

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА НИКОЛАЯ II"
(МГУПС (МИИТ))**

**Программный код для расчёта методом конечных элементов с
использованием переменных параметров упругости балочных
конструкций, разбиваемых на треугольные конечные элементы**

(приложение к отчёту о научных исследованиях за IV семестр)

Выполнил:

Аспирант II курса

Каф. «Мосты и тоннели»

Юрченко В.Э.

```

% Данная функция предназначена для обсчитывания конструкции
% модифицированным методом конечных элементов (при заданных внешних
% нагрузках):
% для расчёта перемещений узлов, деформаций конечных
% элементов и вычисления напряжений в них, а также для
% усреднения внутренних силовых и деформативных факторов между соседними
% треугольными элементами для цели представления результатов в
% форме разбиения конструкции на квадратные конечные
% элементы;
% указанный функционал реализован с возможностью приведения
% жёсткостных параметров материала рассчитываемой конструкции
% (например, для учёта арматуры в бетоне и т.д.),
% а также с введением в расчёт переменных параметров
% упругости
function [L, H, T, nL, nH, X0, Y0, n, n_array, N, N_array, Xjun, Yjun, Mfe_jun, Rb,
Rbt, R2c, E0con, E0arm, G0arm, K0arm, K0con, G0con, nu0con, nu0arm, hi,
lim_def_con_X, lim_shift_con, lim_def_con_Y, lim_def_con_Z, Ael, E0_array,
G0_array, K0_array, nu0_array, calculated_floor, M_el_prop, ke_con, force_array,
U_con, U_loc, Sq_char, E1_array, G1_array, K1_array, nu1_array, norm_stress_array,
norm_def_array, tan_stress_array, tan_def_array, ksi_array] = mod_fe_calc% указание
выходных параметров (функции) и её наименование
disp ('Формирование исходных данных группы "КЭ-сеть");% описание этапа
работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация ручного задания некоторых исходных данных о геометрических
параметрах и о разбишке на конечные элементы рассчитываемой конструкции');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
L=input('Размер конструкции по оси x, мм, L=');% задание длины КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
H=input('Размер конструкции по оси y, мм, H=');% задание высоты КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
T=input('Толщина конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции,
мм, T=');% задание толщины конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
nL=input('Число конечных элементов по оси x, шт, nL=');% задание масштаба
разбиения (количества КЭ) по длине для КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
nH=input('Число конечных элементов по оси y, шт, nH=');% задание масштаба
разбиения (количества КЭ) по высоте для КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
X0=input('Минимальная координата конструкции по оси x, X0=');% задание
начала координат (координат первого узла) по оси X для КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
Y0=input('Минимальная координата конструкции по оси y, Y0=');% задание

```

```

начала координат (координат первого узла) по оси Y для КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
disp ('Инициация расчёта некоторых количественных параметров КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции');% описание этапа работы функции (для удобства
и наглядности)
n=(nL+1)*(nH+1);% расчёт количества узлов в конечноэлементном представлении
рассчитываемой конструкции
n_array=zeros(1,n);% создание нулевого массива для формирования порядкового
вектора - строки узлов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
for n=1:1:n% инициация цикла перебора номеров узлов КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции внутри порядкового вектра-строки узлов КЭ-схемы
    n_array(1,n)=n;% присвоение элементам порядкового вектра-строки узлов КЭ-
схемы рассчитываемой конструкции порядковых значений этих узлов
end
N=nL*nH*2;% расчёт количества КЭ в конечноэлементном представлении
рассчитываемой конструкции
N_array=zeros(1,N);% создание нулевого массива для формирования порядкового
вектора - строки элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
for N=1:1:N% инициация цикла перебора номеров элементов КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции внутри порядкового вектра-строки элементов КЭ-
схемы
    N_array(1,N)=N;% присвоение элементам порядкового вектра-строки элементов
КЭ-схемы рассчитываемой конструкции порядковых значений этих элементов
end
disp ('Инициация расчёта координат узлов рассчитываемой конструкции');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Формирование вектора-строки X координат узлов конструкции');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
Xjun=zeros(1,n);% создание нулевого массива для формирования вектора - строки
X координат узлов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
for nlev1=0:1:nL% инициация цикла перебора узлов нижнего уровня КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
    Xjun(1,nlev1+1)=X0+nlev1*(L/nL);% присваивание числовых значений X
координат узлам нижнего уровня КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
end
for lev=2:1:nH+1% инициация цикла перебора уровней КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
    for i=1:1:nL+1% инициация цикла перебора узлов i-го уровня КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
        Xjun(1,(nL+1)*(lev-1)+i)=Xjun(1,i);% формирование вектора - строки X
координат узлов КЭ-схемы конструкции
    end
end

```

```

end
disp ('Формирование вектора-строки Y координат узлов конструкции');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
Yjun=zeros(1,n);% создание нулевого массива для формирования вектора - строки
Y координат узлов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
for nlev1=1:1:nL+1% инициация цикла перебора узлов нижнего уровня КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
    Yjun(1,nlev1)=Y0;% присваивание числовых значений Y координат узлам
нижнего уровня КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
end
for lev=2:1:nH+1% инициация цикла перебора уровней КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
    for i=1:1:nL+1% инициация цикла перебора узлов i-го уровня КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
        Yjun(1,(nL+1)*(lev-1)+i)=Y0+((H/nH)*(lev-1));% формирование вектора -
строки Y координат узлов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
    end
end
disp ('Формирование матрицы принадлежности узлов КЭ-схемы конструкции
конечным элементам данной схемы');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)
Mfe_jun=zeros(3,N);% создание нулевой матрицы соответствия узлов (их
номеров) конечным элементам (их номерам; номерам столбцов данной матрицы)
КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
disp ('Формирование первой строки (растановка i-х узлов элементов в первой
строке матрицы) матрицы принадлежности узлов КЭ-схемы конструкции
конечным элементам данной схемы');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)
for nH=1:1:nH% инициация цикла перебора горизонтальных этажей КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
    i1=1+((nH-1)*(nL*2));% задание индексной переменной, обозначающей
порядковый номер начального элемента каждого нового этажа КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции в общей матрице принадлежности узлов КЭ-схемы
конструкции конечным элементам данной схемы
    i=1;% введение индексной переменной, необходимой для осуществления
нарщивания с необходимым шагом номеров i-х узлов элементов обсчитываемого
этажа КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
    for step=i1:2:(((nL*2))*nH)% инициация цикла перебора элементов
рассчитываемого этажа КЭ-схемы (столбцов матрицы соответствия узлов
конечным элементам) по принципу "через 1" (в соответствии с алгоритмом
поэлементного изменения i-х узлов по моему способу нумерации узлов КЭ)
        Mfe_jun(1,step)=((nL+1)*nH)+i;% "поэтажное" присвоение соответствующим

```

элементам первой ("i-й") строки матрицы соответствия узлов конечным
элементам номеров в соответствии с алгоритмом глобальной нумерации КЭ-
схемы конструкции

```
Mfe_jun(1,step+1)=Mfe_jun(1,step);% "поэтажное" присвоение "соседним"  
элементам первой ("i-й") строки вышеназванной матрицы номеров в соответствии  
с алгоритмом глобальной нумерации КЭ-схемы конструкции
```

```
i=i+1;% наращивание индексной переменной для присвоения следующего  
"первого" узла следующей пары i-х узлов двух соседних элементов  
соответствующему элементу вышеназванной матрицы (см. схему в тетради от  
05.05.2017)
```

```
end
```

```
end
```

```
disp ('Формирование второй строки (растановка j-х узлов элементов во второй  
строке матрицы) матрицы принадлежности узлов КЭ-схемы конструкции  
конечным элементам данной схемы');% описание этапа работы функции (для  
удобства и наглядности)
```

```
for nH=1:1:nH% инициация цикла перебора горизонтальных этажей КЭ-схемы  
рассчитываемой конструкции
```

```
Mfe_jun(2,(nH-1)*(nL*2)+1)=1+(nH-1)*(nL+1);% присваивание узлового номера j-  
му узлу первого (начального, левого) КЭ nH-го этажа КЭ-схемы конструкции
```

```
Mfe_jun(2,(nH-1)*(nL*2)+1+((nL*2)-1))=1+((nH-1)*(nL+1))+nL;% присваивание  
узлового номера j-му узлу крайнего (правого) КЭ nH-го этажа КЭ-схемы  
конструкции
```

```
i1=2+((nH-1)*nL*2);% задание индексной переменной, обозначающей  
порядковый номер начального элемента первой "пары" каждого нового этажа КЭ-  
схемы рассчитываемой конструкции в общей матрице принадлежности узлов КЭ-  
схемы конструкции конечным элементам данной схемы
```

```
i=1;% введение индексной переменной, необходимой для осуществления  
наращивания (от "пары" к "паре") с необходимым шагом номеров j-х узлов  
элементов обчитываемого этажа КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
```

```
for step=i1:2:((nL*2)*nH)-1% инициация цикла перебора элементов  
рассчитываемого этажа КЭ-схемы (столбцов матрицы соответствия узлов  
конечным элементам) по принципу "через 1" (в соответствии с алгоритмом  
поэлементного изменения j-х узлов по моему способу нумерации узлов КЭ)
```

```
Mfe_jun(2,step)=((nL+1)*(nH-1))+1+i;% "поэтажное" присвоение  
соответствующим элементам (за исключением краевых) второй ("j-й") строки  
матрицы соответствия узлов конечным элементам номеров в соответствии с  
алгоритмом глобальной нумерации КЭ-схемы конструкции
```

```
Mfe_jun(2,step+1)=Mfe_jun(2,step);% "поэтажное" присвоение "соседним"  
элементам в парах второй ("j-й") строки вышеназванной матрицы номеров в  
соответствии с алгоритмом глобальной нумерации КЭ-схемы конструкции
```

```
i=i+1;% наращивание индексной переменной для присвоения следующего
```

"первого" узла следующей пары j -х узлов двух соседних элементов
соответствующему элементу вышеназванной матрицы (см. схему в тетради от
05.05.2017)

end

end

disp ('Формирование третьей строки (растановка k -х узлов элементов в третьей
строке матрицы) матрицы принадлежности узлов КЭ-схемы конструкции
конечным элементам данной схемы');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)

for nH=1:1:nH% инициация цикла перебора горизонтальных этажей КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции

i1=((nH-1)*(nL*2))+1;% задание индексной переменной, обозначающей
порядковый номер начального элемента каждого нового этажа КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции в общей матрице принадлежности узлов КЭ-схемы
конструкции конечным элементам данной схемы

i=0;% введение индексной переменной, необходимой для осуществления
наращивания с необходимым шагом номеров k -х узлов элементов обсчитываемого
этажа КЭ-схемы рассчитываемой конструкции

for step=i1:2:((nL*2)*nH);% инициация цикла перебора элементов
рассчитываемого этажа КЭ-схемы (столбцов матрицы соответствия узлов
конечным элементам) по принципу "через 1" (в соответствии с алгоритмом
поэлементного изменения j -х узлов по моему способу нумерации узлов КЭ)

Mfe_jun(3,step)=((nL+1)*(nH-1))+2+i;% "поэтажное" присвоение
соответствующим элементам третьей ("к-й") строки матрицы соответствия узлов
конечным элементам номеров в соответствии с алгоритмом глобальной
нумерации КЭ-схемы конструкции

Mfe_jun(3,step+1)=Mfe_jun(3,step)+(nL+1);% "поэтажное" присвоение
"соседним" элементам в "неравных парах" третьей ("к-й") строки вышеназванной
матрицы номеров в соответствии с алгоритмом глобальной нумерации КЭ-схемы
конструкции

i=i+1;% наращивание индексной переменной для присвоения следующего
"первого" узла следующей "неравной пары" k -х узлов двух соседних элементов
соответствующему элементу вышеназванной матрицы (см. схему в тетради от
15.05.2017)

end

end

disp ('Формирование конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
завершено!');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

disp ('Формирование исходных данных группы "физико-механические
характеристики");% описание этапа работы функции (для удобства и
наглядности)

disp ('Инициация ручного задания некоторых исходных данных о физико-

механических параметрах материала рассчитываемой конструкции');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

$R_b = \text{input}(\text{'Предельная прочность бетона при одноосном сжатии, МПа (=Н/мм}^2\text{), } R_b = \text{'});$ % задание призмной прочнотости бетона при одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$R_{bt} = \text{input}(\text{'Предельная прочность бетона при одноосном растяжении, МПа (=Н/мм}^2\text{), } R_{bt} = \text{'});$ % задание призмной прочнотости бетона при одноосном растяжении в возрасте 24 суток

$E_{0con} = \text{input}(\text{'Начальный модуль упругости I-го рода для бетона, Н/мм}^2\text{, } E_{0con} = \text{'});$ % задание начального модуля упругости первого рода для бетона в возрасте 24 суток

$E_{0arm} = \text{input}(\text{'Начальный модуль упругости I-го рода для арматурной стали, Н/мм}^2\text{, } E_{0arm} = \text{'});$ % задание начального модуля упругости первого рода для арматурной стали

$G_{0arm} = \text{input}(\text{'Начальный модуль упругости II-го рода для арматурной стали, Н/мм}^2\text{, } G_{0arm} = \text{'});$ % задание начального модуля упругости второго рода для арматурной стали

$K_{0arm} = \text{input}(\text{'Начальный модуль упругости III-го рода для арматурной стали, Н/мм}^2\text{, } K_{0arm} = \text{'});$ % задание начального модуля упругости третьего рода для арматурной стали

$\nu_{0con} = \text{input}(\text{'Начальный коэффициент Пуассона для бетона, } \nu_{0con} = \text{'});$ % задание начального коэффициента Пуассона для бетона в возрасте 24 суток

$\nu_{0arm} = \text{input}(\text{'Начальный коэффициент Пуассона для арматурной стали, } \nu_{0arm} = \text{'});$ % задание начального коэффициента Пуассона для для арматурной стали

$\text{lim_def_con_X} = \text{input}(\text{'Предельная относительная деформация бетона при одноосном сжатии, } \text{lim_def_con_X} = \text{'});$ % задание предельной относительной деформации бетона при одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$\text{disp}(\text{'Инициация расчёта некоторых количественных физико-механических параметров материала рассчитываемой конструкции'});$ % описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

$h_i = R_{bt}/R_b;$ % расчёт соотношения прочностей бетона при одноосном растяжении и одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$\text{lim_def_con_Y} = -\nu_{0con} * \text{lim_def_con_X};$ % расчёт предельной относительной деформации бетона по оси Y при одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$\text{lim_def_con_Z} = -\nu_{0con} * \text{lim_def_con_X};$ % расчёт предельной относительной деформации бетона по оси Z при одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$\text{lim_shift_con} = 1.414 * \text{lim_def_con_X};$ % расчёт предельного октаэдрического сдвига бетона при одноосном сжатии в возрасте 24 суток

$A_{el} = 0.5 * (L/nL) * (H/nH);$ % расчёт площади одного треугольного конечного элемента КЭ-схемы рассчитываемой конструкции

$R_{2c} = 1.184 * R_b;$ % расчёт призмной прочнотости бетона при двухосном сжатии в возрасте 24 суток

```

G0con=0.4*E0con;% расчёт начального модуля упругости второго рода для
бетона в возрасте 24 суток
K0con=(E0con*G0con)/(3*((3*G0con)-E0con));% расчёт начального модуля
упругости третьего рода для бетона в возрасте 24 суток
disp ('Инициация поэлементного формирования матриц жёсткостных параметров
материала рассчитываемой конструкции');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)
E0_array=zeros(1,N);% создание нулевого массива для формирования порядкового
вектора - строки значений модуля упругости материала I-го рода элементов КЭ-
схемы рассчитываемой конструкции
G0_array=zeros(1,N);% создание нулевого массива для формирования
порядкового вектора - строки значений модуля упругости материала II-го рода
элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
K0_array=zeros(1,N);% создание нулевого массива для формирования
порядкового вектора - строки значений модуля упругости материала III-го рода
элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
nu0_array=zeros(1,N);% создание нулевого массива для формирования
порядкового вектора - строки значений начального коэффициента Пуассона
материала элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
for nH=1:1:nH% инициация цикла перебора слоёв КЭ-модели рассчитываемой
конструкции
    calculated_floor=nH% вспомогательный вывод обсчитываемого этажа для
удобства ввода значений площадей составляющих материалов
    Scon_floor=input('Площадь бетона в поперечном сечении обсчитываемого этажа
КЭ-схемы, кв. мм., Scon_floor=');% инициация ввода площади бетона в
поперечном сечении обсчитываемого слоя КЭ-модели рассчитываемой
конструкции
    Sarm_floor=input('Площадь арматуры в поперечном сечении обсчитываемого
этажа КЭ-схемы, кв. мм., Sarm_floor=');% инициация ввода площади арматуры в
поперечном сечении обсчитываемого слоя КЭ-модели рассчитываемой
конструкции
    switch Sarm_floor% условный оператор проверки наличия арматуры в поперечном
сечении обсчитываемого этажа КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
        case 0% случай, когда арматуры нет, т.е. её площадь равна нулю
            for i=(1+(nH-1)*(nL*2)):1:nH*(nL*2)% инициация цикла последовательного
перебора конечных элементов обсчитываемого этажа КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
                E0_array(1,i)= E0con;% присвоение модуля упругости бетона первого рода
рассматриваемому конечному элементу
                G0_array(1,i)= G0con;% присвоение модуля упругости бетона второго рода
рассматриваемому конечному элементу
                K0_array(1,i)= K0con;% присвоение модуля упругости бетона третьего рода

```

```

рассматриваемому конечному элементу
    nu0_array(1,i)= nu0con;% присвоение коэффициента Пуассона бетона ✓
рассматриваемому конечному элементу
end
otherwise% случай, когда арматура в слое есть, т.е. её площадь не равна нулю
for i=(1+(nH-1)*(nL*2)):1:nH*(nL*2)% инициация цикла последовательного ✓
перебора конечных элементов обчитываемого этажа КЭ-схемы рассчитываемой ✓
конструкции
    E0_array(1,i)= (E0con*Scon_floor+E0arm*Sarm_floor)/ ✓
(Scon_floor+Sarm_floor);% присвоение приведённого модуля упругости первого ✓
рода рассматриваемому конечному элементу
    G0_array(1,i)= (G0con*Scon_floor+G0arm*Sarm_floor)/ ✓
(Scon_floor+Sarm_floor);% присвоение приведённого модуля упругости второго ✓
рода рассматриваемому конечному элементу
    K0_array(1,i)= (K0con*Scon_floor+K0arm*Sarm_floor)/ ✓
(Scon_floor+Sarm_floor);% присвоение приведённого модуля упругости третьего ✓
рода рассматриваемому конечному элементу
    nu0_array(1,i)= (nu0con*Scon_floor+nu0arm*Sarm_floor)/ ✓
(Scon_floor+Sarm_floor);% присвоение приведённого коэффициента Пуассона ✓
рассматриваемому конечному элементу
end
end
end
disp ('Формирование информационных массивов о физико-механических ✓
параметрах материалов рассчитываемой конструкции завершено!');% описание ✓
этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация формирования массива ячеек с матрицами упругих свойств ✓
конечных элементов');% описание этапа работы функции (для удобства и ✓
наглядности)
M_el_prop=cell(5,N);% создание массива для внесения упругих харктеристик ✓
конечных элементов схемы рассчитываемой конструкции
for N=1:1:N% инициация цикла перебора элементов конечноэлементной схемы ✓
рассчитываемой конструкции
    jun_num_i=Mfe_jun(1,N);% задание i-го узла для рассматриваемого элемента из ✓
первой строки матрицы соответствия узлов конечным элементам
    jun_num_j=Mfe_jun(2,N);% задание j-го узла для рассматриваемого элемента из ✓
второй строки матрицы соответствия узлов конечным элементам
    jun_num_k=Mfe_jun(3,N);% задание k-го узла для рассматриваемого элемента из ✓
третьей строки матрицы соответствия узлов конечным элементам
    Xi=Xjun(1,jun_num_i);% присвоение глобальной X координаты i-му узлу ✓
рассматриваемого конечного элемента
    Xj=Xjun(1,jun_num_j);% присвоение глобальной X координаты j-му узлу ✓

```

рассматриваемого конечного элемента

$X_k = X_{jun}(1, jun_num_k);$ % присвоение глобальной X координаты k-му узлу ✓

рассматриваемого конечного элемента

$Y_i = Y_{jun}(1, jun_num_i);$ % присвоение глобальной Y координаты i-му узлу ✓

рассматриваемого конечного элемента

$Y_j = Y_{jun}(1, jun_num_j);$ % присвоение глобальной Y координаты j-му узлу ✓

рассматриваемого конечного элемента

$Y_k = Y_{jun}(1, jun_num_k);$ % присвоение глобальной Y координаты k-му узлу ✓

рассматриваемого конечного элемента

$b_i = Y_j - Y_k;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$b_j = Y_k - Y_i;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$b_k = Y_i - Y_j;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$c_i = X_k - X_j;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$c_j = X_i - X_k;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$c_k = X_j - X_i;$ % расчёт коэффициента для формирования матрицы градиентов для ✓

рассматриваемого конечного элемента

$M_el_prop\{1,N\} = (1/(2*Ael)) * [b_i, 0, b_j, 0, b_k, 0; 0, c_i, 0, c_j, 0, c_k; c_i, b_i, c_j, b_j, c_k, b_k];$ % заполнение первой строки массива упругих характеристик конечных ✓

элементов - формирование матриц градиентов для элементов схемы;

$M_el_prop\{2,N\} = (E0_array(1,N)/(1-(nu0_array(1,N)^2))) * [1, nu0_array(1,N), 0; nu0_array(1,N), 1, 0; 0, 0, (1-nu0_array(1,N))/2];$ % заполнение второй строки ✓

массива упругих характеристик конечных элементов - формирование матриц жёсткости для элементов схемы;

$M_el_prop\{3,N\} = (M_el_prop\{1,N\})' * (M_el_prop\{2,N\}) * (M_el_prop\{1,N\}) * T_Ael;$ % заполнение третьей строки массива упругих характеристик конечных ✓

элементов - формирование матриц упругости для элементов схемы;

end

disp ('Формирование массива ячеек с матрицами упругих свойств конечных элементов завершено!'); % описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

disp ('Инициация формирования глобальной матрицы упругости конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции'); % описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

ke_con=zeros(2*n, 2*n); % введение глобальной матрицы упругости для конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции;

for N=1:1:N % инициация цикла перебора конечных элементов

i=Mfe_jun(1,N); % назначение i-го узла для данного элемента с использованием ✓

глобальной нумерации узлов

$j = \text{Mfe_jun}(2, N);$ % назначение j -го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов

$k = \text{Mfe_jun}(3, N);$ % назначение k -го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов

% для расшифровки пояснений к операциям данного цикла см.

% рисунок в рабочей тетради от 30.05.2017

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 1);$ %
добавление в установленное место в глобальную матрицу упругости $X_i - X_i$ -го
значения локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*i)-1) = \text{ke_con}((2*i), (2*i)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 1);$ % добавление
в установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - X_i$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*i)) = \text{ke_con}((2*i), (2*i)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 2);$ % добавление в
установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_i$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 2);$ % добавление
в установленное место в глобальную матрицу упругости $X_i - Y_i$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 3);$ %
добавление в установленное место в глобальную матрицу упругости $X_i - X_j$ -го
значения локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*j)-1) = \text{ke_con}((2*i), (2*j)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 3);$ % добавление
в установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - X_j$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*j)) = \text{ke_con}((2*i), (2*j)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 4);$ % добавление в
установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_j$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 4);$ % добавление
в установленное место в глобальную матрицу упругости $X_i - Y_j$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*k)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*k)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 5);$ %
добавление в установленное место в глобальную матрицу упругости $X_i - X_k$ -го
значения локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*k)-1) = \text{ke_con}((2*i), (2*k)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 5);$ % добавление
в установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - X_k$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*k)) = \text{ke_con}((2*i), (2*k)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 6);$ % добавление в
установленное место в глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_k$ -го значения
локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента


```

disp ('Формирование глобальной матрицы упругости конечноэлементной схемы
рассчитываемой конструкции завершено!');% описание этапа работы функции
(для удобства и наглядности)
disp ('Инициация задания глобального вектора нагрузок');% описание этапа
работы функции (для удобства и наглядности)
force_array=zeros(n*2, 1);% создание нулевого вектора-столбца внешних сил,
приложенных к КЭ-схеме рассчитываемой конструкции;
jun_und_force=input('Количество узлов КЭ-схемы к которым приложены внешние
нагрузки, jun_und_force=');% задание количества узлов КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции, к которым приложены внешние нагрузки
for jun_und_force=1:1:jun_und_force% инициация цикла перебора узлов, к
которым приложены внешние нагрузки
    num_jun_und_force=input('Номер узла, к которому приложена внешняя нагрузка,
num_jun_und_force=');% задание номера узла (узлы перебираются по порядку)
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции, к которому приложена
внешняя нагрузка
    Fx=input('Направление и значение x-составляющей внешней нагрузки,
приложенной к рассматриваемому узлу, H, F(x)=');% задание горизонтальной
составляющей внешней нагрузки, приложенной к рассматриваемому узлу
    Fy=input('Направление и значение y-составляющей внешней нагрузки,
приложенной к рассматриваемому узлу, H, F(y)=');% задание вертикальной
составляющей внешней нагрузки, приложенной к рассматриваемому узлу
    force_array((num_jun_und_force*2)-1, 1)=Fx;% внесение в глобальный вектор-
столбец внешних нагрузок горизонтальной составляющей нагрузки, приложенной
к рассматриваемому узлу конечноэлементной схемы рассчитываемой
конструкции
    force_array((num_jun_und_force*2), 1)=Fy;% внесение в глобальный вектор-
столбец внешних нагрузок вертикальной составляющей нагрузки, приложенной к
рассматриваемому узлу конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
end
disp ('Задание глобального вектора нагрузок завершено!');% описание этапа
работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация закрепления узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой
конструкции');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
n_fix_jun=input('Количество закреплённых узлов конечноэлементной схемы
рассчитываемой конструкции, n_fix_jun=');% введение количества закреплённых
узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
for n_fix_jun=1:1:n_fix_jun% инициация цикла перебора закреплённых узлов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    num_fix_jun=input('Номер закрепляемого узла конечноэлементной схемы
рассчитываемой конструкции, num_fix_jun=');% задание номера закреплённого
узла (узлы перебираются по порядку) конечноэлементной схемы рассчитываемой

```

конструкции

```
Xdir_mov=input('Наличие закрепления рассматриваемого узла от перемещений по оси X (0 - закреплён; 1 - перемещение возможно), Xdir_mov=');% выставление признака закрепления рассматриваемого узла конечноэлементной конструкции в горизонтальной плоскости
```

```
Ydir_mov=input('Наличие закрепления рассматриваемого узла от перемещений по оси Y (0 - закреплён; 1 - перемещение возможно), Ydir_mov=');% выставление признака закрепления рассматриваемого узла конечноэлементной конструкции в горизонтальной плоскости
```

```
switch Xdir_mov% инициация проверки признака горизонтального закрепления рассматриваемого узла
```

```
case 0% обработка случая закрепления рассматриваемого узла от передвижения в горизонтальной плоскости
```

```
ke_con((2*num_fix_jun)-1, :)=0;% модификация строки глобальной матрицы упругости, содержащей значения для "x-направления" рассматриваемого узла
```

```
ke_con(:, (2*num_fix_jun)-1)=0;% модификация столбца глобальной матрицы упругости, содержащей значения для "x-направления" рассматриваемого узла
```

```
ke_con((2*num_fix_jun)-1, (2*num_fix_jun)-1)=1;% присвоение 1 ячейке, лежащей на главной диагонали глобальной матрицы упругости на пересечении "x-направлений" рассматриваемого узла
```

```
force_array((2*num_fix_jun)-1, 1)=0;% обнуление значения внешней нагрузки x-направления, приложенной к данному узлу (в случае её наличия)
```

```
case 1% обработка случая свободы перемещения рассматриваемого узла от передвижения в горизонтальной плоскости
```

```
disp ('По данному узлу в данном направлении перемещение возможно, глобальные матрицы упругости и нагрузок не модифицируются');% информационное сообщение, отражающее теоретические положения
```

```
otherwise% обработка остальных случаев значения признака
```

```
disp ('Некорректно задан признак свободы по оси X рассматриваемого узла!');% информационное сообщение, отражающее сутевую часть работы программного кода в данном случае
```

```
end
```

```
switch Ydir_mov% инициация проверки признака вертикального закрепления рассматриваемого узла
```

```
case 0% обработка случая закрепления рассматриваемого узла от передвижения в вертикальной плоскости
```

```
ke_con((2*num_fix_jun), :)=0;% модификация строки глобальной матрицы упругости, содержащей значения для "y-направления" рассматриваемого узла
```

```
ke_con(:, (2*num_fix_jun))=0;% модификация столбца глобальной матрицы упругости, содержащей значения для "y-направления" рассматриваемого узла
```

```
ke_con((2*num_fix_jun), (2*num_fix_jun))=1;% присвоение 1 ячейке,
```

```

лежащей на главной диагонали глобальной матрицы упругости на пересечении
"у-направлений" рассматриваемого узла
    force_array((2*num_fix_jun), 1)=0;% обнуление значения внешней нагрузки
у-направления, приложенной к данному узлу (в случае её наличия)
    case 1% обработка случая свободы перемещения рассматриваемого узла от
передвижения в вертикальной плоскости
        disp ('По данному узлу в данном направлении перемещение возможно,
глобальные матрицы упругости и нагрузок не модифицируются');%
информационное сообщение, отражающее теоретические положения
        otherwise% обработка остальных случаев значения признака
            disp ('Некорректно задан признак свободы по оси Y рассматриваемого
узла!');% информационное сообщение, отражающее сутевую часть работы
программного кода в данном случае
        end
    end
disp ('Закрепление узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
и модификация матриц завершены!');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)
disp ('Инициация расчёта глобального вектор-столбца перемещений для узлов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции');% описание этапа
работы функции (для удобства и наглядности)
U_con=ke_con\force_array;% расчёт глобальной матрицы перемещений узлов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
disp ('Расчёт глобального вектор-столбца перемещений для узлов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции завершён!');% описание
этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация формирования локальных вектор-столбцов перемещений для
узлов конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции');% описание
этапа работы функции (для удобства и наглядности)
U_loc=cell(1,N);% создание пустого массива ячеек для записи вектор-столбцов
локальных перемещений узлов конечных элементов конечноэлементной схемы
рассчитываемой конструкции
for N=1:1:N% инициация цикла перебора конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    U_loc{1, N}=zeros(6, 1);% создание нулевых вектор-столбцов для будущей
записи локальных перемещений узлов конечных элементов конечноэлементной
схемы рассчитываемой конструкции
end
for N=1:1:N;% инициация цикла перебора конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    i=Mfe_jun(1,N);% назначение i-го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов

```

`j=Mfe_jun(2,N);`% назначение j-го узла для данного элемента с использованием глобальной нумерации узлов

`k=Mfe_jun(3,N);`% назначение k-го узла для данного элемента с использованием глобальной нумерации узлов

`U_loc{1, N}(1, 1)=U_con((2*i)-1, 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения i-го узла по оси X

`U_loc{1, N}(2, 1)=U_con((2*i), 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения i-го узла по оси Y

`U_loc{1, N}(3, 1)=U_con((2*j)-1, 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения j-го узла по оси X

`U_loc{1, N}(4, 1)=U_con((2*j), 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения j-го узла по оси Y

`U_loc{1, N}(5, 1)=U_con((2*k)-1, 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения k-го узла по оси X

`U_loc{1, N}(6, 1)=U_con((2*k), 1);`% запись из глобальной матрицы перемещений узлов в локальную матрицу значения перемещения k-го узла по оси Y

`end`

`disp ('Формирование локальных вектор-столбцов перемещений для узлов конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции завершено!');`% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

`disp ('Инициация расчёта деформаций и напряжений для конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции');`% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

`for N=1:1:N;`% инициация цикла перебора конечных элементов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции

`M_el_prop{4, N}=M_el_prop{1, N}*U_loc{1, N};`% расчёт деформаций для рассматриваемого конечного элемента

`M_el_prop{5, N}=M_el_prop{2, N}*M_el_prop{4, N};`% расчёт напряжений для рассматриваемого конечного элемента

`end`

`disp ('Расчёт деформаций и напряжений для конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции завершён!');`% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

`disp ('Инициация усреднения по соседним треугольным конечным элементам деформаций и напряжений');`% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)

```

Sq_char=zeros(6, (N/2));% создание нулевой матрицы для будущего занесения
значений деформаций и напряжений в конечных элементах при их усреднении
между двумя соседними треугольными КЭ (для получения разбивки конструкции
на квадратные конечные элементы)
for i_sq=1:1:(N/2)% инициация цикла перебора квадратных конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    Sq_char(1, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(1, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(1, 1))
/2;% усреднение деформации по оси X для двух соседних КЭ
    Sq_char(2, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(2, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(2, 1))
/2;% усреднение деформации по оси Y для двух соседних КЭ
    Sq_char(3, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(3, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(3, 1))
/2;% усреднение сдвиговой деформации для двух соседних КЭ

    Sq_char(4, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(1, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(1, 1))
/2;% усреднение напряжения по оси X для двух соседних КЭ
    Sq_char(5, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(2, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(2, 1))
/2;% усреднение напряжения по оси Y для двух соседних КЭ
    Sq_char(6, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(3, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(3, 1))
/2;% усреднение сдвигового напряжения для двух соседних КЭ
end
disp ('Усреднение по соседним конечным элементам деформаций и напряжений
завершено!');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Расчёт конструкции с использованием базовой постановки метода конечных
элементов завершён!');% описание этапа работы функции (для удобства и
наглядности)

disp ('Инициация расчёта конструкции с использованием модифицированной
постановки метода конечных элементов');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)
disp ('Задание начальных нулевых матриц модифицированных параметров
упругости материала и октаэдрических деформационных и силовых факторов');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
E1_array=zeros(1,N);% создание массива для записи переменного модуля
упругости рассчитываемой конструкции 1-го рода
G1_array=zeros(1,N);% создание массива для записи переменного модуля
упругости рассчитываемой конструкции 2-го рода
K1_array=zeros(1,N);% создание массива для записи переменного модуля
упругости рассчитываемой конструкции 3-го рода
nu1_array=zeros(1,N);% создание массива для записи переменного коэффициента
Пуассона для рассчитываемой конструкции

```

```

norm_stress_array=zeros(1,(N/2));% создание массива для записи значений
октаэдрических нормальных напряжений в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
norm_def_array=zeros(1,(N/2));% создание массива для записи значений
октаэдрических нормальных деформаций в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
tan_stress_array=zeros(1,(N/2));% создание массива для записи значений
октаэдрических касательных напряжений в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
tan_def_array=zeros(1,(N/2));% создание массива для записи значений
октаэдрических касательных деформаций (сдвига) в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
disp ('Инициация расчёта октаэдрических деформационных и силовых факторов
для четырёхугольных конечных элементов');% описание этапа работы функции
(для удобства и наглядности)
for i_sq=1:1:(N/2)% инициация цикла перебора квадратных конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
norm_stress_array(1,i_sq)=0.5*(Sq_char(4, i_sq)+Sq_char(5, i_sq));% поэлементный
расчёт октаэдрических нормальных напряжений в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
norm_def_array(1,i_sq)=0.5*(Sq_char(1, i_sq)+Sq_char(2, i_sq));% поэлементный
расчёт октаэдрических нормальных деформаций в четырёхугольных конечных
элементах КЭ-схемы рассчитываемой конструкции
tan_stress_array(1,i_sq)=0.6667*(((Sq_char(4, i_sq)-Sq_char(5, i_sq))^2)+((Sq_char(5,
i_sq)-0)^2)+((0-Sq_char(4, i_sq))^2))^0.5;% поэлементный расчёт октаэдрических
касательных напряжений в четырёхугольных конечных элементах КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
tan_def_array(1,i_sq)=0.6667*(((Sq_char(1, i_sq)-Sq_char(2, i_sq))^2)+((Sq_char(2,
i_sq)-0)^2)+((0-Sq_char(1, i_sq))^2))^0.5;% поэлементный расчёт октаэдрических
касательных деформаций (сдвига) в четырёхугольных конечных элементах КЭ-
схемы рассчитываемой конструкции
end
disp ('Расчёт октаэдрических деформационных и силовых факторов для
четырёхугольных конечных элементов завершён!');% описание этапа работы
функции (для удобства и наглядности)
disp ('Первоначальное присвоение модифицированным параметрам упругости
начальных значений');% описание этапа работы функции (для удобства и
наглядности)
for N=1:1:N% инициация цикла перебора треугольных конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
E1_array(1,N)=E0_array(1,N);% первоначальное присвоение массиву переменного
параметра упругости начальных значений данной величины

```

```

G1_array(1,N)=G0_array(1,N);% первоначальное присвоение массиву переменного
параметра упругости начальных значений данной величины
K1_array(1,N)=K0_array(1,N);% первоначальное присвоение массиву переменного
параметра упругости начальных значений данной величины
nu1_array(1,N)=nu0_array(1,N);% первоначальное присвоение массиву
переменного параметра упругости начальных значений данной величины
end
disp ('Инициация расчёта признака "кси" для определения вида
напряжённого состояния по четырёхугольным конечным элементам');% описание
этапа работы функции (для удобства и наглядности)
ksi_array=zeros(1,(N/2));% создание нулевого массива для последующей записи
искомого признака
for i_sq=1:1:(N/2)% инициация цикла перебора четырёхугольных конечных
элементов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
ksi_array(1, i_sq)=norm_stress_array(1, i_sq)/tan_stress_array(1,i_sq);%
поэлементный расчёт признака "кси" для определения вида напряжённого
состояния в конечном элементе
end
disp ('Расчёт признака "кси" для определения вида напряжённого состояния по
четырёхугольным конечным элементам завершён!');% описание этапа работы
функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация первой корректировки напряжений и деформаций по
треугольным конечным элементам с использованием корректирующих
функций');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
lim_norm_stress_array=zeros(1,(N/2));% создание нулевого массива для
последующей поэлементной записи предельных значений октаэдрических
нормальных напряжений в четырёхугольных конечных элементах КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции
lim_tan_stress_array=zeros(1,(N/2));% создание нулевого массива для
последующей поэлементной записи предельных октаэдрических касательных
напряжений в четырёхугольных конечных элементах КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции
for i_sq=1:1:(N/2)% инициация цикла перебора четырёхугольных конечных
элементов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    lim_norm_stress_array(1,i_sq)=0.3333-((-0.70711-ksi_array(1, i_sq))/(-0.70711-
(-1.41421))*(0.3333-0.7893));% поэлементный расчёт предельных значений
октаэдрических нормальных напряжений в треугольных конечных элементах КЭ-
схемы рассчитываемой конструкции
    lim_tan_stress_array(1,i_sq)=0.4714-((0.4714-ksi_array(1, i_sq))/(0.4714-(0.5581))*
(0.4714-0.5581));% поэлементный расчёт предельных октаэдрических
касательных напряжений в треугольных конечных элементах КЭ-схемы
рассчитываемой конструкции

```

```

if ksi_array(1, i_sq) < -1.41421 % проверка условия допустимости полученного значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента (на предмет выхода за нижний предел допустимого диапазона)
    num=i_sq % вывод на экран номера рассматриваемого конечного элемента
    ksi=ksi_array(1, i_sq) % вывод на экран фактического значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента
    disp('Некорректное значение параметра "кси" по рассматриваемому четырёхугольному элементу - выход за допустимый диапазон значений в отрицательную сторону!'); % вывод маркерного уведомления на экран
elseif ksi_array(1, i_sq) > 1.41421 % проверка условия допустимости полученного значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента (на предмет выхода за верхний предел допустимого диапазона)
    num=i_sq % вывод на экран номера рассматриваемого конечного элемента
    ksi=ksi_array(1, i_sq) % вывод на экран фактического значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента
    disp('Некорректное значение параметра "кси" по рассматриваемому четырёхугольному элементу - выход за допустимый диапазон значений в положительную сторону!'); % вывод маркерного уведомления на экран
elseif ksi_array(1, i_sq) > -0.70711 % проверка условия принадлежности параметра "кси" "зоне несжатия" конечного элемента
    num=i_sq % вывод на экран номера рассматриваемого конечного элемента
    ksi=ksi_array(1, i_sq) % вывод на экран фактического значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента
    disp('Рассматриваемый четырёхугольный конечный элемент находится в состоянии растяжения - жёсткостные, деформационные и силовые параметры не корректируются. '); % вывод маркерного уведомления на экран
else
    num=i_sq % вывод на экран номера рассматриваемого конечного элемента
    ksi=ksi_array(1, i_sq) % вывод на экран фактического значения параметра "кси" для рассматриваемого конечного элемента
    disp('Рассматриваемый четырёхугольный конечный элемент находится в состоянии сжатия - необходима корректировка жёсткостных, деформационных и силовых параметров. '); % вывод маркерного уведомления на экран
    m=log((((3*1.41421*G1_array(1, (i_sq*2))*lim_shift_con)/Rb)-1)/(((3*1.41421*G1_array(1, (i_sq*2))*lim_shift_con)/Rb)-1))*(1/(log(R2c/Rb)))); % расчёт параметра m для конечного элемента (для заданного бетонного состава)
    lim_eta=1-((1-((1.41421*Rb)/(3*G1_array(1, (i_sq*2))*lim_shift_con)))*((2.12133*lim_tan_stress_array(1,i_sq))^m)); % расчёт предельного значения параметра "эта" для конечного элемента (для имеющегося вида напряжённого состояния в нём)
    K=-21/ksi_array(1, i_sq); % расчёт предельного значения параметра K для конечного элемента (для имеющегося вида напряжённого состояния в нём)
    eta=1-((1-lim_eta)*((lim_norm_stress_array(1,i_sq))^K)); % расчёт фактического

```

```

(с учётом приложенной нагрузки) значения параметра "эта" для конечного
элемента (для имеющегося вида напряжённого состояния в нём)
    psi=1/sqrt(1+((lim_eta^2)-1)*((lim_tan_stress_array(1,i_sq))^2));% расчёт
фактического (с учётом приложенной нагрузки) значения параметра "пси" для
конечного элемента (для имеющегося вида напряжённого состояния в нём)
    E1_array(1,(i_sq*2))=(3*E1_array(1,(i_sq*2)))/(psi*(eta*(1-2*nu0_array(1,
(i_sq*2)))+2*(1+nu0_array(1,(i_sq*2)))));% пересчёт значения модуля упругости
первого рода для конечного элемента с применением корректирующих функций
    E1_array(1,((i_sq*2)-1))=E1_array(1,(i_sq*2));% пересчёт значения модуля
упругости первого рода для "предыдущего соседнего" конечного элемента с
применением корректирующих функций
    nu1_array(1,(i_sq*2))=(1-(((1-2*nu0_array(1,(i_sq*2)))*eta)/(1+nu0_array(1,
(i_sq*2)))))/(2+(((1-2*nu0_array(1,(i_sq*2)))*eta)/(1+nu0_array(1,(i_sq*2)))));%
пересчёт значения коэффициента Пуассона для конечного элемента с
применением корректирующих функций
    nu1_array(1,((i_sq*2)-1))=nu1_array(1,(i_sq*2));% пересчёт значения
коэффициента Пуассона для "предыдущего соседнего" конечного элемента с
применением корректирующих функций
end
end
disp('Завершена корректировка жёсткостных параметров треугольных конечных
элементов!');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp('Инициация пересчёта значений деформаций и напряжений в треугольных
конечных элементах с учётом корректировки параметров упругости
материала');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
for N=1:1:N% инициация цикла перебора элементов конечноэлементной схемы
рассчитываемой конструкции
    M_el_prop{2,N}=(E1_array(1,N)/(1-(nu1_array(1,N)^2)))*[1, nu1_array(1,N), 0;
nu1_array(1,N), 1, 0; 0, 0, (1-nu1_array(1,N))/2];% заполнение второй строки
массива упругих характеристик конечных элементов - формирование
модифицированных матриц жёсткости для элементов схемы;
    M_el_prop{3,N}=(M_el_prop{1,N})*(M_el_prop{2,N})*(M_el_prop{1,N})
*T*Ael;% заполнение третьей строки массива упругих характеристик конечных
элементов - формирование содифицированных матриц упругости для элементов
схемы;
end
disp('Инициация формирования модифицированной глобальной матрицы
упругости конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции');% описание
этапа работы функции (для удобства и наглядности)
for N=1:1:N% инициация цикла перебора треугольных конечных элементов
    i=Mfe_jun(1,N);% назначение i-го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов

```

$j = \text{Mfe_jun}(2, N);$ % назначение j -го узла для данного элемента с использованием глобальной нумерации узлов

$k = \text{Mfe_jun}(3, N);$ % назначение k -го узла для данного элемента с использованием глобальной нумерации узлов

% для расшифровки пояснений к операциям данного цикла см.

% рисунок в рабочей тетради от 30.05.2017

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 1);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_i - X_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*i)-1) = \text{ke_con}((2*i), (2*i)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 1);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - X_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*i)) = \text{ke_con}((2*i), (2*i)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 2);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*i)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 2);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_i - Y_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 3);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_i - X_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*j)-1) = \text{ke_con}((2*i), (2*j)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 3);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - X_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i), (2*j)) = \text{ke_con}((2*i), (2*j)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(2, 4);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*j)) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 4);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_i - Y_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$\text{ke_con}((2*i)-1, (2*k)-1) = \text{ke_con}((2*i)-1, (2*k)-1) + \text{M_el_prop}\{3, N\}(1, 5);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу

упругости $X_i - X_k$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*i), (2*k)-1)=ke_con((2*i), (2*k)-1)+M_el_prop\{3,N\}(2,5);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - X_k$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*i), (2*k))=ke_con((2*i), (2*k))+M_el_prop\{3,N\}(2,6);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_i - Y_k$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*i)-1, (2*k))=ke_con((2*i)-1, (2*k))+M_el_prop\{3,N\}(1,6);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_i - Y_k$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*i)-1)=ke_con((2*j)-1, (2*i)-1)+M_el_prop\{3,N\}(3,1);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_j - X_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*i)-1)=ke_con((2*j), (2*i)-1)+M_el_prop\{3,N\}(4,1);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_j - X_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*i))=ke_con((2*j), (2*i))+M_el_prop\{3,N\}(4,2);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_j - Y_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*i))=ke_con((2*j)-1, (2*i))+M_el_prop\{3,N\}(3,2);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_j - Y_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*j)-1)=ke_con((2*j)-1, (2*j)-1)+M_el_prop\{3,N\}(3,3);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_j - X_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*j)-1)=ke_con((2*j), (2*j)-1)+M_el_prop\{3,N\}(4,3);$ % добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_j - X_j$ -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*j))=ke_con((2*j), (2*j))+M_el_prop\{3,N\}(4,4);$ % добавление в

установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости Y_i -
 Y_j -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*j))=ke_con((2*j)-1, (2*j))+M_el_prop\{3,N\}(3,4);$ % добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости X_j -
 Y_j -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*k)-1)=ke_con((2*j)-1, (2*k)-1)+M_el_prop\{3,N\}(3,5);$ %
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости $X_j - X_k$ -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*k)-1)=ke_con((2*j), (2*k)-1)+M_el_prop\{3,N\}(4,5);$ % добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_j -$
 X_k -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j), (2*k))=ke_con((2*j), (2*k))+M_el_prop\{3,N\}(4,6);$ % добавление в
установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_j -$
 Y_k -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*j)-1, (2*k))=ke_con((2*j)-1, (2*k))+M_el_prop\{3,N\}(3,6);$ % добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_j -$
 Y_k -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*k)-1, (2*i)-1)=ke_con((2*k)-1, (2*i)-1)+M_el_prop\{3,N\}(5,1);$ %
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости $X_k - X_i$ -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*k), (2*i)-1)=ke_con((2*k), (2*i)-1)+M_el_prop\{3,N\}(6,1);$ % добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_k -$
 X_i -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*k), (2*i))=ke_con((2*k), (2*i))+M_el_prop\{3,N\}(6,2);$ % добавление в
установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $Y_k -$
 Y_i -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

$ke_con((2*k)-1, (2*i))=ke_con((2*k)-1, (2*i))+M_el_prop\{3,N\}(5,2);$ % добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости $X_k -$
 Y_i -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

```

ke_con((2*k)-1, (2*j)-1)=ke_con((2*k)-1, (2*j)-1)+M_el_prop{3,N}(5,3);%
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости Xk - Xj -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k), (2*j)-1)=ke_con((2*k), (2*j)-1)+M_el_prop{3,N}(6,3);% добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости Yk -
Xj -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k), (2*j))=ke_con((2*k), (2*j))+M_el_prop{3,N}(6,4);% добавление в
установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости Yk -
Yj -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k)-1, (2*j))=ke_con((2*k)-1, (2*j))+M_el_prop{3,N}(5,4);% добавление
в установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости Xk -
Yj -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента

ke_con((2*k)-1, (2*k)-1)=ke_con((2*k)-1, (2*k)-1)+M_el_prop{3,N}(5,5);%
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости Xk - Xk -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k), (2*k)-1)=ke_con((2*k), (2*k)-1)+M_el_prop{3,N}(6,5);%
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости Yk - Xk -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k), (2*k))=ke_con((2*k), (2*k))+M_el_prop{3,N}(6,6);% добавление в
установленное место в модифицированную глобальную матрицу упругости Yk -
Yk -го значения модифицированной локальной матрицы жёсткости
рассматриваемого конечного элемента
ke_con((2*k)-1, (2*k))=ke_con((2*k)-1, (2*k))+M_el_prop{3,N}(5,6);%
добавление в установленное место в модифицированную глобальную матрицу
упругости Xk - Yk -го значения модифицированной локальной матрицы
жёсткости рассматриваемого конечного элемента
end
disp ('Формирование модифицированной глобальной матрицы упругости
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции завершено!');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация расчёта модифицированного глобального вектор-столбца
перемещений для узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой
конструкции');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
U_con=ke_con\force_array;% расчёт модифицированной глобальной матрицы

```

```

перемещений узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
disp ('Расчёт модифицированного глобального вектор-столбца перемещений для
узлов конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции завершён!');%
описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация формирования модифицированных локальных вектор-столбцов
перемещений для узлов конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции');% описание этапа работы функции (для удобства и наглядности)
for N=1:1:N;% инициация цикла перебора конечных элементов
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    i=Mfe_jun(1,N);% назначение i-го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов
    j=Mfe_jun(2,N);% назначение j-го узла для данного элемента с использованием
глобальной нумерации узлов
    k=Mfe_jun(3,N);% назначение k-го узла для данного элемента с
использованием глобальной нумерации узлов
    U_loc{1, N}(1, 1)=U_con((2*i)-1, 1);% запись из модифицированной глобальной
матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную матрицу значения
перемещения i-го узла по оси X
    U_loc{1, N}(2, 1)=U_con((2*i), 1);% запись из модифицированной глобальной
матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную матрицу значения
перемещения i-го узла по оси Y
    U_loc{1, N}(3, 1)=U_con((2*j)-1, 1);% запись из модифицированной глобальной
матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную матрицу значения
перемещения j-го узла по оси X
    U_loc{1, N}(4, 1)=U_con((2*j), 1);% запись из модифицированной глобальной
матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную матрицу значения
перемещения j-го узла по оси Y
    U_loc{1, N}(5, 1)=U_con((2*k)-1, 1);% запись из модифицированной
глобальной матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную
матрицу значения перемещения k-го узла по оси X
    U_loc{1, N}(6, 1)=U_con((2*k), 1);% запись из модифицированной глобальной
матрицы перемещений узлов в модифицированную локальную матрицу значения
перемещения k-го узла по оси Y
end
disp ('Формирование модифицированных локальных вектор-столбцов
перемещений для узлов конечных элементов КЭ-схемы рассчитываемой
конструкции завершено!');% описание этапа работы функции (для удобства и
наглядности)
disp ('Инициация расчёта откорректированных с применением переменных
параметров упругости деформаций и напряжений для конечных элементов КЭ-
схемы рассчитываемой конструкции');% описание этапа работы функции (для
удобства и наглядности)

```

```

for N=1:1:N;% инициация цикла перебора конечных элементов ✓
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
M_el_prop{4, N}=M_el_prop{1, N}*U_loc{1, N};% расчёт откорректированных ✓
деформаций для рассматриваемого конечного элемента
M_el_prop{5, N}=M_el_prop{2, N}*M_el_prop{4, N};% расчёт ✓
откорректированных напряжений для рассматриваемого конечного элемента
end
disp ('Расчёт откорректированных деформаций и напряжений для конечных ✓
элементов КЭ-схемы рассчитываемой конструкции завершён!');% описание этапа ✓
работы функции (для удобства и наглядности)
disp ('Инициация усреднения по соседним треугольным конечным элементам ✓
откорректированных деформаций и напряжений');% описание этапа работы ✓
функции (для удобства и наглядности)
for i_sq=1:1:(N/2)% инициация цикла перебора квадратных конечных элементов ✓
конечноэлементной схемы рассчитываемой конструкции
    Sq_char(1, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(1, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(1, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированной деформации по оси X для двух соседних ✓
КЭ
    Sq_char(2, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(2, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(2, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированной деформации по оси Y для двух соседних ✓
КЭ
    Sq_char(3, i_sq)=(M_el_prop{4, (i_sq*2)-1}(3, 1)+M_el_prop{4, (i_sq*2)}(3, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированной сдвиговой деформации для двух соседних ✓
КЭ

    Sq_char(4, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(1, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(1, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированного напряжения по оси X для двух соседних ✓
КЭ
    Sq_char(5, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(2, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(2, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированного напряжения по оси Y для двух соседних ✓
КЭ
    Sq_char(6, i_sq)=(M_el_prop{5, (i_sq*2)-1}(3, 1)+M_el_prop{5, (i_sq*2)}(3, 1)) ✓
/2;% усреднение откорректированного сдвигового напряжения для двух соседних ✓
КЭ
end
disp ('Усреднение по соседним конечным элементам откорректированных ✓
деформаций и напряжений завершено!');% описание этапа работы функции (для ✓
удобства и наглядности)
disp ('Расчёт конструкции с использованием модифицированной постановки ✓
метода конечных элементов завершён!');% описание этапа работы функции (для ✓
удобства и наглядности)
end

```