ОДЕСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО - БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

БОГДАНОВ Микола Миколайович

ЕФЕКТИВНА СХЕМА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПЕРЕМІЩЕНЬ У СТАТИЦІ КВАЗІСИМЕТРИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Спеціальність 05.23.17 - будівельна механіка

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

Одеса - 1994

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00756454 (V)
АВ 30.065

Робота виконана на кафедрі теоретичної механіки Одеського інженерно - будівельного інституту.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор М.Л. Буришкін

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, О.В. Перельмутер

- кандидат технічних наук В.П. Шупта

Провідна організація - Науково-дослідний інститут "Шторм" (м.Одеса)

Захист відбудеться "14" червня 1994 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.068.41.01 в Одеському інженерно - будівельному інституті за адресою: 270029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд.210 (Головний корпус).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту. Адреса: 270029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розіслання "12" травня 1994 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника АН України

Вчений секретар спеціалізованої ради к.т.н., доцент Малахова Н.О.Малахова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна інженерна практика висуває перед конструкторами і проектувальниками комплекс проблем, серед яких підвищення міцності і зниження матеріаломісткості конструкцій, будов, їх деталей та елементів займають одне з перших місць. Одночасне розв'язання цих проблем, як правило, немохливо без точного аналізу статичних характеристик напружено-деформованого стану запроектованого об'єкту.

Будівельна механіка вміщує широкий набір методів, призначених для дослідження пружних систем. При розрахунку складних багатоелементних конструкцій майже виключно використовуються дискретні (сіткові) методи. Однак вони приводять до надто громіздких розрахунків, які у ряді випадків можуть виявитися важкоздійснюваними навіть при використанні потужних обчислювальних засобів.

У зв'язку з цим особої уваги заслуговує той факт, що багатоелементні інженерні конструкції, їх фрагменти та деталі складної конфігурації в силу технологічних і експлуатаційних вимог, а також з міркувань уніфікації і типізації нерідко складаються з однакових, неодноразово повторюваних частин (комірок). Зокрема це відноситься до розрахункових схем куполів, телебашт, рефлекторів радіотелескопів, градирень, тощо.

Вказані причини обумовили серйозну увагу механіків до проблеми обліку симетрії пружногеометричних властивостей конструкцій на їх статичний розрахунок. Значний вклад в теоретичний аналіз і практичні розрахунки симетричних тіл внесли вчені України В.М.Гордєєв, О.М.Гузь, О.С.Космодаміанський, В.В.Панасюк, Г.Я.Попов, О.О.Уманський, Л.А.Фільштинський, В.М.Фомін, В.А.Шалдирван і ін. Принципово важливі дослідження в цьому напряму проводились також Н.Х.Арутюняном, В.О.Ігнатьєвим, Б.М.Нулером, О.І.Сегалем, В.Д.Шайкевичем та ін. Завдяки зусиль одеської, київської і санкт-петербурзької шкіл дослідження з даної проблеми практично доведені до завершення, а теоретичні результати були реалізовані у ряді промислових обчислювальних комплексів, що плідно використовуються провідними проектними і конструкторськими організаціями країн СНД. Найбільш відомими з них є ПАРАДОКС, розроблений в середині 70-х років А.В.Пе-

рельмутером, В.М.Гордєєвим, В.П.Криханівським і ін.), і ПАРСЕК (В.І.Басенко, М.Л.Буришкін, Х.Д.Возгріна, В.М.Гордєєв і ін.).

На фоні глибоких і ретельних заходів обліку симетрії при проектуванні споруд та їх фрагментів, а також при конструюванні вузлів та деталей машин залишилась на другому плані та важлива обставина, що незначні відхилення пружногеометричних властивостей від випадку строгої симетрії практично неминучі. При проведенні практичних розрахунків проектувальники і конструктори звичайно зустрічаються з квазісиметричними системами, в яких припускаються обмежені порушення симетрії.

Зрозуміло, що в нульовому наближенні в оцінках на міцність і жорсткість квазісиметричні конструкції зручно враховувати цілком симетричними і вживати згадувані вище ефективні методи рахунку. Однак будь-які спроби уточнити отримані оцінки, врахувати вплив окремих недосконалостей і неточностей виявляються виключно трудомісткими і громіздкими.

Таким чином, проблема розробки спеціальної модифікації дискретних методів аналізу статичного напружено-деформованого стану квазісиметричних конструкцій безперечно з'являється актуальною і своєчасною.

Дана робота зв`язана з кафедральною темою "Исследование разрешающих уравнений симметричных пространственных конструкций" (ВНТІцентр 80056889) і виконана у рамках проекту 1/168 "Квазісиметрія", що реалізується Одеським відділенням Інженерної академії України і фінансується Державним комітетом України з питань науки і технології.

Метою дисертації є розв`язання сформульованої проблеми. Окрім теоретичних досліджень робота повинна включати більш докладні методики, що задовольняють алгоритмічним вимогам і здатні для безпосереднього застосування у сучасних обчислювальних комплексах. У відповідності з метою перед дисертаційним дослідом встановлені наступні задачі:

- збудувати методику статичного розрахунку симетричних конструкцій, що зберігла б свою ефективність при малих відхиленнях їх пружногеометричних властивостей від точної симетрії;

- розробити систему розрахункових формул, що забезпечують можливість реалізації такої методики;

- визначити фрагменти класичного дискретного методу переміщень, що потребують зміни у зв`язку із застосуванням запропонованої методики, і згідним чином їх модифікувати;

- оцінити вплив відхилення від симетрії на статичні характеристики деяких будівельних конструкцій баштового типу.

Методи досліджень. У роботі використовуються загальний аналітичний підхід до урахування симетрії пружногеометричних властивостей у лінійних задачах механіки, а також його конкретна реалізація у дискретних методах будівельної механіки. Як основний математичний апарат застосовано прикладна теорія зображення груп і методи лінійної алгебри.

Наукова новизна полягає у наступному:

- уперше поставлено завдання про створення ефективної схеми дискретного розрахунку, орієнтованого на квазісиметричні механічні системи;

- запропоновано узагальнення підходу до обліку симетрії пружногеометричних властивостей конструкцій при їх статичному розрахунку;

- отримані нові розрахункові формули для запису матриць жорсткості у базису з узагальненими симетричними властивостями;

- уперше збудована ефективна методика статичного розрахунку квазісиметричних конструкцій дискретним методом переміщень.

Достовірність отриманих наукових результатів підтверджується коректною математичною постановкою задачі, строгістю використованого математичного апарату, а також пристайністю аналітичних і числових результатів, отриманих для характерних моделей за допомогою метода переміщень у стандартній і запропонованій формах.

Апробація роботи. Основні результати проведених досліджень доповідались на II Міжнародній науковій та технологічній конференції "Актуальни проблеми фундаментальних наук" (Москва, січень, 1994), на науково - технічній конференції професорсько-викладацького складу Одеського інженерно-будівельного інституту (квітень,1993), на засіданні секції науково-технічної ради інституту Укрндіпроектстальконструкція (м.Київ,липень,1993).

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонована методика істотно полегшує проведення досліджень статичного напружено-деформованого стану квазісиметричних конструкцій, а також дозволяє врахувати вплив окремих недосконалостей і неточностей у виробництві і монтажу симетричних конструкцій на характеристики жорсткості і міцності.

Першою практичною апробацією отриманих результатів було їх використання в Укрндіпроектстальконструкція у розрахунках труби

котельної, що проектувалась в останній час для забезпечення робіт, пов'язаних із виведенням з експлуатації Чорнобильської АЕС.

На захист винесено:

- методика статичного розрахунку квазісиметричних конструкцій дискретним методом переміщень;
- розрахункові формули, призначені для запису матриць жорсткості квазісиметричних конструкцій у базису з узагальненими симетричними властивостями;
- алгоритм побудови матриць жорсткості у симетризованій формі;
- оцінки впливу окремих недосконалостей на статичні характеристики деяких будівельних конструкцій баштового типу.

Публікації. З теми дисертації опубліковано одна брошура (препринт Санкт-Петербурзького фізико-технічного інституту ім. О.Ф.Іоффе Російської АН) і дві статті.

Структура і об'єм дисертації. Робота складається з передмови, п'яти розділів, основних висновків і списку використаної літератури з 92-х найменувань. Загальний об'єм - 102 сторінка машинописного тексту, у тому числі 13 таблиць, 12 рисунків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У передмові обгрунтовується актуальність теми, формулюється мета дослідження і основні положення, що винесено на захист, виділяються елементи наукової новизни і наводяться характеристики достовірності та значущості отриманих результатів.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану проблеми дискретного розрахунку симетричних і квазісиметричних конструкцій методом переміщень.

Значна частина публікацій, прямо чи посередньо пов'язаних з вказаною проблемою, додержує задачі з найпростішими симетричними властивостями. У більш загальних задачах зовнішній вплив є довільним. Однак навіть в цьому випадку облік симет. ії пружногеометричних, властивостей незмінно при одить до істотних спрощень статичних розрахунків.

В першу чергу промовлене відноситься до механічних систем з циклічною симетрією. Тут як апарат розкладення використовува-

лись "кінцеві тригонометричні ряди" по окружній координаті. Відповідна схема спрощення, розвинута для циклічних багатоелементних ферм, була потиснена у публікаціях вітчизняних механіків заходами, що базуються на спектральних властивостях циклічних матриць.

Далі розвиток методів пов'язаний з використанням математичного апарату теорії зображень груп. На початку 80-х років на базі цього апарату М.Л.Бурикіним була запропонована загальна ефективна схема статичного дискретного розрахунку механічних конструкцій із скінченними групами симетрії.

Аналіз наукових публікацій виявив, що в галузі квазісиметричних конструкцій аналогічна проблема не вивчалась. Більш того, відсутня навіть постановка відповідної задачі.

У другому розділі розробляється каркас ефективного алгоритму розв'язування статичних задач для квазісиметричних конструкцій. Розглядаються лінійно-пружні тіла S_0 та S, що трохи відрізняються одне від одного пружногеометричними характеристиками. Вважається, що тіло S_0 має скінченну групу симетрії G порядку m. Під $g \in G$ будемо розуміти деяке перетворення симетрії (поворот, відбиття, тощо), $e \in G$ - одиничний елемент групи G (тривіальне перетворення). Тіло S_0 складається з m конгруентних елементарних комірок S^g ($g \in G$); до того ж S^e - основна комірка, а $S^g = g S^e$.

В кожній з комірок S^g вводять свої - локальні - осі декартових координат u_j^g ($j = 1,2,3$), так що $u_j^g = g u_j^e$ і осі u_j^e, що збігаються з глобальними осями u_j ($j = 1,2,3$). Сукупність усіх локальних координатних систем можна назвати інваріантною системою відліку. Згідно з методологією дискретних методів в області, що зайнята тілом S_0, розміщується сітка вузлів. Поставимо вимогу, щоб вона також мала групу симетрії G.

Кожна елементарна комірка вміщує одне й те ж число вузлів n. Будь-який з вузлів λ_s ($s = 1,2,\dots,n$), що є граничним, залишається нерухомим під дією перетворень з підгрупи $G_s \subset G$. Останню кличуть групою вузла λ_s.

Будемо вважати, що навантаження тіл S_0 і S описуються вектором Y, а переміщення - векторами X_0 (для S_0) і X (для S) з простору Ω, які мають блочну структуру:

$$Z=\left[Z\langle g\rangle\right]_{g\in G},\qquad Z\langle g\rangle=\left[Z\langle s,g\rangle\right]_{s=1}^{n},$$

$$Z\langle s,g\rangle=\left[Z\langle t,s,g\rangle\right]_{t=1}^{n_s}\qquad (Z=Y,X_0,X),\qquad (1)$$

де $Z\langle g\rangle$ та $Z\langle s,g\rangle$ ($g\in G$, $s=1,2,\ldots,n$) - підвектори, що відповідають комірці S^g та її вузлу $g\lambda_s$. $Z\langle t,s,g\rangle$ - t -ий компонент підвектора $Z\langle s,g\rangle$, якого записано в інваріантній системі відліку. Істотно, що для всіх $g\in G$ ці компоненти мають однаковий фізичний зміст.

При рівновазі тіл S_0 і S вектори їх навантажень і переміщень зв'язуються між собою відповідними рівняннями:

$$A_0X_0=Y^0,\qquad (2)$$

$$AX=Y,\qquad (3)$$

де A_0 і A - матриці жорсткості вказаних тіл. Згідно із структурою (1) говорять, що розв'язувальні рівняння (2) і (3) наведені в симетризованій формі.

Якщо матрицю A можна уявити у вигляді

$$A=A_0+\varepsilon A_1,\qquad (4)$$

де ε - малий параметр і A_1 - довільна квадратна матриця, елементи якої мають той же порядок, що й в матрицях A і A_0, то конструкція S називається квазісиметричною, а тіло S_0 , рівняння (2) і вектор X_0 - породженими відносно S , (3) і X відповідно.

З (1) випливає, що матриці A_0 , A_1 і A - блочні:

$$U=\left[U\langle g',g\rangle\right]_{g',g\in G},\quad U\langle g',g\rangle=\left[U\langle p,g',s,g\rangle\right]_{p,s=1}^{n},$$

$$U\langle p,g',s,g\rangle=\left[U\langle \gamma,p,g',t,s,g\rangle\right]_{q,t=1}^{n_p,n_s}\qquad (5)$$

$$(U=A_0,A_1,A).$$

В просторі Ω вводять базисні вектори $E^{\rho\gamma}_{(q)\mu}$:

$$E^{p\delta}_{(\vartheta)\mu}\langle s,g\rangle = \delta_{ps}\sum_{\varrho=1}^{m_\vartheta}\tau_{(\vartheta)\mu\varrho}(g)\,E^{(\vartheta)\gamma}_{p}\langle g\rangle \qquad \forall g\in G \qquad (6)$$

$$(\vartheta = 1,2,\dots,\ell\ ;\ \mu = 1,2,\dots,m_\vartheta,$$
$$p,s = 1,2,\dots,n\ ;\ \gamma = 1,2,\dots,z_p^{(\vartheta)}),$$

де $E^{(\vartheta)\gamma}_{p}\langle g\rangle$ - відомі вузлові вектори, $\tau_{(\vartheta)\mu\varrho}(g)$ ($\vartheta = 1,2,\dots,\ell$) - μ,ϱ-ий елемент матриці $\tau_{(\vartheta)}(g)$ m_ϑ- мірного зображення τ_ϑ, ℓ - число незвідних зображень τ_ϑ групи G.

Одержану систему векторів зручно упорядочити так:

$$\left\{\left\{\left\{\left\{E^{p\gamma}_{(\vartheta)\mu}\right\}_{\gamma=1}^{z_p^{(\vartheta)}}\right\}_{p=1}^{n}\right\}_{\mu=1}^{m_\vartheta}\right\}_{\vartheta=1}^{\ell}. \qquad (7)$$

Вектор $Z\in\Omega$ і матриця U, що наведені в базисі (7), далі будуть позначатися як $\tilde{Z}$ і $\tilde{U}$ відповідно.

У новому базисі рівняння (2) і (3) мають вигляд:

$$\tilde{A}_o\tilde{X}_o = \tilde{Y}\ , \qquad (8)$$

$$\tilde{A}\,\tilde{X} = \tilde{Y}\ . \qquad (9)$$

Відомо, що матриця $\tilde{A}_o$ є блочнодіагональною. Згідно з цим система (8) для породженого симетричного тіла S_o розпадається на серію незалежних підсистем малого порядку:

$$\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{o(\vartheta)\mu}\,\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{o} = \tilde{Y}^{(\vartheta)\mu} \qquad (10)$$

$$(\vartheta = 1,2,\dots,\ell)\ .$$

На переході від (8) до (10) базується відомий ефективний алгоритм статичного розрахунку симетричних тіл.

Для квазісиметричних об'єктів вдалось отримати узагальнення розв'язувальних рівнянь (10) і вказаного алгоритму. Виявляється, що з точністю до малих другого порядку шукані підвектори $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}$ знаходяться з рівнянь:

$$\tilde{X}^{(\vartheta)\mu} = \tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{o} + \varepsilon\,\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{1} \qquad (11)$$

$$(\vartheta = 1,2,\dots,\ell\ ;\ \mu = 1,2,\dots,m_\vartheta),$$

де підвектори $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{0}$ і $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{1}$, обумовлені квазісиметрією, обчислюють з рівнянь:

$$\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta)\mu}\,\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{0} = \tilde{Y}^{(\vartheta)\mu}, \qquad (12)$$

$$\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta)\mu}\,\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{1} = -\sum_{\vartheta_0=1}^{\ell}\sum_{\mu_0=1}^{m_{\vartheta_0}}{}^{*}\,\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta_0)\mu_0}\,\tilde{X}^{(\vartheta_0)\mu_0}_{0}. \qquad (13)$$

Символ * після суми означає, що при підсумовуванні опускаються доданки, які відповідають індексам $\vartheta_0 = \vartheta$ і $\mu_0 = \mu$.

На виразах (11) - (13) базується запропонований каркас методики дискретного дослідження статики квазісиметричних тіл. Він складається з восьми основних этапів.

Етап 1. Виділення породженої системи S_0 з квазісиметричної конструкції S. Аналіз симетричних властивостей конструкції S_0 визначення її групи симетрії G і введення інваріантної системи відліку.

Етап 2. Вибір сітки для S_0, і нумерація вузлів. У випадку необхідності - деформація сітки для тіла S.

Етап 3. Побудова вектора $\tilde{Y}$. Визначення ненульових підвекторів $\tilde{Y}^{(\vartheta)\mu}$.

Етап 4. Побудова блоків $\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta)\mu}$ і $\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta_0)\mu_0}$ ($\vartheta, \vartheta_0 = 1,2,\ldots, \ell$, $\mu = 1,2,\ldots, m_\vartheta$; $\mu_0 = 1,2,\ldots, m_{\vartheta_0}$).

Етап 5. Обчислення підвекторів $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{0}$ з рівнянь (12).

Етап 6. Обчислення підвекторів $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{1}$ з рівнянь (13).

Етап 7. Суперпозиція підвекторів $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{0}$ і $\tilde{X}^{(\vartheta)\mu}_{1}$ на основі рівняння (11).

Етап 8. Повернення до вихідного базису.

Ефективність запропонованої методики визначається тим, що всі підсистеми (12) і (13) вирішуються незалежно одна від одної, у той час, як загальне число їх рівнянь не перевищує порядку вихідної системи (10).

Каркас методики допускає додаткові дослідження змісту етапу 4, тому що апарат аналітичної побудови блоків $\tilde{A}^{(\vartheta)\mu}_{(\vartheta_0)\mu_0}$, що розроблено для симетричних об'єктів, у випадку квазісиметрії не може бути використаний. Відповідний аналіз виконано у розділах 3 і 4.

Розділ третій присвячений питанню про побудову розв'язувальних рівнянь в симетризованій формі. Це питання заслуговує самостійного дослідження, оскільки надана форма не є канонічна і процедура її побудови не з'являється стандартною.

Канонічна система рівнянь $\hat{A}\hat{X}=\hat{Y}$ відома, до того ж вектори переміщень $\hat{X}$ і навантажень $\hat{Y}$ мають таку структуру:

$$\hat{Z}=\left[\hat{Z}\langle s\rangle\right]_{s=1}^{n}, \qquad \hat{Z}\langle s\rangle=\left[\hat{Z}\langle g,s\rangle\right]_{g\in\Phi_s^e},$$

$$\hat{Z}\langle g,s\rangle=\left[\hat{Z}\langle t,g,s\rangle\right]_{t=1}^{n_s}. \qquad (14)$$

Тут $\hat{Z}\langle s\rangle$ та $\hat{Z}\langle g,s\rangle$ - підвектори, що відповідають сукупності вузлів, які еквівалентні вузлу λ_s основної комірки і конкретному вузлу $g\lambda_s$ цієї сукупності, Φ_s^e - множина перетворень симетрії, що нумерує елементарні комірки, за якими закріплені розраховувачем вузли $g\lambda_s$. Канонічна форма відрізняється від симетризованої тим, що у векторах першої з них не повторюються підвектори, які відповідають одному й тому ж вузлу.

У зв'язку з (14) матрицям $\hat{U}=\hat{A}$, $\hat{A}_0$, $\hat{A}_1$ канонічної системи методу переміщень природно приписувати аналогічну блочну структуру:

$$\hat{U}=\left[\hat{U}\langle p,s\rangle\right]_{p,s=1}^{n}, \qquad \hat{U}\langle p,s\rangle=\left[\hat{U}\langle g',p,g,s\rangle\right]_{g'\in\Phi_p^e,\,g\in\Phi_s^e},$$

$$\hat{U}\langle g',p,g,s\rangle=\left[\hat{U}\langle q,g',p,t,g,s\rangle\right]_{q,t=1}^{n_p,n_s}. \qquad (15)$$

Перехід від канонічної форми запису розв'язувальних рівнянь до симетризованої взагалі не однозначний. Це затруднення може бути обійденим, якщо умовитися, що при укладенні тих рівнянь (2) або (3), які відповідають комірці Sg', еквівалентні λ_s вузли ($s=1,2,\dots,n$) закріплюються за комірками Sg ($g\in\Phi_s g'=g'\Phi_s^e$) і що

$$U\langle p,g',s,g\rangle=0 \qquad \forall g\notin\Phi_s^{g'},\quad U=A,A_0,A_1. \qquad (16)$$

Відповідно до цієї умови в симетризованій матриці залишається визначити тільки ненульові блоки $\tilde{U}\langle p,g',s,g\rangle$ при $g \in \Phi_s^{g'}$. Для цього використовується рівнання

$$U\langle p,g',s,g\rangle = F^{-1}(h_0')\,\hat{U}\langle g'h_0', p, gh_0, s\rangle\,F(h_0) \qquad (17)$$

$$(g \in \Phi_s^{g'}),$$

де перетворення $h_0' \in G_p$ і $h_0 \in G_s$ мають бути обраними таким чином, що $g'h_0' \in \Phi_p^e$ і $gh_0 \in \Phi_s^e$.

На базі викладених результатів був розроблений алгоритм побудови розв'язувальних рівнянь в симетризованій формі.

У розділі четвертому вивчається фактична побудова незалежних підсистем розв`язувальних рівнянь для квазісиметричних конструкцій. Таке дослідження уявляє собою аналіз заключної частини етапу 4 каркасної методики розрахунку.

Шукані співвідношення знайдені у наступному вигляді:

$$\tilde{Y}^{(\vartheta)\mu}\langle\gamma,\rho\rangle = \frac{m_\vartheta}{m}\sum_{g\in G}\sum_{\varrho=1}^{m_\vartheta}\tau_{(\vartheta)\mu\varrho}(g)\left(Y\langle p,g\rangle, E_p^{(\vartheta)\gamma}\langle\varrho\rangle\right), \qquad (18)$$

$$\tilde{U}_{(\varepsilon)\varrho s\varphi}^{(\vartheta)\mu\rho\gamma} = \frac{m_\vartheta}{m}\sum_{g',g\in G}\sum_{\varrho'=1}^{m_\varepsilon}\sum_{\mu'=1}^{m_\vartheta}\tau_{(\varepsilon)\varrho\varrho'}(g)\,\tau_{(\vartheta)\mu\mu'}(g') \times$$

$$\times\left(U\langle p,g',s,g\rangle E_s^{(\varepsilon)\varphi}\langle\varrho\rangle, E_p^{(\vartheta)\gamma}\langle\mu'\rangle\right) \qquad (19)$$

$$U = A, A_0, A_1 .$$

Незважаючи на громіздкий вигляд ці вирази у кожному конкретному випадку квазісиметрії є досить ефективними, тому що відхилення від випадку строгої симетрії, як правило, стосується лише деяких складових, що приводить до значних спрощень.

Показано також, що у випадку строгої симетрії формули (18) і (19) переходять у відповідні вирази, які були раніше отримані Р Л.Буришкіним,

В п`ятому розділі наводяться результати розрахунку впливу квазісиметрії на напружено - деформований стан опорної конструкції труби висотою 102 м (рис.1). Остання проектувалась Укрдіпро-

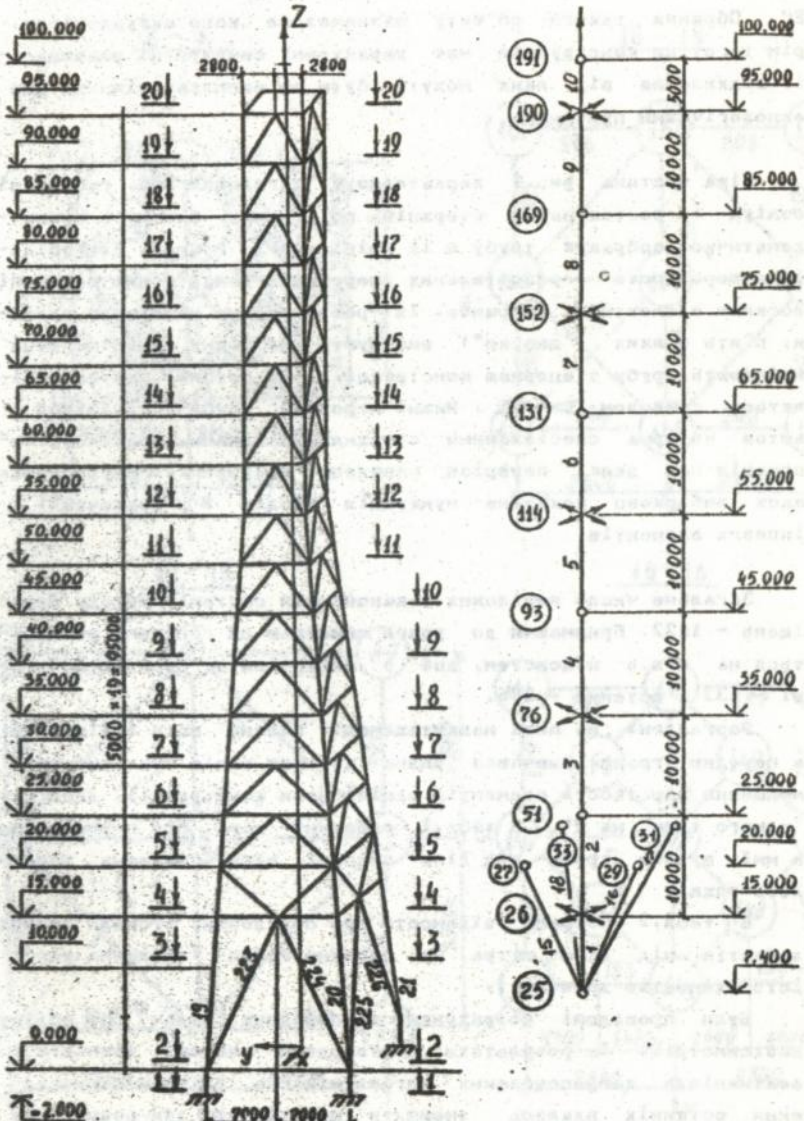
Z
2800
2800
100.000
95.000
90.000
85.000
80.000
75.000
70.000
65.000
60.000
55.000
50.000
45.000
40.000
35.000
30.000
25.000
20.000
15.000
10.000
0.000
-2.000
5000 × 19 = 95000
7000
7000
191
190
169
152
131
114
93
76
51
33
31
27
29
26
25
5000
10000
7.400

Рис. I

проектстальконструкцією (м.Київ) для котельної, що будуватиметься у м.Чорнобилі з метою забезпечення робіт по консервації АЕС. Обрання такого об'єкту визначалося його актуальністю. Крім того, ця конструкція має характерні симетричні властивості, відхилення від яких можуть бути за експлуатаційними або технологічними причинами.

Ліва частина рис.1 характеризує загальний вид, габаритні розміри і розташування стержнів по гранях башти, а права - схематично зображує трубу й її кріплення до граней. Для збільшення жорсткості горизонтальних перерізів деякі з них посилені плоскими елементами стержнів. Їх розташування відмічено вузлами, п'ять з яких ("павуки") виконують ще одну функцію: вони скріплюють трубу з опорною конструкцією. На схемі павуки виділяються символом ><. Нижні перерізи труби з'єднаються з баштою чотирма спеціальними стержнями - тяхами. Додаткова інформація про деякі перерізи наведена на рис.2. На рисунках також вибірково показана нумерація вузлів (у крючочках) і кінцевих елементів.

Загальне число невідомих в канонічній системі методу переміщень - 1122. Приймаючи до уваги симетрію ця система розпадається на п'ять підсистем, дві з яких мають порядок 143, ще дві - 132 і остання - 296.

Розглядені два види навантаження: власна вага і дія вітра на передню грань. Вивчався вплив кількох типів квазісиметрії: зменшення жорсткості елементів однієї ноги конструкції, двох ніг і одного тяха на 5%. В табл.1 наведені дані про переміщення (в мм) вузлів труби під дією власної ваги (зменшена жорсткість тяха).

В табл.2 зібрані відомості про повздовжні зусилля деяких елементів під дією вітра на передню грань (зменшена жорсткість елементів двох ніг).

Були проведені розрахунки відповідних задач без обліку квазісиметрії. Їх результати підтвердили високу точність і ефективність запропонованих алгоритмів. За рахунок запровадження останніх вдалось зменшити необхідного для розрахунку машинного часу більш, ніж у три рази.

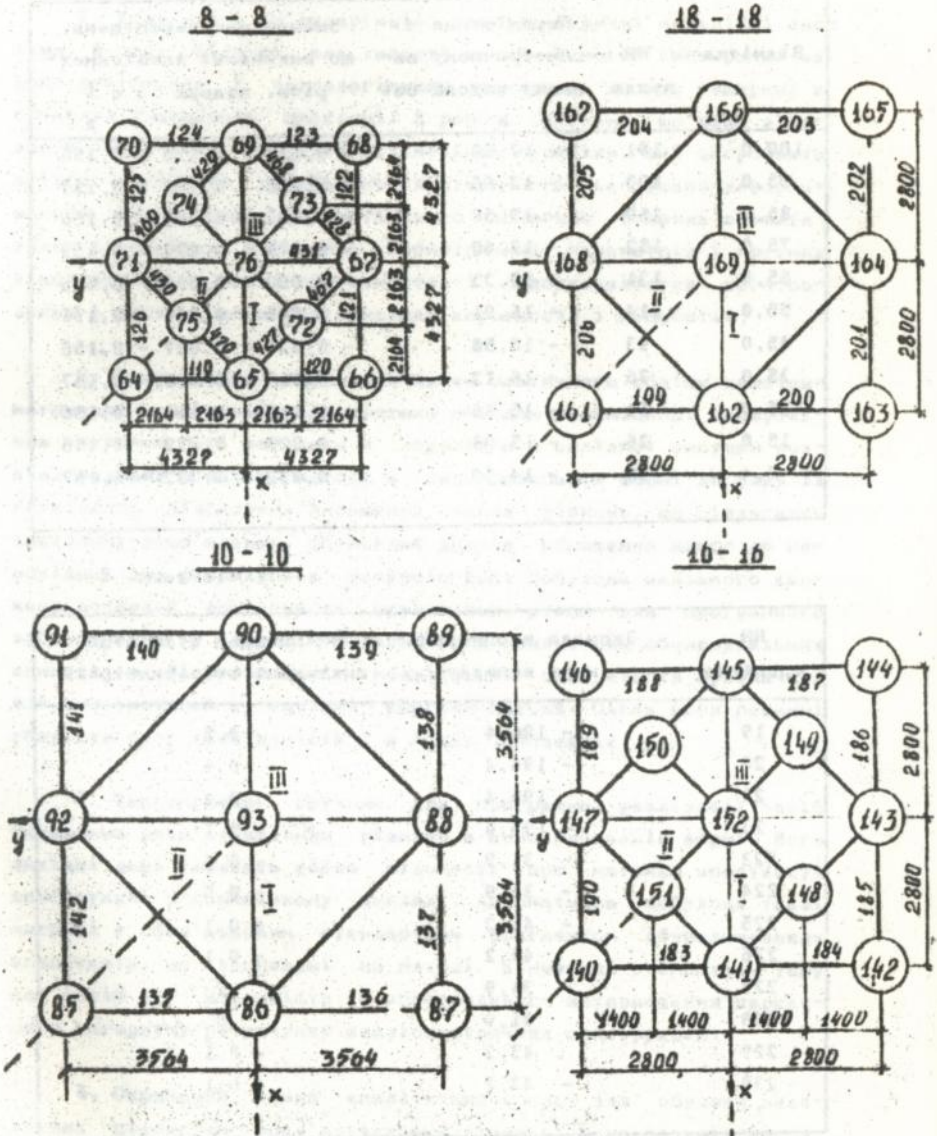
8 - 8
18 - 18
10 - 10
16 - 16
70
69
68
74
73
71
76
67
75
72
64
65
66
124
123
125
122
121
120
119
2164
2163
4327
431
430
427
429
468
469
428
467
470
167
166
165
168
169
164
161
162
163
204
203
205
202
206
201
199
200
2800
91
90
89
92
93
88
85
86
87
140
139
141
138
142
137
136
3564
146
145
144
150
149
147
152
143
151
148
140
141
142
188
187
189
186
190
185
183
184
1400
x
y

Рис. 2

Таблиця 1

Відмітка	NN вузла	Переміщення в симетричному випадку вздовж осі z	Змінювання переміщень, що викликані квазісиметрією, вздовж осі x	y	z
100,0	191	- 17,69	- 0,116	0,116	- 0,156
95,0	190	- 17,66	- 0,108	0,108	- 0,157
85,0	169	- 17,58	- 0,092	0,092	- 0,156
75,0	152	- 17,40	- 0,076	0,076	- 0,156
65,0	131	- 17,23	- 0,060	0,060	- 0,156
55,0	114	- 16,91	- 0,045	0,045	- 0,156
45,0	93	- 16,58	- 0,027	0,027	- 0,156
35,0	76	- 16,12	0,016	- 0,016	- 0,157
25,0	51	- 15,66	0,110	- 0,110	- 0,156
15,0	26	- 15,05	0,229	- 0,229	- 0,156
7,4	25	- 14,59	0,332	- 0,332	- 0,157

Таблиця 2

NN елемента	Зусилля в симетричному випадку	Змінювання зусиль, що викликані квазісиметрією
19	- 196,4	0,5
20	- 196,4	0,5
21	196,4	0,1
23	196,4	0,1
223	- 31,9	- 0,5
224	- 31,9	- 0,5
225	- 43,2	- 0,1
226	43,2	- 0,1
227	31,9	0
228	31,9	0
229	43,2	- 0,1
230	- 43,2	- 0,1

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Розглядені в дисертації квазісиметричні механічні системи, в яких фізичні властивості не є строго симетричні за конструктивними і технологічними причинами, досить поширені в сучасній інженерній практиці. В роботі показано, що вони з'являють новий клас об'єктів будівельної механіки, які допускають суттєве спрощення дослідження їх статичного напружено-деформованого стану. Вивчення останнього дозволяє зокрема оцінити вплив відповідних відхилень геометричних параметрів і пружних властивостей, а також неточностей і недосконалостей виготовлення і монтажу на характеристики жорсткості і міцності.

2. Розроблений каркас методики статичного обліку квазісиметричних конструкцій дискретним методом переміщень. Центральною частиною цієї методики є перехід від вихідної системи розв'язувальних рівнянь методу в симетризованій формі до ряду її незалежних підсистем. Зменшення числа рівнянь, що підлягають числовому розв'язанню, обумовлює значне пониження вимог до необхідних для розрахунків ресурсів ЕОМ. Побудова вказаного каркасу дозволяє реалізувати окремі його етапи для програмного забезпечення у формі, придатної для конкретних обчислювальних комплексів. Запропоновані модифікації цих етапів призначені для використання у системі програм ПАРСЕК. Однак вони повинні зберігти свою ефективність і в інших комплексах.

3. Запропонований інструментальний для програмної реалізації засіб укладення розв'язувальних рівнянь в симетризованій формі. Його вихідні дані уявляють собою відомості про матрицю жорсткості конструкції у канонічному вигляді. Автоматична побудова такої матриці є обов'язковим стандартним фрагментом обчислювальних комплексів, що засновані на методі кінцевих елементів. Тому цей засіб дає можливість безпосереднього використання каркасного алгоритму розрахунку квазісиметричних конструкцій.

4. Отриманий новий аналітичний апарат для побудови незалежних підсистем розв'язувальних рівнянь. Його запровадження забезпечує суттєвий виграш часу і пам'яті обчислювальних засобів, необхідних для формування і вирішення таких підсистем.

ІПМВ ім. В. Стефаника
АН України

Даний апарат узагальнює відомі формули для діагональних блоків матриць підсистем розв'язувальних рівнянь строго симетричних конструкцій, що не можуть бути безпосередньо використані у випадку, що розглядається.

5. Проведений аналіз впливу квазісиметрії на напружено-деформований стан опорної конструкції труби котельної, що будується у Чорнобилі з метою забезпечення робіт по консервації АЕС. Проілюстрована ефективність запропонованих методик і алгоритмів, що їх реалізують. Результати аналіза показують, що конструкції подібного рода досить стійкі відносно різних квазісиметричних відхилень.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Богданов Н.Н., Бреднева В.П., Бурмшкин М.Л. К проблеме упрощения исследований задач линейной механики симметричных систем.-Киев: Деп. в ГНТБ Украины, N 1187-Ук 93, 22.06.1993. Бл.№9.

2. Богданов Н.Н. К статическому расчету квазисимметричных конструкций дискретным методом перемещений. - Киев: Деп. в ГНТБ Украины, N 1136-Ук 93,10.06.1993. Бл.№9(263) 1993.

3. Богданов Н.Н., Бурмшкин М.Л., Галактионов Е.П., Златина И.Н. Новая модификация дискретного метода перемещений в стационарных задачах механики симметричных тел. Препринт ФТИ им. А.Ф.Иоффе Российской Академии наук, N 1614, Санкт-Петербург:1993.- 60 с.

Подп.к печати 5.05.94г. Формат 60x84 I/I6.
Об"ем I,0п.л. 0,7уч.изд.л. Заказ № 397. Тираж 100 экз.
Гортипография Одесского управления по печати,цех№3.
Ленина 49.

457527

Ав 30.065