

624.012(043)  
K492  
V

УРАЛЬСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С.М.КИРОВА

На правах рукописи

КЛИМОВ Михаил Иванович

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ БАЛОК,  
КРУГЛЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ПЛИТ

Специальность 05.23.01. - Строительные конструкции

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Свердловск - 1981

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им.  
Ленинского комсомола на кафедре строительной механики.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
СОЛОМИН В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший науч-  
ный сотрудник КАРПЕНКО Н.И.  
кандидат технических наук, доцент  
ТИТАКОВ А.И.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский и  
проектный институт "Теплопроект" г.Москва.

Защита состоится " \_\_\_\_\_ 1981 г., в \_\_\_\_\_ час., на  
заседании специализированного совета К 063.14.05 при Уральском  
ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте им.  
С.М.Кирова.

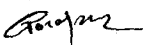
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 620002, г.Свердловск,  
К-2, УПИ им.С.М.Кирова, Ученому секретарю совета института, тел.  
54-85-74.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 1981 г.

Ученый секретарь специализированного совета

кандидат технических наук, доцент



РОГАЛЕВИЧ В.В.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года предусматривается повысить эффективность капитального строительства, осуществлять строительство по наиболее прогрессивным и экономичным проектам.

В строительной практике в качестве фундаментов современных инженерных сооружений широко используются железобетонные балки и плиты. Так, ленточные фундаменты находят рациональное применение при возведении бескаркасных производственных и административно-бытовых зданий. Круглые и кольцевые фундаменты - при возведении сооружений башенного типа (дымовых труб ТЭЦ и ГРЭС, телебашен, радиорелейных мачт и т.п.). На сооружение только одной фундаментной плиты под дымовую трубу Запорожской ГРЭС потребовалось 7800 м<sup>3</sup> бетона и 700 т арматуры. В связи с этим становится все более актуальной задача оптимального проектирования фундаментов, решение которой обеспечивает надежность конструкции и рациональное расходование строительных материалов.

Цель работы. Совершенствование методов оптимального проектирования железобетонных балок, осесимметричных плит на упругом основании и их приложение к оптимизации фундаментов реальных сооружений.

Научная новизна. Новые пути в практике оптимального проектирования большеразмерных фундаментов намечены за счет уточнения математической модели, позволяющей полнее учесть многочисленные требования реального проектирования, и привлечения новых методов и процедур, ускоряющих процесс получения оптимального решения.

Впервые решается комплексная многопараметрическая задача оптимизации фундаментов математическую модель которой образуют: целевая функция, условия прочности и ограничения ширины раскрытия

трещин, деформаций фундамента; уравнения равновесия и совместно - сти деформаций, нелинейные физические уравнения, граничные условия; требования конструктивно-технологического характера (армирование производится в соответствии с имеющимся сортаментом, геометрические размеры сечений унифицированы, их изменение по длине конструкции принято ступенчатым или линейным и др.).

Построены алгоритмы последовательного типа на основе метода обобщенных множителей Лагранжа (ОМЛ) и штрафной негладкой функции. Впервые освещается опыт применения метода ОМЛ в задаче оптимального проектирования конструкции.

Использование разработанной методики при решении ряда практически важных задач позволило получить экономичные и конструктивно приемлемые решения.

Методика исследования. Выполненная работа включает в себя построение математической модели задачи оптимального проектирования и алгоритмов ее решения, а также их реализацию с помощью программы на ЭВМ.

Разработка эффективных алгоритмов поиска основана на идеях функционального анализа, результаты которого отражают специфику оптимизируемых конструкций. Функциональный анализ проведен на основе всестороннего изучения особенностей рассматриваемой задачи (исследуется непрерывность, выпуклость, гладкость целевой функции и ограничений; наличие "овражных" ситуаций внутри и на границе допустимой области; единственность решения задачи и др.).

Разработка программы оптимального проектирования фундаментных блоков и плит проводилась при постоянном контроле получаемой информации. Достоверность полученных результатов в стадии отладки блоков программы оценивалась путем сравнения их с заранее известными решениями. При малом числе переменных параметров для анализа работы алгоритма использовалась геометрическая интерпретация задачи.

Практическая ценность и внедрение. Метод позволяет определять минимальный расход арматуры и ее распределение при неизменных параметрах бетонного сечения, а в случае их переменности оптимальные значения армирования и размеров сечений фундамента.

Метод и реализующая его программа были использованы ВПО "Оренбурггазпром" при исследовании работы фундаментов под турбокомпрессоры газопровода "Оренбург - Западная граница СССР", строительномонтажным трестом "Челябметаллургстрой" при подборе оптимальных параметров фундаментов электрической газоочистки мартеновского цеха ЧМЗ.

Публикация и апробация работы. Основное содержание работы опубликовано в пяти научных статьях. По результатам работы сделаны доклады на Всесоюзном координационном совещании по проблеме "Расчет и оптимизация конструкций из упруго-пластических материалов, в том числе с использованием ЭВМ" (г.Москва, 1975 г.), на УЦ научной конференции по применению ЭВМ в механике деформируемого твердого тела (г.Ташкент, 1975 г.), на Всесоюзной конференции "Современные методы и алгоритмы расчета и проектирования строительных конструкций с использованием ЭВМ" (г.Таллин, 1979 г.) и на XXVIII-XXXI научно-технических конференциях ЧПИ (Челябинск, 1975-1978 гг.).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 125 листах машинописного текста и содержит 21 рисунок и список использованной литературы из 116 наименований.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель оптимального проектирования фундаментных балок, круглых и кольцевых плит и результаты исследований ее функциональных свойств.

2. Алгоритмы для ЭВМ по проектированию оптимальных фундаментных балок, круглых и кольцевых плит.

### 3. Результаты исследований по оптимизации параметров фундаментных конструкций.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечается актуальность работы, научная новизна, описывается ее структура.

В первой главе рассматривается состояние вопроса и поставлены задачи настоящего исследования. В начале главы дается краткий обзор методов расчета конструкций на упругом основании в физически нелинейной постановке. Рассмотрены работы Б.Г.Коренева, А.П.Синицына, Д.Т.Чернова, Г.Ф.Пеньковского, Н.С.Метелька, В.М.Бондаренко, С.Н.Клепикова, В.И.Соломина, В.Ф.Тутынина, И.И.Шимова, Г.В.Трегулова и др. По результатам обзора отобраны наиболее эффективные алгоритмы расчета фундаментов, предложенные в работах В.И.Соломина с сотрудниками. В них жесткости элементов балок определяются по формулам СНиП, а в круглых и кольцевых плитах на основе теории Н.И.Карпенко.

Затем приводится классификация основных методов, применяемых при решении задач оптимизации на ЭВМ. Сравнительный анализ вычислительных алгоритмов сделан на основе известных работ по нелинейному программированию Б.А.Берзина, Л.С.Гурина, Я.С.Дамарского, А.Д.Меркулова, А.И.Прооя, Л.А.Растригина, Б.С.Разумихина, Ф.А.Черноусько, Д.Дж.Уайлда, А.Фиакко и Р.Мак-Кормика, Дж.Хедли и др. Отмечается, что наиболее эффективные алгоритмы построены, как правило, на основе последовательной комбинации различных методов в зависимости от функциональных свойств задачи. Этим обосновывается необходимость предварительного исследования характерных свойств решений, качественных особенностей допустимой области из множества фундаментных конструкций.

Последовательно рассмотрены основные направления по оптимизации конструкций на упругом основании.

Первые работы по этой теме были выполнены Н.Д.Сергеевичем, получившим решение задачи о наименьшем объеме балок на упругом основании. Направление, связанное с поиском наиболее жесткой конструкции на упругом основании, получило наибольшее развитие в работах Г.Г.Книжника.

К следующему направлению отнесены исследования, в которых оптимальное проектирование фундаментов проводится с учетом ряда специфических требований их возведения. Это работы К.Г.Бомштейна, Д.Е.Польшина, Л.Г.Якобсона, Е.Ф.Винокурова, В.Е.Быховцева, Е.И.Ильевича, А.А.Пристера, Я.П.Фельдмана.

Во всех исследованиях по оптимальному проектированию конструкций рассматриваемого типа отмечается целесообразность и возможность решения задачи. В большинстве работ, в каждой конкретной постановке для разных функций цели и ограничений, используются методы, основанные на удачном сочетании эвристических и формальных приемов. Однако сравнительные оценки таких методов затруднены из-за отсутствия одинаковых условий.

Из исследований, посвященных оптимальному армированию конструкций на упругом основании отмечены работы Я.А.Бараускаса и Й.Й.Жеквичюса, В.И.Соломина, И.И.Шилова, А.И.Козачевского, Д.Рожваны.

Рассмотрены особенности различных методов и их недостатки. Отмечается, что использование существующих методов оптимального проектирования фундаментных балок и плит не приводит к решению задачи, в которой одновременно учитывались бы особенности деформирования материалов конструкции при различных моделях основания, условия прочности, ограничения раскрытия трещин и деформаций, а также многочисленные технологические требования.

В завершение анализа поставлены задачи настоящего исследования с целью совершенствования методов проектирования конструкций рассматриваемого назначения.

Во второй главе описана математическая модель оптимального проектирования фундаментных балок и плит, исследованы функциональные свойства поставленной задачи.

Рассматриваются фундаменты из монолитного железобетона с расчетной схемой в виде балки, круглой и кольцевой плиты на упругом основании. Жесткости сечений в зависимости от величины изгибающих моментов определяются с учетом упруго-пластических свойств бетона, с учетом трещинообразования и появления пластических деформаций в арматуре.

При расчете оптимальных фундаментов предполагаются известными следующие данные: результаты инженерно-геологических изысканий строительной площадки, характеристики проектируемого сооружения, переменные и постоянные параметры конструкции, условия производства работ.

Грунтовое основание моделируется по гипотезе Вязклера, упругими слоем или полупространством. Силы трения между подошвой фундамента и основанием не учитываются. При этом параметры фундамента в плане определяются так, чтобы среднее давление на основание не превышало расчетного давления.

В качестве оптимизируемых параметров  $x_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  принимаются  $F_a, F'_a$  - площадь продольной арматуры в нижней и верхней зонах, для плит и в радиальном -  $r$  и в окружном -  $\theta$  направлениях  $F_{ar}, F'_{ar}, F_{a\theta}, F'_{a\theta}$ , а также геометрические размеры бетонного сечения. Поперечное армирование определяется по окончании оптимизации из расчета и условий конструирования по СНиП. Так, как его варьирование в процессе оптимизации не приводит к изменению оптимальных значений принятых переменных.

Критерий оптимальности

$$C(\bar{x}) = \min \quad (I)$$

устанавливается в зависимости от цели задачи - определить минимум объема рабочей арматуры  $V_a$  или минимум стоимости  $C_a V_a + C_b V_b$ .



где  $V_{\sigma}$  - объем бетона,  $C_a, C_{\sigma}$  - стоимостные характеристики. Последние в работе определялись с учетом стоимости материалов и затрат по отдельным видам работ (опалубочные, арматурные, транспортировка, укладка и уход за бетоном).

Ограничения типа равенств записываются в виде системы алгебраических нелинейных уравнений -

$$F_i(\bar{x}, \bar{S}) = 0, \quad i = \overline{1, p}, \quad (2)$$

где  $\bar{S}$  - вектор, компоненты которого - перемещения  $S_j$  в  $i$ -узлах.

Уравнения (2) обобщают в вариационно разностной форме условия равновесия и совместности деформаций элементов конструкции дополненные граничными условиями. Фундаменты под дымовые трубы - плиты значительной толщины и подвергаются воздействию резко сосредоточенных нагрузок (рис. 1). При расчете их известными методами (существующие алгоритмы расчета анализируются в главе I) в последние введены поправки для точек приложения сосредоточенных сил и с учетом деформации сдвига изгибаемого элемента.

Ограничения типа неравенств -

$$\varphi_i(\bar{x}) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

обобщают требования двух групп предельных состояний, а также конструктивные требования на предельно допустимые значения параметров. Параллельно с условиями прочности по СНиП  $M \leq M_{пр}$  рассматриваются условия: исчерпание несущей способности для круглых и кольцевых плит наступает тогда, когда радиальные и окружные линии излома смыкаются и разделяют плиту на отдельные части. В работе устанавливается количественная мера их выражений, удобная для вычисления на ЭВМ.

Ограничения типа дискретности -

$$\bar{x} \in X, \quad (4)$$

где  $X$  - счетное множество, образованное значениями геометрии -

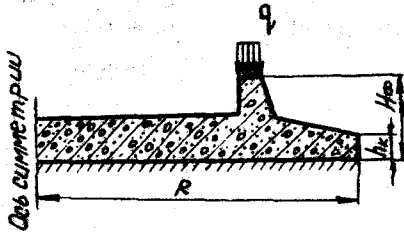


Рис.1. Фундамент под дымоу трубу в виде круглой плиты.

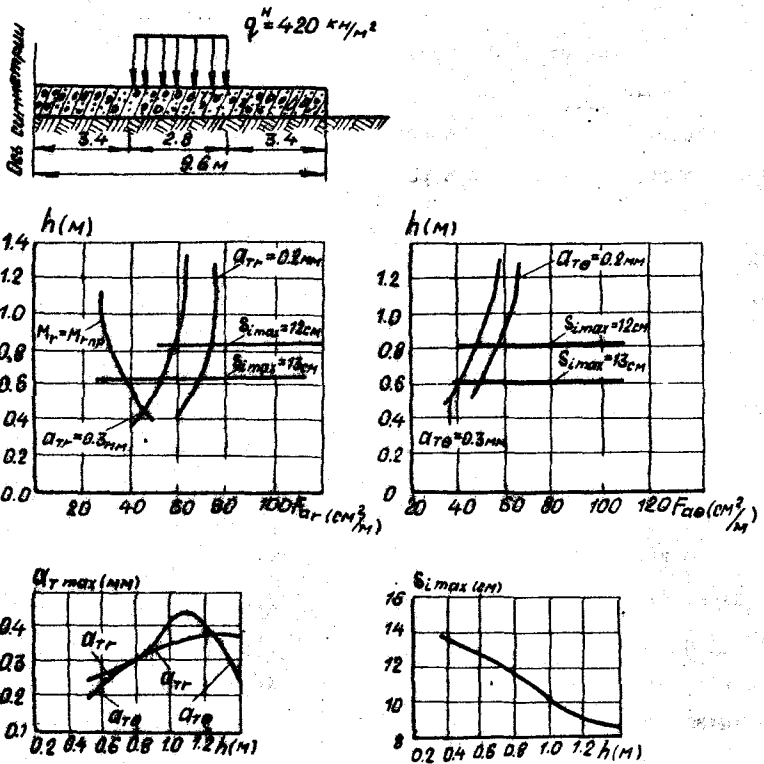


Рис.2. К анализу области возможных состояний - результаты расчетов круглой плиты на упругом основании.

ческих размеров и армирования конструкции согласно модульной системе и сортамента.

Построенная таким образом математическая модель оптимального проектирования фундаментных балок и плит представляет многопараметрическую задачу дискретного программирования.

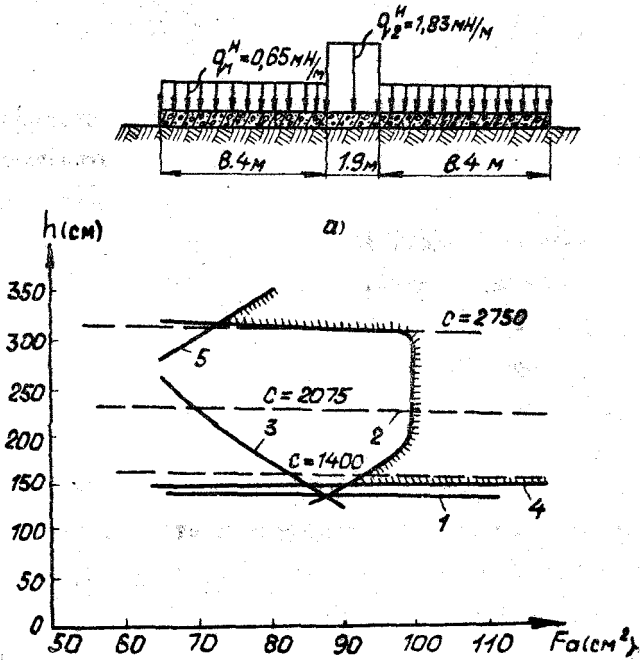
В третьей главе численными методами проводится функциональный анализ задачи (1) - (4). Для балок и плит при числе переменных параметров  $n = 2, 3$  дается геометрическая интерпретация допустимой области решений, строятся линии координатных сечений и изолинии поверхности функций ограничений (3).

Целевая функция (1) и функции ограничений (3) (исследуются в отдельности) - непрерывные функции принятых переменных, последние, сложные неявно выраженные зависимости от принятых параметров, не являются выпуклыми или вогнутыми для всей области определения (рис. 2). Функция ограничения ширины раскрытия трещин  $a_{rr}(\bar{X})$ ,  $a_{r0}(\bar{X})$  не является к тому же монотонной и имеет несколько экстремальных значений (минимумов).

Отмечена склонность допустимой области (рис. 3) к образованию локальных экстремумов с увеличением отношения  $\sigma_a / \sigma_s$ . Из анализа графических картин можно предположить, что задачи оптимального проектирования фундаментных конструкций многоэкстремальны.

Ориентация различных изолиний ограничений позволяют судить о степени чувствительности их к отдельным параметрам и относительно слабом влиянии групп параметров на каждую из функций ограничений (3).

Достоверность предположений, полученных на основе графических картин, подтверждает факторный анализ, с помощью которого получены аналитические выражения функций многих переменных. Для функций, образованных из целевой и каждого из ограничений, отсутствуют критические "овражные" ситуации, приводящие к закликиванию



Для предельных изолиний приняты обозначения:

- 1 - допустимая абсолютная осадка;
- 2 - допустимая ширина раскрытия трещин;
- 3-4 - значения минимальной высоты из условий прочности соответственно по изгибающему моменту и поперечной силе;
- 5 - минимальный процент армирования.

Рис. 3. Графическая интерпретация задачи оптимизации балки на упругом основании.

методов по координатного поиска. Для незначимых линейных эффектов получаются незначимые их групповые взаимодействия.

Одной из особенностей задачи оптимального проектирования фундаментных балок и плит является то, что допустимая область может быть образована возрастающими изолиниями функций ограничений.

Отметим также, что зависимость критериальной величины  $C(\bar{X})$  вблизи минимума имеет пологий характер, линейное или почти линейное изменение. Отсюда параметры дискретного решения получаются близкими к параметрам континуального решения задачи (1)-(3). Вместе с тем следует иметь в виду, что любое округление континуального решения до ближайших конструктивно приемлемых значений (4) не гарантирует получение даже допустимого решения (рис. 2, 3).

На основе полученной информации и выводов в заключении главы предложены рекомендации по выбору метода и построению алгоритмов решения задачи.

В четвертой главе разработан метод оптимального проектирования.

Построение алгоритмов проводится на основе методов безусловной оптимизации с функцией Лагранжа

$$\mathcal{L}^r(\bar{x}) = C(\bar{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^r \varphi_i(\bar{x}) \quad (5)$$

и негладкой функцией штрафа

$$G^r(\bar{x}) = C(\bar{x}) + \sum_{i=1}^m u_i^r H(\varphi_i) \varphi_i(\bar{x}), \quad (6)$$

где  $\lambda_i^r$ ,  $u_i^r$  - неотрицательные множители,  $H(\varphi_i)$  - функция Хевисайда.

Так, метод ОМЛ в том виде, в котором его впервые применил Х.Зверетт, успешно применяется в экономике для решения задач с фиксированными ресурсами на дискретном множестве.

В нашей работе метод ОМЛ характеризуется для решения задач оптимального проектирования. С этой целью выполнено следующее:

Во-первых, получен признак оптимальности в соответствии с целевой задачей проектирования конструкции и обоснована возможность получения решения задачи.

Во-вторых, предложен приемлемый алгоритм поиска, в основу которого положен процесс последовательного наращивания значений параметров решения в соответствии с последовательным увеличением множителей.

Сходимость решения существенным образом зависит от алгоритма изменения множителей, который совместно с алгоритмом минимизации функции (5) образует единый алгоритм слежения за точкой минимума  $\bar{x}^*$ . Для известных алгоритмов пересчета множителей вычислительный процесс применительно к задаче оптимального проектирования сопровождается многократным колебанием  $\Gamma$ -минимумов из допустимой области за ее границу для одних и тех же гиперповерхностей ограничений.

В предлагаемом алгоритме начальные значения параметров  $x_j^0$  и множителей  $\lambda_i^0$  задаются минимально возможными.

Для минимизации функции (5) используется метод локальных вариаций. Для пересчета множителей получена следующая рекуррентная формула:

$$\lambda_i^{r+1} = \begin{cases} \lambda_i^r & , \text{ если } \varphi_i(\bar{x}) \leq 0; \\ \omega \lambda_i^r & , \text{ если } \varphi_i(\bar{x}) > 0, \lambda_i^r > 0; \\ \omega \varepsilon & , \text{ если } \varphi_i(\bar{x}) > 0, \lambda_i^r = 0, \end{cases} \quad (7)$$
$$\omega = \min_{x_j} \left\{ 1 + \left| \frac{\Delta Z^r(\bar{x})}{\sum \lambda_i^r \Delta \varphi_i(\bar{x})} \right| \right\},$$

где  $i$  - индекс присваиваемый всем нарушенным ограничениям (3). В выражении (7)  $\varepsilon \ll 1$ ,  $\lambda_i^r > \varepsilon$ . Вывод коэффициента  $\omega$  в виде (7) связан с реализацией условия  $|x_j^*(\bar{\lambda}^{r+1}) - \bar{x}_j^*(\bar{\lambda}^r)| \leq \rho_j$  выполняющимся почти для всех  $j$ ,  $r$  и  $\rho_j$  (шаг варьирования параметра  $x_j$ ). Таким образом организуется корректирование

движения к экстремуму на основе анализа текущей информации на каждом шаге.

Счет заканчивается при выполнении условий оптимальности, либо после заключения о неэффективности дополнительных затрат машинного времени на улучшение целевой функции. Последнее устанавливается с помощью значений множителей.

Решение на множестве  $X$  отыскивается продолжением минимизации (5) методом покоординатного улучшения и анализируется на основе критерия Эверетта, в котором взамен активных ограничений рассматриваются существенные (определяются из числа ограничений нестрого выполняющихся). Траектория движения к экстремуму состоит из взаимно ортогональных прямолинейных участков. При этом движение вдоль выбранной оси координат продолжается до тех пор, пока абсолютная величина отношения приращений функции (5) к сумме функций нарушенных ограничений  $\sum \lambda_i^r \Delta \varphi_i(\bar{x})$  по этой координате остается меньше других, после чего осуществляется переключение на соответствующую координату  $x_j$ , определяющую минимальное значение  $w$  по формуле (7).

Предусмотрена работа алгоритмов при различных начальных приближениях. Движение вдоль границы допустимой области зигзагообразное. В результате отмечается наименьший минимум или сходимость к одному и тому же решению.

Описанный алгоритм метода ОМЛ позволяет решать задачи с различными дополнительными ограничениями без существенных изменений порядка расчета, решение получается несложно и вычислительный процесс организуется конечным.

Рассматривается организация поиска решения с использованием функции штрафа (6) близкой по виду к функции (5). Для пересчета коэффициентов штрафа получена формула реализующая идею аналогично формуле (7).

С описанными алгоритмами были проведены большие серии расчетов конструкций на жестких опорах и на упругом основании, где  $n = 2, 3$ . В начале решали их графически, а затем исследовали смысл вычислительного процесса. Для алгоритмов с функцией (6) отмечено более целенаправленное движение к границе допустимой области чем с функцией (5), в которой не исключается влияние множителей уже выполненных ограничений. Однако движение вдоль границы, если это не связано с перебором дискретных решений в окрестности континуального экстремума, возможно только на основе функции (5). Функция (6) искусственно, по своему построению, создает овражную ситуацию и часто критическую как для методов по координатному улучшению так и градиентных, для последних из-за некоторой зоны "нечувствительности" вектора движения.

Решены многочисленные задачи, решения которых были известны и получены методами динамического программирования и случайного поиска, отмечается надежная работоспособность алгоритма метода ОМЛ.

Машинные эксперименты дают возможность указать приближенную оценку числа операций потребных для нахождения наиболее экономичного решения  $\sqrt{n} N_1 N_2$ , где  $N_1$  - количество операций при однократном расчете усилий и деформаций конструкции, а  $N_2$  - количество шагов на оптимальном пути  $\bar{x}^* - \bar{x}^0$  с фиксированным шагом  $\rho_j$  по координатам  $x_j$ . Предлагаемый алгоритм метода ОМЛ позволяет получить приближенное решение задачи (I)-(4) при приемлемых затратах машинного времени.

В пятой главе приведены результаты оптимального проектирования фундаментных конструкций, а также результаты некоторых исследований, выполненных для проектных организаций.

Ограничения на конструктивное оформление фундаментов сводятся к следующим:

I. Количество участков одинакового изменения параметров прини-



мается равным по длине балки I...35 и по радиусу плиты I...25 (для каждого участка каждого параметра в отдельности задаются номера граничных узлов).

2. В пределах каждого из участков площадь поперечного сечения продольной арматуры имеет во всех узловых сечениях постоянное значение, а геометрические размеры сечений считаются постоянными либо изменяющимися линейно.

В основной программе разработаны подпрограммы нелинейного расчета балок и осесимметричных плит, вычисления элементов матрицы осадок от единичных сил и ее обращения для оснований в виде слоя или полупространства.

Получены результаты решения задачи I (балки и плиты с заданной геометрией сечения) и задачи II (балки и плиты с переменным по длине или радиусу армированием и сечением), из которых следует:

I. Если параметры сечений балки или плиты необходимо определить так, чтобы не требовалось установки расчетной поперечной арматуры, то оптимальная высота сечений определяется ограничением по поперечной силе и оптимальное проектирование становится, в основном, задачей I по определению минимального расхода арматуры.

2. Учет неупругих деформаций железобетона приводит к значительному изменению "оптимальных" параметров балки или плиты, полученных за счет упрощения расчетной модели - на основе гипотезы линейного деформирования железобетона. В расчетах реальных объектов, в частности, с ограничением высоты сечения ее предельным значением без установки поперечной арматуры, как правило, отмечено уменьшение до 30% расхода арматуры при практически неизменных оптимальных размерах бетонного сечения.

3. Распределение арматуры должно соответствовать напряженно-деформированному состоянию, которое в свою очередь зависит от армирования. При этом влияние количества участков по арматуре не -

значительно сказывается на перераспределении усилий.

4. При проектировании железобетонных фундаментных балок по теориям упругого полупространства и Винклера (при выполнении условий сопоставления) оптимальные решения получаются близкими, если ограничения по осадкам выполняются с запасом. Для таких решений максимальные осадки отличаются значительно. Когда же ограничения по деформациям становятся активными, различия в оптимальных значениях целевой функции увеличиваются.

5. При одновременном поиске оптимальных значений параметров арматуры и бетонного сечения приходится считаться с тем, что эти параметры меняются дискретно и должны быть получены с линейным или ступенчатым законом изменения по длине фундамента. Это вносит существенные коррективы в работу фундамента и должно учитываться в процессе оптимизации.

Разработанная программа позволяет проектировщику производить расчеты при достаточно большом числе участков по длине фундамента. Это дает возможность рационально (технологически приемлемо) назначить границы меньшего числа участков с непрерывным изменением параметров оптимизации. С помощью разработанной программы были подобраны оптимальные параметры арматуры и бетонного сечения фундаментов электрической газоочистки мартеновского цеха ЧМЗ, круглой плиты Костромской ГРЭС и кольцевой плиты Молдавской ГРЭС и др. Вначале были получены решения с распределением параметров по 25 участкам. Это позволило сделать заключение о рациональной конфигурации диаметрального сечения, например, линейном изменении скосов фундаментной плиты дымовой трубы Молдавской ГРЭС для внутреннего и внешнего с тангенсами углов наклона 0,4 и 0,3. Затем фундаменты были запроектированы в других конструктивно приемлемых вариантах, и в частности, со ступенчатой конфигурацией. В приведенных примерах экономия расхода арматуры составляет 30...50% по

сравнению с обычной схемой равномерного армирования. При оптимизации с варьированием бетонного сечения, даже не оптимизируя геометрическую схему фундамента, было получено снижение целевой функции стоимости до 25%.

#### Основные результаты работы

1. Проведен анализ исследований по оптимизации железобетонных конструкций на упругом основании.
2. Поставлена задача и описана математическая модель оптимального проектирования фундаментных балок и плит.
3. Исследованы основные функциональные свойства принятой модели оптимизации.
4. Разработаны алгоритмы решения задачи на основе методов ОМЛ и штрафной негладкой функции, а также реализующие их программы для ЭВМ.
5. Проведен анализ результатов оптимального проектирования фундаментных конструкций, находящих применение в практике строительства.

#### ВЫВОДЫ

1. Существующие математические модели и методы оптимизации фундаментных балок и плит не позволяют в полной мере учесть многочисленные нормативные, конструктивные и технологические требования с учетом особенностей работы железобетонных конструкций на упругом основании. Построенная в работе математическая модель оптимального проектирования фундаментных балок и плит избавлена от этих недостатков - она представляет собой многопараметрическую задачу дискретного программирования.

2. В результате функционального анализа задачи отмечены следующие свойства:

функции цели и ограничений непрерывны; внутри и на границе допустимой области, образованной целевой функцией и каким-либо

ограничением в отдельности, отсутствуют критические "обратные" ситуации для методов прямого поиска; в задаче возможно наличие нескольких локальных решений; окрестность континуального экстремума на заданном дискретном множестве часто не содержит не только оптимального, но и допустимого решения.

3. Предлагаемые алгоритмы, позволяют получать решения больше - размерных задач при приемлемых затратах машинного времени, вычислительный процесс является конечным. Проверка многочисленных решений с использованием геометрической интерпретации допустимой области указывает на надежную работу алгоритмов.

4. Анализ полученных результатов оптимального проектирования фундаментных конструкций показывает:

а) экономия расхода арматуры по сравнению с существующими решениями достигает 50%, а в задаче с переменными параметрами бетонного сечения получено снижение стоимости до 25%;

б) оптимизация на основе упрощенной математической модели с использованием гипотезы о линейной деформируемости железобетона приводит к увеличению расхода рабочей арматуры до 30%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Шишов И.И., Соломин В.И., Климов М.И. Оптимальное армирование круглых и кольцевых фундаментов. - Бетон и железобетон, 1975, № II.

2. Климов М.И., Соломин В.И., Трегулов Г.В., Шишов И.И. Вопросы автоматизации расчетов в оптимальном проектировании больших гибких фундаментов. - Тезисы докладов к УП научной конференции по применению ЭВМ в механике деформируемого тела, ч. I. Ташкент, 1975.

3. Климов М.И., Трегулов Г.В., Шишов И.И. Расчеты и оптимальное проектирование кольцевых железобетонных плит на упругом осно-

вании. - В сб.: Исследование пространственных конструкций. Вып. I: Межвузовский сборник. Свердловск, 1977'.

4. Климов М.И., Трегулов Г.В. К вопросу об оптимальном проектировании железобетонных фундаментов дымовых труб ТЭЦ и ГРЭС. - В сб.: Исследования по бетону и железобетону. Челябинск, 1979, № 193.

5. Климов М.И. Оптимальное проектирование железобетонных гибких фундаментов. - Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Современные методы и алгоритмы расчета и проектирования строительных конструкций с использованием ЭВМ", ч. II. Таллин, 1979.