

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

ШАУЧОВЕНАС Гинтас Ляонович



ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
СТЕРЖНЕВЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИИ

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции,  
здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1993

№ 28933

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре металлических и деревянных конструкций Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
доцент В. А. ПЕРМИКОВ

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
ст. научный сотрудник  
В. В. ГАЙДАЙЧУК

кандидат технических наук,  
доцент, член-корр. ИАН  
И. Н. ЛЕБЕДИЧ

Ведущая организация - КиевЗНИИЭП

Защита диссертации состоится " 21 " сентября 1994 г.  
в 13 часов на заседании специализированного совета К 068.05.04 в  
Киевском государственном техническом университете строительства и  
архитектуры по адресу 252037, Воздухофлотский проспект, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета  
Автореферат разослан " 1 " декабря 1993 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00802853 (Q)

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук

Д. Л. ДИНКЕВИЧ

ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальность темы. Стремление к уменьшению материалоемкости и трудоемкости пространственных стержневых конструкций привело к созданию разнообразных конструктивных схем и различных решений узловых сопряжений элементов. Кроме того, для достижения наилучшего распределения внутренних усилий в системе чаще всего использовалось предварительное напряжение гибкими затяжками или регулированием уровня опорных закреплений, что в свою очередь способствовало поиску методов расчета предполагающих объективный выбор наилучшего решения из множества пробных вариантов.

Непрерывно возрастающие мощности и быстродействие ЭВМ, развитие методов прямого проектирования статически неопределимых систем повлияло на применение методов математического программирования для решения практических инженерных задач. Однако большинство работ по оптимальному проектированию с широким спектром назначаемых переменных проектирования и различными критериями качества (вплоть до приведенных затрат) посвящено, исследованию плоских конструкций. Во многих работах, связанных с оптимальным проектированием пространственных стержневых конструкций, затрагивается только вопрос минимизация веса конструкции или максимальной несущей способности при переменных проектирования таких как, усилия предварительного напряжения и площади поперечных сечений элементов. Практически не используется обобщенный критерий оптимальности - приведенные затраты, а в качестве переменных - геометрические параметры конструкции. Поэтому разработка методики и вычислительного комплекса, позволяющего исследовать влияние различных критериев качества и условий проектирования на оптимальные геометрические параметры пространственных стержневых систем, является актуальной задачей.

Целью реферируемой работы является разработка универсального метода оптимального проектирования пространственных стержневых стальных конструкций, обеспечивающего достижение минимума принятого критерия качества при заданных ограничениях.

Для достижения указанной цели рассматривались следующие задачи:

- разработать алгоритм и комплекс программ для оптимального проектирования пространственных стержневых конструкций на многие

загружения с учетом возможности варьирования геометрическими параметрами:

- провести численные исследования пространственных стержневых покрытий и выявить закономерность изменения их оптимальных геометрических схем в зависимости от условий проектирования;

- на примерах оптимального проектирования показать эффективность разработанного метода.

Научная новизна. В диссертации разработана методика расчета пространственных стержневых конструкций позволяющая определить оптимальные геометрические параметры и распределение внутренних усилий в системе при условии оптимизации принятого критерия качества решения. Выполнены численные исследования оптимальных геометрических параметров пространственных стержневых покрытий и показано влияние различных факторов (критерия качества, расчетного сопротивления, формы сечений) на экономические и геометрические параметры конструкции.

Практическая ценность. Приведенная в работе методика позволяет применять принципы оптимального проектирования при решении широкого круга инженерных задач. Разработанный комплекс программ "ПОИСК-2" может быть применен на практике при оптимальном проектировании как плоскостных, так и пространственных стержневых стальных конструкций с использованием обобщенного критерия качества - приведенных затрат при учете ограничений, соответствующих требованиям СНиП 11-23-81\* на прочность, устойчивость, жесткость и ряда конструктивных ограничений, обеспечивающих выполнение архитектурных и технологических требований.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались на 53 и 54 научно-технических конференциях Киевского инженерно-строительного института и на 5-ой Украинской республиканской научно-технической конференции по металлическим конструкциям "Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле" (Киев 1992 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 3 работы.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы и приложения. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста. Рисунков - 18, таблиц -

16. Список литературы содержит 139 наименований на 13 страницах и приложение - I страница.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен краткий обзор конструктивных решений пространственных стержневых плит, куполов, сводов, оболочек и некоторых индивидуальных решений. Рассмотрены направления их совершенствования. Главным образом создание более экономичных и технологичных конструкций велось путем применения различных типов сечений элементов и узловых сопряжений, рассмотрением вопроса степени участия настила в работе перекрытия и применения предварительного напряжения. Несмотря на ряд преимуществ и оригинальность конструктивных решений большинство пространственных конструкций требует дальнейшего исследования для уточнения их оптимальных параметров. Геометрические параметры серийно изготавливаемых решетчатых плит покрытий (структур) весьма близки к оптимальным, хотя как и остальные системы перекрытий они проектировались без определения технико-экономических показателей. В крайнем случае применялся метод сравнения вариантов, не обеспечивающий достаточной точности, а поскольку эффективность применения конструкции в каждом конкретном случае определяется по этим показателям, то некоторых - выбор той или другой может быть неэкономичным.

Современный этап развития теории оптимального проектирования отличается широким использованием вычислительной техники, достижений математики и механики. Значительную роль в этом направлении играют работы Е. Н. ГЕРАСИМОВА, В. Н. ГОРДЕЕВА, А. В. ГЕММЕРЛИНГА, Я. И. ОЛЬКОВА, В. А. ПЕРМЯКОВА, Б. А. СПЕРАНСКОГО, В. В. ТРОФИМОВИЧА, И. С. ХОЛОПОВА, А. А. ЧИРАСА, В. Н. ШИМАНОВСКОГО, Л. ПИИДТА и других авторов, формулировка основных задач оптимального проектирования в которых имеет практически одинаковую структуру и определенную область допустимых решений, удовлетворяющую условия надежной эксплуатации в виде условий равновесия и неразрывности деформаций, конструктивных и технологических требований предъявляемых к конструкциям. Различия заключаются в назначении переменных, запись целевой функции и ограничений в зависимости от принятых переменных и применяемых методов решения.

Проведенный анализ работ И. Н. КАЛИНИНА, И. В. МОЛЕВА, К. К. МУ-

ХОНОВА, Б. А. ПУШКИНА, А. И. РОМАНОВСКОГО, С. И. ЯКУНЕНКО и др. посвященных оптимальному проектированию пространственных стержневых металлических конструкций показывает, что большинство подходов реализовано для расчета какой-то одной конкретной системы с тщательным учетом специфических особенностей исследуемой конструкции. Весьма разнообразны и применяемые авторами методы оптимизации, которые в свою очередь сказываются на условия проектирования. Приемы линеаризации условий проектирования нелинейных задач, использование приближенных зависимостей отражаются на получаемых результатах, затрудняют задачу исследования оптимальных геометрических параметров конструкции, особенно с применением критерия качества - приведенных затрат.

Более общий подход оптимального проектирования пространственных стержневых покрытий (структур, куполов, оболочек) предложен и развит в работах В. Н. ГОРДЕЕВА, М. Л. ГРИНБЕРГА, В. Н. ШИМАНОВСКОГО с практической его реализацией с системе САПР-ЦИИИСК, позволяющий применять обобщенный критерий качества и назначать переменными размерами ячеек поясных сеток, варьировать числом панелей, высотой конструкции и др.

В. А. ПЕРМЯКОВЫМ сформулированная обобщенная задача оптимального проектирования стержневых систем и на основе этого подхода разработанный пакет прикладных программ (ППП) "ПОИСК-1" отличается универсальностью применения для проектирования широкого круга конструкций, используя при этом различные критерии оптимальности (вплоть до приведенных затрат) и возможность назначения переменными проектирования не только площадей поперечных сечений элементов, усилий предварительного напряжения, но и координаты узлов конструкции, что позволяет определить оптимальные геометрические параметры. Применяемый в качестве оптимизатора метод неортогонального проектирования градиента отличается от традиционных градиентных методов ускоренной сходимостью к точке относительного минимума, пошаговым восстановлением нарушенных связей, возможностью анализа чувствительности ограничений к варьируемым параметрам, высокой точностью соблюдения ограничений неравенств, простотой формирования активных ограничений.

Модульность построения ППП "ПОИСК-1" позволяет использовать отдельные блоки для решения самостоятельных задач, а также при необходимости дополнять или заменять новыми блоками. Такая струк-

тура, в принципе, позволяет некоторые компоненты использовать для разработки комплекса прикладных программ (КПП) "ПОИСК-2" предназначенного для проектирования пространственных стержневых систем.

На основе анализа работ сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе в рамках решения обобщенной задачи (по своей формулировке охватывающей все возможные в практике случаи) сформулирована задача оптимального проектирования пространственных стержневых стальных конструкций: при заданных очертаниях осей конструктивной формы, типе конструкции, условиях опорных закреплений и сопряжений элементов между собой, типах применяемых сечений, внешних нагрузках - найти искомые параметры при сохранении требований проектирования привычных конструктору, т.е. не меняя математическую запись условий приведенных в СНиП 11-23-81<sup>2</sup>. Неизвестными представленной задачи являются координаты узлов, площади поперечных сечений элементов, усилия преднапряжения. В результате задача принимает вид задачи нелинейного программирования и является многопараметрической с детерминированной целевой функцией, выражающей один из технико-экономических показателей.

Решение задачи распространяется на конструкции, работа которых соответствует требованиям норм проектирования и удовлетворяет принятым предпосылкам. Основные принятые в работе теоретические предпосылки:

- система является линейно-деформируемой;
- нагрузки являются статическими;
- стержни имеют постоянное по длине сечение и прямолинейны;
- материал работает в пределах упругости (за исключением оговоренных нормами проектирования случаев - при проектировании сооружений, состоящих из отдельных самостоятельно работающих элементов как, например, балочная клетка или связевой каркас здания, в отдельных элементах которых можно допустить развитие ограниченных пластических деформаций);

Таким образом, составленная математическая модель задачи сводится к определению вектора переменных проектирования  $\mathbf{b}$  с  $n$  минимизирующей функцию качества

$$I = I(\mathbf{x}, \mathbf{b}) \quad (I)$$

при наличии ограничений:

по прочности (нормальные напряжения)

$$A_{1R} \gamma_0 / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (2)$$

$$W_{1R} \gamma_0 / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (3)$$

$$R_{y\gamma_0} / (N_{1j}^x / I_1^x + N_{1j}^y / I_1^y) - 1.0 \geq 0, \quad (4)$$

$$R_{y\gamma_0} / (N_{1j} / A_1 + N_{1j}^x / I_1^x + N_{1j}^y / I_1^y) - 1.0 \geq 0, \quad (5)$$

$$1.0 - (N_{1j} / A_{1R} \gamma_0)^n - N_{1j}^x / c W_{1j}^x - N_{1j}^y / c W_{1j}^y - 1.0 \geq 0, \quad (6)$$

$$R_{y\gamma_0} / (N_{1j}^x / c W_{1j}^x + N_{1j}^y / c W_{1j}^y) - 1.0 \geq 0, \quad (7)$$

$$i=1, NE; j=1, NLC;$$

по прочности (касательные напряжения)

$$0.58 R_{y\gamma_0} I_1^x / Q_{1j}^y S_{1j}^x - 1.0 \geq 0, \quad (8)$$

$$1.16 R_{y\gamma_0} I_1^y / Q_{1j}^x h_{1j} b_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (9)$$

$$0.58 R_{y\gamma_0} h_{1j} t_{1j} / Q_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (10)$$

$$i=1, NE; j=1, NLC;$$

устойчивости при центральном сжатии, в плоскости и из плоскости действия момента при внецентренном сжатии, изгибе в одной или двух плоскостях

$$\Phi_{1A} R_{y\gamma_0} / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (11)$$

$$\Phi_{s1A} R_{y\gamma_0} / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (12)$$

$$c \Phi_{y1} R_{y\gamma_0} / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (13)$$

$$\Phi_{exy1} R_{y\gamma_0} / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (14)$$

$$\Phi_{b1A} R_{y\gamma_0} / N_{1j} - 1.0 \geq 0, \quad (15)$$

$$R_{y\gamma_0} / (N_{1j}^x / \Phi_{b1} W_{1j}^x + N_{1j}^y / W_{1j}^y) - 1.0 \geq 0, \quad (16)$$

$$i=1, NE; j=1, NLC;$$

предельной гибкости элементов

$$\lambda_u / \lambda_1 - 1.0 \geq 0, \quad i=1, NE; \quad (17)$$

перемещений узлов конструкции

$$\Delta_{\max}^{ij} / \Delta_{xyz} - 1.0 \geq 0, \quad (18)$$

$$i=1, NJ; j=1, NLC;$$

пределы изменения переменных

$$x_1^{\min} \leq x_1 \leq x_1^{\max}, \quad i=1, n, \quad (19)$$

конструктивные ограничения

$$\psi(b) \geq 0. \quad (20)$$

где:  $b$  - вектор переменных проектирования;  $z$  - вектор переменных состояния;  $\lambda_u, \lambda_1$  - соответственно предельная и фактическая максимальная гибкость стержня;  $\Delta_{\max}, \Delta_{xyz}$  - максимально допустимое значение перемещения узла конструкции и перемещение узла относительно осей  $x, y, z$  или в пространстве  $oxyz$ ;  $c, c_x, c_y$  - коэффициенты

для расчета на прочность с учетом развития пластических деформаций при изгибе относительно осей  $x-x$ ,  $y-y$ ;  $\phi_1$  - коэффициент продольного изгиба;  $\phi_a$  - коэффициент снижения расчетных сопротивлений при внецентренном сжатии;  $\phi_b$  - коэффициент снижения расчетных сопротивлений при изгибно-крутильной форме потери устойчивости изгибаемых элементов.

Целевая функция формируется на основе выражений теоретической массы конструкции, исходя из объема материала системы:

$$V = \sum A_i l_i \quad (21)$$

$$M_s = V \rho \quad (22)$$

где  $A_i$  - площадь поперечного сечения стержня;  $l_i$  - длина элемента конструкции, определяемая по координатам начального и конечного узлов.

Переход к фактической характеристике массы осуществляется умножением теоретической массы на конструктивный коэффициент, учитывающий расход материала на вспомогательные детали соединения основных элементов системы, численное значение которого может быть определено по методике Н. С. СТРЕЛЕЦКОГО.

В общем случае экономическая оценка качества проекта представлена в виде приведенных затрат, поскольку содержание различных слагаемых выражения обобщенного критерия позволяет выбирать более простые критерии оптимальности.

$$Z = C + 0.01(N_{вос} + N_{кр} + N_{тр})C + E_n C + 0.1(C_{от} + C_{ввн}) Ph \quad (23)$$

$$C = C_n + C_u + C_s + C_p + C_{st} L_h \quad (24)$$

где  $C$  - стоимость конструкции, установленной в проектное положение;  $C_n, C_u, C_s, C_p, C_{st}$  - соответственно удельные стоимости основных материалов, материала изготовления и монтажа узловых соединений и стержней конструкции, кровли, включая подвесной потолок, и стенового ограждения;  $n$  - масса конструкции;  $u, s$  - количество узлов и стержней;  $p$  - площадь покрытия;  $L, h$  - соответственно пролет и высота конструкции на опоре;  $N_{вос}, N_{кр}, N_{тр}$  - нормы отчислений на восстановление, капитальный и текущий ремонт конструкции;  $E_n$  - коэффициент эффективности капитальных вложений в строительстве;  $C_{от}, C_{ввн}$  - удельный норматив на отопление и вентиляцию.

Дискретность сортаментных величин, входящих в выражение (2) - (20), практически исключает возможность применения градиентных методов для решения поставленной задачи. Поэтому, в работе применен подход определения необходимых параметров сечений, исходя из удельных радиусов и коэффициентов эффективности, подсчитанных для различных их типов:

$$\rho_x = t_x / \sqrt{A}, \quad \rho_y = t_y / \sqrt{A}, \quad (25)$$

$$\bar{c}_x = t_x^2 / h^2, \quad \bar{c}_y = t_y^2 / b^2. \quad (26)$$

По значениям определенным по формулам (25)-(26), типу используемого сечения и фактическому значению площади поперечного сечения элемента вычисляются характеристики необходимые для статического анализа и формирования ограничений:

$$\begin{aligned} t_x &= \rho_x \sqrt{A}, \\ h &= t_y / \sqrt{\bar{c}_x}, \\ I_x &= t_x^2 A = \rho_x^2 A^2, \\ W_x &= 2I_x / h = 2A^{3/2} \rho_x \sqrt{\bar{c}_x}, \\ t_y &= \rho_y \sqrt{A}, \\ b &= t_y / \sqrt{\bar{c}_y}, \\ I_y &= t_y^2 A = \rho_y^2 A^2, \\ W_y &= 2I_y / h = 2A^{3/2} \rho_y \sqrt{\bar{c}_y}. \end{aligned} \quad (27)$$

Нормативные параметры (коэффициенты и табличные значения) определяются согласно требованиям норм проектирования, не прибегая к их аппроксимации, поскольку это приводит к сужению области применения полученных зависимостей.

Коэффициент расчетной длины  $\mu$  для элементов структурных конструкций (раскосов, разрезных поясов) выполненных из одиночных уголков, прикрепленных в узлах одной полкой сварными швами, вычисляется по формуле полученной аналитическим путем из графика "Пособия по проектированию стальных конструкций (к СНиП 11-23-81<sup>\*</sup>)" в зависимости от фактической гибкости стержня:

$$\mu = 0.7 + 2.07 \cdot 10^{-5} (\lambda_0 - 200)^2 \quad (28)$$

Предложенная формула по отношению к значениям графика дает погрешность не более 2%.

Алгоритм решения задачи оптимального проектирования пространственных стержневых конструкций методом неортогонального проектирования градиента построен итерационно. На каждом шаге цикла перерасчета  $b^{(k)}$  ограничения имеющие вид равенств (активные ограничения), линеаризуются и временно заменяются касательными к ним в точке  $b^{(k)}$  гиперплоскостями. Поскольку, алгоритм проекции градиента использует линеаризацию уравнений состояния и ограничений, то новый построенный проект  $b^{(k+1)}$  будет удовлетворять ограничениям с некоторой невязкой  $r$ , где  $r$  - вектор невязок в активных ограничениях. Оптимальные корректирующие поправки  $\delta b_R$ , восстанавливающие ограничения, определяются из условия минимума нормы нарушенного вектора  $\delta b_R$ , то есть  $\|\delta b_R\|_{\min}$  при условии  $\nabla q \delta b_R = -r$ . Решая задачу минимизации с помощью функции Лагранжа, получаем  $\delta b_R = -\nabla q^T (\nabla q \nabla q^T)^{-1} r$ . Невязка в активных ограничениях учитывается при построении проектирующего оператора на следующем шаге спуска. При этом антиградиент целевой функции  $-\nabla f(b)$  проектируется не на касательную гиперплоскость, а на близкую к ней, т.е. проекция становится неортогональной и новое направление поиска определяется:

$$p^{(k+1)} = \nabla f(b) - \nabla q^T (\nabla q \nabla q^T)^{-1} (\nabla q \nabla f(b^{(k)}) - r).$$

Стратегия проектирования сводится к последовательности циклов по определению статического поведения конструкции на внешние воздействия в форме МКЭ и имеет вид:

$$K(x)Z - P(x) = 0 \quad (29)$$

где  $K(x)$  - положительно определенная матрица жесткости системы  $P(x)$  - вектор внешних нагрузок;  $Z$  - вектор узловых перемещений. Во время каждого цикла определенные значения переменных становятся начальным состоянием следующего цикла. Расчет при этом повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная сходимость на двух смежных циклах или переполнена матрица чувствительности.

Во избежание плохо обусловленных матриц чувствительности, в процессе решения оптимизационной задачи, переменные проектирования приводятся к единому масштабу, т.е. к единому порядку числа, независимо от абсолютных их величин и размерностей, а ограничения нормируются на предельные значения путем придания им вида  $x_i - 1.0 \geq 0$ , где  $x_i$  - отклик системы.

Описанный алгоритм реализован в виде КПП "ПОИСК-2" с исполь-

зованием ПЭВМ типа IBM 266-PC/AT на языках программирования FORTRAN и Turbo Pascal.

В КПП "ПОИСК-2" можно выделить четыре основных части: блок анализа (вычисления значений переменных поведения конструкций); блок оптимизации; процессор связи (обеспечивающий передачу необходимых данных из одного блока в другой) и вспомогательный блок (ввода - вывода данных).

Блок анализа предназначен для статического расчета конструкции и анализа напряженно-деформированного состояния элементов системы, т. е. по полученным внутренним усилиям и перемещениям производится автоматическое формирование системы ограничений.

Назначение блока оптимизации состоит в определении вектора переменных проектирования, основываясь на значениях целевой функции и ограничений, а также их градиентов.

Удобство работы с пакетом обеспечивает вспомогательный блок, в котором реализована возможность введения исходных данных в интерактивном режиме и проведение расчета в диалоговой форме, а также графического представления на экране монитора схемы конструкции для контроля исходных данных и просмотра результирующей схемы.

Совершенствование представленного алгоритма возможно благодаря модульной его структуре, путем расширения библиотеки модулей.

Далее приводится описание особенностей работы с программным комплексом и порядок подготовки исходных данных.

В настоящей главе представлены результаты решений нескольких широко известных тестовых задач (трехстержневая ферма, десятиэлементная консольная ферма и 25-элементная трансляционная башня) полученных с использованием КПП "ПОИСК-2". Согласование найденных решений с результатами полученными другими авторами, использующими разные методы оптимизации, подтверждает эффективность данного алгоритма.

В третьей главе исследовалось влияние условий проектирования (выбора расчетного сопротивления стали, критерия качества, унификации элементов, типов сечений, изменения списка активных ограничений) на оптимальные параметры геометрических схем пространственных покрытий.

В первом случае рассматривалась шарнирно-стержневая система

(структура)  $9 \times 9$  м, размерами ячеек  $3 \times 3$  м и высотой 1.5 м с опиранием в угловых точках и нагруженная сосредоточенными узловыми нагрузками.

Задачи решались с одной и той же исходной точки при ограничениях по прочности, устойчивости, гибкости стержней и предельному прогибу системы. В качестве варьируемых параметров принимались площади поперечных сечений элементов, высота конструкции и размеры ячеек - путем назначения переменными проектирования соответствующих координат узлов верхнего пояса структуры.

Сравнение полученных результатов исследований структурного покрытия показали, что использование сталей с более высоким расчетным сопротивлением позволило снизить материалоемкость конструкции как за счет изменения высоты, так и из-за изменения размеров ячеек.

В случае применения более эффективных, но и более дорогих трубчатых сечений, вместо одиночных уголков и двутавров, в следствии изменения расположения верхних поясов, получена значительная экономия материала при практически одинаковой высоте покрытия. Приведенные затраты для конструкции из труб увеличились.

Ужесточение требований по предельному прогибу конструкции повлияло на изменения списка активных ограничений по сравнению с задачей при нормативном значении перемещения и тем самым привело к резкому увеличению в 1.4 раза высоты покрытия, массы конструкции - в 1.7 раза и приведенных затрат.

При отступлении от жесткой унификации элементов, т.е. при наращивании количества переменных площадей поперечных сечений, получено более рациональное использование несущей способности конструкции и оптимальное распределение материала, что положительно сказалось на экономических показателях конструкции.

Использование в качестве критерия оптимальности приведенных затрат для определения влияния стоимости энергетических ресурсов и отражающих конструкций на оптимальные параметры, привело к незначительному увеличению массы конструкции, но способствовало уменьшению высоты покрытия на 8...10% по сравнению с задачами минимизации массы. Приведенные затраты при этом снизились на 3...4%.

Соблюдение всех нормативных требований проектирования не всегда способствует достижению желаемого результата. Отказ же от некоторых из них приводит к наилучшим решениям по сравнению с

традиционными. Так, например, в задаче в систему ограничений которой не входили требования обеспечения предельной гибкости для некоторых из групп стержней, получено оптимальное ее решение путем исключения из системы элементов, значение площади которых стремились к нулю. Выбрасывание неработающих стержней производилось при соблюдении геометрической неизменяемости конструкции. Найденное решение явилось самым выгодным из всех рассмотренных.

Во втором случае исследовалось влияние применяемых подходов проектирования на оптимальные параметры разрезной балочной клетки размерами 5,2×3 м.

При оптимизации перекрытия накладывались ограничения по прочности и перемещениям узлов. Ограничения по прочности в опорных узлах главных и второстепенных балок записывались для касательных напряжений соответственно формулам 8 и 10. Кроме того для второстепенных балок ограничения по прочности в середине пролета накладывались для нормальных напряжений (формула 7) с учетом развития пластических деформаций.

Определение минимума массы конструкции проводилась в двух вариантах. В первом - процесс оптимизации разбивался на два этапа (1-й поиск оптимальной расстановки второстепенных балок; 2-й определение значений поперечных сечений при фиксированной схеме перекрытия, полученной на первом этапе). Во втором варианте применялся комплексный подход.

При поэтапной оптимизации масса конструкции составила 0,889 тонн, а второстепенные балки были раздвинуты на одинаковые друг от друга расстояния.

В результате применения комплексного подхода оси двух смежных балок сблизились на величину, практически равную ширине полки двутаврового сечения, что и послужило критерием остановки задачи, при массе конструкции равной 0,823 т. Продолжение решения задачи после замены двух совмещенных балок одной но уже с фиксированной геометрической схемой привело к увеличению массы оптимального перекрытия до 0,834 т, что на 1,25% больше, чем в оптимальном решении при большем количестве балок.

Далее представлены результаты оптимального проектирования неразрезной балочной клетки размерами 18×4 м с двумя промежуточными опорами. Целью исследований являлось определения оптимальной расстановки промежуточных опор. Для данной конструкции более вы-

годным путем оказалась повстанная оптимизация при полученной массе 9.785 т. тогда как, при комплексном подходе масса составила в.803 т.

В четвертой главе представлены примеры, иллюстрирующие роль КПШ "ПОИСК-2" в качестве средства для решения практических задач. Целью численных исследований являлась проверка эффективности проектных решений, полученных с использованием разработанного метода оптимального проектирования.

Исследована конструкция разработанная в Екатеринбургском архитектурном институте, в виде пространственной пирамиды из круглых труб. Конструкция составлена из двух наклонных ферм, объединенных вершинами в коньке и образующих пространственную систему, нижние пояса которой соединены горизонтальными распорками.

Конструкция рассчитывалась на три нагружения, в состав которых включался собственный вес и снеговая нагрузка. Учитывая симметричность конструкции, переменные проектирования (площади сечений и координаты узлов) объединялись в несколько групп. За целевую функцию принималась масса конструкции. Процесс оптимизация начинался с проекта, параметры которого соответствовали значениям проекта-аналога (размеры в плане 70x9 м и высота 17.0 м). Во время оптимизационного процесса на всех итерациях реализовывались допустимые проекты, причем в точке оптимума расход стали на конструкцию составил 90.8 кг/м<sup>2</sup>. Полученное значение на 16% меньше по сравнению с проектом-аналогом, удельная материалоемкость которого равна 107.1 кг/м<sup>2</sup>. Оптимальному проекту соответствовала высота конструкции равная 15.2 м.

В качестве другого объекта исследования была принята нижняя часть ствола опоры высоковольтной линии УЗ30-2+9 Донецкого завода высоковольтных опор (ДЗВО), выполненной из одиночных равнобоких уголков. Минимизация массы производилась при конструктивных решениях принятых по проектной документации ДЗВО. Конструкция рассчитывалась на три нагружения отражающие условия нормальной эксплуатации, а также учитывающие аварийный режим работы опоры. Переменными проектирования назначались площади поперечных сечений элементов (сгруппированы согласно принятой в типовом проекте унификации) и координаты узлов крепления стержней решетки к поясам. За исходный был принят типовый проект нижней части опоры ствола.

Решение задачи оптимизации привело к снижению массм

конструкции с IO. IO4 т. до 9. I85 т., что составило 9% экономии материала.

Полученные результаты были внедрены на заводе ДЗВО при совершенствовании конструкции опоры.

#### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика оптимального проектирования пространственных стержневых конструкций различного функционального назначения с варьируемыми геометрическими параметрами. Методика предусматривает нелинейный характер целевой функции (приведенные затраты) и ограничений, соответствующих требованиям нормативных документов.
2. Математическая модель задачи включает в себя практически все ограничения, учитывающие условия нормальной эксплуатации элементов и конструкции в целом, что позволяет применять ее для исследования любой стержневой системы.
3. Разработан алгоритм определения рационального распределения внутренних усилий в стержнях системы за счет изменения значений площадей поперечных сечений элементов и геометрии конструкции. Постановка задачи основана на определении статического поведения конструкции методом конечных элементов и проведения оптимизации методом неортогонального проектирования градиента.
4. Разработан комплекс прикладных программ "ПОИСК-2" для оптимального проектирования пространственных стержневых стальных конструкций, нагруженных статическими нагрузками. Вычислительный комплекс отличается гибкостью применительно к типу рассматриваемой конструкции, выбору критерия качества, а также возможностью определения значений площадей поперечных сечений элементов и топологии конструкции как комплексно, так и раздельно. Модульность построения пакета позволяет совершенствовать его путем включения новых модулей, учитывающих те или иные условия проектирования, отражающие действительную работу конкретной конструкции.
5. В результате численного исследования различных конструкций покрытий выявлено существенное влияние выбранного критерия качества, расчетного сопротивления стали, унификации эле-

ментов и активности тех или иных ограничений на оптимальное решение. Таким образом, оптимальные геометрические параметры системы должны определяться исходя из конкретных конструктивных, технологических и эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкции.

6. Разработанная методика и комплекс программ позволяет выявить резервы конструкции и значительно уменьшить материалоемкость при проектировании различных систем, что и показано на примерах реального проектирования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пермяков В. А., Шаучивенас Г. Л. Оптимальное проектирование пространственных стержневых конструкций // Пром. стро-во и инж. сооружений. - 1992. - № 1. - с. 38.

2. Шаучивенас Г. Л. Оптимальное проектирование 25-элементной трансляционной башни // Тезисы докладов 53-й научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов. - К.: КИСИ, 1992. - с. 63.

3. Шаучивенас Г. Л. Оптимальное проектирование пространственных стержневых конструкций // Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле: Тезисы докладов в Украинской научно-технической конференции по металлическим конструкциям. - К.: 1992. - с. 80

Подп. к печ. 15.11.93

Формат 60×84<sup>1/16</sup>.

Бумага тип. № 3. Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 2,93

Услови. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100. Зак. № 6446. Бесплатно.

Фирма «ВИПОЛ»

252151, г. Киев, ул. Волыная, 60.



464385

Бесплатно.

AB.28933  
**AV 28.933**