

УДК 539.3

О.О. Лук'яненко., канд. техн. наук

О.В. Костіна, канд. техн. наук

І.Г. Гаран, асп.

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ЗМІННОЇ ТОВЩИНИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЇЇ СТІЙКОСТІ ПРИ ДІЇ КОМБІНОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Розроблена чисельна методика дослідження стійкості циліндричної оболонки з початковою недосконалістю форми при дії комбінованого навантаження. Початкові недосконалості оболонки моделюються у вигляді комбінацій форм втрати стійкості при дії осевого стиснення та поверхневого тиску різної амплітуди. Оцінений вплив початкових недосконалостей на критичне значення комбінованого навантаження. Визначені області стійкості циліндричної оболонки з регулярними недосконалостями.

В задачах стійкості циліндричної оболонки при окремій дії поверхневого тиску або осевого стиснення в багатьох випадках початкова недосконалість моделюється у вигляді відповідних форм втрати стійкості, бо така модель регулярних недосконалостей має значний вплив на стійкість оболонки. При дії комбінованого навантаження задача моделювання початкових недосконалостей оболонки є ще не до кінця дослідженою [1-3]. Тому актуальною є оцінка впливу різних моделей початкової недосконалості оболонки у вигляді форм втрати стійкості на критичне значення комбінованого навантаження.

В роботі розглядається циліндрична оболонка радіусом $R_{cp}=19.978$ м та висотою $H=17.88$ м. Товщина оболонки змінна по висоті через кожні 1.49 м і складає: 15,98; 14,75; 13,83; 11,66; 10,53; 9,33; 9,06; 7,86; 7,7; 7,83; 7,63; 7,83 (мм). Скінченноелементна модель оболонки формується в циліндричних координатах без урахування початкової недосконалості за допомогою сучасного обчислювального комплексу [4]. Поверхня оболонки моделюється плоскими трикутними елементами з відповідними до сталі Ст3 фізико-механічними характеристиками: $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$. У вузлах верхньої кромки моделі оболонки накладаються в'язі, що обмежують переміщення по радіусу та колу; у вузлах нижньої кромки обмежені переміщення по трьом циліндричним координатам (по радіусу, колу та твірній).

У зв'язку з періодичністю форм втрати стійкості оболонки для розрахунків була сформована скінченноелементна модель сегменту, центральний кут якого складає $2\pi/21$ рад. Модель містить 425 вузлів і 768

плоских трикутних елементів. У вузлах граничних твірних сегменту накладені додаткові в'язі, що враховують умови симетрії.

Початкова недосконалість моделюється у вигляді комбінацій форм втрати стійкості досконалої оболонки при дії поверхневого тиску та осьового стиснення (рис. 1, а-д): $[\gamma\psi_p : (1-\gamma)\psi_q]$, де γ – безрозмірний коефіцієнт, що приймає значення (0; 0,3; 0,5; 0,7; 1), ψ_p та ψ_q – вектори форм втрати стійкості досконалої оболонки при дії осьового стиснення та поверхневого тиску відповідно. Створена програма, в якій компоненти векторів форм втрати стійкості додаються до відповідних координат серединної поверхні досконалої оболонки. При цьому компоненти векторів форм втрати стійкості задаються з масштабними коефіцієнтами таким чином, щоб максимальна амплітуда початкової недосконалісті дорівнювала півтори мінімальної товщини стінки оболонки $\Delta_{\max} = 1,5t_{\min} = 1,5 \cdot 7,63 = 11,4$ мм.

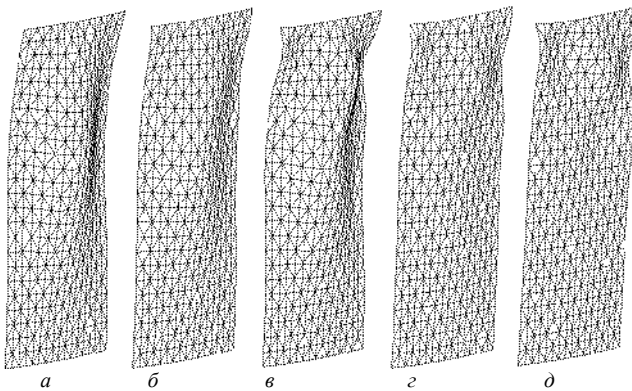


Рис. 1. Скінченноелементна модель сегменту оболонки з різними моделями початкової недосконалісті

Оцінка впливу моделі початкової недосконалісті оболонки на значення комбінованого навантаження при втраті стійкості виконується за допомогою методу покрокового навантаження при розв'язанні нелінійної задачі статyki. Комбіноване навантаження задається у вигляді $\beta[\alpha P_{кр}^0 : (1-\alpha)q_{кр}^0]$, де α – безрозмірний коефіцієнт, що приймає значення [0; 0,3; 0,5; 0,7; 1], β – безрозмірний параметр, який змінюється від 0 до 1. Критичні значення осьового стиснення $P_{кр}^0$ та поверхневого тиску $q_{кр}^0$ визначені при розв'язанні задачі стійкості досконалої оболонки і складають 430598 Н/м та 1230,4 Н/м² відповідно. На кожному кроці навантаження за допомогою методу Ньютон-Рафсона знаходяться розв'язки рівняння рівноваги до забезпечення умови

збіжності по зміні нев'язки навантаження та по роботі внутрішніх сил на приростах вузлових переміщень. В результаті отримані криві навантаження, форми деформування і відповідні напруження оболонки з заданими моделями початкової недосконалості (рис. 1, а-д) при дії комбінованого навантаження.

Представлені криві навантаження та форми деформування сегменту для комбінації навантаження $[0,5P_{кр}^0; 0,5q_{кр}^0]$ з початковою недосконалістю оболонки, яка моделюється у вигляді форми втрати стійкості досконалої оболонки при дії поверхневого тиску (рис. 2, а), комбінацій форм втрати стійкості досконалої оболонки при дії поверхневого тиску та осьового стиснення в пропорції $[0,5\psi_p; 0,5\psi_q]$ (рис. 2, б), форми втрати стійкості досконалої оболонки при дії осьового стиснення (рис. 2, в).

Втрата стійкості оболонки відбувається при навантаженні, що значно менше за критичне комбіноване навантаження досконалої оболонки. Більші деформації спостерігаються у верхніх елементах моделі оболонки, де стінка є тоншою.

Результати розрахунків визначення критичного комбінованого навантаження оболонки з різними моделями її початкової недосконалості зведені в табл. 1. Втрата стійкості відбувається при навантаженні $\beta^{гран} [\alpha P_{кр}^0; (1-\alpha)q_{кр}^0]$, де $\beta^{гран}$ – параметр критичного навантаження.

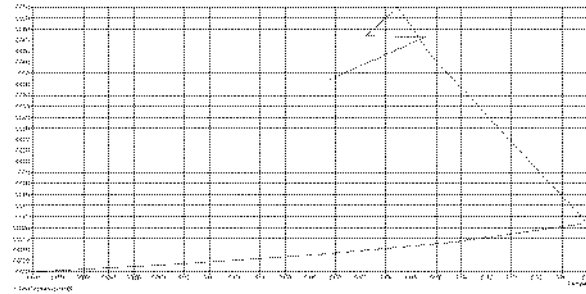
Таблиця 1

Коефіцієнт α	Параметр критичного навантаження $\beta^{гран}$ при моделюванні початкової недосконалості оболонки у вигляді форм втрати стійкості				
	поверхневий тиск	комбінація 0,3:0,7	комбінація 0,5:0,5	комбінація 0,7:0,3	осьове стиснення
0	0,4	0,492	0,598	0,5	0,821
0,3	0,25	0,25	0,25	0,25	0,243
0,5	0,25	0,25	0,259	0,25	0,25
0,7	0,3	0,3	0,278	0,3	0,268
1	0,4	0,35	0,3	0,35	0,275

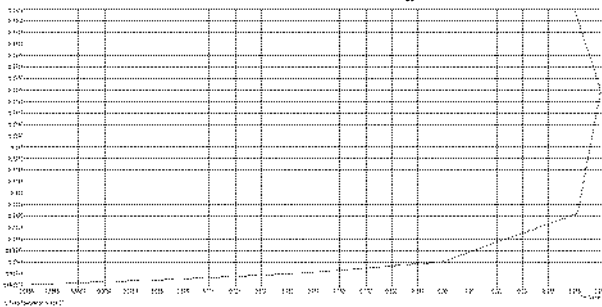
На рис. 3 представлена залежність параметра критичного навантаження $\beta^{гран}$ від коефіцієнта комбінованого навантаження α для різних моделей початкової недосконалості оболонки.

Відоме твердження про те, що при окремій дії поверхневого тиску або осьового стиснення на оболонку початкову недосконалість необхідно моделювати у вигляді форм втрати стійкості оболонки при дії відповідних навантажень, підтверджено в даній роботі. Видно, що при дії поверхневого тиску критичне навантаження зменшується на 60% для оболонки з

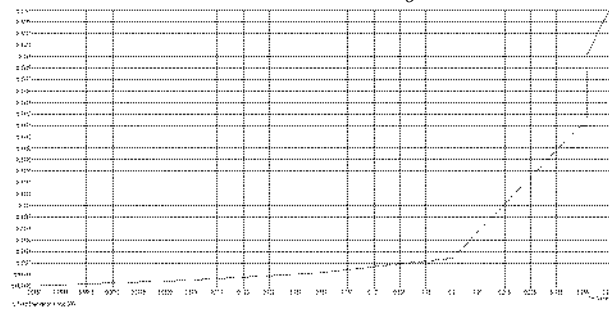
недосконалістю у вигляді форми втрати стійкості при дії поверхневого тиску, а модель недосконалістю у вигляді форми втрати стійкості при дії осьового стиснення зменшує критичне значення лише на 20%. Так само, при дії осьового стиснення на оболонку недосконалість у вигляді відповідної форми втрати стійкості зменшує критичне навантаження на 73%, для моделі недосконалістю у вигляді форми втрати стійкості при поверхневому тиску зменшує критичне навантаження на 60%.



а



б



в



Рис. 2. Криві навантаження та форми деформування при втраті стійкості сегмента недосконалої оболонки

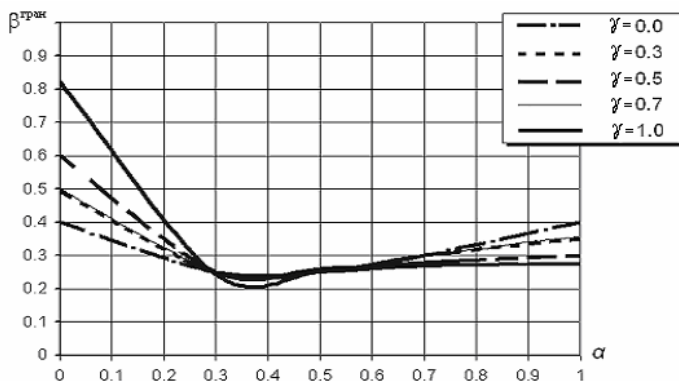


Рис. 3. Залежність параметра критичного навантаження $\beta^{\text{гран}}$ від коефіцієнта комбінованого навантаження α

Коли навантаження є сумісною дією поверхневого тиску та осьового стиснення вплив моделей недосконалостей не є однозначним. Так при дії комбінованого навантаження з коефіцієнтом $\alpha=(0\div 0.3)$ недосконалисть у вигляді форми втрати стійкості при дії поверхневого тиску впливає на критичне навантаження більше за інші моделі. При коефіцієнтах комбінованого навантаження $\alpha>(0.3\div 1)$ спостерігається більший за інші вплив моделі недосконалості у вигляді форми втрати стійкості оболонки при дії осьового стиснення. Моделі недосконалостей оболонки у вигляді комбінацій форм втрати стійкості менше впливають на критичне навантаження ніж моделі у вигляді форм втрати стійкості при окремій дії поверхневого тиску та осьового стиснення.

Для побудови області стійкості оболонки з регулярними недосконалостями при дії комбінованого навантаження визначені критичні сполучення значень осьового стиснення та поверхневого тиску для різних моделей початкової недосконалості. У табл. 2 наведені критичні значення комбінованого навантаження, які віднесені до критичних значень отриманих для досконалої оболонки.

На рис. 4 представлена діаграма областей стійкості оболонки при дії комбінованого навантаження. По осі ординат відкладене відношення критичного поверхневого тиску недосконалої оболонки до критичного поверхневого тиску досконалої оболонки. По осі абсцис - відношення критичного осьового стиснення недосконалої оболонки до критичного осьового стиснення досконалої оболонки.

Таблиця 2

Критичні значення комбінованого навантаження [$P_{кр}/P_{кр}^0; q_{кр}/q_{кр}^0$] при різних моделях недосконалості оболонки				
поверхневий тиск	комбінація [0,3;0,7]	комбінація [0,5;0,5]	комбінація [0,7;0,3]	осьове стиснення
[0; 0,4]	[0; 0,492]	[0; 0,598]	[0; 0,5]	[0; 0,821]
[0,075; 0,175]	[0,075; 0,175]	[0,075; 0,175]	[0,075; 0,175]	[0,073; 0,17]
[0,125; 0,125]	[0,125; 0,125]	[0,13; 0,13]	[0,125; 0,125]	[0,125; 0,125]
[0,21; 0,09]	[0,21; 0,09]	[0,195; 0,083]	[0,21; 0,09]	[0,188; 0,08]
[0,4; 0]	[0,35; 0]	[0,3; 0]	[0,35; 0]	[0,275; 0]

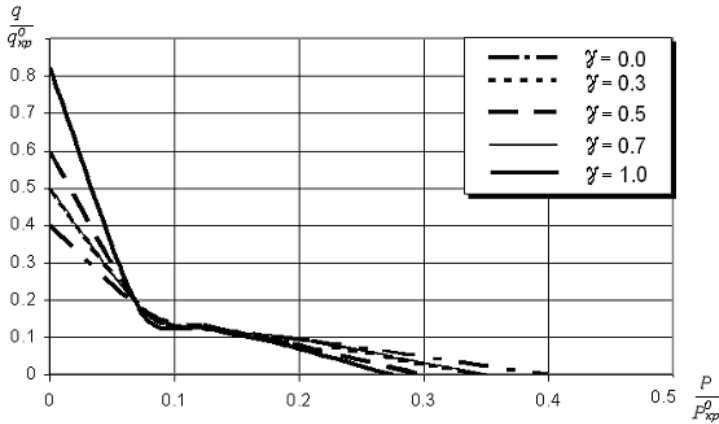


Рис. 4. Діаграма областей стійкості циліндричної недосконалої оболонки при дії комбінованого навантаження

Видно, що області стійкості для оболонки з різними моделями регулярних недосконалостей є різними. Вплив моделей недосконалостей не є пропорційним до відповідних комбінацій навантажень. Тому при дослідженні стійкості оболонки змінної товщини при дії комбінованого навантаження слід враховувати всі моделі її початкової недосконалості (рис. 1), а область стійкості оболонки вважати областю, яка знаходиться між осями координат та лінією, що огинає знизу отримані криві.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек – М.: Наука, 1971. – 807с
2. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 880 с.
3. Гоцуляк С.О., Барвінко А.Ю., Лук'яненко О.О., Костіна О.В., Шах В.В. Оцінка впливу початкових недосконалостей циліндричних оболонок резервуарів на їх стійкість при дії бокового тиску //Опір матеріалів і теорія споруд. К.: КНУБА. – 2008. – № 82. – С. 48-54.
4. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. - М.: ДМК Пресс, 2001.– 448 с.

Отримано 25.08.09

О.А. Лукьяненко, Е.В. Костина, И.Г. Гаран

Моделирование начальных несовершенств цилиндрической оболочки переменной толщины при исследовании ее устойчивости под действием комбинированного нагружения

Разработана численная методика исследования устойчивости цилиндрической оболочки с начальным несовершенством формы при действии комбинированной нагрузки. Начальные несовершенства оболочки моделируются в виде комбинаций форм потери устойчивости при действии осевого сжатия и поверхностного давления разной амплитуды. Оценено влияние начальных несовершенств на критическое значение комбинированной нагрузки. Определены области устойчивости цилиндрической оболочки с регулярными несовершенствами.

O.O. Lukianchenko, O.V. Kostina, I.G. Garan

A design of initial imperfections of cylindrical shell with variable thickness is at investigate of its stability under combined loading

The numerical technique for research of stability of cylindrical shell with the initial defect of form under combined loading is developed. Initial imperfections of shell are designed as combinations of forms of loss of stability at the action of axial compression and superficial pressure of different amplitude. Influence of initial imperfections on the critical value of the combined loading is evaluated. The areas of stability of cylindrical shell with regular imperfections are defined.