

05.23.01

Е 721

Челябинский государственный технический
университет

на правах рукописи

ЕРМАКОВА АННА ВИТАЛЬЕВНА

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ
В УСЛОВИЯХ ШЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ,
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ
СПЕЦИФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

05.23.01 "Строительные конструкции"

Автореферат
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск
1993

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете

Научный руководитель
заслуженный строитель РСФСР,
доктор технических наук,
профессор

Оатул А.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Мурашкин Г.В.

кандидат технических наук,
главный инженер института
"Следжелезобетонпроект"
доцент

Шматков С.Б.

Ведущее предприятие - НИИИБ Госстроя СССР

Зашита состоится "25" декабря 1990 г. в 10⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета К.053.13.05 по
присуждению ученой степени кандидата технических наук в
Челябинском государственном техническом университете
по специальности 05.23.01 - строительные конструкции
(454080, Челябинск, пр. им. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
университета

Автограф разослан "23" декабря 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент

 Трегулов Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время наиболее распространенным из методов расчета строительных конструкций является метод конечных элементов.

Расчет железобетонных конструкций связан с трудностями, которые обусловлены наличием у железобетона специфических особенностей: пластичности бетона, трещинообразования, сцепления бетона и арматуры, предварительного напряжения. В связи с этим в последнее время появилось большое число исследований, посвященных разработке различных методик, направленных на учет свойств железобетона при расчете его МКЭ, а также и на совершенствование самого метода конечных элементов применительно к расчетам конструкций из него.

В данной работе представлена методика расчета железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, методом конечных элементов с учетом специфических свойств железобетона. Одна из ее особенностей состоит в том, что учитывается дискретное расположение арматуры в железобетонном элементе, что позволяет проводить подробный анализ его напряженно-деформированного состояния.

Цель работы является разработка методики расчета МКЭ железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, с учетом пластических свойств бетона, процесса прогрессирующего трещинообразования в нем, действительных свойств сцепления его с арматурой и создание на этой основе алгоритма и программы для автоматизированного расчета таких конструкций.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи и направления исследования:

I. Разработать методику расчета МКЭ железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, которая отвечала бы следующим основным требованиям:

а) расчетная модель основана на использовании:

- плоских треугольных конечных элементов (КЭ) для моделирования бетона, в том числе и на стадии трещинообразования;
- плоских треугольных конечных элементов для представления продольной арматуры, размещаемой в бетоне дискретно;
- связующих (податливых) элементов (СЭ) для моделирования сцепления бетона и арматуры, позволяющих учсть взаимные

смещения в продольном направлении и отрыв - в поперечном;

б) учитывала пластические свойства бетона, процесс прогрессирующего трещинообразования, свойства сцепления бетона и арматуры;

2. Разработать алгоритм и программу расчета железобетонных конструкций на основе предложенной методики и отвечающей следующим требованиям:

а) гибкость и изменяемость алгоритма и программы, построенных на основе отдельных подпрограмм, каждая из которых может быть легко заменена с целью совершенствования заложенного в нее алгоритма;

б) ориентированность программы на использование больших ЭВМ типа ЕС и персональных ЭВМ;

в) простота и удобство программы в эксплуатации (ввода исходной информации и чтения результатов расчета);

г) возможность применения программы для расчета конструкций любой конфигурации, любыми граничными условиями, с ослаблениями и отверстиями;

д) программа должна служить как инструментом расчета железобетонных конструкций, так и инструментом "машинного" исследования их от начала загружания вплоть до разрушения.

3. Для оценки методики выполнить примеры расчета железобетонных элементов на ЭВМ и сопоставление с опытными данными, а также выполнить расчет реальных конструкций с целью их совершенствования и внедрения в практику строительства.

Научная новизна разработанной методики расчета методом конечных элементов железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, с учетом пластических свойств бетона, нелинейных свойств работы контакта бетона и арматуры, прогрессирующего трещинообразования, позволяющей оценить напряженно-деформированное состояние конструкции от начала загружания при условии кратковременного ее нагружения, состоит в следующих основных положениях:

1. Для учета трещинообразования в бетоне разработан специальный конечный элемент с условной трещиной, получены формулы вычисления его матрицы жесткости и определения напряжений.

2. С учетом свойств КЭ бетона с условной трещиной разработан способ учета в процессе расчета конструкции прогрессирующего трещинообразования путем приложения дополнительной (фиктивной) нагрузки к узлам расчетной схемы конструкции без трещин, что

равносильно изменению жесткостных свойств треснувших КЭ, учитываемых при составлении глобальной матрицы жесткости.

3. На основании свойств СЭ, моделирующих сцепление бетона и арматуры разработан способ учета членности сцепления с помощью дополнительной нагрузки, основанный на применении дифференцированного закона сцепления в том числе и для случая, когда условная трещина "пересекает" дискретно расположенную арматуру.

4. Разработанная методика позволяет учесть различные особенности работы железобетонных конструкций методом дополнительной нагрузки, что дало возможность положить ее в основу построенных по одной логической схеме, и в то же время достаточно гибких алгоритма и программы расчета.

Практическое значение результатов работы состоит в разработанной программе расчета МКЭ железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, с учетом специфических особенностей железобетона. Эта программа характеризуется следующими основными положениями:

1. Программа позволяет вести расчет железобетонных конструкций с учетом пластических свойств бетона, податливости сцепления его с арматурой, прогрессирующего трещинообразования, предварительного напряжения арматуры. Она реализует методику учета специфических особенностей железобетона методом фиктивной нагрузки, что приводит к экономии машинного времени за счет операций прямого хода при решении системы линейных уравнений.

2. Программа представляет собой гибкий, легко изменяемый комплекс, позволяющий быстрое вмешательство в тот или иной программный блок с целью совершенствования ранее заложенного алгоритма. Она состоит из отдельных подпрограмм, решающих свою определенную задачу и заменяемых при необходимости новой.

3. Программа может быть использована для рабочего расчета конструкций на определенную нагрузку, а также служить инструментом "машинного" исследования работы конструкций от начала загружения до разрушения. С ее помощью могут быть рассчитаны конструкции сложного очертания с нерегулярной сеткой расчетной схемы. При расчете конструкций с регулярной сеткой расчетной схемы облегчается подготовка исходных данных за счет ее сокращения.

4. Программа написана на языке ФОРТРАН, ориентирована на использование ЕС ЭВМ и персональных ЭВМ типа "Искра 1030-II".

5. При использовании программы для расчета конструкций и решения отдельных задач можно получить подробные сведения о зап-

ряженно-деформированном состоянии этих конструкций, анализ которого в ряде случаев, как это доказано расчетами некоторых конструкций, приводит к более рациональному их конструированию, экономии материальных ресурсов и получению за счет этого экономического эффекта.

6. Программа используется в учебном процессе, в курсовом и дипломном проектировании и научно-исследовательской работе студентов.

Основные положения, вынесенные на защиту:

I. В области разработки методики расчета МКЭ железобетонных конструкций:

а) плоский треугольный конечный элемент бетона с условной трещиной и зависимости, описывающие его свойства;

б) способ учета прогрессирующего трещинообразования методом фиктивной нагрузки, определение которой основано на свойствах этого КЭ бетона с условной трещиной;

в) способ учета податливости сцепления бетона и арматуры по поверхности их контакта методом фиктивной нагрузки, основанной на использовании дифференцированного закона сцепления, включая случай, когда условная трещина в КЭ бетона "пересекает" дискретно расположенную в бетоне арматуру.

2. Алгоритм и программа "Элемент-I" расчета МКЭ железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния при кратковременном нагружении, с учетом пластических свойств бетона, прогрессирующего трещинообразования в нем, податливости сцепления его с арматурой и предварительного напряжения арматуры.

Агробация работы и публикации. Основные результаты выполненной работы докладывались и получили одобрение на Всесоюзном координационном совещании на тему: "Трещиностойкость железобетонных конструкций" (Брест, 2-4 октября 1984 г.); на республиканском научно-техническом совещании на тему: "Совершенствование технологий изготовления, методов расчета и свойств фибробетонных конструкций" (Рига, 26-27 апреля 1988 г.); на областных научно-технических конференциях на тему: "Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского строительства и технологии их изготовления на Среднем Урале" (Свердловск, 28-29 мая 1987 г. и 5-6 мая 1988 г.); на 37-43 научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1984-1990 г.г.) и опубликованы в пяти печатных работах.

Внедрение. Программа "Элемент-І" была применена для расчета ряда железобетонных конструкций и их элементов (см. описание 4 главы), что помогло дать рекомендации по их рациональному конструированию и получить экономический эффект.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем работы 271 с., из них 137 страниц основного текста, 28 таблиц (22 с.), 55 рисунков (49 с.), 122 наименования литературы (14 с.), 39 с. приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору работ по применению метода конечных элементов в расчетах железобетонных конструкций и постановке целей и задач исследования.

Поскольку метод конечных элементов является наиболее эффективным при расчете конструкций, то вопросы его реализации рассматривались Масленниковым А.М., Постновым В.А., Александровым А.В., Морозовым Е.М., Никишковым Г.И., Немчиновым Ю.И., Розиным Л.А., Сахаровым А.С., Синицыным А.П., Хархурином И.Я. и др., зарубежными авторами: Дж. Аргириосом, О.Зенкевичем, Р.Клафом, Дж. Оденом, Р.Галахером, Р.Ливси, Л.Сегерлингом, И.Смитом, С.Рао и др.

Различным вопросам применения метода конечных элементов к расчету железобетонных конструкций посвящены работы БидногоТ.А., Андреева О.О., Бабанова В.В., Белана Т.А., Воронцова Г.В., Городецкого А.С., Здоренко В.С., Гребенюка Г.И., Дацевского Е.М., Карленко Н.И., Калякина А.А., Козачевского А.И., Леви М.И., Мекагонова М.Г., Насешника В.В., Сегалова А.Е., Сохина С.А., Ярина Л.А. и др.; зарубежных авторов: Салмана Ч., Крисфилда М.А., Скорделиса А., Рахмана Х., Сьюдана М., Шнэбрюча В. и др.

МКЭ в классической, упругой постановке сводит расчет любой конструкции к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$KV = P \quad , \quad (I)$$

где V - матрица-столбец неизвестных перемещений узлов;

P - матрица-столбец внешней нагрузки;

K - матрица жесткости всей рассчитываемой конструкции.

Существуют две группы способов учета специфических свойств железобетона. Первая группа связана с изменением на каждом шаге загружения или итерации коэффициентов матрицы K . Вторая - связана с изменением компонентов вектора P .

Первая группа способов требует на каждом шаге нагружения и на каждой итерации составлять заново матрицу K и каждый раз решать новую систему линейных уравнений.

Вторая группа позволяет при решении системы методом Гаусса исключить наиболее трудоемкую операцию приведения матрицы K к треугольному виду на каждом шаге приближений и из преобразований прямого хода оставить только те, которые связаны с вычислением столбца свободных членов, а затем сразу выйти на обратный ход. Это позволяет существенно сократить трудоемкость расчета и приводит к экономии машинного времени.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с реализацией именно этой, второй группы способов учета нелинейных свойств железобетона на различных стадиях его работы. Так, на стадии учета пластических свойств бетона система (I) принимает вид:

$$KV = P + \Phi_{pe} , \quad (2)$$

где Φ_{pe} – вектор фиктивной нагрузки, учитывающий пластические свойства бетона.

На стадии учета трещинообразования в бетоне система (I) имеет форму:

$$KV = P + \Phi_{pe} + \Phi_{cic} , \quad (3)$$

где Φ_{cic} – вектор фиктивной нагрузки, учитывающий трещинообразование в бетоне.

На стадии учета нелинейных свойств сцепления бетона и арматуры разрешающая система уравнений (I) выглядит так

$$KV = P + \Phi_{pe} + \Phi_{cic} + \Phi_{sc} , \quad (4)$$

где Φ_{sc} – вектор фиктивной нагрузки, учитывающий изменение свойств сцепления в процессе работы конструкции.

Обзор работ показал, что учёт пластических свойств бетона методом фиктивной нагрузки Φ_{pe} целесообразно выполнять по алгоритму, разработанному А.А.Карякиным на основе деформационной теории пластичности Г.А.Генкина, а для учета сцепления арматуры с бетоном при ее дискретном задании лучше опираться на введение специальных связующих элементов (СЭ), предложенных Скорделисом А., и на дифференцированный закон сцепления. Исходя из сказанного, можно выделить две узкие задачи исследования: способ формирования векторов фиктивной нагрузки трещинообразования Φ_{cic} и нелинейности сцепления Φ_{sc} .

Вторая глава посвящена разработке методики расчета железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, МКЭ с учетом пластических свойств бетона, трещинообразования в нем, нелинейных свойств сцепления бетона и арматуры.

Для описания соотношения между упругими напряжениями $\bar{\sigma}$ и пластическими $\Delta\bar{\sigma}_{pe}$ в КЭ бетона использована теория Гончарова Г.А.:

$$\bar{\sigma}_{pe} = \bar{\sigma} + A\bar{\sigma}_{pe} . \quad (5)$$

Здесь $A\bar{\sigma}_{pe}$ - матрица-столбец, которая характеризует степень проявления пластических свойств бетона. Элементы этой матрицы зависят от уровня и вида напряженно-деформированного состояния КЭ:

$$A\bar{\sigma}_{pe} = f(\epsilon, \bar{\sigma}, \Gamma, T, \omega) , \quad (6)$$

где Γ - интенсивность деформаций сдвига;

T - интенсивность касательных напряжений;

ω - функция пластичности.

Между напряжениями $\bar{\sigma}$, действующими в пределах КЭ, и его узловыми силами R существует связь:

$$R = tSC\bar{\sigma} . \quad (7)$$

где t - толщина конечного элемента;

S - его площадь;

C - матрица связи.

Для пластической стадии работы КЭ можно записать:

$$K\bar{V} + \Delta R_{pe} = tSC(\bar{\sigma} + A\bar{\sigma}_{pe}) , \quad (8)$$

где K - упругая матрица жесткости бетонного КЭ;

V - перемещения его узлов;

ΔR_{pe} - вектор, обеспечивающий изменение упругих напряжений на величину $A\bar{\sigma}_{pe}$.

Раскрывая скобки, получаем:

$$\Delta R_{pe} = tSC\Delta\bar{\sigma}_{pe} . \quad (9)$$

Для конструкции в целом справедлива запись

$$KV + \Phi_1 = P , \quad (10)$$

где Φ_1 - вектор, учитывающий проявление пластических свойств бетона в конечных элементах, формируемый из векторов ΔR_{pe} отдельных КЭ бетона.

Сравнивая выражения (2) и (10), получаем, что искомый вектор фиктивной нагрузки, учитывающий пластичность бетона

$$\Phi_{pe} = -\Phi_1 \quad . \quad (II)$$

Значение этого вектора на каждом шаге нагружения конструкции определяется итерационным путем.

Для учета процесса трещинообразования в бетоне с помощью вектора фиктивной нагрузки Φ_{csc} был разработан КЭ бетона с условной трещиной. При этом были приняты следующие предпосылки:

1. Трещины в бетоне образуются при превышении главным растягивающим напряжением σ_{mt} предельного сопротивления бетона расщеплению R_{et} .

2. Направление развития трещинки перпендикулярно направлению σ_{mt} .

3. После образования трещинки напряжение в направлении, перпендикулярном ее развитию, становится равным 0, т.е. $\sigma_{mt} = 0$.

Основываясь на этих предпосылках, были получены формулы для определения его матрицы жесткости и напряжений (здесь не приводится):

$$B_{csc} = \{(\sigma_{mc}, \alpha_i)\} \quad , \quad (I2)$$

где σ_{mc} - главное сжимающее напряжение;

α_i - угол наклона площадки, в которой действует напряжение σ_{mt} .

Если взять напряжения в КЭ без трещин σ_{pe} и напряжения в КЭ бетона с условной трещиной B_{csc} при одинаких и тех же перемещениях его узлов V , то можно соотношение между ними записать так:

$$B_{csc} = \sigma_{pe} + \Delta B_{csc} \quad , \quad (I3)$$

где ΔB_{csc} - матрица-столбец, которая характеризует изменение напряжений σ_{pe} в КЭ за счет образования трещины.

Выражение (I3) аналогично выражению (5), поэтому формула для определения вектора ΔR_{csc} , обеспечивающего изменение напряжений в КЭ вследствие образования трещины, аналогична (7):

$$\Delta R_{csc} = t S C A \Delta B_{csc} \quad , \quad (I4)$$

а вектор Φ_{csc} , учитывающий появление трещин во всей конструкции, формируется из этих векторов ΔR_{csc} отдельных КЭ.

Вектор фиктивной нагрузки Φ_{csc} , учитывающий нелинейную работу контакта бетона и арматуры, вычисляется на основе матрицы жесткости СЭ и ее свойств. Эта матрица записывается так

$$K_0 = \begin{bmatrix} K_y & 0 \\ 0 & K_x \end{bmatrix} \quad . \quad (I5)$$

Жесткость продольной связи согласно дифференцированному закону сцепления определяется по формуле

$$K_x = S_g A_s e^{-c_1 \vartheta_w^2} \quad . \quad (16)$$

где параметры A_s и S_g зависят от класса бетона и положения рассматриваемого сечения относительно трещин или торца конструкции, а ϑ_w – величина взаимного смещения бетона и арматуры в продольном направлении, S_g – площадь боковой поверхности арматуры на рассматриваемом участке.

Для начальной стадии расчета, когда $\vartheta_w = 0$, начальная жесткость K_x^0 определяется так

$$K_x^0 = S_g A_s \quad . \quad (17)$$

Представим матрицу жесткости СЭ K_{ce} с нелинейными свойствами в виде суммы двух матриц

$$K_{ce} = K + \Delta K_{cu} \quad . \quad (18)$$

где K – матрица жесткости СЭ с постоянными свойствами;

ΔK_{cu} – матрица, характеризующая степень изменения матрицы вследствие проявления нелинейных свойств контакта бетона и арматуры.

Для СЭ справедливо следующее соотношение между перемещениями узлов V и узловыми реакциями

$$K_{ce} V = R_{ce} \quad , \quad (24)$$

которое перепишем в виде

$$(K + \Delta K_{cu}) V = R + \Delta R_{cu} \quad , \quad (25)$$

где R – матрица упругих реакций СЭ;

ΔR_{cu} – матрица-столбец, характеризующая нелинейность сцепления.

После преобразований получим

$$\Delta R_{cu} = \Delta K_{cu} V \quad . \quad (26)$$

Компоненты вектора ΔR_{cu} зависят от степени проявления нелинейных свойств сцепления, их действие эквивалентно изменению жесткостных характеристик связей СЭ. Причем в поперечном направлении СЭ работает жестко при сжатии, а при растяжении его поперечная жесткость принята равной 0.

Идя уже известным путем, что вектор Φ_{cu} , учитывающий нелинейную работу сцепления, формируется из векторов Φ отдельных СЭ.

Далее в главе дается общее описание алгоритма расчета кон-

структур по стадиям расчета от составления расчетной схемы до анализа полученных результатов.

В третьей главе дано описание программы "Элемент-I", предназначенной для расчета железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, МКЭ. В основу программы заложен алгоритм, изложенный в главе 2. Программа написана языке ФОРТРАН и может быть реализована на ЕС ЭВМ или ПЭВМ "Искра И030-II".

На рис. I дано структурное дерево программы "Элемент-I". Она состоит из семи программных блоков, которые отличаются своим функциональным назначением. Каждый из блоков содержит одну или несколько подпрограмм и решает свою задачу. Эти блоки на рисунке обрамлены штриховой линией. Всего в программе около 1380 операторов. Кроме того есть еще дополнительный блок для вычисления матрицы жесткости КЭ с условной трещиной, состоящий из пяти подпрограмм и приблизительно 150 операторов.

Программа состоит из управляющей программы ("MAIN") и 23 функциональных подпрограмм, из которых двадцать две составлены автором диссертации. Программа "GAUSS", предназначенная для решения системы линейных алгебраических уравнений, разработана Пасечником В.В. В нее были внесены лишь незначительные изменения, связанные с привязкой к другим подпрограммам.

Далее в диссертации дано краткое описание программных блоков и подпрограмм их образующих, а затем подробное описание правил подготовки исходных данных.

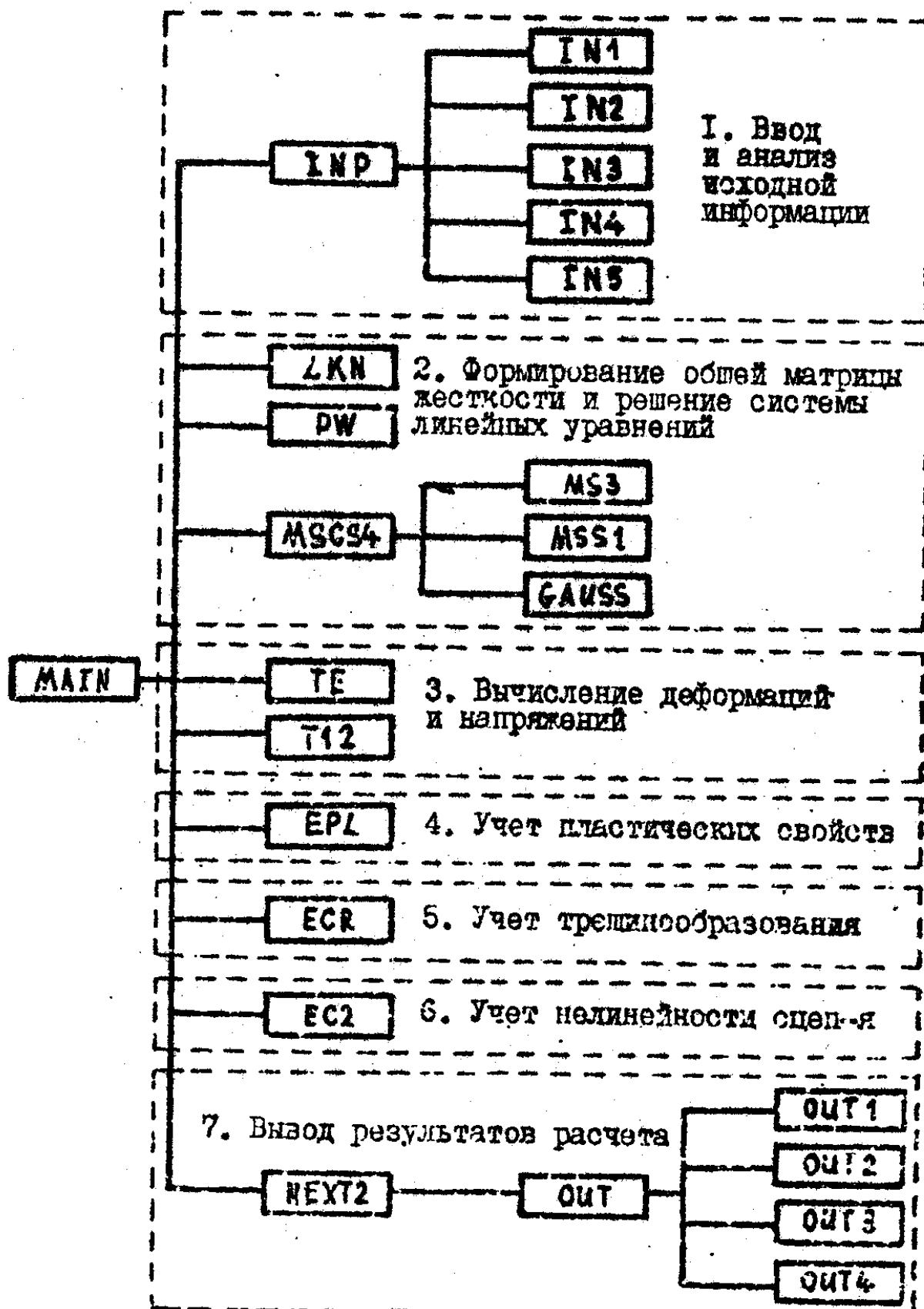
В конце главы даны правила чтения результатов расчета, а в заключении пример подготовки исходной информации и выводы.

В четвертой главе представлены результаты расчета некоторых железобетонных конструкций и их элементов с помощью программы "Элемент-I". Были рассчитаны:

1. Внутренние стеловые цокольные панели многоэтажного крупнопанельного здания.
2. Платформенные стыки крупнопанельного здания.
3. Фибробетонные балки.
4. Железобетонные балки с изменением жесткостных характеристик по высоте.
5. Центрально-растянутый образец.
6. Узел сопряжения колонны и ригеля каркаса одноэтажного промышленного здания.

При выполнении расчетов соблюдалась последовательность:

Структурное дерево программы "Элемент-1"



Штриховыми линиями обозначены программные блоки

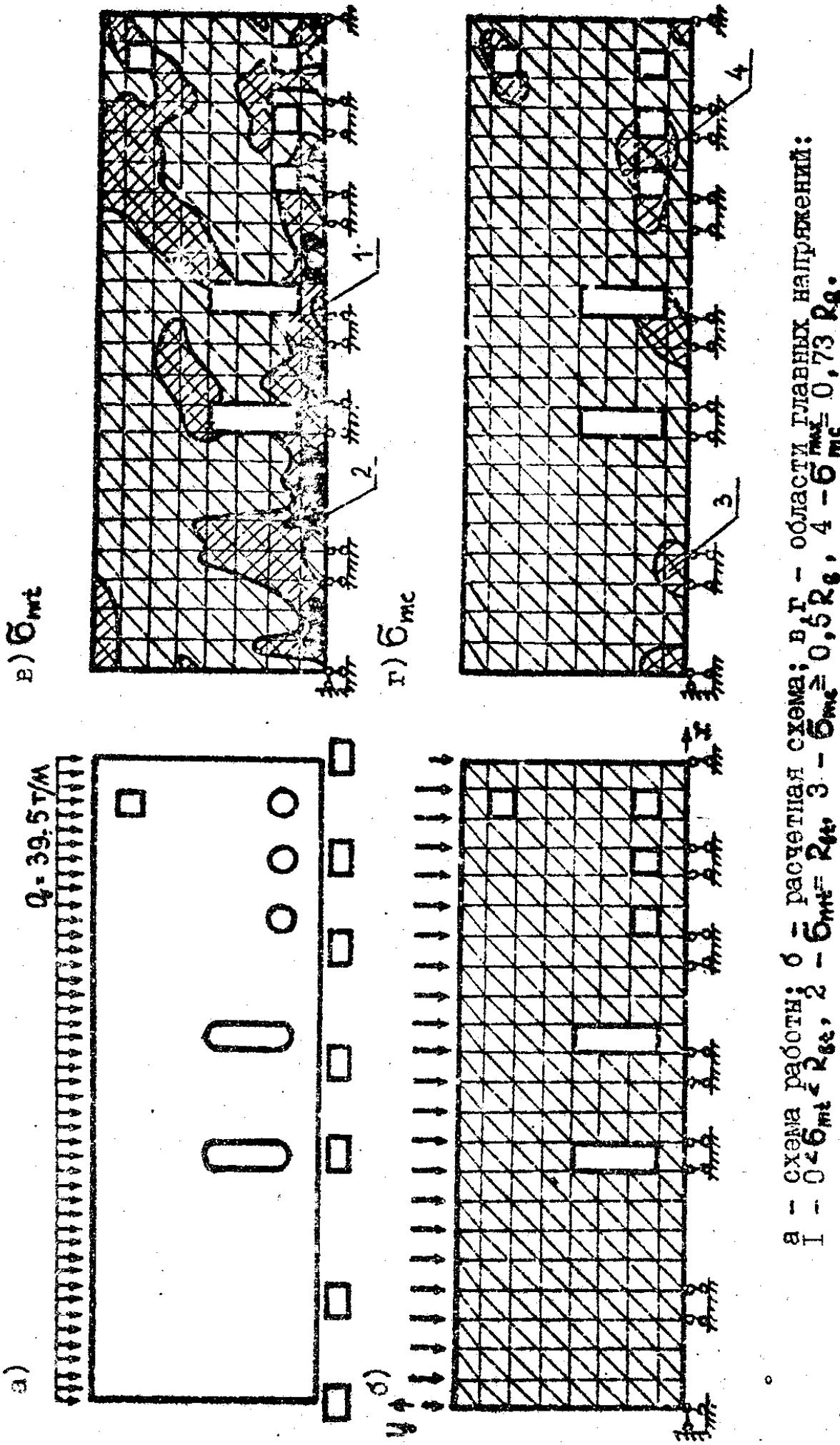
1. Изучение конструктивного решения исследуемого объекта.
2. Постановка задач расчета как в плане изучения напряженно-деформированного состояния, так и в плане изучения расчетного аппарата, т.е. самой программы "Элемент-1".
3. Составление расчетных схем и подготовка исходных данных
4. Проведение расчета на ЭВМ.
5. Анализ полученных результатов,
6. Сравнение с опытными данными.
7. Выводы по результатам расчета как по анализу напряженно-деформированного состояния конструкции, так и по анализу используемого расчетного аппарата.

Расчет внутренних стеновых цокольных панелей жилых зданий серии III-121, был выполнен по заказу ПСМО "Челябинскгражданстрой". Согласно техническому заданию было сделано четыре варианта расчета. В результате расчета были получены следующие характеристики напряженно-деформированного состояния панелей: перемещения узлов, относительные деформации КЭ, нормальные, касательные и главные напряжения, действующие в каждом КЭ. По результатам расчета на ЭВМ были построены линии главных напряжений и эпюры нормальных и касательных сил для каждого из четырех вариантов. На рис. 2 даны схема работы, расчетная схема и области главных напряжений первого варианта расчета панелей. Анализ полученных результатов показал, что при заданных нагрузках и схемах опирания возможен переход на изготовление цокольных панелей из бетона класса В15 (против В20 по проекту) без изменения их конструкции.

Расчет платформенных стыков 16-этажных жилых зданий серии 97 был выполнен по заданию этого же ПСМО. Было рассмотрено пять вариантов конструктивного решения платформенных стыков (см. рис. 5). По результатам расчета был проведен аналогичный анализ напряженно-деформированного состояния, который показал, что первые три варианта полностью отвечают предъявляемым прочностным требованиям, причем даже в случае снижения марки раствора до М100 против проектной М200. Четвертый и пятый вариант не удовлетворяют этим требованиям, поскольку не могут воспринять проектную нагрузку. Сделанные теоретические выводы совпадали с результатами опытных данных.

Расчет фибробетонных балок был проведен по заказу в/ч 89515. Исходными данными для расчета послужили результаты натурных испытаний предварительно напряженных балок. Было сдела-

Внутренняя стеновая цокольная панель УВСЦ-5 (Вариант I)



а - схема работы; б - расчетная схема; в, г - области главных напряжений:
 $\Gamma_1 = \sigma_{int} < R_{st}$, $\Gamma_2 = \sigma_{int} = R_{st}$, $\Gamma_3 = \sigma_{int} \geq 0,5 R_s$, $\Gamma_4 = \sigma_{int} \geq 0,73 R_s$.

Рис. 2

но пять вариантов расчета (см. рис. 3). Анализ результатов расчета помог показать эффективность фибрового армирования, а кроме того показал, что опытные и теоретические значения нагрузок начального трещинообразования отличаются на 2,16-13,32%, что доказывает достоверность используемого расчетного аппарата.

Расчет железобетонных балок с учетом изменения жесткостных характеристик по высоте был выполнен по заказу кафедры "Испытание сооружений" Московского инженерно-строительного института им. Куйбышева (см. рис. 4).

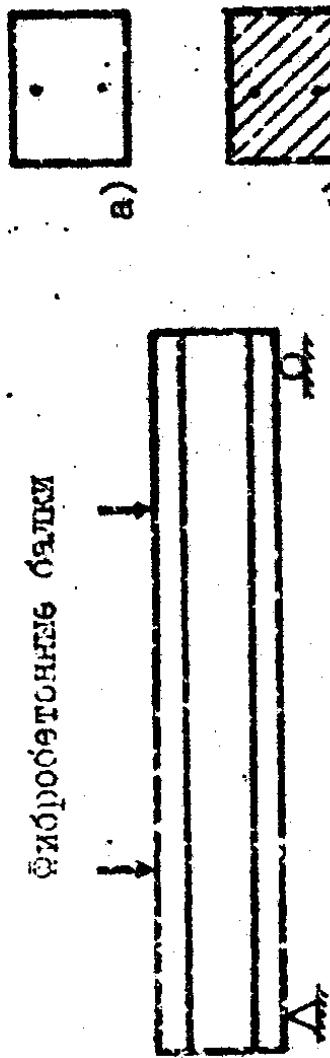
В соответствии с заданием было рассчитано четыре варианта распределения характеристик E_b , R_b , R_{st} по высоте балки (см. рис. 4). Расчетная схема для всех случаев была одна, причем арматура учитывалась дискретно.

Из предложенных вариантов по результатам расчета был выбран наиболее близкий к опытному. Кроме того, было сделано сопоставление результатов упругого, пластического и расчета с учетом трещинообразования, который доказал эффективность программы.

Так, учет пластических свойств по сравнению с упругим расчетом давал нагрузку начального трещинообразования на 29,0-47,4% выше, чем упругий расчет, при этом вертикальные перемещения росли на 12,6-18,5%, а горизонтальные на 18,3-25,3%. Если же к тому же учитывалось трещинообразование, то рост вертикальных перемещений по сравнению с упругими составил 52,4-58,4%, а горизонтальных 58,9-68,4%.

Чтобы проследить характер изменения напряжений в зависимости от упругого, пластического и расчета с учетом трещинообразования, был сделан расчет всех четырех вариантов на одну и ту же нагрузку. Для сечения, в котором образуется трещина, он показал, что при пластическом расчете максимальные растягивающие напряжения в бетоне составляют 68,2-76,4% упругих, а сжимающие в бетоне растут на 6,6-9,0%; напряжения же в арматуре растут на 20,4-30,4%. После образования трещины сжимающие напряжения в бетоне растут на 47,2-49,8%, а напряжения в арматуре растут в 2,7-3 раза. Для второго сечения, при пластическом расчете максимальные растягивающие напряжения составляют 71,1-75,9% упругих, а максимальные сжимающие напряжения в бетоне растут на 5,1-6,2%; напряжения же в арматуре растут на 19,4-26,8%. После образования трещины в первом сечении, напряжения в бетоне во втором сечении практически не изменяются по сравнению с пластическими, а напряжения в арматуре составляют уже 128,1-135,8% упругих.

Фибробетонные панели

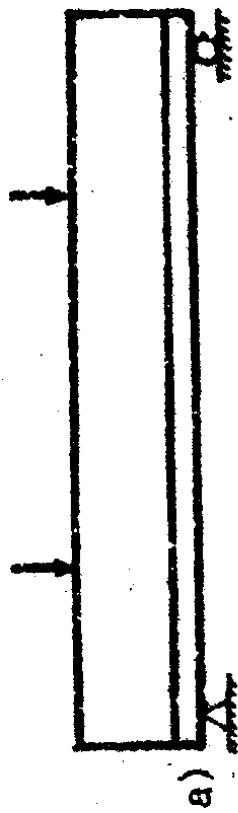


Варианты:

- сетка (а); 2 - СФБ с проволочной фиброй (б); 3 - СФБ с листовой фиброй (в); 4 - бетон и СФБ с проволочкой (г); 5 - бетон и СФБ с листовой фиброй (д).

Рис. 3

Железобетонные панели



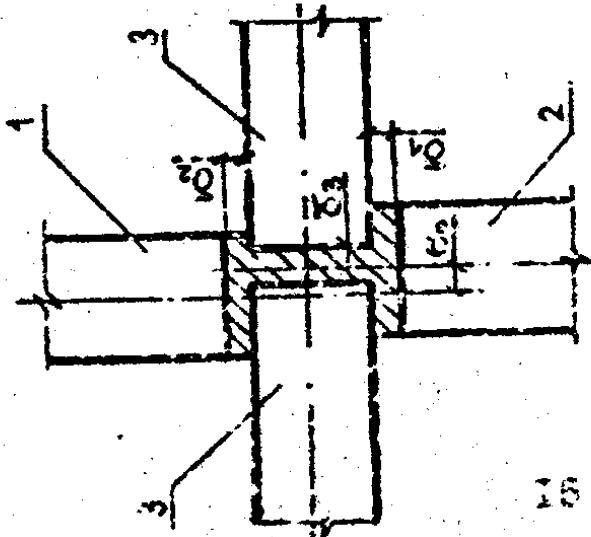
а)

б)

- а) конструкция балок; б) распределение жесткостных характеристик E_1, E_2, R_1 по высоте по вариантам расчета.

Рис. 4

Платформенный стык



Расчет центрально-растянутого образца выполнен в целях отладки алгоритма учета нелинейности сцепления в программе "Элемент-І". Он показал необходимость учета этой нелинейности при дискретном задании арматуры в конструкции и достоверность алгоритма ее учета, заложенного в программу.

Расчет узла сопряжения колонны и ригеля одноэтажного промышленного здания был выполнен на основании материалов работы по созданию облегченного каркаса ОПЗ, которая проводилась на кафедре железобетонных конструкций ЧПИ (см. рис. 6). Этот расчет позволил получить данные о напряженно-деформированном состоянии узла сопряжения, дать рекомендации по его конструированию.

По результатам диссертационной работы были сделаны следующие основные выводы:

1. Разработанная методика расчета методом конечных элементов железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, содержит следующие основные положения:

а) расчетная схема конструкции представляет собой совокупность плоских треугольных КЭ бетона или арматуры и СЭ, моделирующих сцепление;

б) пластические свойства бетона учитываются методом фиктивной нагрузки, формирование которой основано на деформационной теории пластичности Гениева Г.А. и происходит в процессе выполнения последовательных приближений;

в) прогрессирующее трещинообразование, наблюдаемое в процессе нагружения, учитывается путем фиктивной нагрузки, формирование которой основано на свойствах треугольного конечного элемента с условной трещиной;

г) учет нелинейных свойств сцепления бетона и арматуры основано тоже на методе дополнительной нагрузки, формирование которой происходит согласно дифференцированному закону сцепления, описывающего поведение СЭ, установленных на контакте бетона и арматуры, включая и случай, когда условная трещина "пересекает" дискретно расположенную в бетоне арматуру;

д) предложенная методика достаточно проста и послужила основой для разработки алгоритма и программы расчета железобетонных конструкций на ЭВМ.

2. Разработанный алгоритм и составленная по нему программа "Элемент-І" предназначены для расчета железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния при кратковременном нагружении, МКЭ с учетом специфических особенностей.

ностей железобетона. Она характеризуется положениями, изложенными на третьей странице.

3. Выполненные расчеты железобетонных конструкций МКЭ с помощью программы "Элемент-I" показали следующее:

а) учет специфических особенностей работы железобетонных конструкций при расчете их МКЭ помогает получить более полные сведения о напряженно-деформированном состоянии, что приводит к их рациональному конструированию;

б) сопоставление опытных и теоретических результатов показало, что разработанные методика, алгоритм и программа достаточно точно описывают напряженно-деформированное состояние конструкции, т.к. наблюдалось их качественное и количественное совпадение.

Положения диссертации отражены в печатных работах:

1. Калякин А.А., Ермакова А.В. Методика учета процесса трещинообразования при расчете железобетонных конструкций методом конечных элементов. - В кн.: Исследования по строительной механике и строительным конструкциям - Челябинск: ЧИИ, 1985, I3I-I33.

2. Оатул А.А., Калякин А.А., Ермакова А.В. Об учете сцепления арматуры и бетона при расчете железобетонного образца МКЭ. - В кн.: Исследования по строительной механике и строительным конструкциям - Челябинск: ЧИИ, 1987, с. 86-89.

3. Ермакова А.В. Исследование работы железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния, на ЭВМ: Тезисы докладов областной научно-технической конференции "Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского строительства и технологии их изготовления на Среднем Урале" - Свердловск, 1987, с. 33-34.

4. Ермакова А.В., Зива А.Г., Соловьев Б.В., Боксбергер З.К. Влияние фибрового армирования на деформативность и трещиностойкость изгибающего элемента с учетом слоистости конструкции: Тезисы докладов республиканского научно-технического совещания "Фибробетон: свойства, технология, конструкции". - Рига: ЛатНИИ строительства, 1988, с. 41-43.

5. Ермакова А.В., Калякин А.А. Исследование стендовых цокольных панелей жилых зданий на ЭВМ.: Тезисы докладов областной научно-технической конференции "Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского строительства и технологии их изготовления на Среднем Урале". - Свердловск, 1988, с. I3-I4.

Л.Б.Карякин