Міністерство освіти України
Київський інженерно-будівельний інститут

На правах рукопису

ЧЕВЕРДА Петро Павлович

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ОБОЛОНОК НА ОСНОВІ МЕТОДУ РЕДУКЦІЇ БАЗИСУ

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

Київ -1993

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки та в Науково-дослідному інституті будівельної механіки Міністерства освіти України при Київському інженерно-будівельному інституті.

Науковий керівник - доктор технічних наук,
Є.О.Гоцуляк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
М.М.Крюков,
кандидат технічних наук,
В.Г.Корбач.

Провідна організація - Інститут нових фізичних та прикладних проблем АН України

Захист дисертації відбудеться "19" березня 1993 р. в 13 годин на засіданні спеціалізованої ради К 068.05.04 Київського інженерно-будівельного інституту (252037, м. Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31) в залі засідань ради інституту.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського інженерно-будівельного інституту.

Автореферат відправлено "18" лютого 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
к.т.н., доцент Г.Й.Мельниченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тонкостінні просторові конструкції знайшли широке використання в несучих элементах конструкцій в будівництві, машинобудуванні та в інших галузях сучасної техніки. Для забезпечення їх міцності, надійності та низької матеріалоємкості на стадії проектування потрібно проводити з достатньою точністю їх розрахунок на дію динамічного навантаження. Це викликано тим, що під час эксплуатації в елементах конструкції мають місце динамічні навантаження, які можуть викликати втрату стійкості, супроводжувану виникненням прогинів, які в декілька разів перевищують товщину оболонки. Тому уміння дати оцінку поведінці оболонок при динамічному навантаженні зумовлює актуальність роботи.

Метою дисертаційної роботи є створення на основі комплексного поєднання класичних методів будівельної механіки та методів криволінійних сіток і редукції базису методики розрахунку задач стійкості складних оболонок, які мають отвори чи підкріплені ребрами при довільному динамічному навантаженні та пакету прикладних програм, який дозволяє виконувати розрахунки для широкого кола практичних задач.

Науковою новизною роботи є розробка на основі синтезу методів криволінійних сіток і редукції базису методики чисельного дослідження динамічних процесів в пружних оболонках під дією динамічного навантаження як в докритичному, так і в критичному стані, та виявлення явища самоорганізації форми руху оболонки, що може служити критерієм динамічної втрати її стійкості.

Практична цінність. Дисертаційна робота виконана у відповідності з загальним планом досліджень кафедри будівельної механіки та Науково-дослідного інституту будівельної механіки при Київському інженерно-будівельному інституті. Методика та пакет прикладних програм можуть бути використані при проведенні досліджень стійкості оболонок складної форми під дією динамічного навантаження. Виконано розрахунок реальної конструкції - оболонки вакумної камери токамаку під дією електромагнітного навантаження, що виникає в момент зриву струму в плазмі.

Результати досліджень можуть використовуватися при виконанні проектних робіт по конструюванню тонких оболонкових конструкцій в будівництві, машинобудуванні та інших галузях техніки.

Апробація роботи. Основні результати доповідались на 52-й та 53-й науково-технічних конференціях Київського інженерно-будівельного інституту.

Публікації. Основні положення роботи та результати досліджень стійкості оболонок опубліковані в трьох друкованих роботах.

Об'єм роботи. Дисертаційна робота включає в себе вступ, 3 розділи, висновки, список використаної літератури з 167 найменувань та складається з 110 сторінок машинописного тексту, 41 малюнка, 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Теорія розрахунку оболонкових систем при динамічному навантаженні на протязі останніх десятиліть одержала значний розвиток. Великий внесок в розвиток задач динаміки зробили вчені М.М. Боголюбов, В.В. Болотін, А.С. Вольмір, Г.Ю. Джанелідзе, М.М. Крилов, С.П. Тимошенко та інші. Теорія і методи розрахунку нелінійних коливань тонких пластин і оболонок надалі розвинуті в роботах В.А.Агамірова, А.А.Алумяе, В.А.Баженова, Е.І. Григолюка, Я.М.Григоренка, В.І. Гуляєва, Є.С. Дехтярюка, В.А. Кармішина, В.А.Крисько, М.М. Крюкова, Г.В. Мішенкова, Л.І. Срубщика, Стефенса, Хуана. У ряді наукових праць приведені теоретичні та експериментальні дані дослідження стійкості нескладних пологих оболонок при динамічному навантаженні. Зокрема в роботах А.С.Вольміра, І.Я. Аміро, Б.А. Гордієнко, Р.П. Дідика, С.П. Тимошенко, C.C. Chao, I.S. Lin, V.K. Thompsona та інших вчених розглянута задача стійкості сферичних та циліндричних оболонок. Результати дослідження стійкості циліндричних оболонок при динамічному навантаженні з точки зору загальної стійкості руху наведені в роботах Е.І. Григолюка, А.І. Сребовського, А.В. Очнєва, Л.А. Толоконнікова, Біника, Фена, Лекмена та інших.

Проведений огляд робіт з питань стійкості оболонок при динамічному навантаженні свідчить про те, що існуючі алгоритми дозволяють проводити розрахунок простих непологих оболонок. Використання їх для дослідження стійкості більш складних чи непологих оболонок неможливе взагалі або потребує значних затрат машинного часу. Дослідження стійкості тонких пластин і оболонок при дії динамічного навантаження виконано на основі геометрично нелінійної теорії. Для дослідження режимів коливань, що не установились, сформульована континуальна модель, яка представляє собою систему нелінійних диференційних рівнянь в частинних похідних. Принциповим при розв'зку таких задач є перехід до дискретної динамічної моделі. Дискретизація вихідних диференційных рівнянь, які описують рух оболонки, здійснюється за допомогою методу криволінійних сіток. Беручи до уваги, що система рівнянь задач динаміки має велике число невідомих, для зменшення розмірності системи звичайних диференційних рівнянь, які одержані в результаті дискретизації вихідних диференційних рівнянь, в роботі використовується модифікований метод Бубнова-Гальоркіна. Проектування нелінійного оператора здійснюється за схемою Папковича. За базисні вектори при вирішенні нелінійних задач динамічної стійкості приймаються лінійне рішення задачі статики від заданого навантаження та певна кількість лінійних біфуркаційних форм втрати стійкості або форм власних коливань.

Диференційне рівняння руху елемента оболонки, яке записане на основі теорії тонких оболонок з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Лява, має вигляд

$$-m\sqrt{a}\,\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2}+\frac{\partial(\sqrt{a}\,\vec{T}^{\alpha})}{\partial x^{\alpha}}+\sqrt{a}\,\vec{q}(t)=0\quad(\alpha=1,2),\tag{1}$$

де $\vec{T}^1$, $\vec{T}^2$ - контраваріантні вектори внутрішніх зусиль ($\vec{T}^1=T^{11}\vec{e}_1+T^{12}\vec{e}_2+T^{13}\vec{e}_3$; $\vec{T}^2=T^{21}\vec{e}_1+T^{22}\vec{e}_2+T^{23}\vec{e}_3$); $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ - вектори основного локального базису системи криволінійних координат x^1, x^2 ($\vec{e}_3=[\vec{e}_1,\vec{e}_2]/\sqrt{a}$) ; m - маса елемента оболонки; a - фундаментальний визначник метричного тензора.

Співвідношення для перерізуючих зусиль $T^{\alpha 3}$ визначаються з умови дорівнювання нулю головного моменту внутрішніх зусиль і моментів, що діють на елемент оболонки

$$\frac{\partial\sqrt{a}\,M^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}}+[\vec{e}_{\alpha},\vec{T}^{\alpha}]\sqrt{a}=0,\tag{2}$$

де $\vec{M}^{\alpha}=C_{\beta\gamma}M^{\alpha\beta}\vec{e}^{\gamma}$ - вектор внутрішніх моментів; $C_{\beta\gamma}$ -дискримінантний тензор поверхні.

Контраваріантні складові тензорів мембранних $T^{\alpha\beta}$ і згинних $M^{\alpha\beta}$ зусиль виражаються через коваріантні компоненти тензорів мембранних $\varepsilon_{\alpha\beta}$ і згинних $\mu_{\alpha\beta}$ деформацій співвідношеннями, що витікають із закону стану теорії пружності

$$T^{\alpha\beta}=\frac{Eh}{1-\nu^2}\,\varepsilon_{\gamma\omega}\left[\nu a^{\alpha\beta}a^{\gamma\omega}+(1-\nu)\,a^{\alpha\gamma}a^{\beta\omega}\right];$$

$$M^{\alpha\beta} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \mu_{\gamma\omega} [\nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\omega} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\omega}], \tag{3}$$

де h - товщина оболонки; E - модуль пружності Юнга; ν - коефіцієнт Пуасона.

Компоненти деформацій $\varepsilon_{\alpha\beta}$ та $\mu_{\alpha\beta}$ виражаються через вектор переміщень $\vec{u} = u_s \vec{e}^{\,s}$ відповідно з формулами

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \Big(\frac{\partial \vec{u}}{\partial x^\alpha} \vec{e}_\beta + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x^\beta} \vec{e}_\alpha + \vartheta_\alpha \vartheta_\beta \Big);$$

$$\mu_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \Big(\frac{1}{c^{\alpha\gamma}} \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial x^\beta} \vec{e}^{\,\gamma} + \frac{1}{c^{\beta\omega}} \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial x^\alpha} \vec{e}^{\,\omega} \Big), \tag{4}$$

де $\vec{\Omega} = c^{\alpha\beta} \vartheta_\alpha \vec{e}_\beta$ - вектор кута повороту нормалі серединної поверхні; $\vartheta_\alpha = (\partial u / \partial x^\alpha) \cdot \vec{e}_3$.

Дискретизація вихідних диференційних рівнянь в частинних похідних виконана за допомогою методу криволінійних сіток, запропонованого Є.О.Гоцуляком, який представляє собою модифікацію методу кінцевих різниць, що дозволяє врахувати вплив жорстких зміщень на похибку скінченно-різнецевої апроксимації коваріантних похідних складових вектор-функцій. В результаті дискретизації рівняння (1) одержана система звичайних рівнянь руху, яка має вигляд

$$\begin{aligned} M\ddot{U} + A\cdot U + B\cdot U + C\cdot(U+U_0)\cdot(U+U_0) - C_0\cdot U_0\cdot U_0 \; + \\ + D\cdot U\cdot(U+U_0) + F\cdot(U+U_0)\cdot(U+U_0)\cdot(U+U_0) \; - \\ - F\cdot U_0\cdot U_0\cdot(U+U_0) + R(U+U_0) + Q = 0, \end{aligned} \tag{5}$$

де M - матриця мас; $\ddot{U}$ - вектор прискорення вузлів дискретної моделі; $A = \{a^{ij}\}$; $B = \{b^{ij}\}$ - мембранна та згинна лінійні матриці жорсткості; $C=\{c^{ijk}\}$ - масив коефіцієнтів білінійних форм, які породжені нелінійними членами мембранних деформацій; $D=\{d^{ijk}\}$; $F=\{f^{ijk\ell}\}$ - масиви коефіцієнтів, які відображають добуток лінійної та нелінійної частин зусиль на кут повороту локального базису поверхні; $U=\{u_i\}$ - вектор початкових переміщень; дія $(\cdot)$ означає згортання тензора відповідно правилу $A\cdot U=a^{ij}u_j$, $C\cdot U\cdot V=c^{ijk}u_i v_k$.

Вектор переміщень $\vec{U}$ у виразі (5) подамо, як суму двох векторів

$$U = V + Z \tag{6}$$

де V, Z - вектори, які одержані в результаті комбінації лінійних біфуркаційних форм стійкості та рішення від квадратичної нев'язки при умові дорівнювання нулю вектора нормальних зміщень відповідно. Вектор початкових переміщень задамо рівним $U_\circ = V_\circ$. При цьому будемо вважати, що вектор Z не викликає повороту локального базису поверхні оболонки, який знайдемо з рівняння

$$\bar{A}\cdot Z + \bar{C}\cdot(V+V_\circ)\cdot(V+V_\circ) - \bar{C}\cdot V_\circ\cdot V_\circ = 0, \tag{7}$$

де $Z=\begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ 0 \end{Bmatrix}$, $\bar{A}=\{\bar{A}^{ij}\}$, $\bar{A}^{ij}=A^{ij}$ при $i,j=1,2$, $A^{3j}=A^{i3}=0$, $A^{33}=E$,

$\bar{C}=\{\bar{c}^{ijk\ell}\}$, $\bar{c}^{ijk}=c^{ijk}$ при $i\neq 3$, $c^{3jk}=0$.

В результаті вирішення рівняння (7) відносно

$$Z = -\bar{A}^{-1}[\bar{C}\cdot(V+V_\circ)\cdot(V+V_\circ) - \bar{C}\cdot V_\circ\cdot V_\circ], \tag{8}$$

та підстановки (8) в (5), нехтуючи членом $M\ddot{Z}$, одержимо

$$M\ddot{V} + A\{V-\bar{A}^{-1}[\bar{C}\cdot(V+V_\circ)(V+V_\circ) - \bar{C}\cdot V_\circ\cdot V_\circ]\} + B\cdot C +$$
$$+ C\cdot(V+V_\circ)(V+V_\circ) - C\cdot V_\circ\cdot V_\circ + D\cdot\{V-\bar{A}^{-1}[C\cdot(V+V_\circ)(V+V_\circ) -$$
$$- \bar{C}\cdot V_\circ\cdot V_\circ]\}\cdot(V+V_\circ) + F\cdot(V+V_\circ)\cdot(V+V_\circ)\cdot(V+V_\circ) -$$

$$-F\cdot V_\circ\cdot V_\circ\cdot(V+V_\circ)+R(V+V_\circ)+Q=0. \tag{9}$$

Виконаємо пониження розмірності системи (9) шляхом проектування нелінійного оператора на координатні вектори, за які приймемо розв'язок лінійної задачі

$$(A+B)\cdot V_Q + Q = 0, \tag{10}$$

та нижчі власні вектори лінеарізованої задачі стійкості

$$(A+B)\cdot V + \mu_Q\cdot D\cdot V_Q\cdot V = 0. \tag{11}$$

Після підстановки шуканого розв'язку і початкового погину у вигляді розкладання по прийнятим базисним векторам

$$V = V_i\,\alpha^i = \hat{V}\cdot\alpha\ ,\quad V_\circ = V_i\,\alpha^i = \hat{V}\cdot\alpha_\circ\ , \tag{12}$$

та проектування системи рівнянь (9) на координатні вектори V з урахуванням позначень

$$\begin{aligned}
\widetilde{M} &= \hat{V}^T\cdot M\cdot\hat{V},\\
\widetilde{A} &= \hat{V}^T\cdot(A+B)\cdot\hat{V},\\
\widetilde{C} &= \hat{V}^T\cdot(C-A\cdot\bar{A}^{-1}\bar{C})\cdot\hat{V}\cdot\hat{V},\\
\widetilde{D} &= \hat{V}^T\cdot D\cdot\hat{V}\cdot\hat{V},\\
\widetilde{F} &= \hat{V}^T(F-D\cdot\bar{A}^{-1}\cdot\bar{C})\cdot\hat{V}\cdot\hat{V}\cdot\hat{V},\\
\widetilde{R} &= \hat{V}^T\cdot R\cdot\hat{V},\\
\widetilde{Q} &= \hat{V}^T\cdot Q,
\end{aligned} \tag{13}$$

одержимо систему звичайних диференційних рівнянь пониженої розмірності

$$\widetilde{M}\cdot\ddot{\alpha}+\widetilde{A}\cdot\alpha+\widetilde{C}\cdot(\alpha+\alpha_\circ)\cdot(\alpha+\alpha_\circ)-\widetilde{C}\cdot\alpha_\circ\cdot\alpha_\circ+\widetilde{D}\cdot\alpha\cdot(\alpha+\alpha_\circ)+$$

$$\widetilde{F}\cdot(\alpha+\alpha_\circ)\cdot(\alpha+\alpha_\circ)\cdot(\alpha+\alpha_\circ)-\widetilde{F}\cdot\alpha_\circ\cdot\alpha_\circ\cdot(\alpha+\alpha_\circ)+\widetilde{R}(\alpha+\alpha_\circ)+\widetilde{Q}=0. \tag{14}$$

Далі, вирішуючи систему рівнянь відносно α, шляхом підстановки (12) в (8) і (6), одержимо шуканий вектор переміщень дискретної моделі в будь-який момент часу. Інтегрування системи рівнянь (14) виконується за допомогою методу Рунге-Кутта.

2^*

Початкові недосконалості поверхні задаються в долях нормованої ($|W_{max}| = 1$) форми втрати стійкості при статичному навантаженні.

При оцінці явища втрати стійкості користуються так званим критерієм динамічної втрати стійкості конструкції. Ряд дослідників за критичне значення динамічного навантаження приймають таку її величину, при якій значення характерного прогину збільшується до величини, рівної товщині оболонки. Вважається, що при такій величині прогину приведене напруження в елементах конструкції приблизно дорівнює границі текучості матеріалу. Інші за критерій динамічної втрати стійкості приймають момент швидкого збільшення прогинів. Нагрузка, яка відповідає такому моменту, вважається критичною, а відповідний час- критичним часом. Тільки незначна кількість досліджень присвячена вивченню стійкості оболонок з позицій загальної теорії стійкості руху, означення якому дав А.М.Ляпунов. В даній роботі за критерій втрати стійкості при динамічному навантаженні приймається такий стан руху оболонки, коли коливання із хаотичних перетворюються в гармонічні з утворенням в оболонці значних прогинів. Такому стану відповідає критичне значення динамічного навантаження. В момент втрати стійкості відбувається самоорганізація форми руху, тобто протікає перекачка енергії деформації стиску в енергію згинної деформації, яка відповідає нижчій формі втрати стійкості. Це підтверджується тим, що жорсткість конструкції при втраті стійкості, коли навантаження досягає критичної величини, дорівнює нулю. Явище самоорганізації форми руху добре відоме для багатьох природніх та штучних систем, зокрема завдяки цьому явищу існує лазер. Наука, яка вивчає такі явища, що виникають в зв'язку з нестійкістю руху, називається синергетикою.

Розроблена методика розрахунку задач стійкості конструкцій під дією динамічного навантаження реалізована на ПЕОМ у вигляді комплексу програм, які написані на алгоритмічній мові високого рівня ФОРТРАН-77. Функціювання комплексу здійснюється під управлінням операційної системи MS DOS. Крім завантажувального модуля даного комплексу для створення виконавчого файлу необхідні модулі пакетів прикладних програм "МЕКРІС-2" та "РЕДБАЗ". Для ефективності і простоти користування пакетом прикладних програм по розрахунку задач динамічної стійкості розроблена меню-орієнтована діалогова система, яка дозволяє виконувати ввід даних у діалоговому та пакетному режимах, автоматизувати сам процес розрахунку задачі стійкості, а також візуалізувати результати розрахунків у вигляді схем деформацій, ліній рівнів зусиль та напружень , графіків руху конструкції на екрані дисплея.

За допомогою розробленого комплексу програм виконано рішення ряду задач стійкості оболонкових систем як тестового, так і прикладного характеру під дією миттєво прикладеного зовнішнього тиску.

На прикладі пологої кругової арки при якісній оцінці розрахунків було виявлене явище самоорганізації форми руху. За розрахункову модель арки приймалась смуга шириною 0,02 м, яка була виділена з циліндричної оболонки нескінченної довжини. За базисні вектори нелінійної задачі приймались лінійне рішення від зовнішнього навантаження w_q та чотири біфуркаційні форми втрати стійкості w_i (i=1,2,4,6), нормальні складові яких приведені на рис.1. На рис.2 приведені графіки руху вершини арки при докритичному та критичному значеннях навантаження. Аналіз результатів розрахунку показує, що при докритичних значеннях навантаження коливання арки мають хаотичний характер з незначною амплітудою прогину, а при досягненні критичної величини навантаження коливання перетворюють-

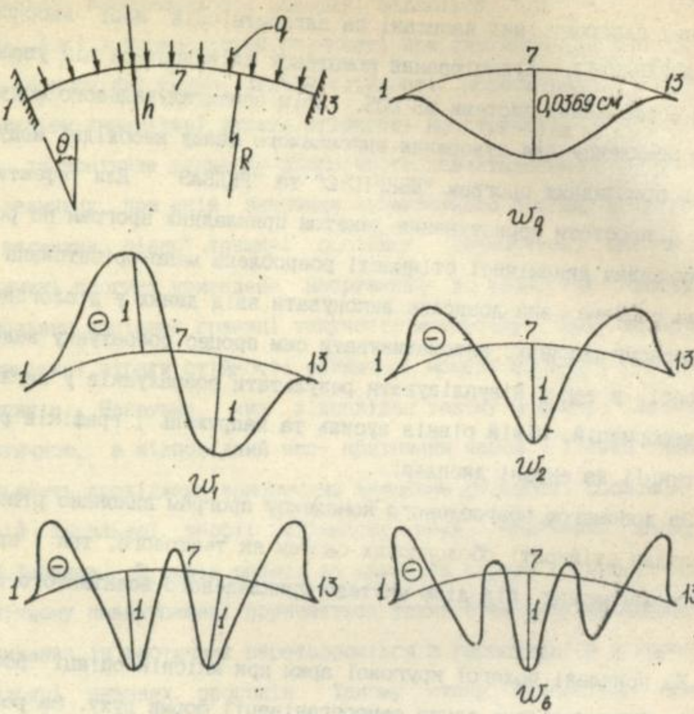

q
h
θ
R
1
7
13
0,0369 см
w_q
Θ
w_1
w_2
w_4
w_6

Рис. I

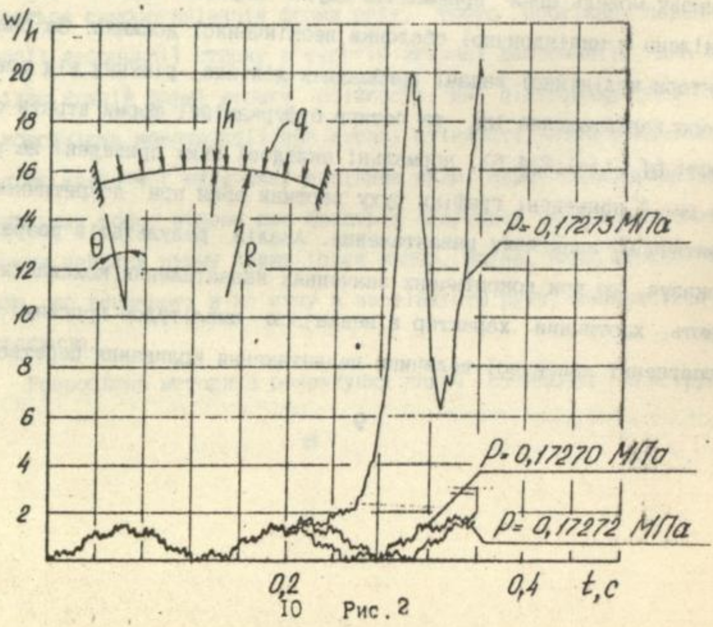

w/h
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
h
q
θ
R
p= 0,17273 МПа
p= 0,17270 МПа
p= 0,17272 МПа
0,2
0,4
t, c

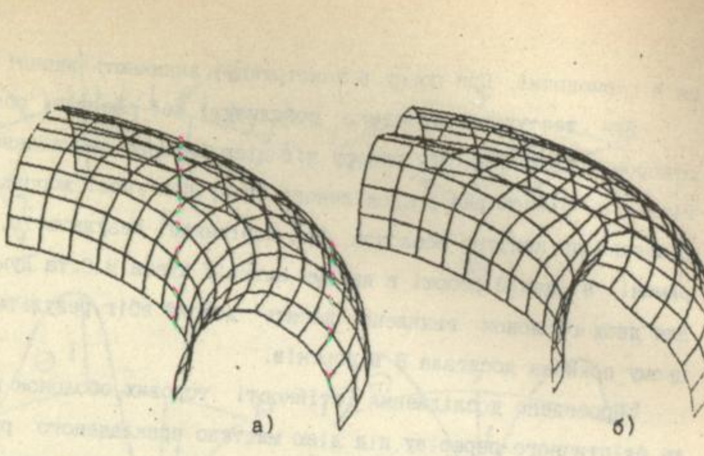
Рис. 2

ся в гармоничні. При цьому в конструкції виникають значні прогини.

Для тестування методики розглянуті дві сферичні оболонки з отвором в полюсі та без отвору під дією миттєво прикладеного зовнішнього рівномірно розподіленого тиску при умові жорсткого закріплення по контуру оболонок. При порівнянні результатів, які отримані в даній роботі з даними авторів Хуана Н.С.та Думіра П.С. для двох оболонок виявлено досить добрий збіг результатів, при цьому похибка досягала 8 відсотків.

Проведено дослідження стійкості торових оболонок кругового та еліптичного перерізу під дією миттєво прикладеного рівномірно розподіленого зовнішнього тиску. В зв'язку з тим, що форма навантаження та оболонка симетричні за розрахункову модель приймалася восьма частина оболонки, на яку наносилась скінченно-різнецева сітка. Дослідження показали, що з збільшенням динамічного навантаження деформативність оболонки кругового перерізу зростає, як це видно з рис.3 а,б, але явного скачку прогину не спостерігалось, тобто втрати стійкості не було.

При конструюванні торові оболонки, як правило, підкріпляють ребрами, завдяки чому загальна втрата стійкості оболонок при динамічному навантаженні не наступає. Тому в роботі розглянута задача місцевої стійкості тороїдальних панелей під дією динамічного навантаження. Дослідження виконувались для семи жорстко закріплених по контуру панелей для випадків, коли за розрахункову модель приймалась частина торової поверхні, яка розміщувалась в різних зонах гаусової кривизни в напрямку твірної тору. В результаті проведених досліджень зроблено висновок, що втрата стійкості панелі наступає в зоні позитивної гаусової кривизни, що підтверджує графік на рис.4, де криві 1,2 відображають рух оболонки при критичному та докритичному значеннях навантаження відповідно.



а) - деформація оболонки при P= 3,5 МПа;
б) - деформація оболонки при P= 5,5 МПа

Рис.3

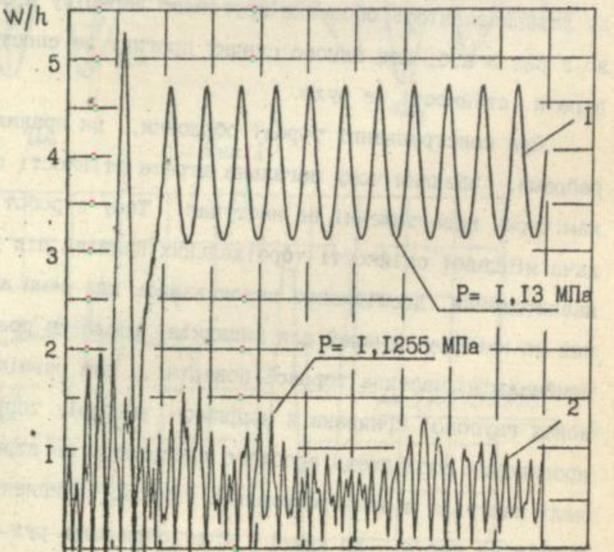


Рис. 4

Розглянута задача пружно-деформованого стану та стійкості торової оболонки вакумної камери токамаку IFT при дії електромагнітних сил, які виникають в момент зриву струму в плазмі. Розрахунок проводився за два етапи. На першому етапі обчислювались складові електромагнітних сил в кожному вузлі різницевої сітки. Далі проводилось дослідження статичної та динамічної стійкості при заданому навантаженні. По даним розрахунку задачі стійкості встановлено, що статична втрата стійкості оболонки відбувається при значних величинах навантаження, а динамічна втрата стійкості оболонки вакумної камери на інтервалі часу зриву струму в плазмі, який дорівнює $1{,}5\cdot10^{-3}$ сек., не наступає. Розроблена методика дозволила врахувати при розв'язку задачі отвори, ребра та технологічні патрубки, які моделювались як ребра. Розрахунок задачі дозволив встановити, що електромагнітні нагрузки значною мірою впливають на деформативність оболонки, в той же час напруження в конструкції не перевищують границі пропорційності.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи полягають в слідуючому:

1. На основі синтезу методів криволінійних сіток та редукції базису розроблена методика чисельного дослідження динамічної стійкості оболонок складної форми, які мають отвори або підкріплені ребрами.

2. Створено обчислювальний алгоритм та пакет прикладних програм для ПЕОМ, який забезпечує повну автоматизацію розрахунку задачі, обробку та видачу результатів у вигляді таблиць.

3. Розроблена меню-орієнтована діалогова система управління розрахунком задачі і виводу результатів на екран дисплея, яка дозволяє візуалізувати вихідну та деформовану дискретну модель

об'єкту, графіки коливань, лінії рівнів зусиль та напружень.

4. На прикладі пологої арки, сфери та тороїдальної панелі виявлено явище самоорганізації форми руху, суть якого полягає в тому, що коливання системи в момент втрати стійкості стають гармонічними, і яке може використовуватись як критерій втрати стійкості при динамічному навантаженні.

5. В результаті порівняння чисельних даних тестових задач з розрахунками інших авторів показана достовірність розробленої методики.

6. Виконано чисельне дослідження впливу коефіцієнта еліптичності торової оболонки на деформативність тора при миттєвому прикладенні рівномірно розподіленого зовнішнього тиску. Установлено, що при збільшенні коефіцієнта еліптичності перерізу прогини в оболонці зростають.

7. Вирішена задача стійкості реального об'єкту - установки по одержанню термоядерної реакції типу токамак під дією електромагнитних сил, які виникають в конструкції токамаку під час зриву струму в плазмі.

Основні результати роботи відображені в публікаціях:

1. Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В., Чеверда П.П. Устойчивость тороидальной оболочки эллиптического сечения при динамическом нагружении // Сопротивление материалов и теория сооружений. - 1991. -Вып.59. -С. 53-59.

2. Гоцуляк Е.А., Чеверда П.П. Устойчивость тороидальных оболочек эллиптического сечения при динамическом нагружении // Тез. докл. 52-й научно-практической конференции КИСИ. - Киев: КИСИ, 1992. - С.91-92.

3. Гоцуляк Е.А., Чеверда П.П. Прощелкивание тороидальной панели при динамическом нагружении // Тез. докл. 53-й научно-практической конференции КИСИ. - Киев: КИСИ, 1992. - С.92.

Підп. до друку 15.02.93 . Формат $60 \times 84^{1}/_{16}$.
Папір друк. № 3 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 0,93 .
Умовн. фарбо-відб. 1,10 . Обл.-вид. арк. 1,0 .
Тираж 100 . Зам. № 3464 . Безплатно.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

Бесплатно