок» на панели *Загрузки*. Откроется окно, показанное на рис.10.

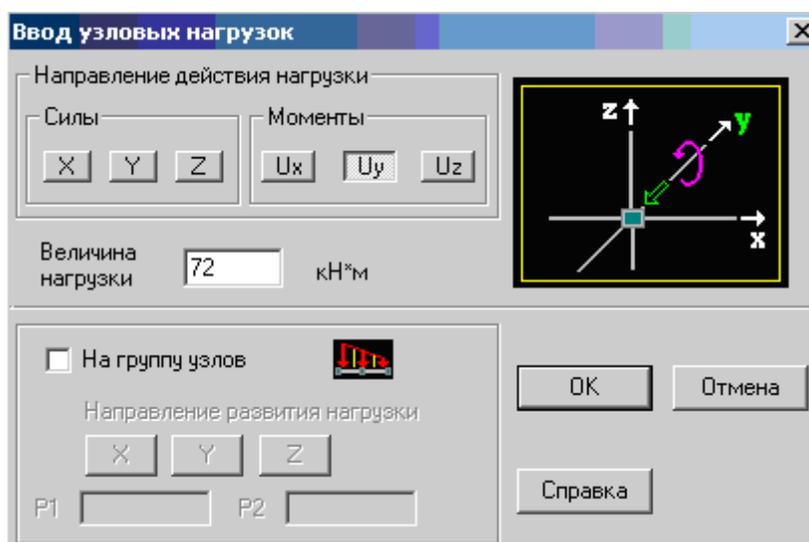


Рис.10. Окно **Ввод узловых нагрузок**

В демонстрируемом диалоговом окне показано как задается сосредоточенная нагрузка в виде момента, равного 72 кН·м и действующего на узел 1 вокруг оси Y . Момент считается положительным при его действии по часовой стрелке, если смотреть с положительного конца оси Y (на картинке в окне назначения нагрузок всегда показано положительное направление вводимой нагрузки). Если в исходных данных момент направлен в другую сторону, его значение вводится со знаком минус. После нажатия кнопки ОК появится расчетная схема, в которой надо выделить узел, на который действует момент, и нажать кнопку ОК с зеленой галочкой на меню панели *Загрузки*.

Сосредоточенная узловая сила назначается тем же способом.

Для задания распределенной нагрузки используем кнопку «Нагрузки на стержни». Появится окно *Задание нагрузки на стержневые элементы* (рис.11).

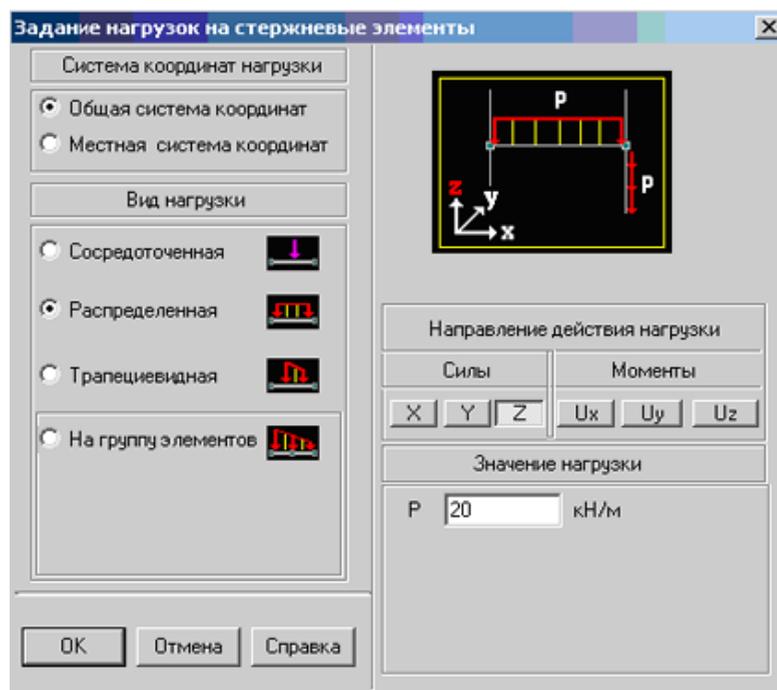


Рис.11. Окно *Задание нагрузки на стержневые элементы*

При задании распределенной нагрузки последовательность действий следующая: 1) выбирается система координат, в которой задается нагрузка; 2) указывается вид нагрузки («*Распределенная*»); 3) указывается направление нагрузки в общей системе координат (*Z*); 4) задается знак и значение нагрузки. После нажатия на кнопку *ОК* появится расчетная схема балки.

С помощью курсора и левой клавиши мыши выделим элемент 2, к которому следует приложить заданную нагрузку (ось элемента станет красной), и нажимаем кнопку *ОК* с зеленой галочкой на инструментальной панели раздела *Загружения*. При нажатых кнопках отображения нагрузок панели фильтров на экране появится расчетная схема с заданными нагрузками.

Когда все требуемые по заданию нагрузки введены и загрузка балки полностью сформировано, его необходимо сохранить (кнопка *Сохранить/добавить загрузку* на панели инструментов *Загружения*). В нашем примере рассмотрено только суммарное загрузку балки всеми нагрузками одновременно и ему при сохранении присвоено наименование «Суммарная» и присвоен номер1. После сохранения появляется запрос программы: «*перейти к формированию нового загрузку?*». При ответе «Да», все нагрузки, которые были созданы и отображались на экране, исчезают, а также становится активным раскрывающееся окно на панели *Загружения* со списком сохраненных нагрузок. Из этого окна можно открыть любое из сформированных ранее загрузку.

Вид расчетной схемы с любым загрузку можно сохранить в файле с расширением *.wmf* (кнопка с изображением фотоаппарата инструментальной панели *Управление*) и при необходимости вставить в текст отчета или распечатать сразу с экрана.

Назначение расчетных сечений в стержнях

На стержневых элементах с линейной эпюрой M для ее построения и анализа достаточно иметь только по две ординаты, на элементах с равномерно распределенной нагрузкой рекомендуется иметь усилия не менее чем в 3 сечениях по длине элемента. Для назначения количества сечений используется кнопка «Вычисление усилий в дополнительных сечениях и узлах» раздела *Назначения* (рис.12).

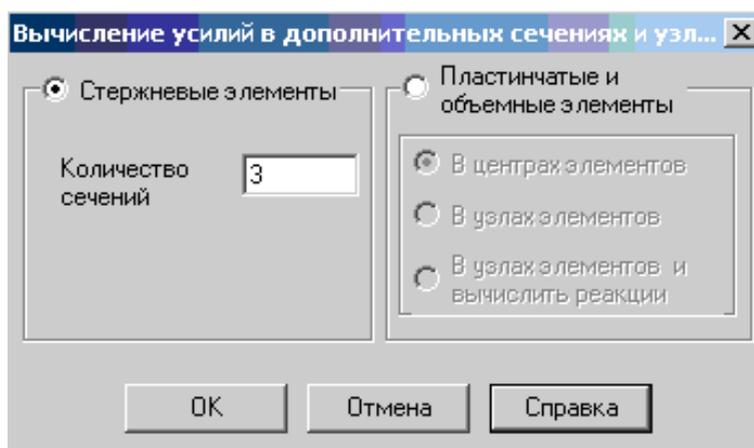


Рис.12. Эпюра моментов

На стержневых элементах с линейной эпюрой M для ее построения и анализа достаточно иметь только по две ординаты. Для этого в окошке с названием «Количество сечений» надо ввести цифру 2. Затем нажать ОК и на появившейся снова расчетной схеме отметить элементы, в которых ожидается линейная эпюра M , и нажать кнопку ОК с зеленой галочкой на инструментальной панели раздела *Назначения*.

Аналогично на элементах с равномерно распределенной нагрузкой рекомендуется иметь усилия не менее чем в 3 сечениях по длине элемента: в сечениях по концам элемента и в среднем сечении $[3 \div 5]$. В демонстрируемом здесь окне введена цифра 3 для элементов 2, 5, 6 и 7. Далее последовательно выполняются только что описанные действия для назначения указанных трех сечений на отмеченных элементах.

Расчет

Для выполнения расчета необходимо зайти в раздел *Управление* и нажать кнопку для выхода в экран управления проектом. В дереве проекта, в группе функций *Расчет* выбираем *Линейный*. Все параметры расчета оставляем принятыми по умолчанию. После предложенного программой сохранения проекта автоматически запускается численный анализ задачи.

В ходе выполнения расчета отображается протокол его выполнения. Если расчет закончен успешно, в протоколе появится сообщение об этом. Тогда следует нажать кнопку «Выход» для выхода в экран управления проектом.

Если же появится сообщение, что расчет не выполнен, нужно, нажав кнопку «Выход», вернуться в экран управления проектом. Затем, выбрав команду *Расчетная схема*, открыть снова препроцессор чтобы найти и исправить допущенные ошибки.

Анализ результатов

После успешного завершения проекта нужно проанализировать полученные результаты и выбрать ряд изображений для формирования отчета.

Результаты расчета оцениваются в разделе *Графический анализ*, который открывается из экрана управления проектом. Это окно по структуре похоже на окно формирования модели, но отличается другими панелями инструментов. В инструментальной панели *Деформации* можно оценить характер деформирования балки под нагрузкой. Панель *Эпюры усилий* служит для получения эпюр моментов, продольных и поперечных сил в стержневых элементах.

Для того, чтобы получить эпюры M и Q , требуемые в задании, нужно открыть панель инструментов *Эпюры усилий*. Затем в раскрывающихся окнах выбрать (слева направо): обозначение усилия, для которого предполагается построить эпюру (M или Q); номер загрузки (ему будет соответствовать название, если оно было задано, в нашем варианте «Суммарная»); масштабный коэффициент для ординат эпюры.

Для отображения на экране выбранного усилия надо нажать кнопку  «Ввод эпюр». При этом в рабочей области экрана появится расчетная схема балки для МКЭ с требуемой эпюрой.

Если на панели *Фильтры отображения* нажать кнопку , то на эпюре будут обозначены значения и знаки усилий.

Эпюры моментов и поперечных сил в балке показаны на рис.13, 14.

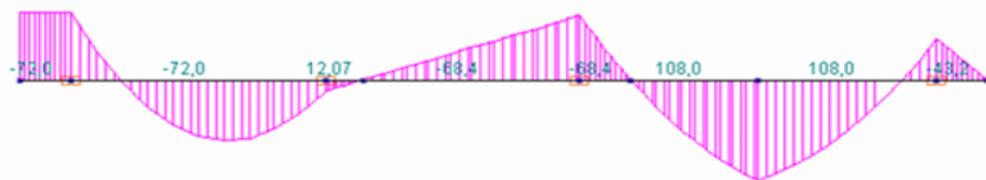


Рис.13. Эпюра моментов

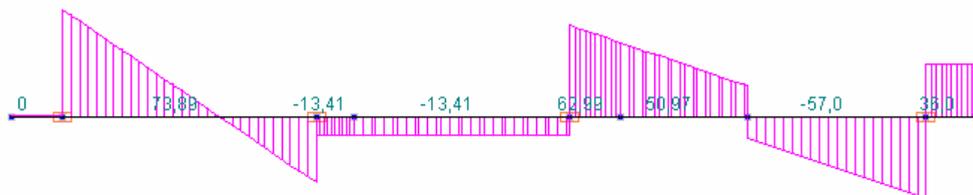


Рис.14. Эпюра поперечных сил

Варианты заданий для работы №2
«Построение эпюр M и Q в шарнирной балке»

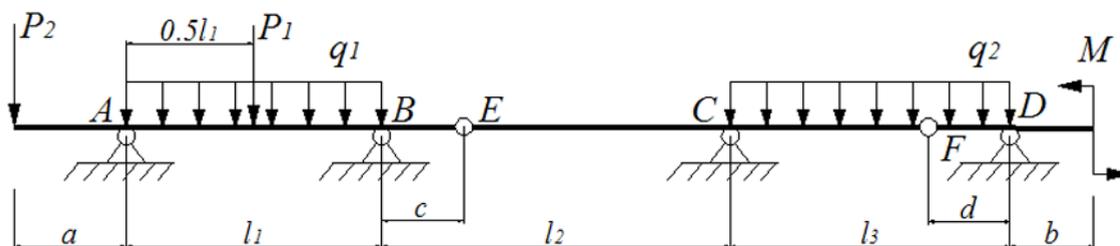


Рис. 1. Схема шарнирной балки

Зависимости для определения основных геометрических размеров и нагрузок:

$$l_1 = l_2 = l; \quad l_3 = 1.4l; \quad a = b = d = 0.2l; \quad c = 0.15l;$$

$$q_1 = 2q; \quad q_2 = q; \quad P_1 = P_2 = 0.6ql; \quad M_o = 0.2ql^2.$$

Выбор варианта осуществляется согласно представленной таблице:

Первая буква фамилии	l	q	Первая буква фамилии	l	q	Первая буква фамилии	l	q
А	2,0	10,0	К	7,0	20,0	Ф	6,0	15,0
Б	2,5	11,0	Л	7,5	21,0	Х	5,5	16,0
В	3,0	12,0	М	8,0	22,0	Ц	5,0	17,0
Г	3,5	13,0	Н	8,5	23,0	Ч	4,5	18,0
Д	4,0	14,0	О	9,0	24,0	Ш	4,0	19,0
Е	4,5	15,0	П	8,5	10,0	Щ	3,5	20,0
Ё	5,0	16,0	Р	8,0	11,0	Э	3,0	21,0
Ж	5,5	17,0	С	7,5	12,0	Ю	2,5	22,0
З	6,0	18,0	Т	7,0	13,0	Я	2,0	23,0
И	6,5	19,0	У	6,5	14,0			