

Василий Малиновский  
Брестский политехнический  
институт  
Анатолий Карякин  
Челябинский политехнический  
университет

РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
БАЛОК С ОТОГНУТОЙ АРМАТУРОЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа работы железобетонных конструкций показывает, что этот метод в состоянии учесть такие важные особенности железобетона, как дискретное расположение арматуры [1], сцепление её с бетоном [2], прогрессирующее трещинообразование [1,3]. В статье излагается один из возможных вариантов моделирования и расчета на ЭВМ предварительно напряженной железобетонной балки, у которой часть напрягаемой арматуры переводится из нижней зоны в пролете в верхнюю на опоре.

Расчетная схема балки представлена в виде совокупности различных конечных элементов (КЭ) - треугольных для бетона и линейных для арматуры. Арматура связана с бетоном при помощи специальных связующих элементов (СЭ), допускающих взаимные сдвиги арматуры относительно бетона, имитирующих сцепление арматуры с бетоном (рис. 1). Принятая модель позволяет связать КЭ бетона и арматуры при различной длине линейного КЭ арматуры. Длина КЭ прямолинейной не отогнутой напрягаемой и ненапрягаемой арматуры равна размеру треугольного КЭ бетона, и связь КЭ осуществляется в каждом узле сетки по длине арматуры. Длина отогнутой части арматуры принята такой, что связь узлов арматуры выполняется через два или три КЭ бетона (рис. 1).

Связующие элементы, соединяющие узлы бетона и прямолинейной арматуры, имеют одну податливую связь (тип 1), направленную вдоль арматурного стержня (рис. 1б), а СЭ, соединяющие наклонную часть отогнутой арматуры с бетоном (тип 2), имеют две также податливые связи по направлению координатных осей (рис. 1в).

Расположение узла расчетной схемы определяется координат-

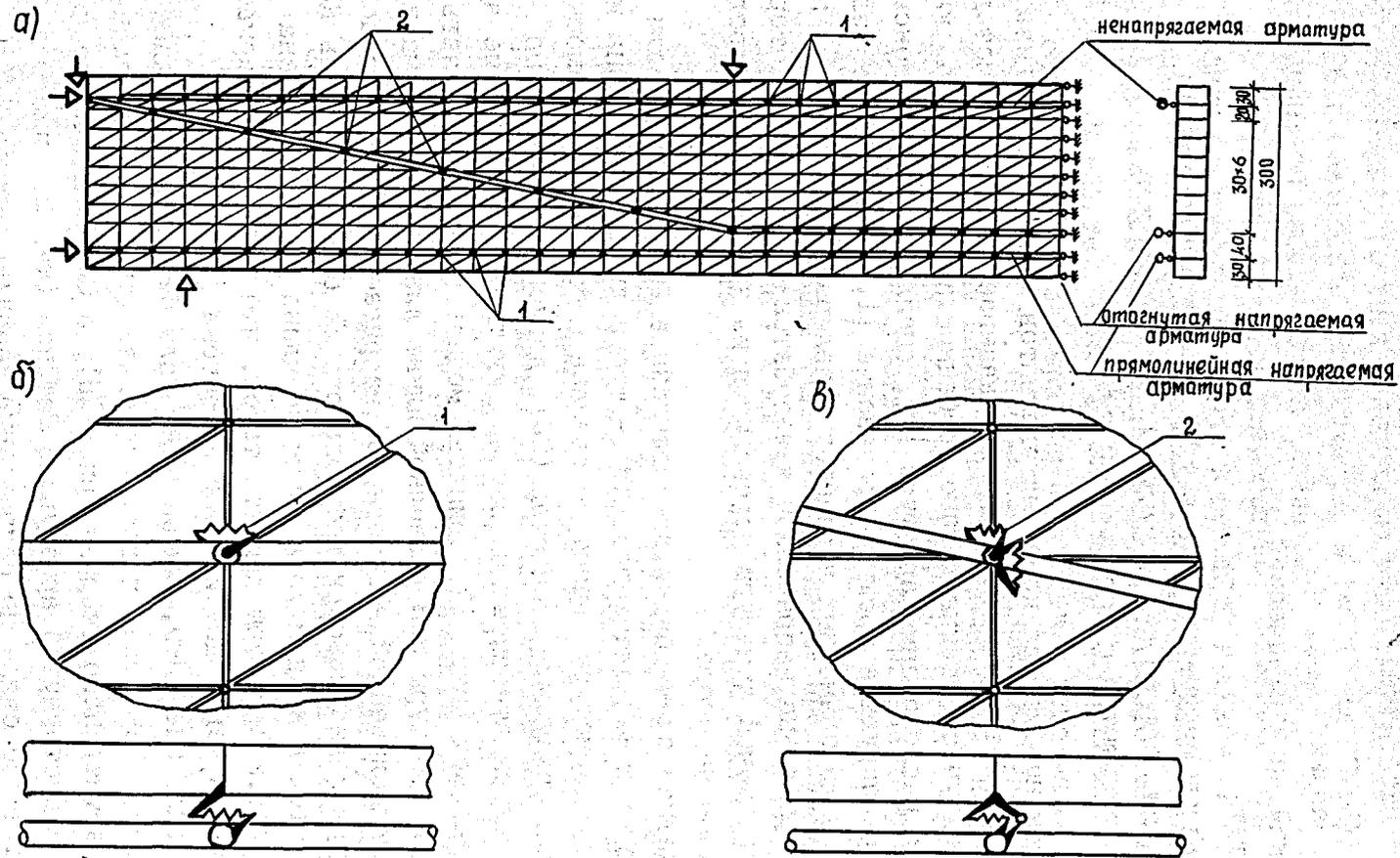


Рис. I. Расчетная схема железобетонной балки с отогнутой арматурой   
 а) - разбивка на конечные элементы (КЭ), б) - представление сцепления   
 прямоугольной арматуры с бетоном, в) - то же с отогнутой арматурой   
 1 - расположение связующих элементов типа I между бетоном и прямоугольной   
 арматурой; 2 - то же с отогнутой арматурой (тип 2)



линейного элемента. Соотношение между жесткостями горизонтальных и вертикальных связей в СЭ типа 2 определялось зависимостью

$$K_{с.э}^y = K_{с.э}^x \cdot \frac{T_{с.э}^y}{T_{с.э}^x} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

где  $K_{с.э}^y, K_{с.э}^x$  – жесткость, соответственно, вертикальной и горизонтальной связей;

$T_{с.э}^y, T_{с.э}^x$  – усилия в вертикальной и горизонтальной связях;

$\alpha$  – угол наклона отогнутой арматуры.

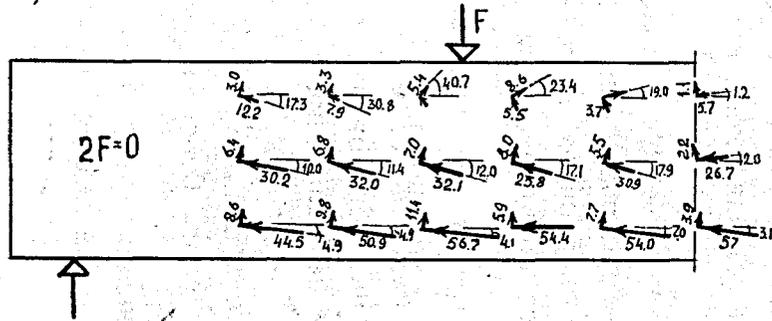
Задача по определению  $K_{с.э}^y$  и  $K_{с.э}^x$  решалась методом последовательных приближений. Первоначально в первом приближении с учетом рекомендаций [1,2] задавалась жесткость  $K_{с.э}^{y(0)}, K_{с.э}^{x(0)}$  и производился расчет по определению взаимных смещений арматуры и бетона по вертикали  $q^y$  и горизонтали  $q^x$ . Пользуясь условием (1) по найденным величинам  $q$  определялись усилия  $T_{с.э}^y$  и  $T_{с.э}^x$  и их значения подставлялись в выражение (2) для получения значений  $K_{с.э}^{y(1)}$  и  $K_{с.э}^{x(1)}$  второго приближения. Вычисления повторялись до тех пор, пока значения  $q$  предыдущего и последующего расчета не достигали требуемой точности.

Дополнительная анкеровка арматуры за счет отгиба в точке перегиба учитывалась увеличением  $K_{с.э}^y$  и  $K_{с.э}^x$  до значений, обеспечивающих совместность перемещений по вертикали узлов бетона и арматуры в данной точке.

Усилие от предварительного натяжения арматуры прикладывалось как внешняя сжимающая сила к крайнему КЭ у торца арматуры. Нагрузка от внешнего загрузения прикладывалась к узлам расчетной схемы.

Для оценки напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной железобетонной балки разработана блок-схема и составлена программа на языке ФОРТРАН для ЭВМ ЕС. В качестве исходных данных приняты геометрические размеры балок, соответствующие опытным, данные по её разбивке на конечные элементы, упругие характеристики материалов (бетона и арматуры), жесткости связей каждого вида арматуры с бетоном. Кроме того, исходная информация содержит номера узлов приложения внешней нагрузки и величины внешней нагрузки.

а)



б)

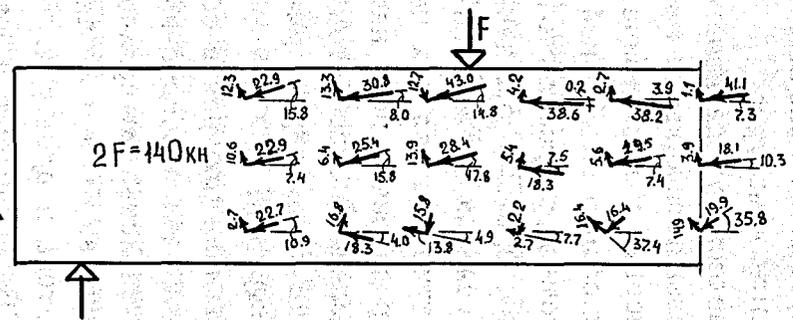
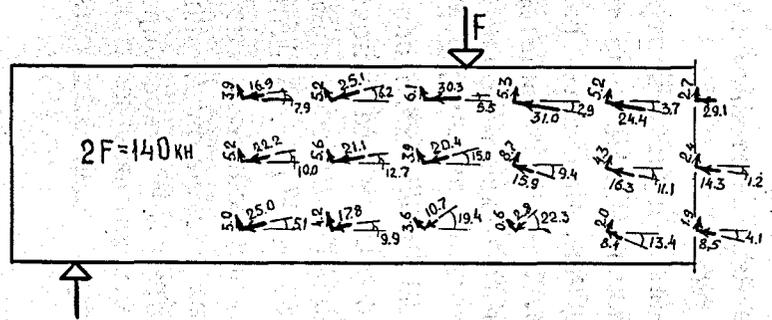
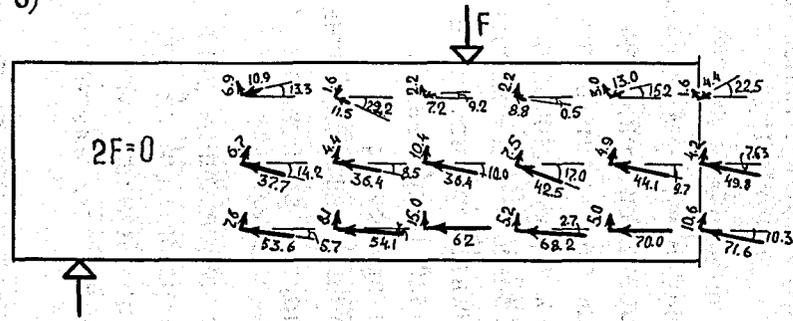


Рис. 2. Направление и величины главных деформаций ( $\epsilon_{mc} \cdot 10^{-5}$ ) в балке с отогнутой арматурой от действия внешней нагрузки и усилия предварительного обжатия  
 а) расчет по МКЭ, б) - экспериментальные данные.

6.

Порядок расчета следующий:

- составление расчетной схемы с разбивкой исследуемой балки на треугольные конечные элементы бетона и линейные конечные элементы арматуры;
- составление управляющего поля чисел;
- вычисление локальных матриц жесткости, учитывающих физико-механические и геометрические характеристики конечных элементов, и сборка глобальной матрицы жесткости в виде коэффициентов системы разрешающих линейных алгебраических уравнений;
- решение системы уравнений ленточного типа методом Гаусса, определение узловых перемещений в принятой расчетной схеме;
- корректировка узловых перемещений напрягаемой арматуры вследствие предварительного натяжения арматуры;
- определение компонентов напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры с учетом упругой работы материалов до появления трещин.

Разработанная программа обладает достаточной универсальностью, позволяющей свободно изменять расчетную схему, физико-механические свойства материалов, расположение арматуры, и варьировать количество, вид и жесткость связующих элементов в узлах соединения бетона и арматуры.

На рис. 2а представлены результаты расчета по разработанной программе железобетонной балки, расчетная схема которой приведена на рис. 1.

Приведенные результаты отражают качественную и количественную картину изменения её напряженно-деформированного состояния с ростом нагрузки. Сравнение результатов расчета с опытными данными (см. рис. 2а и 2б) свидетельствует об удовлетворительной точности расчета балки методом КЭ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карякин А.А. Расчет железобетонных балок методом конечных элементов с учетом пластичности бетона, образования трещин дискретного расположения арматуры и её сцепления с бетоном. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Свердловск, 1979 - 21с.
2. Оатул А.А., Карякин А.А. Расчет железобетонных балок методом конечных элементов // Известия вузов. Строительство и архитектура, № 3 - Новосибирск, 1977.