

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

РЕМЕННІКОВ Олександр Михайлович

УДК 624.014.03

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ТА ГЕОМЕТРІЇ  
СТЕРЖНЕВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Спеціальність 06.23.01 - Будівельні конструкції,  
будівлі та споруди

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 1992

Робота виконана на кафедрі металевих та дерев'яних  
конструкцій Київського інженерно-будівельного інституту.

Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
доцент В.О.ПЕРМЯКОВ

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,  
професор В.М.ГОРДЕЄВ

кандидат технічних наук,  
В.П.ФУРСА

Ведуча організація - Київський Зональний науково-дослідний  
інститут експериментального проекту-  
вання (КиївЗНДІЕП)

Захист відбудеться 18 12 1992 р. о 13 годині на  
засіданні спеціалізованої ради К 068.05.04 Київського інженерно-  
будівельного інституту за адресою 252037, м.Київ, Повітрофлотський  
проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано 16 11 1992 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
канд. техн. наук, доцент

Г.І.МЕЛЬНИЧЕНКО

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН УРСР

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00814394 (Т)

Актуальність теми. Для підвищення техніко-економічної ефективності наукових досліджень та проектних робіт важливим напрямом є застосування в проектній практиці розробленої загальної методології оптимального проектування, що дає змогу уникнути перевитрат матеріалу.

Відомо, що при високому рівні застосування ЕОМ для статичних розрахунків (до 95%) лише 26% проектних робіт автоматизовані. Методи оптимального проектування конструкцій недостатньо впроваджуються в проектній практиці. Існуючі програми оптимізації застосовуються, головним чином, при типовому проектуванні, що призводить до економії маси та вартості конструкцій на 10-12%. При проектуванні унікальних систем методи оптимізації практично не використовуються. Тому розробка універсальних обчислювальних комплексів оптимізації, що дозволяють визначити оптимальні параметри не лише конструкцій масового призначення, але й більш складних систем, дасть змогу широкого використання методів оптимізації в практиці проектування і є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка універсального алгоритму та програмного забезпечення для визначення оптимальних параметрів сталевих стержневих конструкцій.

Задачі дослідження:

- розробити універсальний алгоритм оптимального проектування плоских сталевих стержневих конструкцій на основі методів нелінійної оптимізації та МКЕ;
- розробити пакет прикладних програм ПОИСК-І, що дає змогу знаходити оптимальні за визначеним критерієм поперечні перерізи елементів, геометричну схему та топологію сталевих стержневих конструкцій, в тому числі попередньо напружених;
- дослідити особливості формування оптимальних геометричних схем сталевих стержневих конструкцій та проаналізувати вплив на них різноманітних факторів;
- оцінити економічну ефективність реальних проектних рішень, що одержані за допомогою розробленого підходу.

Наукова новина полягає в наступному:

- розроблена універсальна методика, алгоритм та програма оптимального проектування сталевих стержневих конструкцій, в тому числі попередньо напружених;
- вперше виконано аналіз впливу різноманітних факторів проек-

тування на оптимальні геометричні параметри сталевих стержневих конструкцій.

Вірогідність та обґрунтування наукових результатів, висновків та рекомендацій, що сформульовані в дисертації, обумовлені чисельними та аналітичними дослідженнями із застосуванням опробованих гіпотез будівельної механіки, а також порівняльним аналізом одержаних результатів з аналогічними результатами інших авторів.

Практичне значення роботи та впровадження результатів. Розроблено універсальний алгоритм та програмне забезпечення, що дозволяє визначити оптимальні параметри сталевих стержневих конструкцій за обраним критерієм оптимальності.

Розроблено програмне забезпечення та результати оптимізації конструкції покриття використані Інститутом УкрНДІпроектстальконструкції (м.Київ) в проєкті будівлі теплої стоянки будівельних машин (м.Симферополь). Окремі результати використані в навчальному процесі.

Апробація роботи. Основні положення дисертації викладені та ухвалені на 50,51 та 52 науково-технічних конференціях Київського Інженерно-будівельного інституту, на IV та V Республіканських конференціях з металевих конструкцій (м.Симферополь,1988р. та м.Київ, 1992р.), на всесоюзній конференції "Вопросы надежности и оптимизации в строительной механике" (м.Вильнюс,1988р.), на I та II науково-технічних конференціях "Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций, машин и механизмов" (м.Севастополь,1989 р., 1991р.), на Шостому Національному конгресі з теоретичної та прикладної механіки (м.Варна,Болгарія,1989р.), на міжнародній конференції "Сварные конструкции" (м.Київ,1990р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 22 роботи.

Обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків по роботі, списку літератури та додатку. Викладена на 194 стор., включає 32 рисунки, 16 таблиць, список літератури із 175 найменувань на 17 стор., 2 стор. додатку.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі наводиться огляд існуючих методів визначення оптимальних параметрів стану і геометричних схем будівельних

конструкцій, розглядаються основні постановки задач оптимального проектування та методи їх вирішення.

Відмічається, що в більшості робіт з оптимізації конструкцій довгий час зберігався академічний підхід до постановки, при якому їх математичні моделі укладались з урахуванням вимог забезпечення несучої здатності та деформативності конструкцій. В працях В.В.Бірюльова, В.М.Гордєєва, О.В.Геммерлінга, Є.В.Горохова, Я.І.Олькова, О.В.Перельмутера, В.О.Пермякова, Б.А.Сперанського, В.В.Трофимовича, І.С.Холопова, В.М.Шимановського та інш. в математичні моделі, окрім умов, що описують напружено-деформативний стан конструкцій, вводяться і обмеження, що відображають специфіку конструювання, виготовлення і монтажу, завдяки чому відкривається можливість практичного використання результатів оптимального проектування.

Великий вклад в розробку загального підходу до формування математичних моделей задач розрахунку сталевих конструкцій різних класів було внесено при створенні системи САПР-ЦІЛІПСК В.Б.Барським, Г.О.Геммерлінгом, В.М.Гордєєвим, М.Г.Дмитрієвим, І.С.Ковнером, Б.С.Кузнецовим, М.О.Микитаренко та інш.

В роботі відмічається, що постановка та математичне формулювання задач оптимізації сталевих стержневих конструкцій має досить велику різноманітність, пов'язану, передусім, з вибраними критеріями оптимальності, змінними параметрами, повнотою опису вимог до конструкції, а також з методами реалізації розрахунку.

З розгляду детермінованих постановок задач оптимального проектування відзначено основні критерії вибору оптимального рішення, що описують один із показників ефективності конструкції.

Як змінні задачі оптимізації конструкцій розглядаються три групи параметрів:

- розміри поперечних перерізів елементів конструкції;
- зусилля (напруження) в окремих стержнях та їх перерізах, в тому числі зусилля попереднього напруження;
- геометричні розміри форми, що досліджується (координати вузлів, довжини елементів).

Вказані параметри можуть бути визначені як окремо, так і в комплексі один з одним, що призводить до різних за метою та структурою задачам. Показано, що виключення параметрів геометричної схеми заданої конструктивної форми в математичну модель призводить до найбільш складної задачі багатопараметричної оптимізації, яка не має до цього часу загальних методів вирішення.

Питанням оптимізації геометричних параметрів сталевих стерж-

невих конструкцій присвячені роботи В.М.Гордеева, Є.В.Горохова, Г.І.Гребенюка, М.Л.Гринберга, Я.І.Олькова, В.О.Пермякова, Ю.М.Почтмана, В.В.Трофимовича, В.М.Шименовського та інш. Також питання оптимізації форми і топології стержневих конструкцій розглядалися в працях таких авторів, як M.W.Dobbs, L.P.Felton, K.I.Majid, D.W.Elliott, M.P.Saka, L.R.Friedland, W.R.Spillers, O.E.Lev та інш.

На ґрунті досягнень в галузі оптимізації конструкцій в працях В.О.Пермякова сформульована узагальнена задача оптимального проектування стержневих металевих конструкцій. Вона полягає в тому, що для заданої топології конструктивної форми, граничних умов і зовнішніх навантажень визначити параметри геометричної схеми, розподіл зусиль в стержнях та розміри поперечних перерізів елементів при досягненні заданих вимог до конструкції.

Із аналізу результатів теоретичного та чисельного дослідження методів і алгоритмів вирішення задач оптимізації конструкцій, виконаних такими авторами, як В.С.Михалевич і І.В.Сергієнко, Д.Химмельбляу, K.Schittkowski, E.Sandgren і K.Ragsdell, A.Belegundu і J.Aroga для розробки алгоритму та програми розрахунку оптимальних стержневих металевих конструкцій прийнято метод проєкції градієнта в формі його модифікації – метода неортогональної проєкції градієнта, запропонованого в працях В.А.Баженова, В.І.Гуляєва та В.Л.Кошкіна.

Із огляду робіт випливає, що при наявності великої кількості постановок задач оптимального проектування і методів їх вирішення немає доступного програмного забезпечення, що вирішує проблему оптимізації довільної конструкції. Тому розробка універсального підходу до оптимального проектування стержневих систем зберігає в нинішній час свою практичну значимість.

На закінчення розділу сформульовані мета та задачі дослідження.

Другий розділ присвячений розробці алгоритму вирішення задачі оптимального проектування та його програмній реалізації.

Узагальнена задача оптимального проектування формується у вигляді задачі нелінійного програмування, в межах якої розглянуто окремі випадки, пов'язані із заданням параметрів окремих стержнів; з введенням в конструкцію початкових зусиль; з пошуком оптимального числа стержнів (топології) в конструкції заданого типу; з вибором найкращої конструктивної форми із розглянутих оптимальних варіантів, що відповідають одним і тим самим умовам проектування.

Розглянуто питання формування математичних моделей задач

оптимального проектування стержневих металевих конструкцій. В основі формування цільової функції лежить теоретичний об'єм матеріалу конструкції

$$V = \sum A_i l_i, \quad (1)$$

де  $A_i$  - площа перерізу  $i$ -го елемента,  $l_i$  - його геометрична довжина. Довжини елементів можуть бути виражені через координати вузлів початку та кінця стержня, що дає можливість використовувати таку цільову функцію для пошуку оптимальної геометрії системи.

В даній роботі запроваджується узагальнений критерій оптимальності в вигляді

$$Z = \sum C_1 \sum \Phi_i \sum \rho A_i l_i + k_1 \left[ \sum \rho A_i l_i \right]^m + k_2 \left[ H + k_3 \text{Ltg} \alpha \right] + B, \quad (2)$$

У наведеному виразі перший складник характеризує вартість матеріалу конструкції, другий - трудомісткість її виготовлення, третій - експлуатаційні витрати на об'єм споруди, до складу якої входить конструкція, що проектується, прольотом  $L$  та висотою  $H$ , четвертий - сталий складник. Значення коефіцієнтів  $k_1, k_2, k_3, m$  залежать від конструктивної форми, що проектується, та визначаються за методикою Я.М. Ліхтерникова. В залежності від прийнятого критерію оптимальності цільова функція (2) може описувати різні техніко-економічні показники конструкції, в тому числі й найбільш прості із них (маса чи вартість матеріалу), для чого частина її складників може бути обернена на нуль.

До системи обмежень виключені обмеження двох типів: геометричні та обмеження, що описують поведінку конструкції.

Геометричні обмеження покладаються безпосередньо на змінні проектування і висловлюють вимоги технологічності, фізичної реалізуємості, естетики та інш. Можуть мати вигляд рівностей та нерівностей.

Обмеження, що описують поведінку конструкції, переважно нелінійні і можуть бути розділені на дві групи. Перша група - це обмеження-рівності, такі як рівняння рівноваги в формі МКЕ:

$$h(X, Z) = K(X)Z - P(X) = 0, \quad (3)$$

де  $K(X)$  - матриця жорсткості конструкції,  $Z$  - вектор вузлових переміщень,  $P(X)$  - вектор зовнішніх вузлових навантажень.

До другої групи включені вимоги проектування стержнів та системи в цілому, обумовлені будівельними нормами СНиП II-23-81\*. Система обмежень задачі оптимізації сталевих конструкцій має вигляд:

обмеження за міцністю

$$A_1 R_y \gamma_c / N_{1j} - I.0 \geq 0, \quad (4)$$

$$W_1 R_y \gamma_c / M_{1j} - I.0 \geq 0, \quad (5)$$

$$R_y \gamma_c / (N_{1j}/A_1 + M_{1j}/W_{x1}) - I.0 \geq 0, \quad (6)$$

$t=I, NE; j=I, NLC;$

обмеження за стійкістю при центральному стисненні, в площині та із площини дії моменту при позакентровому стисненні

$$\varphi_1 A_1 R_y \gamma_c / N_{1j} - I.0 \geq 0, \quad (7)$$

$$\varphi_{0.1} A_1 R_y \gamma_c / N_{1j} - I.0 \geq 0, \quad (8)$$

$$c\varphi_{y1} A_1 R_y \gamma_c / N_{1j} - I.0 \geq 0, \quad (9)$$

$t=I, NE; j=I, NLC;$

обмеження на граничну гнучкість елементів

$$[\lambda] / \lambda_1 - I.0 \geq 0, \quad t=I, NE; \quad (10)$$

обмеження на переміщення вузлів конструкції

$$\delta_{max} / \delta_{1jk} - I.0 \geq 0, \quad (11)$$

$$t=I, NJ; j=I, NLC; k=1, 2, 3;$$

обмеження на межі зміни параметрів

$$X_1^l \leq X_1 \leq X_1^u, \quad t=I, n, \quad (12)$$

конструктивні обмеження

$$\psi(X) \geq 0; \quad (13)$$

обмеження, що забезпечують потрібне окреслення всієї конструкції (прямолінійне чи криволінійне)

$$y_1 = F(X, x_1), \quad (14)$$

де  $NE$  - число кінцевих елементів;  $NJ$  - число вузлових сполучень;  $NLC$  - число завантажень. Тут: вектор змінних проектування  $X = \{A|Z|Y|T\}$  включає площі перерізів елементів  $A$ , змінні стану конструкції  $Z$ , координати вузлів  $Y$  і зусилля попереднього напруження  $T$ ;  $N_{1j}$ ,  $M_{1j}$  - внутрішні зусилля в  $t$ -му елементі при  $j$ -му завантаженні;  $\delta_{1k}$  - переміщення  $t$ -го вузла при  $j$ -му завантаженні у напрямку  $k$ -ї координати;  $R_y \gamma_c$  - розрахунковий опір матеріалу конструкції;  $\varphi_1$  - коефіцієнт поздовжнього вигину для центрально стиснутого  $t$ -го стержня;  $\varphi_{0.1}$ ,  $\varphi_{y1}$  - коефіцієнти, що наводяться у СНІП II-23 81<sup>а</sup> для перевірки стійкості позакентрово стиснутого стержня в площині та із площини дії моменту.

Для визначення всіх величин, що входять до системи обмежень (4)-(14) розроблені додаткові функціональні залежності для знаходження геометричних характеристик перерізів, параметрів стійкості та інших значень в залежності від змінних проектування.

З використанням методу включення факторів множинного неліній-

ного регресійного аналізу одержано аналітичну залежність  $\varphi_0 = \varphi_0(\lambda, m_{ог})$  на основі впроксімації табличних значень коефіцієнта  $\varphi_0$ , що наведені в СНІП. Отримане рівняння регресії наведене у вигляді полінома п'ятого ступеня. Показано, що знайдений вираз для  $\varphi_0$  дає задовільні результати (похибка не перевищує 10% по відношенню до табульованих значень) при  $m_{ог} < 7.0$ .

Для знаходження геометричних характеристик прокатних перерізів елементів конструкції  $(I, W, t)$ , що необхідні для статичного розрахунку та перевірки міцності та стійкості стержнів, за відомою площев перерізу  $A$ , що прийнята як змінна проектування, визначені безрозмірні параметри прокатних перерізів, які залишаються практично сталими для даного виду прокатного профілю. До них належать приведений радіус інерції, або критерій раціональності форми перерізу  $\rho_{x,y}$  та коефіцієнт ефективності профілю  $\bar{C}_{x,y}$ , які визначаються таким чином

$$\rho_{x,y} = t_{x,y} / \sqrt{A}, \quad \bar{C}_x = t_x^2 / h^2, \quad \bar{C}_y = t_y^2 / b^2, \quad (15)$$

де  $t_{x,y}$  - радіус інерції перерізу,  $h$  і  $b$  - відповідно висота та ширина перерізу.

З використанням виразу (15) та обрахованих значень безрозмірних параметрів одержані наступні залежності геометричних характеристик від площі перерізу:

$$\begin{aligned} t &= \rho \sqrt{A}, \quad h = t / \sqrt{\bar{C}}, \\ I &= \rho^2 A^2, \quad W = 2A^{3/2} \rho \sqrt{\bar{C}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Відмічено, що аналогічний підхід може бути застосований і для стержнів складеного перерізу, для яких необхідні параметри профілів можуть бути визначені шляхом обробки даних для ряду оптимально скомпонованих перерізів, що відповідають усім вимогам норм.

Розроблено алгоритм рішення задачі оптимального проектування стержневих конструкцій методом неортогональної проєкції градієнта який в укрупненому вигляді може бути представлений так:

Крок 1. На ітерації  $k=0$  знаходимося в точці  $X^0$ .

Крок 2. Поточна  $k$ -а ітерація - в точці  $X^k$ .

Обчислити значення цільової функції  $f(X^k)$  та її градієнта  $\nabla f(X^k)$ .

Крок 3. Виконати аналіз конструкції методом МКЕ. Визначити внутрішні зусилля в елементах конструкції від зовнішнього навантаження. При наявності попереднього напруження вико-

нати розрахунок конструкції на дію зусиль попереднього напруження.

Крок 4. Перевірити обмеження для всіх завантажень. Визначити множини  $I^0(X^k)$  індексів активних обмежень. Призначити  $L = I^0(X^k)$ .

Крок 5. Визначити вектор нев'язок в активних обмеженнях  $R^k$ .

Крок 6. Обчислити коефіцієнти чутливості для кожного  $l$ -го обмеження ( $l \in L$ ) і сформувати матрицю коефіцієнтів лінеаризованих активних обмежень  $\left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]$ .

Крок 7. Обчислити множники Лагранжа

$$\lambda = \left( \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right] \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]^T \right)^{-1} \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right] \nabla f(X^k).$$

Якщо  $\lambda \geq 0$ , то робота алгоритму продовжується з наступного кроку. Інакше нехай  $\lambda_i$  - найбільша за модулем із від'ємних компонент вектора  $\lambda$ . Призначити  $L \leftarrow L - \{i\}$  і повернутися до кроку 6.

Крок 8. Обчислити проєктуючу матрицю

$$P = I - \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]^T \left( \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right] \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]^T \right)^{-1} \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right].$$

Крок 9. Обчислити вектор корегувючих поправок

$$\delta X_R = - \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]^T \left( \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right] \left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]^T \right)^{-1} R^k.$$

Крок 10. Обчислити новий напрям переміщення

$$y^k = -P \nabla f(X^k) + \frac{1}{\alpha} \delta X_R.$$

Крок 11. Знайти нове значення змінних проєктування

$$X^{k+1} = X^k + \alpha y^k.$$

Крок 12. В разі коли  $|f(X^{k+1}) - f(X^k)|$  та  $\|\bar{y}^k\|$  досить малі

( $\bar{y}^k = P \nabla f(X^k)$ ), то робота алгоритму закінчується. В іншому випадку призначити  $k \leftarrow k+1$  і повернутися до кроку 2.

Розглянуті деякі обчислювальні аспекти запропонованого алгоритму, що підвищують ефективність його застосування.

Оскільки змінні проєктування мають різну фізичну природу, то масштаби змінювання їх величин можуть відрізнитися в значній мірі. Це призводить до появи погано обумовлених матриць, що утруднюють рішення задачі оптимізації обраним методом. Тому в алгоритмі реалізована така стратегія масштабування змінних, щоб кожна з них мала приблизно одну й ту саму величину.

Щоб уникнути появи погано обумовлених матриць, обмеження задачі ОП нормовані на їх граничні значення, при цьому кожне обмеження представлено у вигляді  $g_i = R_i^* - I \cdot 0 \geq 0$ , де  $R_i^*$  - приведений відгук системи. Така процедура полегшує порівняння порушень для різних обмежень і формування набору активних обмежень.

Враховуючи вимоги уніфікації елементів та симетрію конструкцій, елементи системи розділяються на кілька груп, і кожній групі відповідають однакові змінні проектування. Об'єднання змінних в групи вводиться перетворенням  $T$  так, що

$$\tilde{X} = T X, \quad (17)$$

де  $\tilde{X}$  - вихідний вектор  $\tilde{n}$  змінних проектування,  $X$  - зменшений вектор змінних з урахуванням уніфікації, що містить  $n$  елементів,  $T$  - матриця розмірності  $\tilde{n} \times n$ .

Статичний розрахунок конструкцій виконується методом кінцевих елементів з урахуванням необхідних заходів, що підвищують ефективність використання цього методу.

Обчислювальний алгоритм методу неортогональної проєкції градієнта будується на використанні стратегії активних обмежень та аналізі чутливості цих обмежень до збурення змінних проектування.

Як видно з алгоритму, матриця чутливості  $\left[ \frac{\partial g}{\partial X} \right]$  та вектор градієнту цільової функції  $\nabla f(X)$  використовуються для побудови проєктувочої матриці, обчислення множників Лагранжа та визначення напрямку спуску по градієнту. Аналіз чутливості виконується або аналітично, або чисельно. В першому випадку одержані явні вирази в термінах змінних проектування для похідних матриць  $\partial Z / \partial X$  та  $\partial F_1 / \partial X$  де  $F_1$  - вектор внутрішніх зусиль в елементі. Дється спосіб визначення складників, що входять у вираз для  $\partial F_1 / \partial X$ :

$$\frac{\partial F_1}{\partial X} = \frac{\partial k_1}{\partial X} T z_g + k_1 \frac{\partial T}{\partial X} z_g + k_1 T \frac{\partial z_g}{\partial X} + \frac{\partial p_1}{\partial X}, \quad (18)$$

де  $k_1$  - матриця жорсткості елемента в локальній системі координат,  $z_g$  - вузлові переміщення в загальній системі координат,  $T$  - матриця перетворення локальної координатної системи на загальну.

Так, для обмеження за міцністю центрально розтягнутого стержня коефіцієнт чутливості визначається наступним чином:

$$\frac{\partial g_1^0}{\partial A_j} = - R_y \gamma_c \frac{A_1}{N_1^2} \frac{\partial N_1}{\partial A_j}, \quad (19)$$

де  $\partial N_1 / \partial A_j$  - елемент матриці  $\partial F_1 / \partial X$  з (18).

Одержані також явні вирази для похідних функцій  $\varphi = \varphi(X)$ ,  $\varphi_a = \varphi_a(X)$  та  $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}(X)$ .

Інший підхід полягає в тому, що збурється одна із змінних проектування: для апроксимації похідних матриць обмежень та цільової функції використовуються кінцеві різниці. Ці вирази мають вигляд:

$$\frac{\partial g_1}{\partial X_j} \cong \frac{g_1(X + \delta e_j) - g_1(X)}{\delta}, \quad \frac{\partial f}{\partial X_j} \cong \frac{g(X + \delta e_j) - f(X)}{\delta}, \quad (20)$$

де  $e_j$  має одиницю на  $j$ -му місці, а в решті позицій - нулі,  $\delta$  - мале збурення  $X_j$ .

Для попередньо напружених конструкцій розроблені методика статичного розрахунку в рамках МКЕ та аналізу чутливості змінних стану таких конструкцій по відношенню до зусиль попереднього напруження.

Визначення зусиль в елементах попередньо напружених конструкцій ґрунтується на принципі суперпозиції внутрішніх зусиль та створенні редукованої моделі конструкції, в якій напружені елементи замінюються відповідними зусиллями попереднього напруження  $\bar{S}_{pn}$ . Тоді рівняння стану редукованої системи

$$K_{red} Z_{red} = \bar{S}_{pn}, \quad (21)$$

де  $Z_{red}$  - вектор вузлових переміщень,  $K_{red}$  - матриця жорсткості редукованої системи,  $\bar{S}_{pn}$  - вектор зусиль попереднього напруження.

Після диференціювання (21) за змінною  $T_j$  (зусилля попереднього напруження) та урахування, що  $\partial K_{red} / \partial T_j = 0$ , маємо

$$K_{red} \frac{\partial Z_{red}}{\partial T_j} = \frac{\partial \bar{S}_{pn}}{\partial T_j}. \quad (22)$$

Оскільки вектор  $\bar{S}_{pn} = (0 \dots T_1 \dots T_j \dots 0 \dots T_n \dots 0)^T$ , то похідна  $\partial \bar{S}_{pn} / \partial T_j = (0 \dots 0 \dots I \dots 0 \dots 0 \dots 0)^T$ . Приймаючи до уваги ідентичність записів (21) і (22), запишемо їх в вигляді одного узгальненого рівняння рівноваги та аналізу чутливості попередньо напруженої конструкції

$$K_{red} \tilde{Z}_{red} = F^0, \quad (23)$$

де  $Z_{red} = \left[ Z_{red} \mid \frac{\partial Z_{red}}{\partial T_j} \right]$ ,  $F^0 = \left[ \bar{S}_{pn} \mid \frac{\partial \bar{S}_{pn}}{\partial T_j} \right]$ . З обчислювальної точки зору наведена процедура має високу ефективність, оскільки дозволяє одержати одночасно і реакцію системи, і коефіцієнти чутливості змінних стану по відношенню до зусиль попереднього напруження. Одержані значення  $\frac{\partial Z_{red}}{\partial T_j}$  використовуються потім для аналізу чутливості повних зусиль в елементах конструкції.

Відзначимо особливість рішення задачі оптимізації попередньо напружених конструкцій методом неортогональної проєкції градієнта-цільова функція (маса, вартість, приведені витрати та інш.) не є функцією змінних проектування  $T_j$ , а обмеження задачі (4)-(I4) залежать від  $T_j$ . Це призводить до того, що  $\partial f / \partial T_j = 0$  і при відсутності активних обмежень приріст  $\Delta T_j$  на ітерації дорівнює нулю. Оскільки  $\partial G_i / \partial T_j \neq 0$ , то матриця проектування  $F^0$  залежить від  $T_j$ , і проєкція антиградієнта цільової функції призводить до зміни величини  $T_j$ . Таким чином, при появі хоча б одного активного обмеження, що залежить від  $T_j$ , прирости  $\Delta T_j$  стають ненульовими.

Далі розглядається організація розробленого пакета прикладних програм (ППП) ПОИСК-I, призначеного для рішення на ПЕОМ, сумісних з IBM-PC/XT/AT, задач оптимального проектування стержневих металевих конструкцій як такого, що реалізує наведений вище алгоритм. Блоки програми написані мовами FORTRAN-77 і QuickBasic.

Програмний комплекс ПОИСК-I складається із таких складових частин: блок підготовки даних в інтерактивному режимі WELCOME, блок оптимізації, блок статичного аналізу, а також процесорні блоки для забезпечення зв'язку блока оптимізації з блоком аналізу і навпаки. Відбиття результатів розрахунку та оптимізації в графічному вигляді на екрані монітора виконується блоком PLOT.

В блоці аналізу виконується статичний розрахунок системи на багато звантажень і аналізується напружений стан кожного стержня, результати чого використовуються для автоматизованого формування системи обмежень. Туди ж передається інформація про розрахункові зусилля, що визначаються при несприятливому сполученні зовнішніх навантажень, та нормативні дані, необхідні для формування обмежень.

Основний алгоритм проєкції градієнта реалізований у вигляді підблока GLAVN, що звертається до підблоку обчислення цільової функції та її градієнтів CELFGR, підблоку формування системи обмежень OGR, підблоку формування списку активних обмежень INDM і підблоку формування матриці чутливості SENS. Організація взаємодії

блоків аналізу і оптимізації здійснюється посередництвом процесорного блоку CHANGE, за допомогою якого значення змінних проектування, що одержані в блоці оптимізації, переводяться в систему вхідних параметрів в формі, потрібній для блоку аналізу.

Модульна структура ППП ПОИСК-І дозволяє замінювати його складові частини іншими еквівалентними програмами, організувати інші режими роботи блок-схеми ППП.

Далі наводиться опис особливостей експлуатації ППП ПОИСК-І, способів підготовки початкових даних та опис вихідної інформації. Даються рекомендації по призначенню початкового значення крокового множника  $\alpha$ , вибору кількості ітерацій, контролю за збіжністю ітераційного процесу.

В третьому розділі проводиться аналіз роботи ППП ПОИСК-І, досліджуються особливості формування оптимальних геометричних схем сталевих стержневих конструкцій.

Проведено порівняння результатів оптимального проектування конструкцій, одержаних за допомогою ППП ПОИСК-І, із результатами, одержаними іншими авторами та іншими методами оптимізації. Розглянуто задачі оптимізації 3-стержневої ферми, 10-елементної ферми, попередньо напруженої шпренгельної балки, задача пошуку оптимальної топології 11-елементної ферми. Порівняння одержаних результатів свідчить про вірогідність рішень, що отримуються за допомогою ППП ПОИСК-І.

Досліджено вплив вибору цільової функції та активності обмежень (умов проектування) на оптимальні параметри конструкцій на прикладах типової кроквяної ферми із паралельними поясами з парних кутників прольотом 30м та малоелементної шпренгельної ферми прольотом 18м.

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:

- при заданій геометричній схемі конструкції результати оптимального проектування її по різних критеріям, як от, за критерієм маси та приведених витрат, практично збігаються. Тому доцільно прийняти такий критерій, який визначається найбільш простим способом;

- якщо геометрія змінюється, то вибір критерію оптимальності має суттєвий вплив на оптимальні параметри конструкції. Так, оптимальна висота ферми, знайдена за критерієм приведених витрат, виявилась меншою за висоту, знайдену за умови мінімуму маси.

Враховуючи вплив на оптимальні геометричні параметри стержневої системи вибору не лише цільової функції, але й активності

тих чи інших обмежень, що виключені в математичну модель задачі, досліджено на прикладі попередньо напруженої ферми типу "арка із зтяжкою" прольотом 42м вплив на результати оптимізації конструкцій прийнятих умов проектування, під якими розуміємо: вибір сталі для елементів конструкції; типи поперечних перерізів її елементів; вимоги уніфікації перерізів стержнів; спеціальні обмеження, серед яких, наприклад, вимоги підвищеної жорсткості.

Оптимальні параметри та витрати сталі, що отримані в разі оптимізації ферми з фіксованою геометрією, прийняті як базові значення, з якими подалі порівнювалися одержані результати. Найбільшого зменшення значення цільової функції вдається досягти у випадку варіювання координат усіх вузлів верхнього та нижнього поясів. Проте, одержана конструктивна форма не відповідає вимогам реального проектування. Тому в систему обмежень необхідно ввести умови, що забезпечують прямолінійність поясів конструкції. Витрати сталі при цьому збільшуються, але ферма задовольняє проектним вимогам.

Застосування сталей підвищеної міцності для поясів ферми у більшому ступені справило вплив на витрати металу, ніж на оптимальну геометрію конструкції. Використання ефективних профілів (широкополічних таврів, гнущозварних замкнутих профілів, труб) призводить до збільшення оптимальної висоти конструкції на 20-30% у порівнянні з традиційними рішеннями. Значний вплив на оптимальні геометричні параметри справив вибір уніфікації стержнів. Скорочення кількості типорозмірів прийнятих перерізів з 10 до 4 призвело до збільшення оптимальної висоти ферми на 15%.

З введенням жорсткого обмеження на прогин обрис ферми типу "арка із зтяжкою" наблизився до трикутного. Оптимізація ферми при тій же умові на прогин, але з фіксованою геометрією, веде до проекту, в якому витрати сталі в 1.8 разів більші, ніж для задачі із змінними геометричними параметрами. При порівнянні рішень двох останніх задач зроблено висновок про високу ефективність пошуку оптимальних геометричних параметрів стержневих металевих конструкцій.

Відмічено, що для багатьох традиційних конструкцій широко використовуються рекомендації по вибору параметрів їх геометричних схем. Проте, одержані результати свідчать, що не тільки для нових, але й для традиційних конструкцій оптимальні геометричні параметри при кожному конкретному проектуванні виявляються досить різноманітними і визначаються прийнятими умовами проектування. Вплив цих

умов має бути врахований при оптимальному проектуванні конкретних конструкцій.

Розглянуто питання пошуку оптимальної топології стержневих систем як окремих випадків узагальненої задачі оптимального проектування. Сформульовані ознаки вилучення вузлів і стержнів з конструкції, методика корегування її геометричної схеми. Відмічено ряд особливостей, що характерні для задач пошуку оптимальної топології. На прикладах проектування ферм покриття із жорстким двосхилим верхнім поясом та з паралельними поясами подано методику одержання оптимальних топологічних схем конструкцій та ефективність її застосування.

В четвертому розділі досліджується економічна ефективність реальних проектних рішень, що одержані з використанням розробленого в роботі підходу до оптимального проектування стержневих металевих конструкцій.

Розглянуто питання визначення оптимальних параметрів панельно-шпренгельних систем покриття (ПШС), конструктивна система яких запропонована УкрНДІПСК. Рішення задачі оптимізації ПШС виконувалось з допомогою ППП ПОИСК-І. Сформульовані дві цільові функції - маса панелі і приведені витрати на конструкцію. Як змінні проектування прийняті з урахуванням уніфікації та симетрії площі перерізів елементів і координати вузлів верхнього та нижнього поясів панелі.

Розрахунок ПШС виконувався на 4 найбільш несприятливі комбінації навантажень - постійного, снігового та кранового. При несиметричному навантаженні у внутрішньому розкосі системи з'являється стискаюче зусилля. Щоб не допускати стиснення у цьому розкосі і одержати найбільш раціональну епору моментів у верхньому поясі, в стойки шпренгеля вводиться зусилля попереднього напруження. З цієї причини до змінних проектування додається зусилля попереднього напруження шпренгеля.

За початковий проект були прийняті параметри блок-секції ПШС 3×24, розробленої в проекті "Унифицированные стальные конструкции покрытий на основе мембранных панелей" (УкрНДІПСК). Питома металоемність системи покриття (без урахування підкрюкв'яних конструкцій) складає 31.6 кг/м<sup>2</sup>.

В результаті пошуку оптимальних параметрів стану та геометрії таких конструкцій питома металоемність проекту, оптимального за масою, склала 25.6 кг/м<sup>2</sup>, оптимального за критерієм приведених витрат - 28.0 кг/м<sup>2</sup>, тобто зменшилася, відповідно, на 19% і 12%.

Знайдена оптимальна висота ППС за критерієм приведених витрат в 1.5 рази менше висоти, що знайдена із умови мінімуму маси.

Одержані результати були використані при розробці проекту будівлі теплої стоянки будівельних машин в м.Симферополі (УкрНДІПСК).

Розглянуто задачу оптимального проектування попередньо напруженої конструкції покриття цеху по переробці скрапу металургійного заводу "Сарканайс металургс" в м.Лісая (УкрНДІПСК).

Поперечник цеху 4-прольотний з розміром прольоту 27м і центральнов жорстков вставков прольотом 12м. Будівля обладнана мостовими кранами Q=30т.

Порівнювались два варіанти покриття. Перший - розрізні ферми прольотом 27м; другий - попередньо напружені нерозрізні ферми. Спосіб створення початкових зусиль - регулювання змінюв рівня середньої опори.

Оптимальному проекту відповідає величина зміщення середньої опори +0.10м (догори). Одержані витрати сталі на 20% менше витрат матеріалу на розрізні конструкції. Розроблено методику реалізації попереднього напруження за допомогою гідравлічних домкратів. Результати використано у навчальному процесі.

#### ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Узагальнена задача оптимального проектування сталевих стержневих конструкцій із змінною геометрією, що базується на принципах реального проектування з урахуванням усіх вимог нормативних документів подана як багатопараметрична в детермінованій постановці і її розв'язання зводиться до розв'язання задачі нелінійного програмування. Передбачені особові випадки узагальненої задачі, що виникають при проектуванні конкретних конструкцій.

2. Запропоновані нові структури математичних моделей задачі, до яких, крім необхідних обмежень, які відбивають умови міцності, стійкості, граничних гнучкостей стержнів і переміщень вузлів, - включено умови, що описують закони змінення обрисів вісей конструкції (прямолінійні або криволінійні). Математична модель узагальненої задачі дозволяє розглядати її як придатну для розрахунку будь-якої стержневої системи.

3. Розроблено універсальний алгоритм визначення оптимальних параметрів стану і геометрії стержневих металевих конструкцій, що оснований на аналізі кінцево-елементної моделі конструкції і вирішенні задачі оптимізації методом неортогональної проєкції гра-

дієнта.

4. Розроблено алгоритм розрахунку попередньо напружених конструкцій на основі їх кінцево-елементних моделей з використанням редукованих систем. Задача оптимального проектування попередньо напружених конструкцій сформульована і вирішена в нелінійній постановці. Одержано аналітичні залежності для коефіцієнтів чутливості проектних параметрів до зміни зусиль попереднього напруження.

5. Розроблено пакет прикладних програм ПОИСК-І, що дозволяє знаходити оптимальні за заданим критерієм поперечні перерізи елементів, геометричну схему і топологію стержневих конструкцій, в тому числі і попередньо напружених. Модульна структура розробленого ППП дозволяє взаємозамінювати окремі блоки і доповнювати новими, що враховують специфічні особливості проектування конкретних конструкцій.

6. Виявлена суттєва залежність оптимальних параметрів геометричних схем від вибору критерію оптимальності, розрахункового опору сталі, типів ґратки і поперечних перерізів стержнів, уніфікації елементів, активності тих чи інших груп обмежень. У зв'язку з цим можна констатувати, що багаточислені загальні рекомендації по призначенню геометричних розмірів ґратчастих конструкцій є наближеними, а оптимальна схема тієї чи іншої системи повинна визначатися для кожного конкретного випадку у відповідності з технічним завданням на проектування.

7. На прикладах проектування реальних об'єктів продемонстровано високу економічну ефективність рішень, що одержуються за допомогою розробленої методики. Одержані оптимальні параметри конструкцій прийнято до використання в реальних проектах.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Пермяков В.А., Ремєнников А.М. Оптимальное проектирование стержневых систем с переменной топологией // Вопросы оптимизации и надежности в строительной механике: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. -Вильнюс: 1988. -с.63.

2. Пермяков В.А., Ремєнников А.М. Поиск оптимальной геометрии и топологии стержневых систем на основе использования метода топологических вариаций // Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций, машин и механизмов: Тезисы докладов науч.-технич. конференции. -Севастополь: 1989. - с.71-73.

3. Кошкин В.Л., Мельниченко Г.И., Пермяков В.А., Ремєнников А.М.

Пакет прикладных программ ПОИСК-1.- К.: "Реклама", 1989.

4. Ременников А.М. Оптимизация формы и топологии стержневых конструкций // Тезисы докладов Шестого Национального конгресса по теоретической и прикладной механике. -Варна: 1989. -с.VI.46.

5. Пермяков В.А., Ременников А.М. Комплекс программ для решения задач оптимизации стержневых конструкций // Металлические конструкции и испытания сооружений: Межвуз. темат. сб. тр./ ЛИСИ. Л.: 1989. -с.60-63.

6. Ременников А.М. Оптимальное проектирование стальных конструкций при нескольких условиях нагружения на персональном компьютере // Сварные конструкции: Тезисы докладов Международной конференции.- К.: 1990.- с.39.

7. Ременников А.М. Оптимизация формы и топологии стержневых конструкций // Доклады Шестого Национального конгресса по теоретической и прикладной механике.Кн.4. -София: 1990. -с.360-363.

8. Ременников А.М. Оптимальное проектирование стальных предварительно напряженных конструкций методами нелинейного программирования // Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций, машин и механизмов: Тезисы докладов науч.-технич.конференции Севастополь: 1991. -с.65.

9. Пермяков В.А., Ременников А.М. Оптимизация геометрических схем ферменных конструкций // Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos statyboje: Доклады науч.-технич.конференции.- Vilnius: 1991. -с.39-42.

10. Навроцкий А.Е., Ременников А.М. Панельно-шпренгельные системы и оптимизация их параметров // Промышленное строительство и инженерные сооружения. -1992. - N1. -с.36-38.

11. Пермяков В.А., Ременников А.М. Поиск геометрических схем металлических конструкций на основе методов нелинейного программирования // Совершенствование сварных металлических конструкций/Под. ред. М.М. Жербина.- Киев: Наук. думка, 1992.- с.68-73.

12. Permyakov V.A. & Remennikov A.M. General Purpose Code for Steel Structures . Optimal Design // Computers & Structures, Vol.43, No.6, pp.1155-1164, 1992.

13. Ременников А.М. Особенности формирования оптимальных геометрических схем стальных стержневых конструкций // Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле: Тезисы докладов V Украинской науч.-технич.конференции по металлическим конструкциям. -К.: 1992. -с.81.

АНБ им. В. Стефанова  
АН УРСР

468870

Безплатно.

Ав 26.054

Підп. до друку 03.11.92 . Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір друк. № 3 .  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 0,93 . Умов. фарб.-відбиток 1,16 .  
Облік-вид. арк. 1,0 . Тираж 100 . Зам. № 4-9/ . Безплатно.

РОВО «Укравузполіграф».  
252151, Київ, вул. Волинська, 60.