

Р РК 218-149-2018 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Приказ Председателя Комитета автомобильных дорог Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 21 декабря 2018 года № 122

Предисловие

1	РАЗРАБОТАНЫ И ВНЕСЕНЫ	Акционерным обществом "Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт" (АО "КаздорНИИ")
2	УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕННЫ В ДЕЙСТВИЕ	Приказом Председателя Комитета автомобильных дорог Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан № 122 от 21 декабря 2018 года
3	СОГЛАСОВАНЫ	Акционерным обществом "НК "ҚазАвтоЖол" № 03/14-2-2591-И от 12 ноября 2018 года
4	СРОК ПЕРВОЙ ПРОВЕРКИ	2023 год
	ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ	5 лет
5	ВВЕДЕННЫ ВПЕРВЫЕ	

Документ доступен к просмотру в информационно-правовой системе нормативно-правовых актов Республики Казахстан "Эділет"

Настоящие рекомендации не могут быть полностью или частично воспроизведены, тиражированы и распространены без разрешения Комитета автомобильных дорог Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан

Содержание

	Введение
1	Область применения
2	Нормативные ссылки
3	Термины и определения
4	Методика использования программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov
4.1	Общая постановка задачи
4.2	Формирование массивов координат
4.3	Граничные условия
4.4	Определяющие соотношения уравнения равновесия

4.5 Вычисление матрицы градиентов четырехугольного элемента с восемью узлами

4.6 Алгоритм определения деформации и напряжений

4.7 Краткая инструкция по использованию программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

4.8 Примеры расчетов по программе BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

Приложение А (обязательное) Исходный код программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov Приложение Б (

обязательное) Исходный код подпрограммы BtDBnds

Библиография

Введение

Настоящие методические рекомендации разработаны согласно плану работ, принятому в рамках выполнения темы Б01.02 "Разработка теоретических решений и программ для определения напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды".

Документ содержит постановку типовой задачи по определению напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной конструкции, статически нагруженной весом автомобиля, и основные формулы из алгоритма расчета методом конечных элементов. В методе применяется высокоточный квадратичный прямоугольный конечный элемент с восемью узлами. В приложении А приведен текст (листинг) расчетной программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov на языке MATLAB [1-4], снабженный необходимыми комментариями. В приложении Б приводится листинг подпрограммы BDB0, предназначенный для вычисления матрицы жесткости элемента. Приводится также краткая инструкция по использованию программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov. В конце документа приведен список использованной литературы.

1 Область применения

1.1 Настоящие рекомендации распространяются на сеть автомобильных дорог общего пользования Республики Казахстан и предназначены для решения вопросов, связанных с проектированием многослойных автомобильных дорог общего пользования.

1.2 Рекомендациями следует руководствоваться при проектировании конструкций дорожных одежд для автомобильных дорог общего пользования, для расчета дорожных одежд на стадиях проектирования и эксплуатации, а также при решении инженерно-экономических задач применительно к автомобильным дорогам.

2 Нормативные ссылки

Для применения настоящих рекомендаций необходимы следующие ссылочные нормативные документы:

СП РК 3.03-103-2014 "Проектирование жестких дорожных одежд"

СП РК 3.03-104-2014 "Проектирование нежестких дорожных одежд"

Примечание - При пользовании настоящими рекомендациями целесообразно проверить действие ссылочных документов по ежегодно издаваемому информационному указателю "Нормативные документы по стандартизации", составленному по состоянию на текущий год и соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящими рекомендациями следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящих рекомендациях применяются следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 Дорожная одежда: Многослойная конструкция в пределах проезжей части автомобильной дороги, воспринимающая нагрузку от автотранспортного средства и передающая ее на грунт.

3.2 Земляное полотно: Конструктивный элемент, служащий основанием для размещения дорожной одежды, а также технических средств организации дорожного движения и обустройства автомобильной дороги.

3.3 Деформация: Относительная величина, характеризующая изменение линейных размеров тела по отношению к его первоначальным размерам.

3.4 Напряжение: Относительная величина, определяемая нормальной или касательной нагрузкой, приходящейся на единицу площади.

3.5 Дорожная одежда нежесткая: Дорожная одежда со слоями, устроенными из разного вида асфальтобетонов, из материалов и грунтов укрепленных битумом, цементом, известью, комплексными и другими вяжущими, а также из слабосвязных зернистых материалов

3.6 Конструктивный слой: Каждый слой дорожной одежды, состоящий из однородных материалов и отличающийся от соседних слоев видом материалов, его прочностью и составом. Учитывается при расчете прочности дорожной одежды.

3.7 Покрытие дорожное: Одно- или многослойная верхняя часть дорожной одежды, устраиваемая на дорожном основании, непосредственно воспринимающая нагрузки от транспортных средств и предназначенная для обеспечения заданных эксплуатационных требований и защиты дорожного основания от воздействия атмосферных факторов.

3.8 Основание дорожное: Нижний несущий слой дорожной одежды, воспринимающий нагрузки от транспортных средств совместно с покрытием и

предназначенный для ее распределения на дополнительные слои или непосредственно на грунт земляного полотна.

3.9 Метод конечных элементов: Численный метод решения дифференциальных уравнений математической физики.

4 Методика использования программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

4.1 Общая постановка задачи

Для построения математической модели автомобильной дороги общего пользования рассмотрим конструкцию, состоящую из двухслойной асфальтобетонной дорожной одежды и основания дорожной одежды, состоящего из щебеночно-песчаной смеси с 8 % цементной добавкой, щебеночной смеси и гравийно-песчаной смеси. Основание дорожной одежды устраивается на грунтовом основании из легкого суглинка (рисунок 1).

Возможности численного метода – метода конечных элементов, применяемого для решения задачи о равновесии многослойной конструкции, позволяют сравнительно легко назначать требуемые значения геометрических размеров конструктивных слоев и физико-механических характеристик материалов, используемых в конструкции.

Поэтому, приведенные в таблице 1 геометрические размеры конструктивных слоев в рассматриваемой математической модели (рисунок 1) и физико-механические свойства материалов конструктивных элементов (в том числе модули упругости) назначены согласно [6].



1 – покрытие, асфальтобетон мелкозернистый плотный; 2 – асфальтобетон крупнозернистый пористый; 3 – щебеночно-песчаная смесь 8 %; 4 – щебеночная смесь; 5 – гравийно-песчаная смесь; 6 – грунт суглинок легкий

Рисунок 1 – Схематический вид дорожной конструкции

Значения физико-механических свойств материалов конструктивных элементов вводятся в 108-110 строках приложения А.

Таблица 1 – Характеристики конструктивных слоев

Материал конструктивного слоя	Модуль упругости Е, МПа	Коэффициент Пуассона,	Высота слоя, м
1 Асфальтобетон мелкозернистый плотный	3200	0,18	0,05
2 Асфальтобетон крупнозернистый пористый	2000	0,27	0,10
3 Щебеночно-песчаная смесь 8%	800	0,30	0,40
4 Щебеночная смесь	275	0,30	0,45
5 Гравийно-песчаная смесь	180	0,30	1,00
6 Грунт суглинок легкий	50	0,35	-

Для компьютерной реализации алгоритма решения задачи о напряженно-деформированном состоянии дорожной конструкции методом конечных элементов разработана расчетная программа **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov** на алгоритмическом языке системы MATLAB.

Исследуемая область разбивается на квадратичные прямоугольные конечные элементы с восемью узлами (рисунок 2). Местная нумерация узлов с 1 по 8 в таком конечном элементе начинается с левого нижнего узла, и осуществляется в направлении против часовой стрелки.

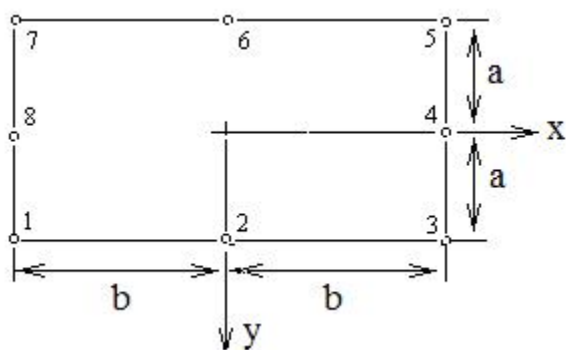


Рисунок 2 – Прямоугольный элемент с восемью узлами

Для создания конечно-элементной сетки применялись переменные шаги и в направлении координатных осей и (рисунок 3).

В каждом горизонтальном ряде (рисунок 3) расположено по 60 элементов ($egor=60$), а количество горизонтальных рядов элементов – 23 ($ever=23$). Следовательно, исследуемая область разбита на 1380 конечных элементов, а число узлов равно $np=(3*ever+2)*egor+2*ever+1=4307$ (строки 12-15 приложения А).

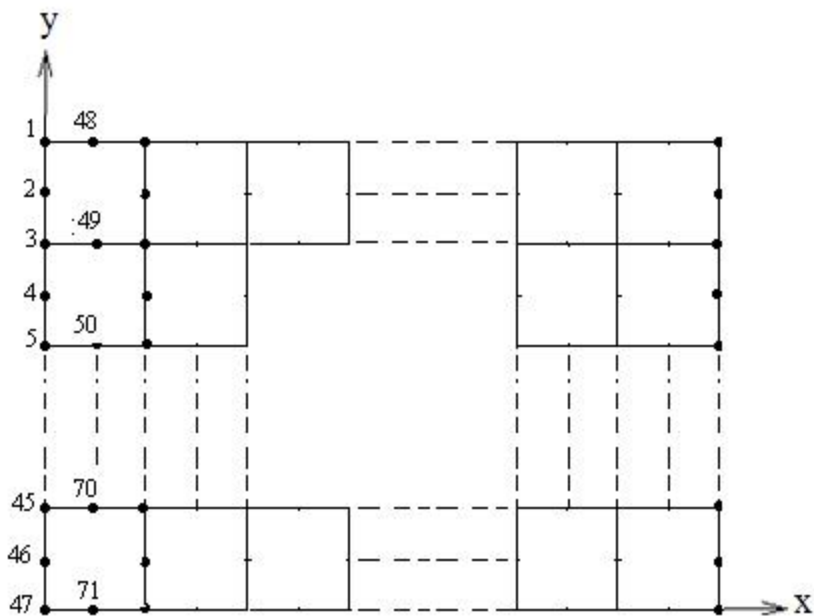
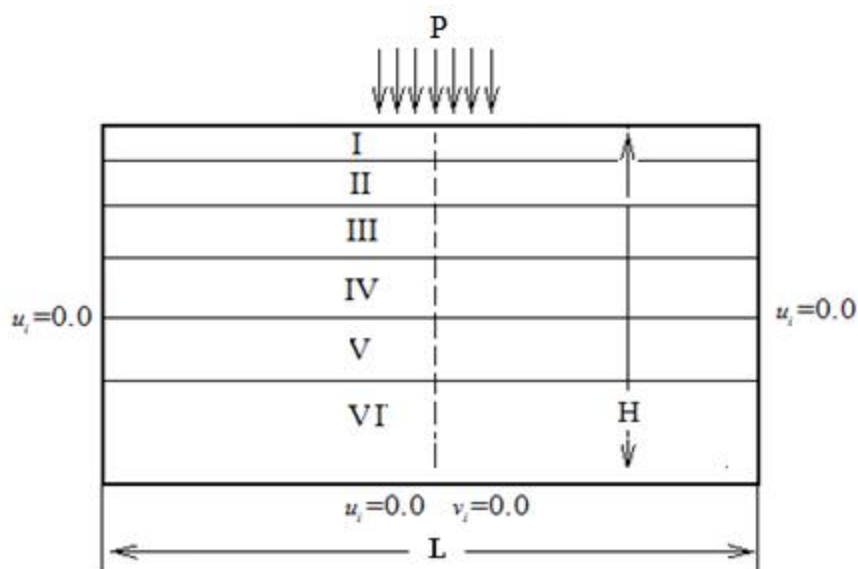


Рисунок 3 – Схематический вид конечно-элементной разбивки исследуемой области

Глобальная нумерация узлов начинается с крайнего левого вертикального ряда узлов, и осуществляется сверху вниз и перемещается слева направо (рисунок 3).

При этом разбивка получается нерегулярной, т.к. в восьмиузловых элементах центральный узел отсутствует. В данном случае, в одном вертикальном ряду имеются 47 узлов, а в следующем – 24 узла.

Требуется определить компоненты вектора перемещений в узловых точках конечно-элементной сетки под действием веса автомобиля, передаваемого через одно колесо и приложенного в виде вертикальных нагрузок в соответствующих узлах (рисунок 4).



L и H – ширина и высота исследуемой области соответственно; P – нагрузка от колеса транспортного средства; u_i, v_i – компоненты перемещения точек на границах в направлении координатных осей x и y ; I – VI конструктивные слои дорожной одежды и грунтового основания

Рисунок 4 – Расчетная схема задачи

4.2 Формирование массивов координат

В программе **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov** заданы массивы dx и dy , содержащие значения шагов по координатам. Наличие таких массивов позволяет задавать переменные шаги по координатам (строки 44-63 приложения А).

В блоке формирования координат программы (строки 68-91 приложения А) глобальные номера узлов текущего конечного элемента обозначены через $n1, n2, \dots, n8$, соответствующие локальным номерам 1, 2, ..., 8, приведенным на рисунке 2. Конкретные значения глобальных номеров узлов, вычисляемые по алгоритмам вычисления $n1, n2, \dots, n8$ в программе **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov** определяются номером элемента в текущем горизонтальном ряде узлов ($m=1:egor$) и номером элемента в текущем вертикальном ряде узлов ($n=1:ever$).

4.3 Граничные условия

Из рисунка 4 видно, что граничные условия в перемещениях по бокам и на нижней границе исследуемой области задаются в виде нулевых значений соответствующих компонентов вектора перемещений ($u=0$ и $u=v=0$). Чтобы задавать граничные условия в виде известных перемещений некоторых узлов также нужно создать специальный массив Mz , содержащий номера узлов задаваемых известных перемещений (строки 23-43 приложения А).

Граничные условия в нагрузках задаются в виде сосредоточенных вертикальных усилий, рассчитанных от веса автомобиля, приходящегося на одно колесо. Методика расчета граничных условий в нагрузках приведена в приложении А (строки 112-166). Конечный результат расчета представляет собой вектор правой части уравнения равновесия системы (1).

4.4 Определяющие соотношения уравнения равновесия

Уравнение равновесия системы в случае применения квадратичных элементов, как и в случае линейных треугольных конечных элементов, в матричной форме имеет вид [7]:

(1)

где $[K]$ – матрица жесткости системы размерности $(2*nr, 2*nr)$;

- вектор узловых перемещений размерности $2 \cdot n_p$;
- вектор узловых нагрузок размерности $2 \cdot n_p$;
- n_p – общее число узлов в конечно-элементной сетке.

Порядок вычисления значений компонентов вектора, соответствующие граничным условиям в нагрузках приведены в строках 150-165 приложения А. Остальные компоненты этого вектора, в силу условий равновесия узлов, равны нулю.

В уравнении (1) матрица жесткости системы определяется в виде суммы

где n – общее число элементов в конечно-элементной сетке; K_e – матрица жесткости текущего элемента e .

Матрица жесткости элемента вычисляется с помощью объемного интеграла (2):

(2)

где алгоритм вычисления матрицы упругости приведены в строках 204-207 приложения А.

В выражении (2) так называемая матрица градиентов формируется путем дифференцирования функций формы по координатам.

В случае нелинейной зависимости функций формы от координат, что имеет место в случае квадратичных элементов с восемью узлами, производные от функций формы по координатам сами являются функциями координат, и вычисление интеграла представляет собой самостоятельную задачу с громоздкими математическими выкладками.

4.5 Вычисление матрицы градиентов четырехугольного элемента с восемью узлами

Для численного интегрирования объемного интеграла в соотношении (2) предлагается [7] переходить к локальной системе координат (рисунок 5). Здесь замену переменных интегрирования можно сделать с помощью соотношения (3):

(3)

где t – единичная толщина элемента, J – определитель матрицы преобразования координат Якоби. Тогда объемный интеграл в (2) приводится к виду (4):

(4)

Переход к переменным интегрирования и упрощает пределы интегрирования, что позволяет разработать единый алгоритм вычисления интегралов через квадратуру Гаусса-Лежандра.

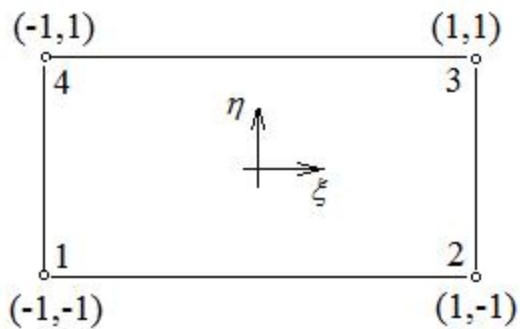


Рисунок 5 – Система координат для линейного прямоугольного элемента

4.6 Алгоритм определения деформации и напряжений

Выражение перепишем в следующем виде (5):

(5)

где

,

,

,

, (6)

,

,

Теперь из выражения (5) компоненту тензора деформации определим следующим образом:

(7)

или учитывая равенства (5)

(8)

В выражении (8) координаты ξ и η относятся к линейному прямоугольнику (рисунок 5), и им при рассмотрении восьмиугольных прямоугольников будут соответствовать ξ и η .

Аналогично определяются и остальные компоненты тензора деформации. Из формулы (5) для компоненты имеем:

или, учитывая (4) и ϵ_{xx} , получим:

(9)

Деформация сдвига определяется аналогичным образом.

Для определения компонентов напряжений воспользуемся формулами вычисления напряжений [7]:

, и σ_{xy} , (10)

где, для плоской деформации $\nu = 0$;

E - модуль упругости;

- коэффициент Пуассона.

Программа численной реализации приведенного алгоритма вычисления компонентов вектора деформации и вектора напряжений приведена в строках 412-527 приложения А настоящего документа. Кроме этого, в приложении А предусмотрены фрагменты программ построения графиков горизонтальных перемещений точек характерных вертикальных сечений (строки 297-312 приложения А), вертикальных перемещений точек горизонтальных сечений, расположенных на различных глубинах (строки 316-408 приложения А) и значений компонент векторов деформаций и напряжений (строки 441-475, 529-602 приложения А).

4.7 Краткая инструкция по использованию программы

BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

Целью создания настоящего нормативного документа является разработка расчетной программы на языке MATLAB.

Расчетная программа предназначена для вычисления значений компонентов перемещений, деформаций и напряжений в точках исследуемой дорожной конструкции (рисунок 4).

В мировой практике существуют и другие пакеты программ, способных решать задачу о напряженно-деформированном состоянии в твердом деформируемом теле. Наиболее известным среди них является программный комплекс ANSYS. Однако, все они являются коммерческими, алгоритм их реализации скрытый, и простому пользователю использовать их для расчетов своих задач, тем более их видоизменить просто невозможно. Настоящий программный продукт BASIC_NDS_MKE_8_uzlov является открытым, алгоритм его реализации расписан открытым текстом, программа легко адаптируется и всегда есть возможность ее усовершенствовать. Например, ее можно дополнить отдельными блоками и решить задачи об условиях образования низкотемпературных трещин в дорожном покрытии, усталостных трещин в конструктивных слоях дорожной одежды.

Для запуска программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov для решения конкретной задачи, в первую очередь необходимо, чтобы в компьютере была установлена одна из версии программного комплекса MATLAB, и в директорию этого комплекса был внесен текст (листинг) программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov. На рабочий стол компьютера выносится ярлык программного комплекса MATLAB (рисунок 6).

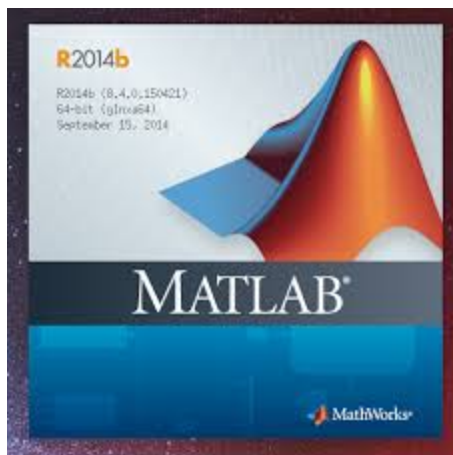


Рисунок 6 – Ярлык программного комплекса MATLAB

В приложении А настоящего документа приведен исходный код программы **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov**. Для облегчения обращения к тексту листинг снабжен построчной нумерацией, которую нужно удалить перед установкой программы в директорию программного комплекса MATLAB.

Вызов программного комплекса MATLAB для расчетов осуществляется двойным щелчком на ярлыке (рисунок 6).

На рабочем столе появится главная страница MATLAB (рисунок 7).

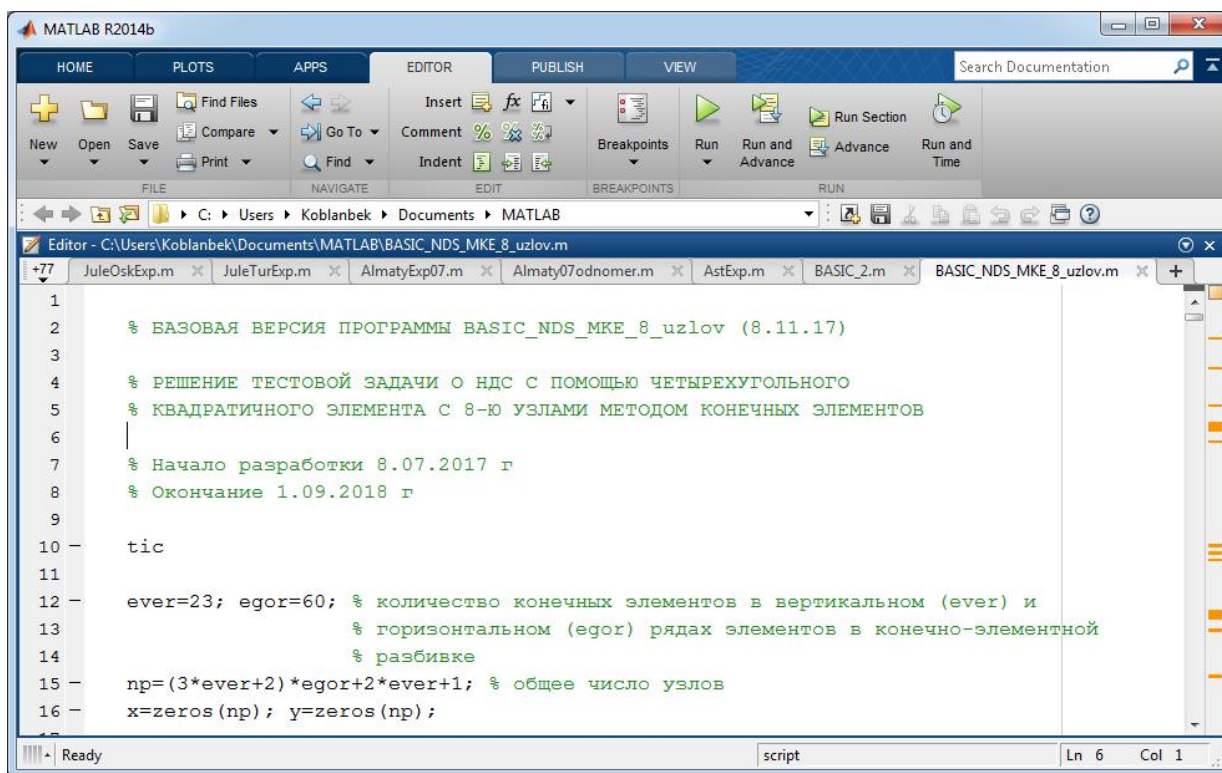


Рисунок 7 – Вид главной страницы программы на MATLAB

На рисунке 7 на главной странице MATLAB приведен фрагмент программы **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov**. Если же этот фрагмент будет отсутствовать, а на главной

странице присутствует фрагмент другой программы, то поиск необходимой программы **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov** будет произведен простым нажатием на кнопку **OPEN**, расположенной в верхней части главной страницы. После нажатия кнопки **OPEN** получим список программ, находящихся в директории MATLAB (рисунок 8).

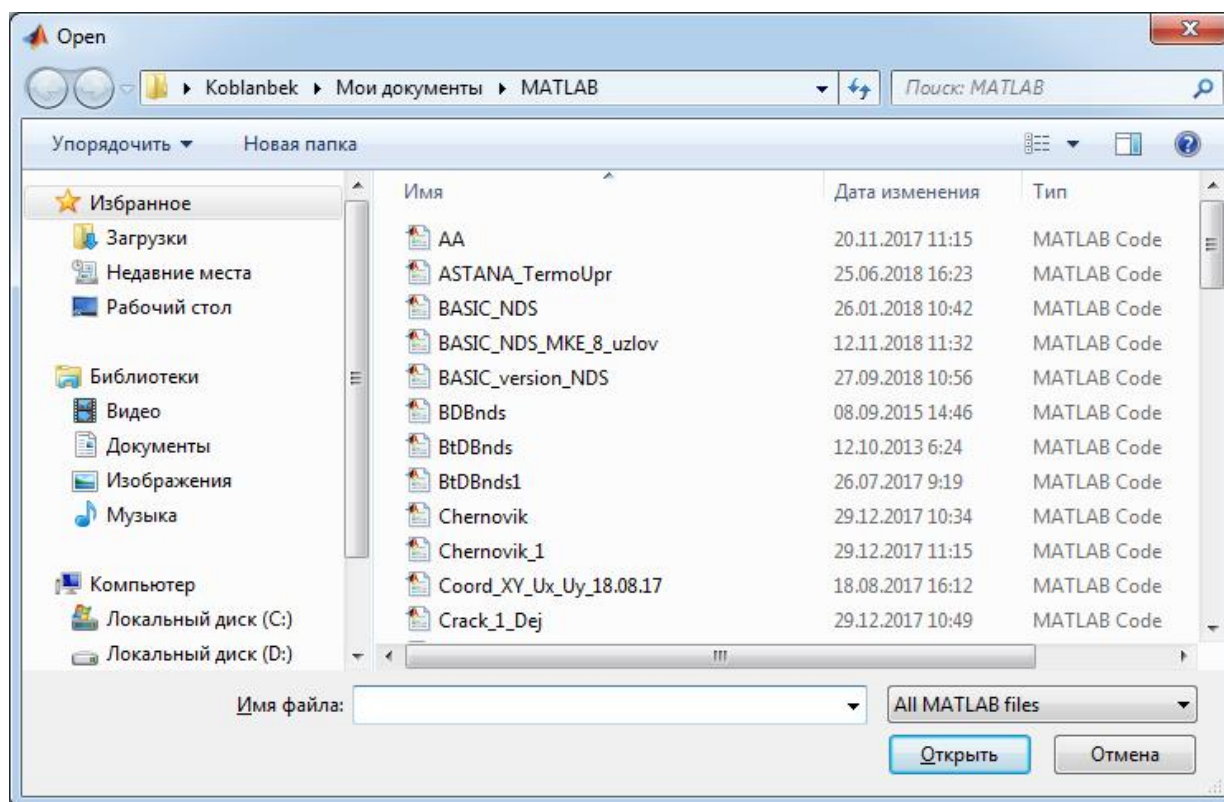


Рисунок 8 – Вид списка программ в директории

Простым нажатием на название нужной программы **BASIC_NDS_MKE_8_uzlov** из приведенного списка вызывается эта программа на главную страницу (рисунок 7).

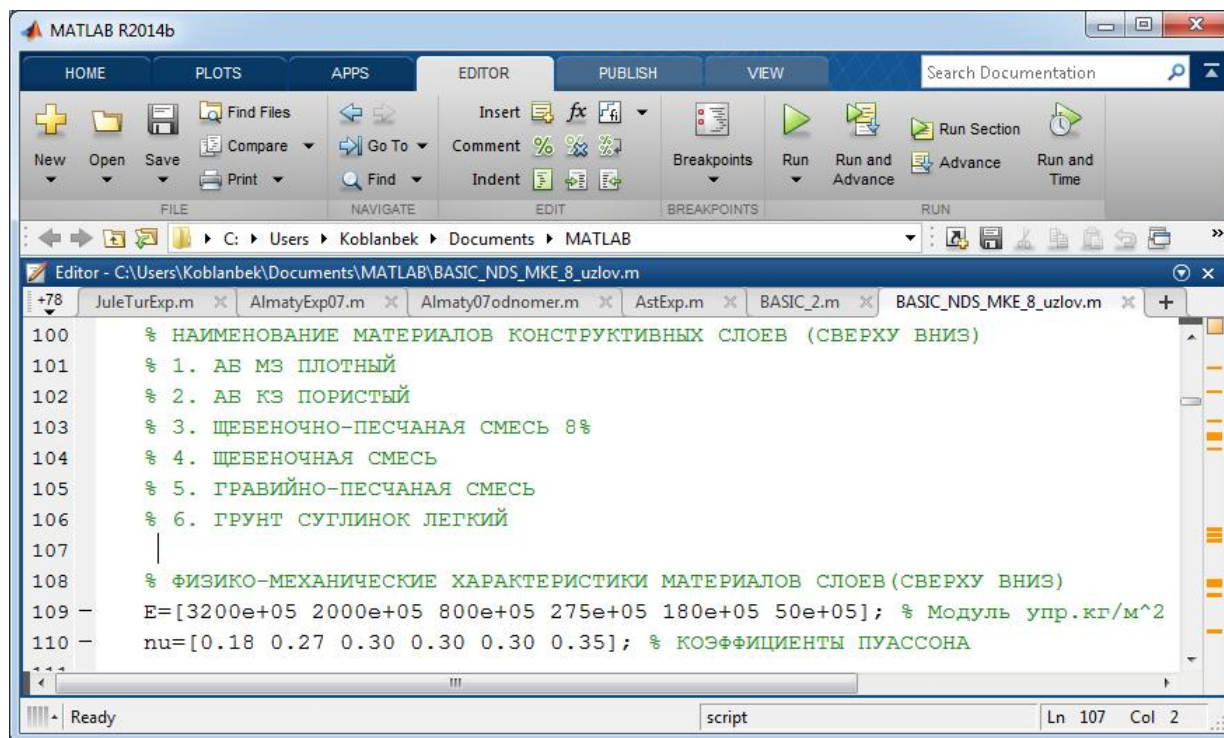


Рисунок 9 – Строка 109-110 для введения физико-механических характеристик материалов слоев

По умолчанию в программе установлены физико-механические характеристики автомобильной дороги. Для изменения их значений данные необходимо ввести в строки 109-110 (рисунок 9). После введения физико-механических характеристик вводим значение прилагаемой вертикальной силы на поверхность в строку 150, а так же вводим номера поверхностных узлов куда необходимо приложить нагрузку (рисунок 10).

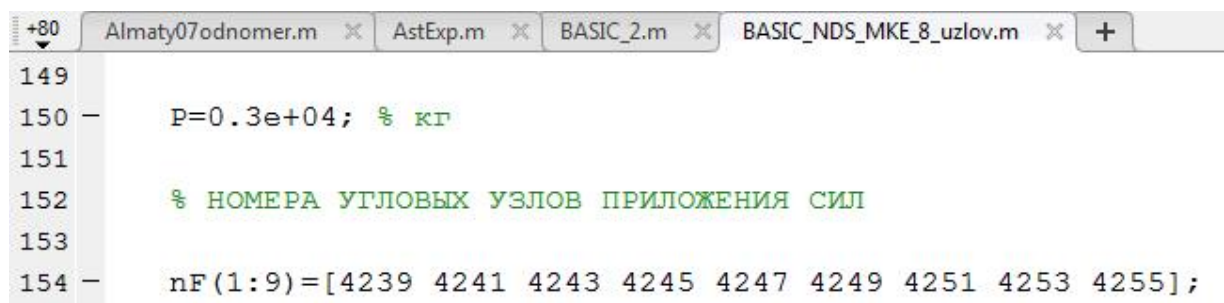


Рисунок 10 – Строка для введения значения прилагаемой силы на поверхность и номеров узлов приложения сил

Следующим этапом при решении задачи является получение графических результатов по необходимым для пользователя требованиям. Ниже приведены примеры запроса графиков вертикальных перемещений узлов на разных глубинах (рисунки 11-17).

```
Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+79  AlmatyExp07.m  Almaty07odnomer.m  AstExp.m  BASIC_2.m  BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
354  % ГРАФИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ
355  % ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ НА ГЛУБИНАХ h
356  X=zeros(2*egor+1);
357  Y=zeros(2*egor+1);
358  for i=1:(2*egor+1)
359      j=Nv(45,i); % ГЛУБИНА h=5 CM
360      X(i)=x(j);
361      Y(i)=U(j+np);
362  end
363  hPlot=plot(X,Y,'-');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
364  set(hPlot,'LineWidth',2);
365  hold on
```

Рисунок 11 – Получение графиков вертикальных перемещений узлов на глубине $h=5$ см

```
Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+79  AlmatyExp07.m  Almaty07odnomer.m  AstExp.m  BASIC_2.m  BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
367  X=zeros(2*egor+1);
368  Y=zeros(2*egor+1);
369  for i=1:(2*egor+1)
370      j=Nv(41,i); % ГЛУБИНА h=15 CM
371      X(i)=x(j);
372      Y(i)=U(j+np);
373  end
374  hPlot=plot(X,Y,'-');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
375  set(hPlot,'LineWidth',2);
376  hold on
```

Рисунок 12 – Получение графиков вертикальных перемещений узлов на глубине $h=15$ см

```

Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+79 - AlmatyExp07.m x Almaty07odnomer.m x AstExp.m x BASIC_2.m x BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m x
378 - X=zeros(2*egor+1);
379 - Y=zeros(2*egor+1);
380 - for i=1:(2*egor+1)
381 -     j=Nv(39,i); % ГЛУБИНА h=25 CM
382 -     X(i)=x(j);
383 -     Y(i)=U(j+np);
384 -     Ux325(i)=U(j);
385 -     Uy325(i)=Y(i);
386 - end
387 - hPlot=plot(X,Y,'--');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
388 - set(hPlot,'LineWidth',2);
389 - hold on

```

Рисунок 13 – Получение графиков вертикальных перемещений узлов на глубине $h=25$ см

```

Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+79 - AlmatyExp07.m x Almaty07odnomer.m x AstExp.m x BASIC_2.m x BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m x
391 - for i=1:(2*egor+1)
392 -     j=Nv(35,i); % ГЛУБИНА h=45 CM
393 -     X(i)=x(j);
394 -     Y(i)=U(j+np);
395 -     X345(i)=X(i);
396 -     Ux305(i)=U(j);
397 -     Uy305(i)=Y(i);
398 - end
399 - hPlot=plot(X,Y,'--');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
400 - set(hPlot,'LineWidth',2);
401 - hold on

```

Рисунок 14 – Получение графиков вертикальных перемещений узлов на глубине $h=45$ см

```

Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+78 JuleTurExp.m x AlmatyExp07.m x Almaty07odnomer.m x AstExp.m x BASIC_2.m x BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m x +
532 % ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ SigmaX0, SigmaY0 И
533 % TauXY0 В СРЕДИННЫХ УЗЛАХ ЭЛЕМЕНТОВ
534
535 X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
536 Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
537 for m=1:egor
538     n=Nv(1,2*m);
539     X(m)=x(n);
540     i23=NEv(23,m); % h=2,5 CM
541     i22=NEv(22,m); % h=7,5 CM
542     i20=NEv(20,m); % h=20,0 CM
543     i18=NEv(18,m); % h=40,0 CM
544     i14=NEv(14,m); % h=87,5 CM
545     i12=NEv(12,m); % h=120,0 CM
546     Y23(m)=SigmaX0(i23); % 2,5 CM
547     Y22(m)=SigmaX0(i22); % 7,5 CM
548     Y20(m)=SigmaX0(i20); % 20,0 CM
549     Y18(m)=SigmaX0(i18); % 40,0 CM
550     Y14(m)=SigmaX0(i14); % 87,5 CM
551     Y12(m)=SigmaX0(i12); % 120,0 CM
552 end
553 hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y18,'-.',X,Y14,'-r');...
554 grid on;xlabel('X, m');ylabel('SigmaX, МПа')
555 set(hPlot,'LineWidth',2);
556 figure

```

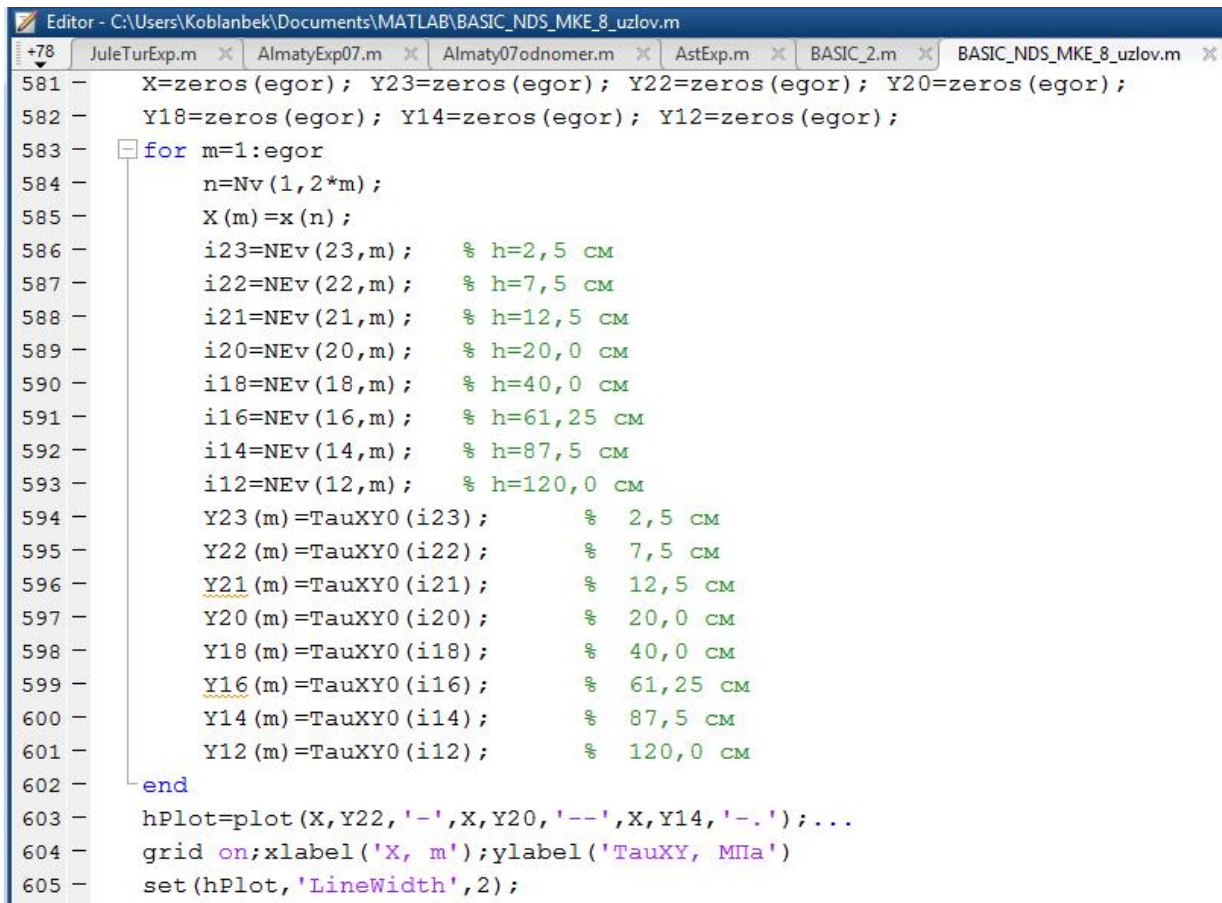
Рисунок 15 – Получение графиков компонент напряжений SigmaX

```

Editor - C:\Users\Koblanbek\Documents\MATLAB\BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m
+78 JuleTurExp.m x AlmatyExp07.m x Almaty07odnomer.m x AstExp.m x BASIC_2.m x BASIC_NDS_MKE_8_uzlov.m x
558 X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
559 Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
560 for m=1:egor
561     n=Nv(1,2*m);
562     X(m)=x(n);
563     i23=NEv(23,m); % h=2,5 CM
564     i22=NEv(22,m); % h=7,5 CM
565     i20=NEv(20,m); % h=20,0 CM
566     i18=NEv(18,m); % h=40,0 CM
567     i14=NEv(14,m); % h=87,5 CM
568     i12=NEv(12,m); % h=120,0 CM
569     Y23(m)=SigmaY0(i23); % 2,5 CM
570     Y22(m)=SigmaY0(i22); % 7,5 CM
571     Y20(m)=SigmaY0(i20); % 20,0 CM
572     Y18(m)=SigmaY0(i18); % 40,0 CM
573     Y14(m)=SigmaY0(i14); % 87,5 CM
574     Y12(m)=SigmaY0(i12); % 120,0 CM
575 end
576 hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y18,'-.',X,Y14,'-r');...
577 grid on;xlabel('X, m');ylabel('SigmaY, МПа')
578 set(hPlot,'LineWidth',2);
579 figure

```

Рисунок 16 – Получение графиков компонент напряжений SigmaY



```
581 - X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
582 - Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
583 - for m=1:egor
584 -     n=Nv(1,2*m);
585 -     X(m)=x(n);
586 -     i23=NEv(23,m); % h=2,5 CM
587 -     i22=NEv(22,m); % h=7,5 CM
588 -     i21=NEv(21,m); % h=12,5 CM
589 -     i20=NEv(20,m); % h=20,0 CM
590 -     i18=NEv(18,m); % h=40,0 CM
591 -     i16=NEv(16,m); % h=61,25 CM
592 -     i14=NEv(14,m); % h=87,5 CM
593 -     i12=NEv(12,m); % h=120,0 CM
594 -     Y23(m)=TauXY0(i23); % 2,5 CM
595 -     Y22(m)=TauXY0(i22); % 7,5 CM
596 -     Y21(m)=TauXY0(i21); % 12,5 CM
597 -     Y20(m)=TauXY0(i20); % 20,0 CM
598 -     Y18(m)=TauXY0(i18); % 40,0 CM
599 -     Y16(m)=TauXY0(i16); % 61,25 CM
600 -     Y14(m)=TauXY0(i14); % 87,5 CM
601 -     Y12(m)=TauXY0(i12); % 120,0 CM
602 - end
603 - hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y14,'-.');...
604 - grid on;xlabel('X, m');ylabel('TauXY, МПа')
605 - set(hPlot,'LineWidth',2);
```

Рисунок 17 – Получение графиков компонент напряжений TauXY

Просмотрев весь текст программы на главной странице, и установив все необходимые исходные данные, а при необходимости, внося изменения в тело программы, можно будет запустить программу на выполнение. Для этого достаточно нажать на кнопку Run (рисунок 18).

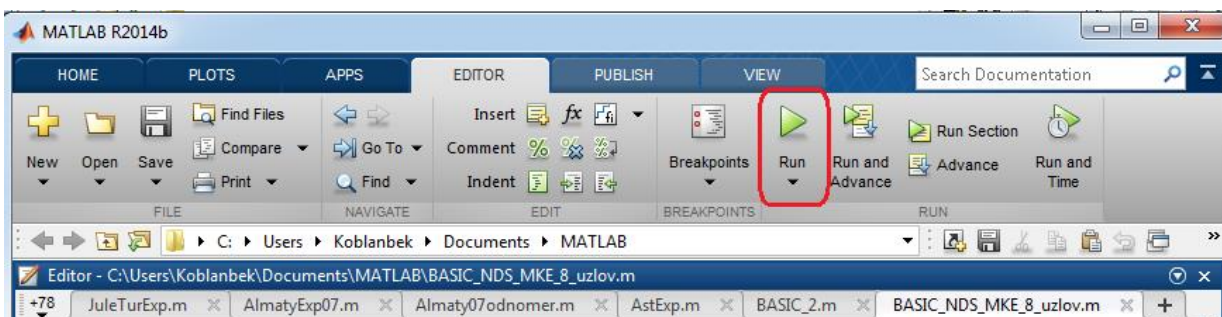


Рисунок 18 – Кнопка Run на панели инструментов для запуска программы

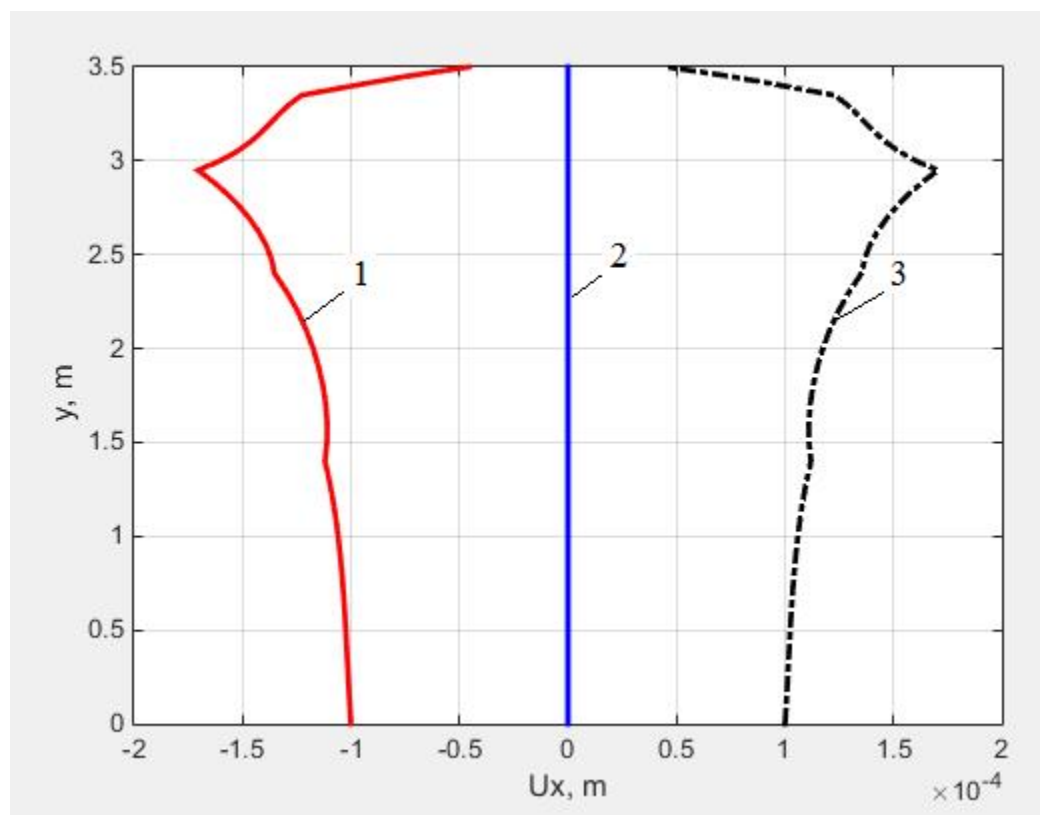
В тексте программы присутствуют команды, согласно которым на экран будет выводиться необходимая информация о результатах решения задачи. Такая

информация может иметь графическую форму, может быть в виде таблиц, или в виде текстового файла. Все это зависит от воли заказчика.

Ниже, на рисунках 13-18, в качестве примера приведены результаты решения тестовой задачи, где приведены картины формирования поля горизонтальных и вертикальных перемещений точек характерных сечений исследуемой области и компоненты напряжений в характерных горизонтальных сечениях. В тестовой задаче дорожная конструкция нагружена распределенной вертикальной нагрузкой от одиночного колеса автомобиля, действующей в центре поверхности дорожного покрытия.

4.8 Примеры расчетов по программе BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

Ниже приводятся результаты компьютерной реализации программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov в виде графиков перемещений и напряжений.



1–горизонтальные смещения точек вертикального сечения, отстоящего от вертикальной оси симметрии слева на 30 см; 2–горизонтальные смещения точек вертикальной оси симметрии; 3–горизонтальные смещения точек вертикального сечения, отстоящего от вертикальной оси симметрии справа на 30 см

Рисунок 19 – Горизонтальные смещения точек вертикального сечения

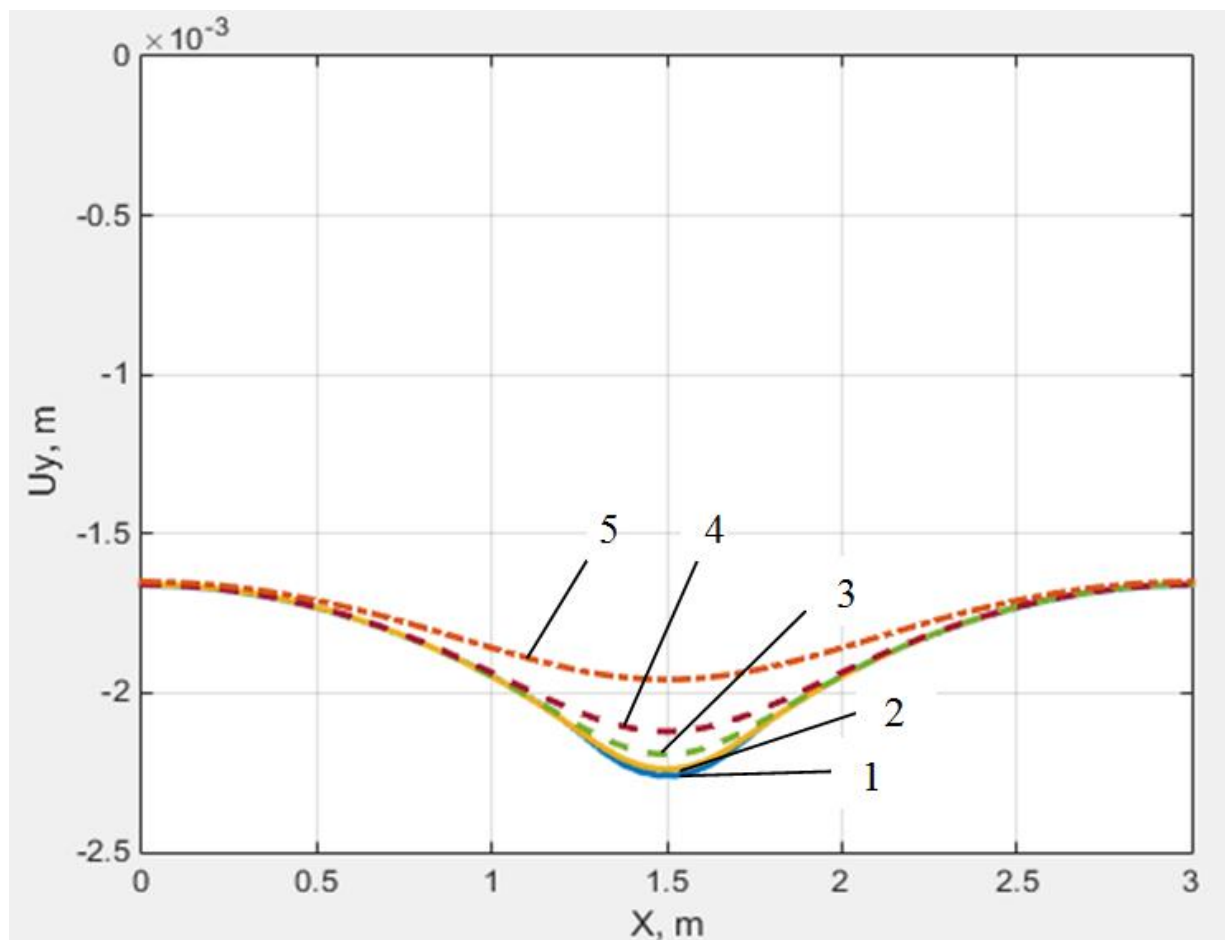


Рисунок 20 – Вертикальные смещения точек горизонтальных сечений, расположенных на глубинах: 1– $h=5$ см; 2– $h=15$ см; 3– $h=25$ см; 4– $h=45$ см; 5– $h=80$ см.

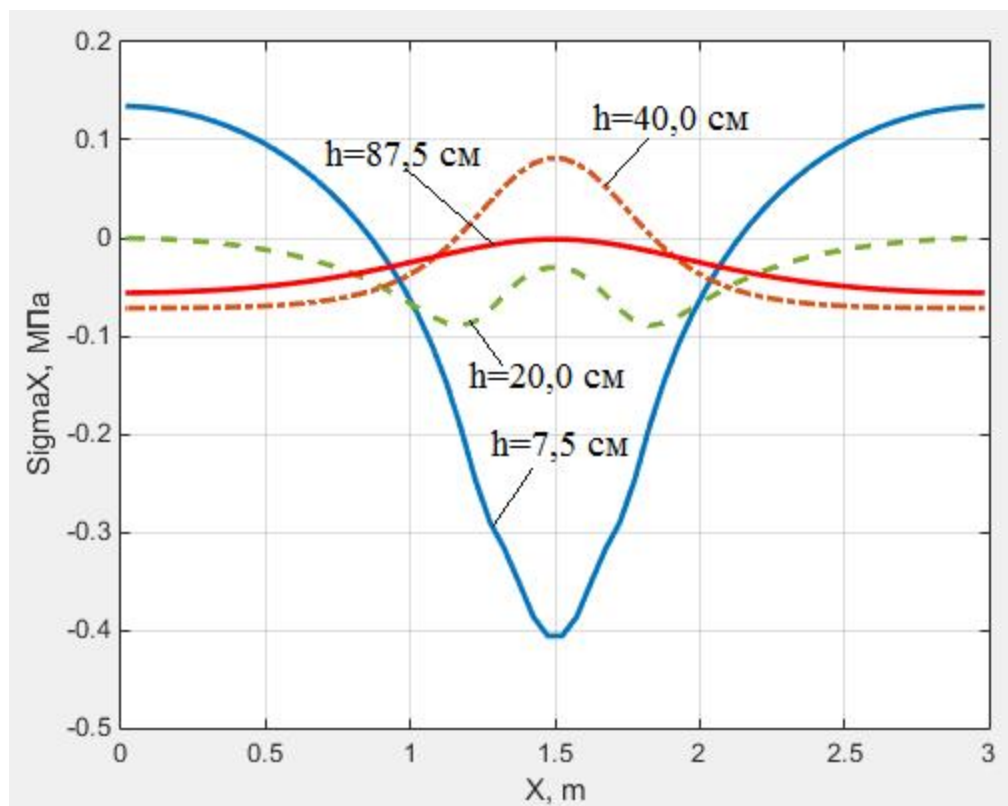


Рисунок 21 – Распределение напряжений на глубинах h

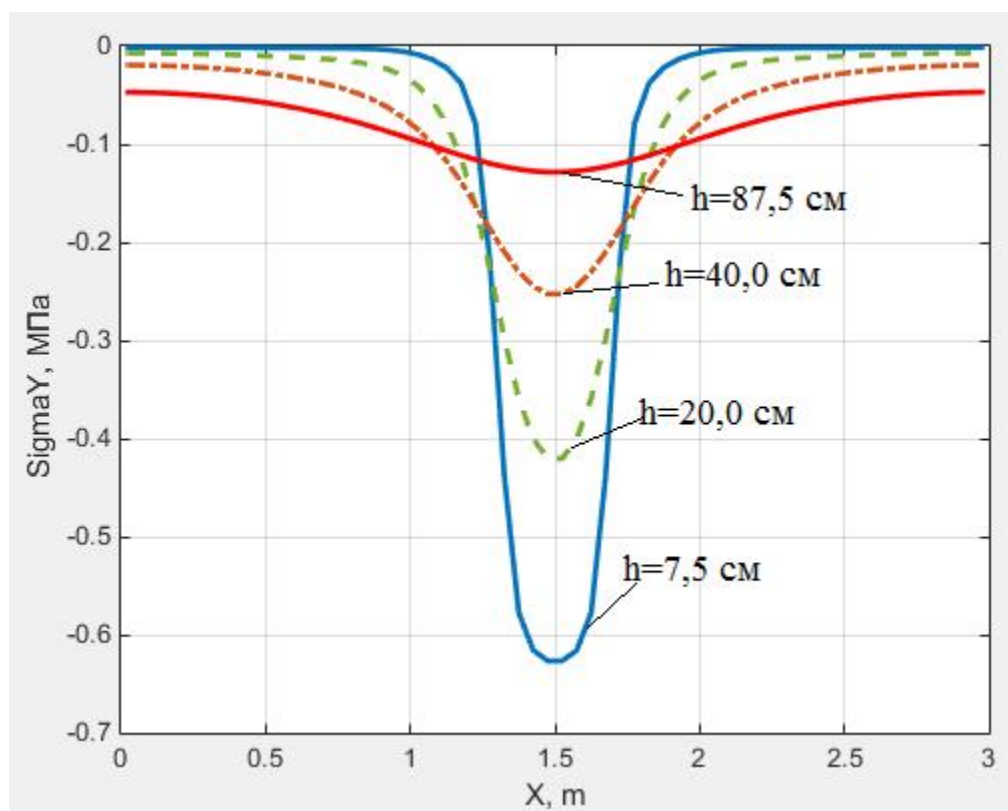


Рисунок 22 – Распределение напряжений на глубинах h

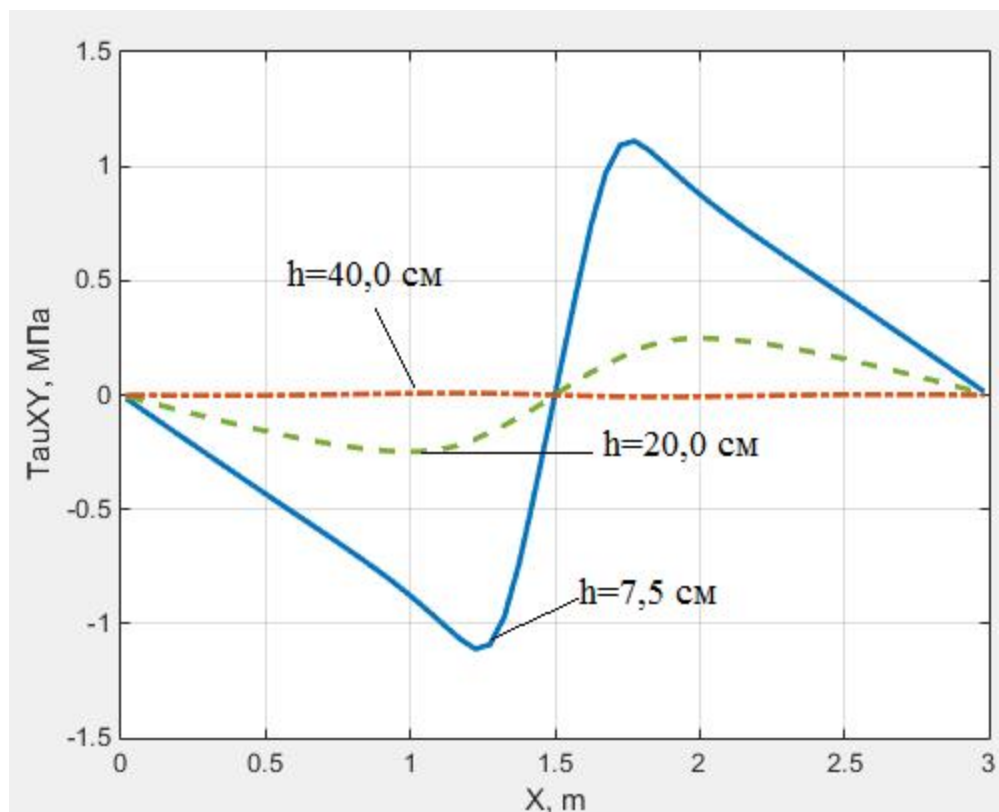


Рисунок 23 – Распределение напряжений на глубинах h

Приложение А

(обязательное)

Исходный код программы BASIC_NDS_MKE_8_uzlov

```

1  % БАЗОВАЯ ВЕРСИЯ ПРОГРАММЫ BASIC_NDS_MKE_8_uzlov
2  % РЕШЕНИЕ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ О НДС С ПОМОЩЬЮ
3  % ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНОГО
4  % КВАДРАТИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА С 8-Ю УЗЛАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ
5  % ЭЛЕМЕНТОВ
6
7  % Начало разработки 8.07.2017 г
8  % Окончание 1.09.2018 г
9
10 Tic
11
12 ever=23; egor=60; % количество конечных элементов в вертикальном (ever) и
13 % горизонтальном (egor) рядах элементов в конечно-элементной
14 % разбивке
15 np=(3*ever+2)*egor+2*ever+1; % общее число узлов
16 x=zeros(np); y=zeros(np);
17

```

```

18 % ПОРЯДОК НУМЕРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ - СЛЕВА НАПРАВО (РЯДЫ
% НАЧИНАЮТСЯ СНИЗУ)
19 % ПОРЯДОК НУМЕРАЦИИ УЗЛОВ - СЛЕВА НАПРАВО. РЯДЫ УЗЛОВ ТАКЖЕ
% НАЧИНАЮТСЯ
20 % СНИЗУ. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЯДЫ УЗЛОВ, ПРОХОДЯЩИЕ ЧЕРЕЗ СЕРЕДИНУ
% ЭЛЕМЕНТОВ
21 % СОДЕРЖАТ egor+1 УЗЛОВ
22
23 % ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА НОМЕРОВ УЗЛОВ С ЗАДАННЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ
24 % ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ
25
26 Mz=zeros(400);
27 np=ever*(3*egor+2)+2*egor+1;
28 for i=1:(2*egor+1)
29 Mz(i)=i;
30 End
31 k=2*egor+2;
32 for i=1:ever
33 Mz(k)=(2*egor+1)+1+(i-1)*(3*egor+2);
34 Mz(k+1)=Mz(k)+egor;
35 Mz(k+2)=Mz(k+1)+1;
36 Mz(k+3)=Mz(k+2)+2*egor;
37 k=k+4;
38 End
39 for i=1:(2*egor+1)
40 Mz(k)=Mz(i)+np;
41 k=k+1;
42 End
43
44 % МАССИВЫ ШАГОВ ПО КООРДИНАТНЫМ ОСЯМ В МЕТРАХ
45 format long
46 dx=zeros(2*egor);
47 dy=zeros(2*ever);
48
49 dx=[
50 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
51 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
52 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
53 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
54 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
55 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
56 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...
57 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 ...

```

```

58 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01 0.250e-01];
59
60 dy=[0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 ...
61 0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 0.1000 0.0750 0.0750 ...
62 0.0625 0.0625 0.0500 0.0500 0.0500 0.0500 0.0250 ...
63 0.0250 0.0250];
64
65 yy=[0.000 0.200 0.400 0.600 0.800 1.000 1.200 1.400 1.600 1.800 2.000 2.200 ...
66 2.400 2.550 2.700 2.825 2.950 3.050 3.150 3.250 3.350 3.400 3.450 3.500];
67
68 % БЛОК ФОРМИРОВАНИЯ КООРДИНАТ
69 % Положительное направление оси x - слева направо
70 % Положительное направление оси y - снизу вверх
71 k=1;
72 NN=zeros(1,ever);
73 for n=1:ever
74 for m=1:egor
75 n1=2*m-1+(3*egor+2)*(n-1); n2=n1+1; n3=n1+2;
76 n4=n3+2*egor-m+1; n5=n3+(3*egor+2);
77 n6=n5-1; n7=n5-2; n8=n4-1;
78
79 x(n1)=(m-1)*2*dx(m); x(n2)=x(n1)+dx(m); x(n3)=x(n1)+2*dx(m);
80 x(n4)=x(n3); x(n5)=x(n3); x(n6)=x(n2); x(n7)=x(n1); x(n8)=x(n1);
81
82 y(n1)=yy(n); y(n2)=y(n1); y(n3)=y(n1); y(n4)=y(n3)+dy(n);
83 y(n5)=y(n3)+2*dy(n); y(n6)=y(n5); y(n7)=y(n5); y(n8)=y(n4);
84 if(m==36)
85 NN(2*k-1)=n3;
86 NN(2*k)=n4;
87 k=k+1;
88 end
89 End
90 End
91 NN(1:2*ever+1);
92
93 % ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБНУЛЕНИЕ МАТРИЦ
94 np2=2*np;
95 K=zeros(np2,np2);
96 U=zeros(np2+1);
97 U0=zeros(np2+1);
98 F=zeros(np2);
99
100 % НАИМЕНОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ (СВЕРХУ ВНИЗ)

```

101 % 1. АБ МЗ ПЛОТНЫЙ

102 % 2. АБ КЗ ПОРИСТЫЙ

103 % 3. ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ 8%

104 % 4. ЩЕБЕНОЧНАЯ СМЕСЬ

105 % 5. ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ

106 % 6. ГРУНТ СУГЛИНОК ЛЕГКИЙ

107

108 % ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ СЛОЕВ(СВЕРХУ
% ВНИЗ)

109 $E=[6933e+05 \ 4142e+05 \ 1000e+05 \ 250e+05 \ 180e+05 \ 58e+05]$; % Модуль упр.кг/м²

110 $\nu=[0.18 \ 0.27 \ 0.30 \ 0.30 \ 0.30 \ 0.35]$; % КОЭФФИЦИЕНТЫ ПУАССОНА

111

112 % ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В НАГРУЗКАХ

113

114 % Нагрузка от одиночного колеса

115

116 % ДАННЫЕ ИЗ ИНТЕРНЕТА

117 % 1 Па=0.102 кгс/м²

118 % 0.6 МПа=6.12 кгс/см²=60000.0 кгс/м²

119

120 % РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ПО УГЛОВЫМ УЗЛАМ ЭЛЕМЕНТА НАГРУЗКА ОТ
% ОДИНОЧНОГО КОЛЕСА

121 % ПРИКЛАДЫВАЕТСЯ ПО ЦЕНТРУ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ. При этом промежуточные
% узлы

122 % игнорируются

123

124 % НАГРУЗКА НА КОЛЕСО РАССЧИТЫВАЕТСЯ ИЗ РАСЧЕТА НОРМАТИВНОЙ
% ИНТЕНСИВНОСТИ

125 % НАГРУЗКИ $q=0.6$ МПа

126 % ЕСЛИ 1 Па=0.102 кгс/м² (из Интернета) ТО

127 % 0.6 МПа=6.12 кгс/см² = 60000.0 кгс/м².

128 % Таким образом, если на 1 погонный метр полотна приходится 60000 кг веса, то

129 % на одно расстояние 0.05 м – 3000 кг веса.

130 % Если ширину колеса принять равной 40 см, а ширину одного конечного

131 % элемента в горизонтальном направлении – 5 см, то транспортная нагрузка

132 % будет распределена по 9 узлам в пределах 8 конечных элементов.

133 % Расстояние между угловыми узлами - 0.05 м (5 см - ширина конечного элемента).

134 % При этом надо учесть, что

135 % два крайних узла (1-ый и 9-ый узлы) будут нагружены наполовину.

136 % В таком случае, нагрузки в узловых точках будут распределены

137 % следующим образом:

138 % $P1=P9=1500$ кг, $P2=P3= \dots =P8=3000$ кг

139

140 % РАСЧЕТ НАГРУЗКИ НА УЗЕЛ

```

141 % РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ УЗЛАМИ 0.025 М (учитываются и промежуточные узлы)
142 % НА 1 М ПРИХОДИТСЯ 60000 КГ ВЕСА, А НА ОДНО РАССТОЯНИЕ 0.025 М
143 % ПРИХОДИТСЯ 1500 КГ ВЕСА
144
145 % РЕЗУЛЬТАТЫ БУДУТ ПОЛУЧЕНЫ В КГ И МЕТРАХ
146
147 % ВЕЛИЧИНЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ, ПРИЛОЖЕННЫХ ПО УГЛОВЫМ УЗЛАМ
148 % В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЭПЮРЫ
149
150 P=0.3e+04; % кг
151
152 % НОМЕРА УГЛОВЫХ УЗЛОВ ПРИЛОЖЕНИЯ СИЛ
153
154 nF(1:9)=[4239 4241 4243 4245 4247 4249 4251 4253 4255];
155 for i=1:9
156 j=nF(i);
157 xP(i)=x(j);
158 end
159
160 % ПРИЛОЖЕНИЕ СИЛ К УГЛОВЫМ УЗЛАМ
161 F(nF(1)+np)=-P/2;
162 F(nF(9)+np)=-P/2;
163 for i=1:7
164 F(nF(1+i)+np)=-P;
165 end
166
167 % ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТА [ke] И
168 % ГЛОБАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ [K]
169
170 mpe=[-0.577350 0.577350]; % КООРДИНАТЫ ТОЧЕК ИНТЕГРИРОВАНИЯ
171 mH=[1 1]; % ВЕСОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ
172 K=zeros(np2,np2);
173 for n=1:ever
174 for m=1:egor
175 n1=2*m-1+(3*egor+2)*(n-1); n2=n1+1; n3=n1+2;
176 n4=n3+2*egor-m+1; n5=n3+(3*egor+2);
177 n6=n5-1; n7=n5-2; n8=n4-1;
178
179 X1=x(n1); Y1=y(n1);
180 X2=x(n3); Y2=y(n3);
181 X3=x(n5); Y3=y(n5);
182 X4=x(n7); Y4=y(n7);
183

```

```

184 % ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ УПРУГОСТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЛОСКОЙ
    % ДЕФОРМАЦИИ
185 if((n>=1)&(n<=7))
186 e1=E(6); nu1=nu(6); % ГРУНТ СУГЛИНОК ЛЕГКИЙ
187 end
188 if((n>=8)&(n<=12))
189 e1=E(5); nu1=nu(5); % ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ
190 end
191 if((n>=13)&(n<=16))
192 e1=E(4); nu1=nu(4); % ЩЕБЕНОЧНАЯ СМЕСЬ
193 end
194 if((n>=17)&(n<=20))
195 e1=E(3); nu1=nu(3); % ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ 8%
196 end
197 if((n>=21)&(n<=22))
198 e1=E(2); nu1=nu(2); % АБ КЗ ПОРИСТЫЙ
199 end
200 if(n==23)
201 e1=E(1); nu1=nu(1); % АБ МЗ ПЛОТНЫЙ
202 end
203
204 D=zeros(3,3);
205 D(3,3)=e1/(2*(1+nu1)); D(2,2)=2*D(3,3)*(1-nu1)/(1-2*nu1);
206 D(1,1)=D(2,2); D(1,2)=2*D(3,3)*nu1/(1-2*nu1);
207 D(2,1)=D(1,2);
208
209 dJ=abs((X1-X2)*(Y2-Y4))/4; % якобиан
210
211 % ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАДРАТУРЫ ГАУССА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО
    % ИНТЕГРИРОВАНИЯ
212 % ДВОЙНОГО ИНТЕГРАЛА В МАТРИЦЕ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТА [Ke]
213
214 % BtDBnds1(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3) - подпрограмма вычисления
215 % матрицы жесткости элемента
216 Ke=zeros(16,16);
217 psi=mpe(1); eta=mpe(1);
218 k11=BtDBnds1(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3);
219 psi=mpe(1); eta=mpe(2);
220 k12=BtDBnds1(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3);
221 psi=mpe(2); eta=mpe(1);
222 k21=BtDBnds1(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3);
223 psi=mpe(2); eta=mpe(2);
224 k22=BtDBnds1(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3);

```

```

225 Ke=dJ*(mH(1)*(mH(1)*k11+mH(2)*k12)+mH(2)*(mH(1)*k21+mH(2)*k22));
226
227 ne8=[n1 n2 n3 n4 n5 n6 n7 n8];
228 for i=1:8
229 for j=1:8
230 K(ne8(i),ne8(j))=K(ne8(i),ne8(j))+Ke(i,j);
231 K(ne8(i),ne8(j)+np)=K(ne8(i),ne8(j)+np)+Ke(i,j+8);
232 K(ne8(i)+np,ne8(j))=K(ne8(i)+np,ne8(j))+Ke(i+8,j);
233 K(ne8(i)+np,ne8(j)+np)=K(ne8(i)+np,ne8(j)+np)+Ke(i+8,j+8);
234 end
235 end
236 end
237 end
238
239 disp('Матрица К сформирована')
240
241 % ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СЛАУ
242
243 np2=2*np;
244 i=1;
245 for n=1:np2
246 if(n==Mz(i))
247 F(n)=K(n,n)*U(n);
248 for m=1:np2
249 if(m~=n)
250 K(n,m)=0.0;
251 end
252 end
253 i=i+1;
254 end
255 end
256
257 i=1;
258 for n=1:np2
259 if(n==Mz(i))
260 for m=1:np2
261 if(m~=n)
262 F(m)=F(m)-K(m,n)*U(n);
263 K(m,n)=0.0;
264 end
265 end
266 i=i+1;
267 end

```

```

268 end
269
270 % РЕШЕНИЕ СЛАУ
271 U=K\F;
272 disp('Система [K]{U}={F} решена')
273
274 % Номера узлов характерных вертикальных сечений
275 nom12=[
276 49 146 231 328 413 510 595 692 ...
277 777 874 959 1056 1141 1238 1323 1420 ...
278 1505 1602 1687 1784 1869 1966 2051 2148 ...
279 2233 2330 2415 2512 2597 2694 2779 2876 ...
280 2961 3058 3143 3240 3325 3422 3507 3604 ...
281 3689 3786 3871 3968 4053 4150 4235];
282 nom15=[
283 61 152 243 334 425 516 607 698 ...
284 789 880 971 1062 1153 1244 1335 1426 ...
285 1517 1608 1699 1790 1881 1972 2063 2154 ...
286 2245 2336 2427 2518 2609 2700 2791 2882 ...
287 2973 3064 3155 3246 3337 3428 3519 3610 ...
288 3701 3792 3883 3974 4065 4156 4247];
289 nom18=[
290 73 158 255 340 437 522 619 704 ...
291 801 886 983 1068 1165 1250 1347 1432 ...
292 1529 1614 1711 1796 1893 1978 2075 2160 ...
293 2257 2342 2439 2524 2621 2706 2803 2888 ...
294 2985 3070 3167 3252 3349 3434 3531 3616 ...
295 3713 3798 3895 3980 4077 4162 4259];
296
297 % ГРАФИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ В СРЕДНЕМ СЕЧЕНИИ
298 Y=zeros(2*ever+1);
299 X150=zeros(2*ever+1);
300 X120=zeros(2*ever+1);
301 X180=zeros(2*ever+1);
302 for i=1:2*ever+1
303 j120=nom12(i);
304 j150=nom15(i);
305 j180=nom18(i);
306 Y(i)=y(j150);
307 X120(i)=U(j120)-0.0001; % СЛЕВА ОТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ СИММЕТРИИ НА 30 СМ
308 X150(i)=U(j150)*10; % НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ СИММЕТРИИ
309 X180(i)=U(j180)+0.0001; % СПРАВА ОТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ СИММЕТРИИ НА
% 30 СМ

```

```

310 end
311 hPlot=plot(X150,Y,'b-',X120,Y,'r-',X180,Y,'k-.');grid on;xlabel('Ux, m');ylabel('y, m')
312 set(hPlot,'LineWidth',2);
313
314 figure
315
316 % ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА НОМЕРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЯДОВ УЗЛОВ
    % Nv(I,m)
317
318 % ОБЩЕЕ ЧИСЛО УЗЛОВ В КАЖДОМ ПОЛНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ РЯДУ РАВНО
    % 2*egor+1,
319 % А ЧИСЛО ТАКИХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЯДОВ РАВНО ever+1
320 % СЕЧЕНИЯ, ПРОХОДЯЩИЕ ЧЕРЕЗ СЕРЕДИНУ ЭЛЕМЕНТОВ, НЕ
    % РАССМАТРИВАЮТСЯ.
321 % ОНИ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ ИСКОМЫХ ВЕЛИЧИН НА
    % КАЖДОМ
322 % ГОРИЗОНТАЛЬНОМ УРОВНЕ (ГЛУБИНЕ)
323
324 Nv=zeros(ever+1,2*egor+1);
325 for n=1:(ever+1)
326 for m=1:(2*egor+1)
327 I=2*n-1;
328 Nv(I,m)=m+(3*egor+2)*(n-1);
329 end
330 end
331 for n=1:ever
332 for m=1:(egor+1)
333 I=2*n;
334 Nv(I,2*m-1)=m+(2*egor+1)*n+(egor+1)*(n-1);
335 end
336 end
337
338 format short
339 Set=zeros(2*ever+1,4);
340 for n=1:2*ever+1
341 i=Nv(n,1);
342 Set(n,1)=n;
343 Set(n,2)=i;
344 Set(n,3)=y(i);
345 Set(n,4)=3.50-y(i);
346 end
347 for m=1:47
348 % fprintf('%6u %6u %10.4f %10.4f\n',Set(m,1),Set(m,2),Set(m,3),Set(m,4));
349 end

```

```

350
351 % ГРАФИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УЗЛОВ
352 % ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ НА ГЛУБИНАХ h
353 X=zeros(2*egor+1);
354 Y=zeros(2*egor+1);
355 for i=1:(2*egor+1)
356     j=Nv(45,i); % ГЛУБИНА h=5 CM
357     X(i)=x(j);
358     Y(i)=U(j+np);
359 end
360 hPlot=plot(X,Y,'-');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
361 set(hPlot,'LineWidth',2);
362 hold on
363
364 X=zeros(2*egor+1);
365 Y=zeros(2*egor+1);
366 for i=1:(2*egor+1)
367     j=Nv(41,i); % ГЛУБИНА h=15 CM
368     X(i)=x(j);
369     Y(i)=U(j+np);
370 end
371 hPlot=plot(X,Y,'-');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
372 set(hPlot,'LineWidth',2);
373 hold on
374
375 X=zeros(2*egor+1);
376 Y=zeros(2*egor+1);
377 for i=1:(2*egor+1)
378     j=Nv(39,i); % ГЛУБИНА h=25 CM
379     X(i)=x(j);
380     Y(i)=U(j+np);
381     Ux325(i)=U(j);
382     Uy325(i)=Y(i);
383 end
384 hPlot=plot(X,Y,'--');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
385 set(hPlot,'LineWidth',2);
386 hold on
387
388 for i=1:(2*egor+1)
389     j=Nv(35,i); % ГЛУБИНА h=45 CM
390     X(i)=x(j);
391     Y(i)=U(j+np);
392     X345(i)=X(i);

```

```

393 Ux305(i)=U(j);
394 Uy305(i)=Y(i);
395 end
396 hPlot=plot(X,Y,'-');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
397 set(hPlot,'LineWidth',2);
398 hold on
399
400 for i=1:(2*egor+1)
401 j=Nv(29,i); % ГЛУБИНА h=80 CM
402 X(i)=x(j);
403 Y(i)=U(j+np);
404 Ux270(i)=U(j);
405 Uy270(i)=Y(i);
406 end
407 hPlot=plot(X,Y,'-.');grid on;xlabel('X, m');ylabel('Uy, m')
408 set(hPlot,'LineWidth',2);
409
410 figure
411
412 % ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ДЕФОРМАЦИИ В СРЕДИННЫХ ТОЧКАХ
413 % ЭЛЕМЕНТОВ (eps=0.0, eta=0.0)
414
415 epsX0=zeros(ever*egor);
416 epsY0=zeros(ever*egor);
417 gamXY0=zeros(ever*egor);
418
419 for n=1:ever
420 for m=1:egor
421 n1=2*m-1+(3*egor+2)*(n-1); n2=n1+1; n3=n1+2;
422 n4=n3+2*egor-m+1; n5=n3+(3*egor+2);
423 n6=n5-1; n7=n5-2; n8=n4-1;
424
425 dJ=abs((x(n1)-x(n3))*(y(n3)-y(n7)))/4; % якобиан
426 i=m+egor*(n-1);
427 epsX0(i)=(U(n4)-U(n8))/(x(n4)-x(n8));
428 epsY0(i)=(-U(n2+np)+U(n6+np))/(y(n6)-y(n2));
429 gamXY0(i)=(-U(n2)+U(n6))/(x(n4)-x(n8))+(U(n4+np)-U(n8+np))/(y(n6)-y(n2));
430 end
431 end
432
433 % НОМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ ПОСТРОЧНО
434 NEv=zeros(ever,egor);
435 for n=1:ever

```

```

436 for m=1:egor
437 i=m+egor*(n-1);
438 NEv(n,m)=i;
439 end
440 end
441
442 % НОМЕР СРЕДИННОГО УЗЛА, ДЛЯ КОТОРОГО ВЫЧИСЛЯЮТСЯ ДЕФОРМАЦИИ % И
    НАПРЯЖЕНИЯ,
443 % СОВПАДАЕТ С НОМЕРОМ ЭЛЕМЕНТА, РАСПОЛОЖЕННОГО В МАССИВЕ NEv(n,m)
444
445 X=zeros(egor); Y25=zeros(egor); Y200=zeros(egor); Y400=zeros(egor);
446 for m=1:egor
447 n=Nv(1,2*m);
448 X(m)=x(n);
449 i25=NEv(23,m);
450 i200=NEv(20,m);
451 i400=NEv(18,m);
452 Y25(m)=epsX0(i25); % 2,5 см
453 Y200(m)=epsX0(i200); % 20,0 см
454 Y400(m)=epsX0(i400); % 40,0 см
455 end
456 hPlot=plot(X,Y25,'-',X,Y200,'--',X,Y400,'-.');...
457 grid on;xlabel('X, m');ylabel('epsX')
458 set(hPlot,'LineWidth',2);
459 figure
460
461 X=zeros(egor); Y25=zeros(egor); Y200=zeros(egor); Y400=zeros(egor);
462 for m=1:egor
463 n=Nv(1,2*m);
464 X(m)=x(n);
465 i25=NEv(23,m);
466 i200=NEv(20,m);
467 i400=NEv(18,m);
468 Y25(m)=epsY0(i25); % 2,5 см
469 Y200(m)=epsY0(i200); % 20,0 см
470 Y400(m)=epsY0(i400); % 40,0 см
471 end
472 hPlot=plot(X,Y25,'-',X,Y200,'--',X,Y400,'-.');...
473 grid on;xlabel('X, m');ylabel('epsY')
474 set(hPlot,'LineWidth',2);
475 figure
476
477 % ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕНИЙ Sigma В СРЕДИННЫХ ТОЧКАХ

```

```

478 % ЭЛЕМЕНТОВ (eps=0.0, eta=0.0)
479 SigX=zeros(ever); SigY=zeros(ever);
480 k=0;
481 for n=1:ever
482 for m=1:egor
483 n1=2*m-1+(3*egor+2)*(n-1); n2=n1+1; n3=n1+2;
484 n4=n3+2*egor-m+1; n5=n3+(3*egor+2);
485 n6=n5-1; n7=n5-2; n8=n4-1;
486
487 % ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ УПРУГОСТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЛОСКОЙ
% ДЕФОРМАЦИИ
488 if((n>=1)&(n<=7))
489 e1=E(6); nu1=nu(6); % ГРУНТ СУГЛИНОК ЛЕГКИЙ
490 end
491 if((n>=8)&(n<=12))
492 e1=E(5); nu1=nu(5); % ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ
493 end
494 if((n>=13)&(n<=16))
495 e1=E(4); nu1=nu(4); % ЩЕБЕНОЧНАЯ СМЕСЬ
496 end
497 if((n>=17)&(n<=20))
498 e1=E(3); nu1=nu(3); % ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНАЯ СМЕСЬ 8%
499 end
500 if((n>=21)&(n<=22))
501 e1=E(2); nu1=nu(2); % АБ КЗ ПОРИСТЫЙ
502 end
503 if(n==23)
504 e1=E(1); nu1=nu(1); % АБ МЗ ПЛОТНЫЙ
505 end
506
507 D=zeros(3,3);
508 D(3,3)=e1/(2*(1+nu1)); D(2,2)=2*D(3,3)*(1-nu1)/(1-2*nu1);
509 D(1,1)=D(2,2); D(1,2)=2*D(3,3)*nu1/(1-2*nu1);
510 D(2,1)=D(1,2);
511
512 X1=x(n1); X2=x(n3); Y2=y(n3); Y4=y(n7);
513 dJ=abs((X1-X2)*(Y2-Y4))/4; % Якобиан
514 G=e1/(2*(1+nu1));
515
516 i=m+egor*(n-1);
517 % В МПа
518 SigmaX0(i)=(D(1,1)*epsX0(i)+D(1,2)*epsY0(i))/100000;
519 SigmaY0(i)=(D(2,1)*epsX0(i)+D(2,2)*epsY0(i))/100000;

```

```

520 TauXY0(i)=D(3,3)*gamXY0(i)/100000;
521 if(m==30)
522 k=k+1;
523 SigX(n)=SigmaX0(i);
524 SigY(n)=SigmaY0(i);
525 end
526 end
527 end
528
529 % ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ SigmaX0, SigmaY0 И
530 % TauXY0 В СРЕДИННЫХ УЗЛАХ ЭЛЕМЕНТОВ
531
532 X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
533 Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
534 for m=1:egor
535 n=Nv(1,2*m);
536 X(m)=x(n);
537 i23=NEv(23,m); % h=2,5 см
538 i22=NEv(22,m); % h=7,5 см
539 i20=NEv(20,m); % h=20,0 см
540 i18=NEv(18,m); % h=40,0 см
541 i14=NEv(14,m); % h=87,5 см
542 i12=NEv(12,m); % h=120,0 см
543 Y23(m)=SigmaX0(i23); % 2,5 см
544 Y22(m)=SigmaX0(i22); % 7,5 см
545 Y20(m)=SigmaX0(i20); % 20,0 см
546 Y18(m)=SigmaX0(i18); % 40,0 см
547 Y14(m)=SigmaX0(i14); % 87,5 см
548 Y12(m)=SigmaX0(i12); % 120,0 см
549 end
550 hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y18,'-.',X,Y14,'-r');...
551 grid on;xlabel('X, m');ylabel('SigmaX, МПа')
552 set(hPlot,'LineWidth',2);
553 figure
554
555 X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
556 Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
557 for m=1:egor
558 n=Nv(1,2*m);
559 X(m)=x(n);
560 i23=NEv(23,m); % h=2,5 см
561 i22=NEv(22,m); % h=7,5 см
562 i20=NEv(20,m); % h=20,0 см

```

```

563 i18=NEv(18,m); % h=40,0 см
564 i14=NEv(14,m); % h=87,5 см
565 i12=NEv(12,m); % h=120,0 см
566 Y23(m)=SigmaY0(i23); % 2,5 см
567 Y22(m)=SigmaY0(i22); % 7,5 см
568 Y20(m)=SigmaY0(i20); % 20,0 см
569 Y18(m)=SigmaY0(i18); % 40,0 см
570 Y14(m)=SigmaY0(i14); % 87,5 см
571 Y12(m)=SigmaY0(i12); % 120,0 см
572 end
573 hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y18,'-',X,Y14,'-r');...
574 grid on;xlabel('X, м');ylabel('SigmaY, МПа')
575 set(hPlot,'LineWidth',2);
576 figure
577
578 X=zeros(egor); Y23=zeros(egor); Y22=zeros(egor); Y20=zeros(egor);
579 Y18=zeros(egor); Y14=zeros(egor); Y12=zeros(egor);
580 for m=1:egor
581 n=Nv(1,2*m);
582 X(m)=x(n);
583 i23=NEv(23,m); % h=2,5 см
584 i22=NEv(22,m); % h=7,5 см
585 i21=NEv(21,m); % h=12,5 см
586 i20=NEv(20,m); % h=20,0 см
587 i18=NEv(18,m); % h=40,0 см
588 i16=NEv(16,m); % h=61,25 см
589 i14=NEv(14,m); % h=87,5 см
590 i12=NEv(12,m); % h=120,0 см
591 Y23(m)=TauXY0(i23); % 2,5 см
592 Y22(m)=TauXY0(i22); % 7,5 см
593 Y21(m)=TauXY0(i21); % 12,5 см
594 Y20(m)=TauXY0(i20); % 20,0 см
595 Y18(m)=TauXY0(i18); % 40,0 см
596 Y16(m)=TauXY0(i16); % 61,25 см
597 Y14(m)=TauXY0(i14); % 87,5 см
598 Y12(m)=TauXY0(i12); % 120,0 см
599 end
600 hPlot=plot(X,Y22,'-',X,Y20,'--',X,Y14,'-');...
601 grid on;xlabel('X, м');ylabel('TauXY, МПа')
602 set(hPlot,'LineWidth',2);
603
604 toc

```

Приложение Б

(обязательное)

Исходный код подпрограммы BtDBnds

```
1 function[BDB]=BtDBnds(psi,eta,D,X1,X2,Y1,Y3);
2 A=(-2/(X1-X2));
3 B1=A*(1-eta)*(2*psi+eta)/4; B2= A*(-psi*(1-eta));
4 B3= A*(1-eta)*(2*psi-eta)/4; B4= A*(1-eta^2)/2;
5 B5= A*(1+eta)*(2*psi+eta)/4; B6= A*(-psi*(1+eta));
6 B7= A*(1+eta)*(2*psi-eta)/4; B8= A*(-(1-eta^2)/2);
7 B=(-2/(Y1-Y3));
8 C1=B*(1-psi)*(psi+2*eta)/4; C2=-B*(1-psi^2)/2;
9 C3=B*(1+psi)*(-psi+2*eta)/4; C4=-B*eta*(1+psi);
10 C5=B*(1+psi)*(psi+2*eta)/4; C6=B*(1-psi^2)/2;
11 C7=B*(-(1-psi)*(psi-2*eta)/4); C8=-B*eta*(1-psi);
12
13
14 B=[B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 0 0 0 0 0 0 0];
15 0 0 0 0 0 0 0 0 C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8;
16 C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8];
17 Bt=B';
18 BtD=Bt*D;
19 BDB=BtD*B;
```

Библиография

[1] Мартынов Н.Н., Иванов А.П. MATLAB 5.X. Вычисления, визуализация, программирование. – М.:КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000.-336 с.

[2] Коткин Г.Л., Черкасский В.С. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием MATLAB: Учебное пособие/Новосиб. ун-т. Новосибирск, 2001. 173 с.

[3] Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.X. В 2-х томах. –М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. 670 с.

[4] Тынкевич М.А. Численные методы.-Кемерово.:КузГТУ.1977.-122 с.

[5] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М: Мир, 1979.– 392 с.

[6] СТ РК 1293-2004 Методы определения модуля упругости дорожных одежд нежесткого типа и их классификация.

