

УДК 539.3

Гоцуляк Є.О., д-р техн.наук,
Барвінко А.Ю., канд. техн. наук,
Лук'янченко О.О., канд. техн. наук,
Костіна О.В., канд. техн. наук,
Шах В.В.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОЧАТКОВИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК РЕЗЕРВУАРІВ НА ЇХ СТІЙКІСТЬ ПРИ ДІЇ БОКОВОГО ТИСКУ

Досліджується нелінійна стійкість резервуарів змінної товщини з початковими недосконаlostями, які моделюються у вигляді першої форми втрати стійкості при дії бокового тиску, та оцінюється вплив величини амплітуди форми недосконаlostей на стійкість оболонок.

Основи розрахунку стійкості оболонок з урахуванням їх початкових недосконаlostей закладені у роботах [1,2,3]. Задачі дослідження впливу недосконаlostей на стійкість оболонок з використанням чисельних і аналітичних підходів розглянуті в статтях [4, 5, 6]. В роботі застосовується чисельна методика, яка представлена у статті [7].

В роботі досліджується поведінка чотирьох резервуарів, які представляють собою циліндричні оболонки зі змінною по висоті товщиною стінок, геометричні характеристики яких наведені в табл. 1. Товщина стінок оболонок змінюється по висоті через кожні 1,49 м, починаючи знизу.

Таблиця 1

Назва резервуара				
	СПП№1	СПП№2	СПП№6А	СПП№6С

ра				
Середній радіус R_{cp} , м	19,966	19,978	19,978	19,963
Висота H , м	17,88	17,88	17,88	17,88
Товщина стінки резервуара t , мм	15,94	15,98	15,14	15,24
	14,54	14,75	13,66	14,22
	14,03	13,83	14,96	13,40
	11,63	11,66	11,93	11,56
	10,36	10,53	10,40	10,43
	9,30	9,33	9,33	9,46
	8,63	9,06	9,80	8,60
	7,36	7,86	9,63	7,70
	7,40	7,7	9,46	7,53
	7,53	7,83	9,66	7,40
	7,90	7,63	9,60	7,46
7,80	7,83	9,60	7,16	

Скінченноелементні моделі оболонок резервуарів формуються за допомогою обчислювального комплексу у циліндричних координатах. Поверхня кожної оболонки моделюється трикутними плоскими елементами із матеріалу – сталь Ст3 з відповідними механічними характеристиками: $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$, $\rho=7800$ кг/м³. Бокова поверхня оболонки розбивається на 164 частини по колу і на 24 - по твірній.

Недосконалості задаються у вигляді форми втрати стійкості, яка отримана при розв'язанні лінійної задачі стійкості і характеризує збудження форми серединної поверхні оболонки. На рис. 1. представлена форма втрати стійкості досконалої оболонки СПП №1 в двох проекціях.

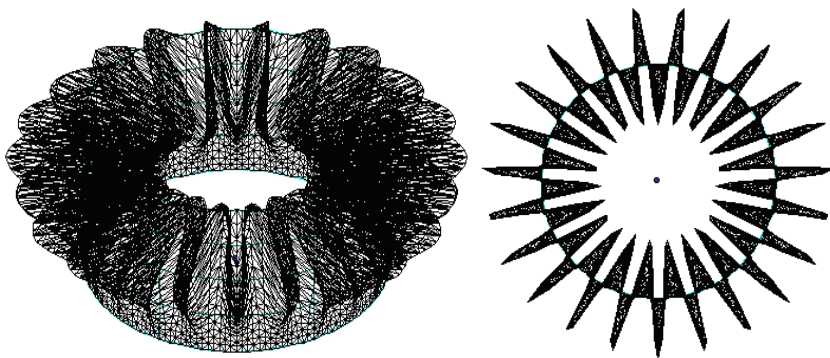


Рис. 1. Форма втрати стійкості досконалої оболонки СПП №1 при дії бокового тиску

Для всіх чотирьох резервуарів без урахування недосконалостей форма втрати стійкості однакова. Критичні значення бокового тиску $q_{кр}^0$ наведені в табл. 2. Розрахункові моделі недосконалих оболонок резервуарів будуються за допомогою обчислювального комплексу скінченноелементного аналізу та розробленої програми, в якій для формування нових координат вузлів моделей оболонок компоненти вектора форми втрати стійкості додаються до відповідних координат середньої поверхні оболонки. Недосконалості приймаються пропорційними мінімальній товщині стінок оболонок t : $\delta/t=0,1$; $\delta/t=0,2$; $\delta/t=0,4$; $\delta/t=1,0$; $\delta/t=1,5$; $\delta/t=2,0$.

Використовуючи процедуру обчислювального комплексу розв'язання нелінійної задачі статичної, для чотирьох оболонок резервуарів з різними амплітудами початкових недосконалостей визначаються критичні значення поверхневого тиску. Навантаження на оболонку задається у вигляді залежності $q_{кр}^0 \cdot \beta$, де β - безрозмірний параметр, що змінюється в інтервалі від 0 до 1. На кожному ступені навантаження за допомогою методу Ньютона-Рафсона знаходяться розв'язки рівняння рівноваги недосконалої оболонки до забезпечення умови збіжності по зміні нев'язки навантаження та по роботі внутрішніх сил на приростах вузлових переміщень. На рис. 2 представлені криві навантаження чотирьох оболонок резервуарів при різних амплітудах їх початкових недосконалостей δ/t . По осі абсцис відкладені переміщення Δ вузла скінченноелементної моделі оболонки, в якому спостерігаються максимальні значення, по осі ординат - відношення тиску q до критичного $q_{кр}^0$.

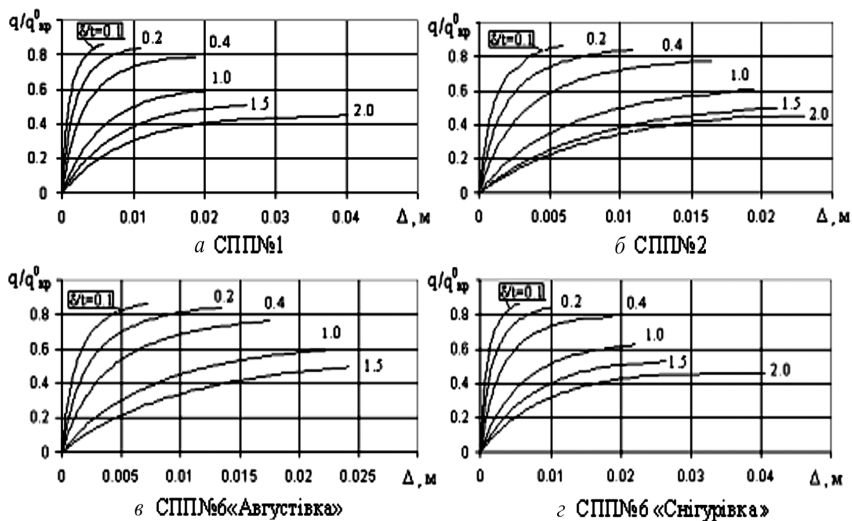


Рис. 2. Вплив початкових недосконалостей на докритичну поведінку циліндричних оболонок

Видно, що із зростанням амплітуд недосконалостей збільшується їх вплив на докритичну поведінку оболонок: збільшуються радіальні переміщення стінок оболонок та зменшується значення бокового тиску при втраті їх стійкості.

На рис. 3 представлені форми деформування циліндричної оболонки СПП №2 від дії критичного бокового тиску при різних значеннях початкових недосконалостей.

Форми деформування інших оболонок мають аналогічний вигляд.

На всіх ступенях навантаження оболонок перевірялось виконання умов забезпечення міцності стінок оболонок: максимальні напруження не перевищували розрахунковий опір сталі $R_y = 240$ МПа; максимальні радіальні переміщення отримують допустимі значення.

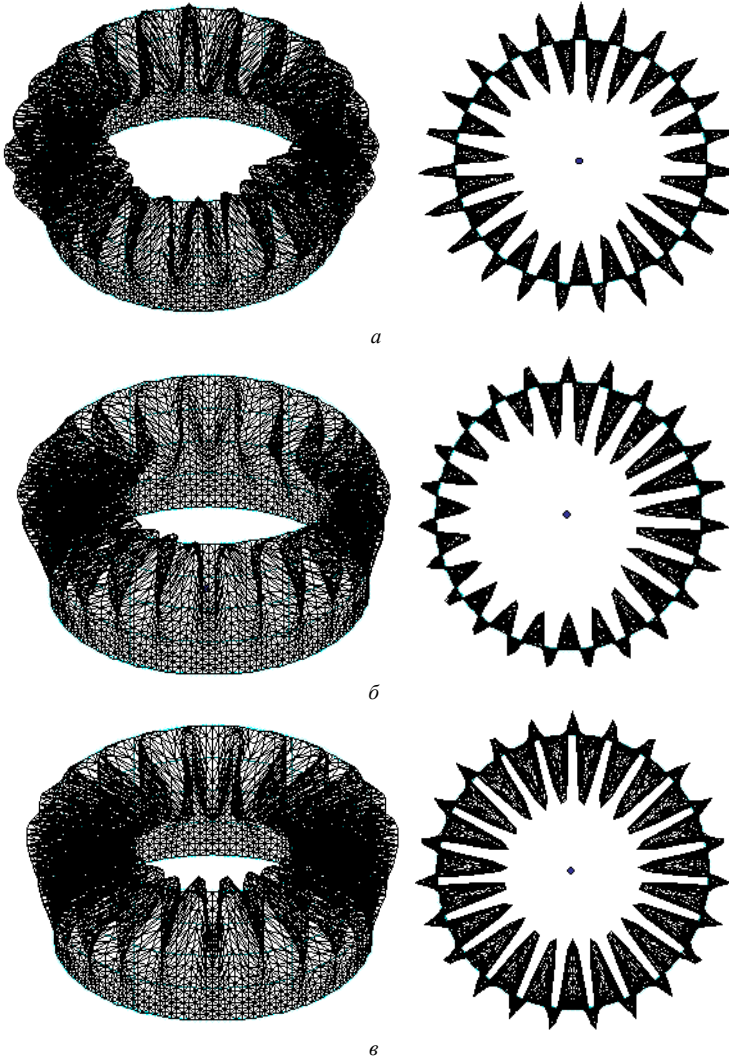


Рис. 3. Форми деформування недосконалої оболонки СПП№2 при дії критичного бокового тиску з амплітудою недосконалості: а) $\delta/t=0,4$; б) $\delta/t=1,0$; в) $\delta/t=2,0$

В табл. 2 наведені відносні значення критичного бокового тиску $q_{кр}/q_{кр}^0$, що отримані в результаті розрахунку, для всіх оболонок з початковими недосконалостями: $\delta/t=0,1$; $\delta/t=0,2$; $\delta/t=0,4$; $\delta/t=1,0$; $\delta/t=1,5$; $\delta/t=2,0$.

Таблиця 2

Назва резервуара	Критичний боковий тиск досконалої оболонки $q_{кр}^0$, кН/м ²	Відносне значення критичного бокового тиску $q_{кр}/q_{кр}^0$ при різних амплітудах недосконалостей δ/t					
		0.1	0.2	0.4	1.0	1.5	2.0
СПП№1	1218,9	0,872	0,847	0,777	0,601	0,510	0,450
СПП№2	1257,4	0,869	0,844	0,776	0,600	0,497	0,468
СПП№6 «Августівка»	1686,9	0,869	0,844	0,765	0,599	0,494	0,463
СПП№6 «Снігурівка»	1179,6	0,870	0,845	0,788	0,624	0,531	0,461

Видно, що при збільшенні амплітуди недосконалості оболонок δ/t відносне значення критичного бокового тиску $q_{кр}/q_{кр}^0$ зменшується.

На рис. 4 представлені криві навантаження боковим тиском оболонок з однаковими амплітудами недосконалості їх стінок. Поведінка оболонок при однакових амплітудах недосконалостей на різних стадіях навантаження дуже схожа, лише відрізняються значення максимальних радіальних переміщень вузлів моделей оболонок з амплітудою недосконалості $\delta/t=2,0$ при втраті їх стійкості.

Для визначення областей стійкості недосконалих оболонок при дії бокового тиску побудовані діаграми стійкості, які представлені на рис. 5. Область стійкості лежить між осями координат та кривою залежності відносного критичного бокового тиску $q_{кр}/q_{кр}^0$ від амплітуди початкової недосконалості оболонки δ/t .

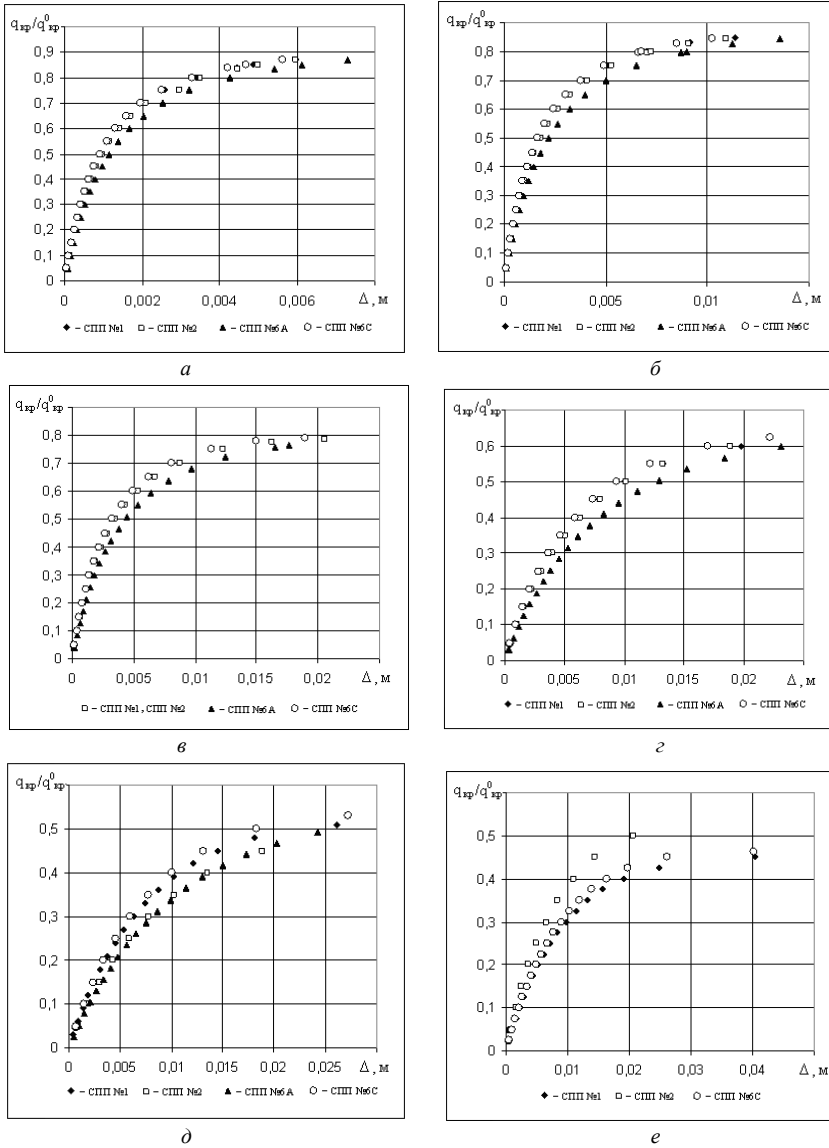


Рис. 4. Порівняння кривих навантаження боковим тиском оболонки резервуарів при однакових амплітудах їх початкових недосконалостей:

а) $\delta/t = 0.1$; б) $\delta/t = 0.2$; в) $\delta/t = 0.1$; г) $\delta/t = 0.1$; д) $\delta/t = 0.1$; е) $\delta/t = 0.1$

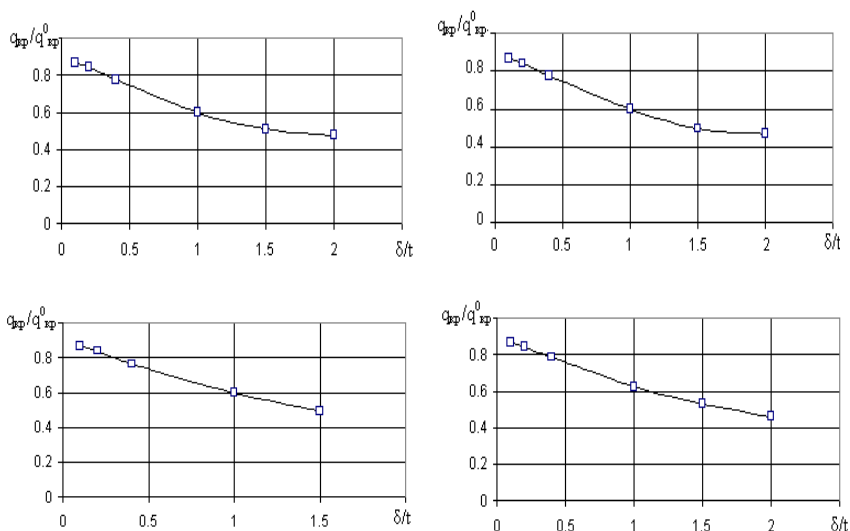


Рис. 5. Діаграми стійкості недосконалих оболонок резервуарів при дії бокового тиску

1. *Арбош И.* Влияние начальных прогибов на устойчивость оболочек // Тонкостенные оболочечные конструкции. – М.: Машиностроение, 1980. – С.222-259.
2. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984с.
3. *Тимошенко С.П.* Устойчивость стержней, пластин и оболочек – М.: Наука, 1971. – 807с.
4. *Є.О.Гоцуляк, А.Ю.Барвінко, В.В.Шах* Стійкість стінок вертикальних сталевих резервуарів, підкріплених ребрами жорсткості // Металлические конструкции. Взгляд в прошлое и будущее. Сборник докладов. Ч.1. Изд-во “Сталь”, 2004 – С. 444-450.
5. *Гавриленко Г.Д.* Численный и аналитический подходы к исследованию несущей способности несовершенных оболочек // Прик. механика. – 2003. – 39, №9. – С.44-62.
6. *Гоцуляк Е.А. Заблоцкий С.В.* К исследованию устойчивости оболочек с несовершенствами // Прик. механика. – 1990. – 26, №4. – С.49-55.
7. *Є.О.Гоцуляк, А.Ю.Барвінко, В.В.Шах, Костіна О.В.* Дослідження стійкості циліндричної оболонки резервуара з урахуванням недосконалостей форми // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2005. – Вип.. 77. – С. 91-96.