

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
имени академика С. П. КОРОЛЕВА

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПЛАСТИНЫ
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ**

КУЙБЫШЕВ 1987

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ
ПЛАСТИНЫ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
для студентов

Куйбышев 1987

Приводится описание лабораторной работы по конечно-элементному моделированию подкрепленной пластины с отверстием при нагружении в своей плоскости. Решение задачи, включая дискретизацию, индексацию, вычисление узловых координат и печать результатов, полностью автоматизировано.

В работе производится исследование напряженного состояния пластины и выполняются индивидуальные задания, связанные с различными вопросами реализации метода конечных элементов.

Правильность выполнения этих заданий контролируется с помощью ЭВМ в диалоговом режиме.

Работа выполняется на ЭВМ СМ-4.

Методические указания предназначены для студентов, изучающих курс «Строительная механика л.а. и теория упругости».

Рецензенты: доцент кафедры сопротивления материалов и строительной механики Куйбышевского инженерно-строительного института, к.т.н. И.А.ЕПАНЧИЦЕВА;

доцент кафедры сопротивления материалов
Андроповского авиационного технологического
института, к.т.н. С.А.БУКАТЫЙ

Автор-составитель ДУПЛЯКИН Вячеслав Митрофанович

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной лабораторной работы является:

- ознакомление с реализацией метода конечных элементов на ЭВМ, включая построение сетки конечных элементов, формирование матрицы жесткости конструкции и вычисление напряжений;
- получение навыков подготовки исходных данных при использовании программ по методу конечных элементов;
- исследование напряженного состояния предложенной подкрепленной пластины с отверстием при нагружении в своей плоскости.

1. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Начертить сетку конечных элементов в соответствии с предлагаемым алгоритмом. Пронумеровать конечные элементы и узловые перемещения.
2. Подготовить исходные данные для программы расчета подкрепленных пластин RPLA3.
3. Выполнить предложенные индивидуальные задания и подготовить результаты их выполнения для контроля на ЭВМ.
4. Вызвать из внешней памяти ЭВМ программу расчета RPLA3 и ввести исходные данные.
5. После завершения расчета ввести в ЭВМ с дисплея результаты выполнения индивидуальных заданий и получить напечатанный на АЦПУ протокол лабораторной работы.
6. Построить эпюры напряжений в указанных сечениях.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной лабораторной работе используется программа, которая позволяет рассчитывать методом конечных элементов подкрепленные пластины при нагружении в своей плоскости, как показано на рис. 1.

Возможные варианты геометрии пластин представлены на рис.2.

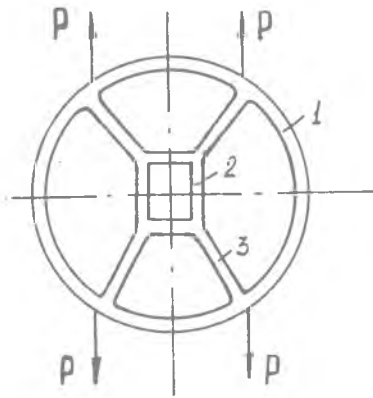


Рис. 1. Подкрепленная пластина с вырезом:
1. - внешняя окантовка;
2. - внутреняя окантовка;
3. - радиальное подкрепление

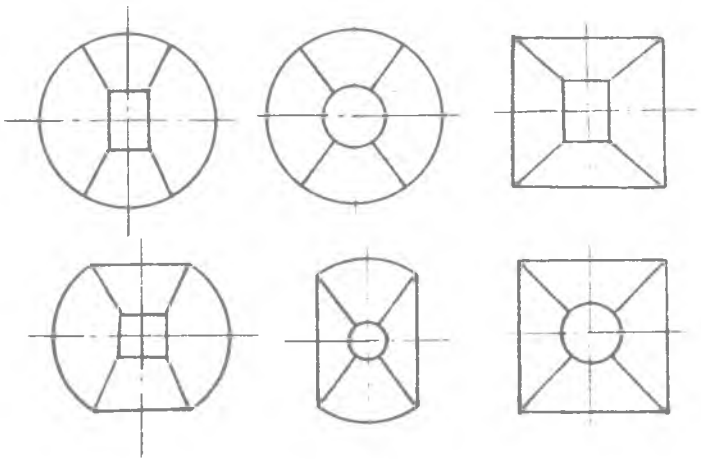





Рис. 2. Возможная геометрия пластин

3. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ПЛАСТИНЫ

При разбиении пластины на конечные элементы прежде всего необходимо выбрать подходящий тип конечных элементов, руководствуясь соображениями, связанными с описанием геометрии пластины, удобством программирования и необходимой точностью. Наиболее употребимые типы конечных элементов, используемые в плоских задачах, представлены в таблице I /I/.

Таблица I

Типы плоских конечных элементов

№ п/п	Название	Схема элемента	Число узловых перемещений
1.	Ферменный		4
2.	Балочный		6
3.	Треугольный		6
4.	Четырехугольный первого порядка		8
5.	Четырехугольный второго порядка		16

Для моделирования работы окантовки и радиального подкрепления применяются как балочные, так и ферменные элементы. Использование балочных элементов позволяет учесть работу на изгиб, однако при этом к неизвестным перемещениям добавляются углы поворота сечений в узловых точках. Поскольку напряжения слабо изменяются по сечению подкрепляющих элементов, можно принять, что подкрепляющие элементы работают только на растяжение-сжатие, и для их моделирования воспользоваться ферменными элементами.

Для моделирования работы пластины можно использовать тре-

гольные и четырехугольные элементы. Треугольные элементы позволяют хорошо воспроизводить геометрию разнообразных пластин и наиболее просты с точки зрения программирования вычислений их матриц жесткости. Однако, как известно, они имеют существенный недостаток, связанный с тем, что напряжения постоянны в пределах отдельного элемента. Чтобы получить достаточную точность, необходимо увеличить число таких элементов по сравнению с более сложными.

Четырехугольные элементы различаются по числу узлов, расположенных на боковых сторонах. Элементы первого порядка имеют прямолинейные границы, а более высоких порядков - в общем случае криволинейные. В данной работе используются четырехугольные конечные элементы первого порядка, как наиболее простые элементы с переменным полем напряжений. Дискретизация расчетной области во многом определяет точность решения. Например, результаты ухудшаются, если имеются четырехугольные элементы с острыми углами, меньшими 30° . Неудовлетворительным следует считать разбиение, приводящее к появлению излишне вытянутых элементов.

Разбиение на элементы, индексацию перемещений и вычисление узловых координат можно выполнять вручную, что представляет собой трудоемкий процесс, приводящий к появлению большого числа ошибок в исходных данных. Поэтому предпочтительнее использовать автоматизированное формирование соответствующей информации с помощью ЭВМ.

В данной работе предусмотрено формирование необходимых данных программным путем. Алгоритм формирования сетки конечных элементов представлен на рис.3. Из соображений симметрии рассматривается только четверть пластины.

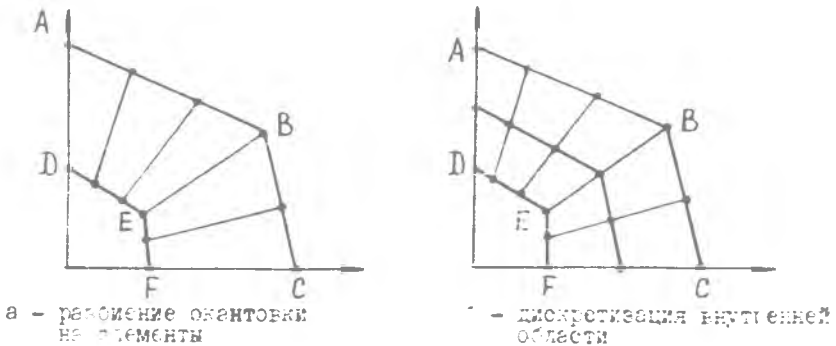


Рис. 3. Алгоритм дискретизации:
($N_{AB} = 3$, $N_{BC} = 2$, $N_{AD} = 2$)

Сначала участок периметра AB разбивается на некоторое число (NAB) одинаковых по длине элементов, такое же число равных по длине элементов выделяется на участке DE . Полученные узловые точки соединяются прямыми линиями. На участках BC и EF аналогично выделяются элементы, число которых обозначается - NBC . После этого на каждом из полученных радиальных отрезков выделяются одинаковые по длине элементы численностью NAD . В результате имеем узловые точки, которые соединяются прямыми линиями. При дискретизации пластин следует учесть симметрию, выделив часть пластины и закрепив ее, как показано на рис. 4. На этом же рисунке представлен вариант сетки конечных элементов. Элементы окантовки, элементы радиального подкрепления и элементы пластины нумеруются независимо друг от друга. Последовательность нумерации ясна из рисунка 4. Последовательность индексации узловых перемещений легко понять из рисунка 5.

Вследствие ограничения объема оперативной памяти ЭВМ $СМ-4$ программа $RPLA3$ имеет следующие ограничения:

1. Общее число элементов вдоль сторон AB и BC

$$NAB + NBC \leq 20.$$

2. Число элементов вдоль стороны AD

$$NAD \leq 20.$$

3. Общее число перемещений

$$NV \leq 160.$$

4. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭВМ

Исходные данные программы $RPLA3$ вводятся с дисплея построчно, через запятую в соответствии с таблицей 2, при этом используется бесформатный ввод.

В пояснении нуждается заполнение списка индивидуальных заданий (пункт 3). Каждая строка этой информации показывает, какие из четырех возможных типов заданий должен выполнить индивидуально студент с таким же порядковым номером в списке бригады, какой имеет данная строка в списке заданий. При этом отдельный студент может иметь от одного до четырех заданий: Φ ставится, если задания данного типа нет, I - если оно имеется.

В качестве примера в таблице 3 дается список заданий, соответствующий распределению заданий, представленному в таблице 2.

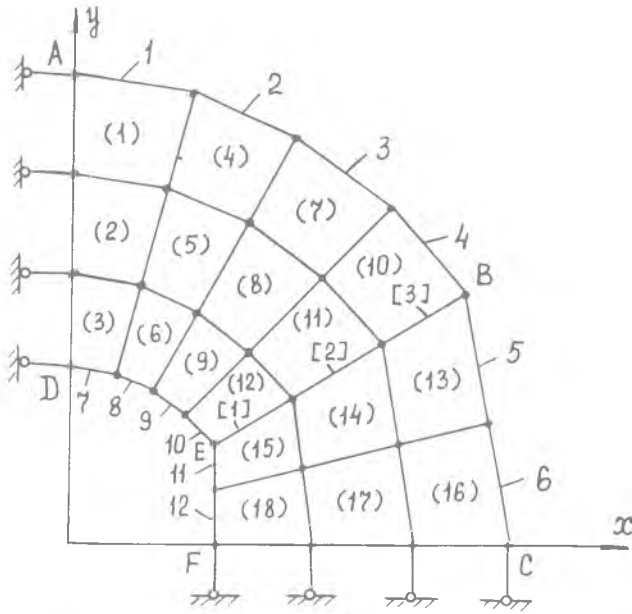


Рис. 4. Нумерация элементов: \dot{i} - элементы окантовки; [i] - элементы радиального подкрепления; (i) - элементы пластины

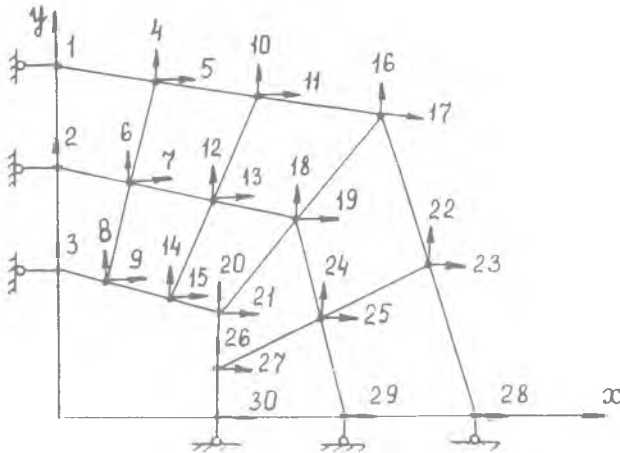


Рис. 5. Индексация перемещений

Таблица 2

1. Число, месяц, год, номер группы, численность бригады
15,04, 1987, 144, 3
2. Список бригады
1 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ИВАНОВ С.И.
2 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ПЕТРОВ А.М.
3 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ВАСИНА Т.А.
3. Список индивидуальных заданий (\emptyset - нет, I - есть)
\emptyset , \emptyset , \emptyset , I
\emptyset , \emptyset , I, I
\emptyset , I, \emptyset , I
4. Характеристики пластины: толщина, модуль упругости
4.0, 70000.
5. Характеристики окантовки: площадь сечения, модуль упругости
150.0, 70000.
6. Радиальное подкрепление: площадь сечения, модуль упругости
250.0, 70000.
7. Нагрузка P
25000.
Координаты характерных точек периметра
8. Точка A: координата y
110.
9. Точка B: координаты x, y
85., 70.
10. Точка C: координата x
100.
11. Точка F : координата x
40.
12. Точка E: координаты x, y
40., 30.

13. Точка D : координата y
50.
14. Типы участков AB, BC, DE, EF
I - отрезок прямой, 2 - дуга окружности с центром в начале координат
2, I, 2, I
15. Параметры дискретизации NAB, NBC, NAD
4, 4, 5

Пример распределения заданий

Таблица 3

Порядковый номер студента в списке бригады	Индивидуальные задания			
	I тип	II тип	III тип	IV тип
1	нет	нет	нет	да
2	нет	нет	да	да
3	нет	да	нет	да

5. ВЫПОЛНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

После ввода исходных данных начинается решение задачи по методу конечных элементов. При этом на дисплей последовательно выдаются следующие сообщения, соответствующие выполняемому этапу вычислений.

1. "Вычисляются узловые координаты".
2. "Формируется матрица жесткости".
3. "Производится определение узловых перемещений".

После определения узловых перемещений выдаются сообщения, которые означают переход программы в режим контроля индивидуальных заданий: "Расчет закончен", "Программа готова к проверке индивидуальных заданий".

Получив последнее сообщение, студенты вводят с дисплея результаты выполнения индивидуальных заданий построчно в бесформатной форме. При этом I-я строка всегда содержит порядковый номер

студента в списке бригады и номер типа задания, по которому он отчитывается. Последующая информация имеет различную структуру в зависимости от типа выполняемого задания (она описывается ниже).

После ввода всей контрольной информации данного индивидуального задания на дисплей выдается одно из сообщений: "Задание выполнено неверно" или "Задание принято".

При неверном выполнении задания результаты исправляются и вводятся заново.

Порядок отчетности между студентами бригады и порядок отчетности отдельного студента по типам заданий произвольный.

При правильном выполнении всех запланированных данной бригадой заданий на АППУ печатается заключительный протокол. В случае необходимости оканчить работу с программой, не дожидаясь прохождения всех заданий, следует ввести с дисплея строку

β, β

I-й тип заданий

Проверить графическое построение границ конечного элемента пластины с номером NE , указанным преподавателем.

Контрольная информация: $NE, XI, YI, XJ, YJ, XL, YL, XM, YM$.

Здесь XI, YI, \dots координаты узлов i, j, l, m данного элемента. Начало и направление обхода узлов показано на рис. 6.

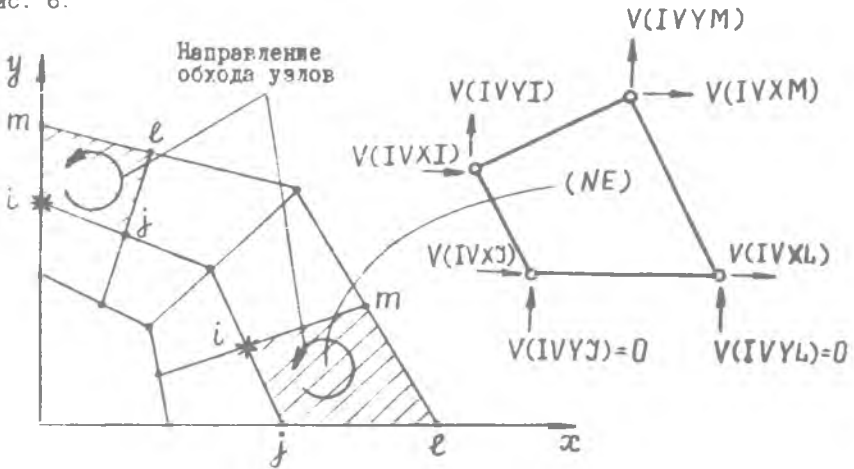


Рис. 6 Вид в начале и направления обхода узлов отдельных элементов. Индексация перемещений (ж - начало обхода узлов выделенного элемента)

2-й тип заданий

Сределить индексы коэффициентов сокращенной матрицы жесткости конструкции, с которыми суммируются коэффициенты матрицы жесткости конечного элемента пластины с номером NE , указанным преподавателем.

Контрольная информация:

$NE, IVXI, IVYI, IVXI, IVYI, IVXL, IVYL, IVXM, IVYM.$

Здесь $IVXI, IVYI, \dots$ - номера перемещений V_{ix}, V_{iy}, \dots узлов элемента в принятой сквозной нумерации. Если соответствующее перемещение запрещено, то на месте его номера ставится нуль.

Обход узлов показан на рисунке 6.

3-й тип заданий

Определить номера конечных элементов пластины, окантовки и радиального подкрепления, матрицы жесткости которых используются при вычислении коэффициента сокращенной матрицы жесткости конструкции K_{ij} с индексами, заданными преподавателем.

Контрольная информация:

$I, J, N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8.$

Здесь I, J - индексы заданного коэффициента матрицы жесткости;

$N1, N2, N3, N4$ - номера элементов пластины;

$N5, N6$ - номера элементов окантовки;

$N7, N8$ - номера элементов радиального подкрепления.

Номера отдельных типов элементов обязательно записываются в возрастающем порядке. На месте каждого неиспользованного номера проставляется нуль.

4-й тип заданий

Получить распечатку напряжений и осевых усилий окантовки в точках заданного сечения пластины.

Контрольная информация: $NE3$.

Здесь $NE3$ - номер элемента наружной окантовки, через центр которого проходит выбранное сечение.

При работе программы выделяется последовательность смежных конечных элементов, следующих друг за другом в радиальном направлении, как показано на рис. 7. В центре каждого выделенного элемента вычисляются напряжения $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$. Кроме того, на печать выдаются осевые усилия в элементах окантовки,

попавших в указанное сечение.

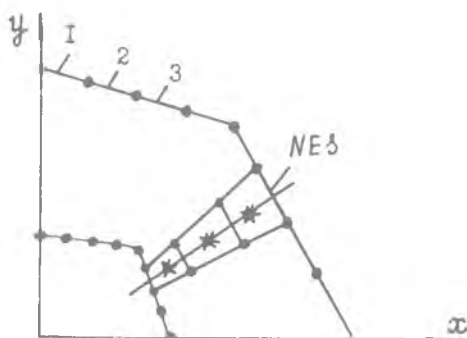


Рис. 7. Формирование последовательности элементов при определении напряжений:
ж - точки, в которых определяются напряжения

При распечатке напряжений используются следующие обозначения:

I - порядковый номер расчетной точки;

IE - номер конечного элемента пластины;

3X , 3Y , 3XY - напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} .

6. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Блок-схема программы RPLAS представлена на рис. 8.

— начале работы программы подключается подпрограмма VVOD ϕ , которая обеспечивает ввод исходных данных с дисплея в диалоговом режиме. При этом контролируется допустимая величина параметров дискретизации.

Далее подпрограмма CORDA производит вычисление массивов узловых координат.

Подпрограмма KE3 работает в цикле, обеспечивающем обход всех элементов, и осуществляет формирование матрицы жесткости конструкции. Она взаимодействует с подпрограммами KEK, KER, KEP , которые вычисляют матрицы жесткости элементов окантовки, подкрепления и пластины. Для вычисления индексов перемещений

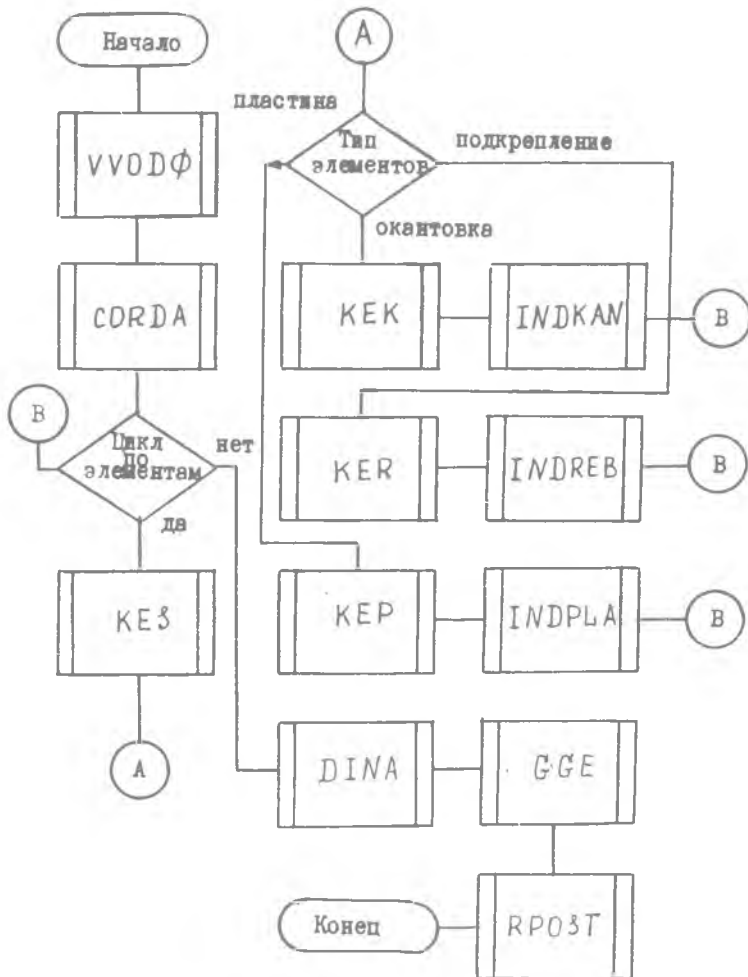


Рис. 8. Блок-схема программы RPLA3

соответствующих элементов используются подпрограммы *INDKAN* ,
INDREV , *INDPLA*.

Подпрограмма *DINA* формирует матрицу узловых сил.

Подпрограмма *GGE* используется для определения узловых перемещений и является подпрограммой решения системы линейных алгебраических уравнений, записанной по "активным" столбцам.

Подпрограмма *RPOST* осуществляет контроль индивидуальных заданий и обеспечивает распечатку напряжений в выбранном сечении.

Л и т е р а т у р а

1. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов.- М.: Высш.шк., 1985.- 392 с.
2. Конспект лекций по строительной механике и теории упругости.

О г л а в л е н и е

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
1. Порядок выполнения работы	3
2. Объект исследования	3
3. Дискретизация пластины	5
4. Подготовка исходных данных для ЭВМ	7
5. Выполнение индивидуальных заданий	10
6. Описание программы	13
Литература	14

Автор-составитель Вячеслав Митрофанович Д у п л я к и н

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОДКРЫШЕННОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Редактор Л.М.К а р п о в а

Подписано в печать 8.07.1987 г.
Формат 60x84 1/16. Оперативная печать.
Бумага оберточная белая. Усл.п.л. 0,93.
Уч.-изд.л. 0,9. Т. 500 экз. Заказ 5331.
Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областное полиграфическое объединение, г. Куйбышев,
ул. Венцева, 6'.