

УДК 624.953:624.07

doi:10.31650/2707-3068-2025-29-112-120

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ FEM-МОДЕЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ ВІТРОВОГО ТИПУ

Сторов Є.А., докт. техн. наук, професор,
yehorov.yevhenii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-0242-0260

Івченко Ю.В., канд. техн. наук,
ivchenko.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1318-991X

Івченко О.М., аспір.,
ivchenko.oleksandr@pdaba.edu.ua

ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», УДУНТ

Анотація. У роботі розглянуто питання стійкості сталевих вертикальних циліндричних резервуарів (РВС) при дії вітрового навантаження, що є важливим фактором для забезпечення їх надійної експлуатації. Виконано серію розрахунків стійкості для циліндричних оболонок з геометричними параметрами, що відповідають вітчизняній номенклатурі РВС. Результати розрахунків дозволяють оцінити вплив характеристик розбиття моделі оболонки на точність визначення критичних навантажень. Визначено ефективні параметри скінченно-елементних моделей РВС для адекватного чисельного аналізу їх поведінки при вітровому тиску.

Ключові слова: циліндрична оболонка, вітрове навантаження, критичний тиск, FEM-модель.

Вступ. Наявність резервів нафтопродуктів є стратегічно важливою для економіки України. В умовах воєнного стану резервуарний фонд країни зазнає значних втрат: певну частину резервуарів повністю знищено, інша частина – розташована на тимчасово окупованих територіях. Це зумовлює нагальну потребу у створенні нових, економічно ефективних нафтосховищ. Одним із найпоширеніших типів ємностей для зберігання нафтопродуктів є сталеві вертикальні циліндричні резервуари. Їх розповсюдженість пояснюється, по-перше, особливостями геометричної форми розглянутих резервуарів. Циліндрична стінка таких резервуарів є однією з найефективніших несучих конструкцій, яка поєднує в собі економію матеріалів і зменшення ваги конструкцій. По-друге, сучасні технології виготовлення та монтажу резервуарів досягли високого рівня розвитку, що забезпечує їх швидке будівництво та введення в експлуатацію. Сталеві вертикальні резервуари (РВС) піддані дії багатьох навантажень і впливів, зокрема, це власна вага конструкцій і вага обладнання, вага від тиску продукту, що зберігається, надмірний тиск або вакуум у газовому просторі резервуару, атмосферні впливи (сніг, вітер). Надійна експлуатація РВС визначається міцністю резервуарів при дії гідростатичного тиску. Проте, на РВС діє також цілий комплекс стискаючих навантажень, які можуть спричинити втрату стійкості резервуару. Серед таких навантажень особливої уваги заслуговує вітровий тиск. Розглянуті споруди є вертикальними наземними циліндричними оболонками, які, як типові тонкостінні конструкції, дуже чутливі до згину від дії вітрових навантажень, особливо коли вони порожні або мають низький рівень продукту. Таким чином, питання стійкості РВС при дії навантаження вітрового типу має суттєве значення.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Дію вітрового навантаження на резервуар можна розглядати як окремий випадок невісесиметричного або нерівномірного зовнішнього тиску на тонкостінну циліндричну оболонку. Теоретичному дослідженню напруженого стану та стійкості циліндричних оболонок при дії невісесиметричного зовнішнього тиску присвячено роботи [1, 2].

Задачу стійкості оболонок з параметрами $l/r = 0,4 \div 4$, $r/t = 200$ при дії невісесиметричних навантажень розглянуто в [1]. Отримано, що однією з особливостей,

притаманних зазначеному класу задач, є суттєва моментність вихідного напружено-деформованого стану оболонок. Критичні навантаження, визначені в рамках статичного критерію Ейлера, можуть при цьому істотно не збігатися з граничними навантаженнями. Величина відхилення залежить як від виду навантаження, так і від точності визначення вихідного стану оболонок, який визначається з лінійних, лінеаризованих або нелінійних рівнянь. Поведінка вільно обпертих циліндричних оболонок за невісесиметричного зовнішнього тиску досліджується в роботі [2]. Для оболонок з геометричними параметрами $l/r = 2; 3$; $r/t = 200, 290, 400$ виконано серію розрахунків у лінійній і нелінійній постановці. Аналіз результатів показав, що має місце резонанс докритичних форм вигину і форм, які реалізуються за навантаження, близького до граничного. Крім того, в [2] встановлено межі застосовності спрощених розрахункових моделей, які визначені залежно від параметра змінюваності зовнішнього навантаження:

$$s = \frac{m}{n}; \quad (1)$$

де m – кількість хвиль зовнішнього тиску в окружному напрямку;

n – кількість хвиль форми втрати стійкості оболонки при невісесиметричному тиску.

Отримано, що за малої неоднорідності навантаження $s < 0,5$ дані лінійного біфуркаційного розрахунку добре узгоджуються з результатами нелінійного розрахунку. За значень $s \geq 0,5$ лінійний біфуркаційний розрахунок дає суттєву похибку: при $s = 1,8$ спостерігається завищення критичного навантаження в 1,5 рази. Аналіз невісесиметричного тиску за [2] показав, що епюра тиску наближається до нормативного розподілу вітрового навантаження при значенні $m = 12$. Однак геометричні параметри оболонок, що розглядаються в [2], явно не відповідають геометричним параметрам резервуарних оболонок, отже, залишається незрозумілою можливість застосування результатів роботи для РВС при дії вітрового тиску.

З робіт, що безпосередньо стосуються дослідження проблеми стійкості сталевих резервуарів при дії вітрового навантаження, слід зазначити роботи [3–5]. У [3] досліджується стійкість наземного циліндричного резервуара з конічною покрівлею. Виконуються теоретичні розрахунки, достовірність результатів яких перевіряється шляхом зіставлення з реальною втратою стійкості резервуару, що сталася внаслідок дії ураганного вітру. Розглядаються різні варіанти розрахункової схеми резервуара. Встановлено, що в разі використання розрахункової схеми «оболонка - покрівля» критичне навантаження і форма втрати стійкості резервуара є найадекватнішими дійсним. Однак у цьому випадку багато що залежить від розподілу вітрового тиску по поверхні покрівлі.

У роботі [4] розглядається поведінка у критичному та за критичному стані тонкостінних циліндричних резервуарів, навантажених вітром, і чутливість такої поведінки до впливу малих геометричних відхилень від циліндричної форми. Дане дослідження показує, що в залежності від своїх геометричних особливостей резервуари можуть демонструвати дуже різну поведінку при вигині та чутливість до недосконалостей геометричної форми під дією вітру.

У роботі [5] розглядається числова оцінка стійкості порожніх тонкостінних сталевих резервуарів, що знаходяться під дією вітрового навантаження, яка виконується згідно з нормами проектування країн Євросоюзу EN 1993-1-6, EN 1993-4-2 [6, 7] та нормами проектування США API 650 [8]. Відзначається, що попередні дослідження виявили розбіжності щодо опору втраті стійкості порожніх резервуарів між методом розрахунку, запропонованим американським стандартом API 650, та аналітичними формулами, рекомендованими європейськими стандартами EN 1993-1-6 та EN 1993-4-2. У цьому дослідженні представлено порівняння положень вказаних норм проектування шляхом виконання всіх типів чисельних аналізів на вигин, рекомендованих у Єврокоді, тобто LBA – лінійний пружний біфуркаційний аналіз, GNA – геометрично нелінійний пружний аналіз ідеального за формою резервуара та GNIA – геометрично нелінійний пружний аналіз

резервуара з недосконалостями геометричної форми. Авторами роботи [5] зазначено, що такі розрахунки проводяться для того, щоб оцінити опір втраті стійкості двох існуючих тонкостінних сталевих резервуарів з великим діаметром і змінною товщиною стінок. Також у роботі показано чутливість критичних навантажень до граничних умов. Щодо дії нерівномірного вітрового тиску на резервуари відзначено, що рівномірний розподіл вітрового тиску є більш несприятливим у порівнянні з розподілом EN 1993-1-6, і ця обставина підтверджена експериментально. Проте при цьому реалізується інша поведінка оболонки з меншими переміщеннями і напруженнями.

У вітчизняних нормах проектування [9] при оцінці стійкості РВС нерівномірний вітровий тиск приймається у вигляді умовного вітрового навантаження, рівномірно розподіленого по колу:

$$q_{eq} = k_w \cdot w_m, \quad (2)$$

де w_m – розрахункове вітрове навантаження;

k_w – коефіцієнт перетворення нерівномірного вітрового навантаження до рівномірного тиску.

При цьому, згідно з [9], коефіцієнт k_w приймається однаковим для резервуарів усіх об'ємів і дорівнює 0,5. На думку авторів, такий підхід не враховує цілу низку параметрів, які обумовлюють поведінку РВС при дії нерівномірного вітрового тиску. Зокрема, геометричні параметри РВС змінюються у доволі великих діапазонах: $r/t = 590 \div 3800$; $l/r = 0,6 \div 2,5$. Як зазначається у [4], з точки зору механіки циліндричні резервуари розглянутого типу не є одним класом циліндричних оболонок, і, в залежності від особливостей своїх геометричних параметрів, вони можуть демонструвати дуже різну поведінку при втраті стійкості під дією вітру. Також у нормативній оцінці стійкості [9, 10] ніяким чином не враховується вплив умов закріплення торців циліндричної стінки на величину критичного тиску, які, в залежності від конструктивного рішення вузлів кріплення стінки до дна і покрівлі, можуть бути дуже різноманітними.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на велику кількість наукових досліджень, більшість з них виконано для оболонок, геометричні параметри яких суттєво відрізняються від геометричних параметрів сталевих резервуарів. Це ускладнює застосування отриманих результатів у практичних задачах аналізу та проектування реальних резервуарів. **Постановка завдання.** Метою цієї роботи є визначення ефективних параметрів FEM-моделей циліндричних резервуарів для аналізу їх реальної роботи та особливостей поведінки під дією вітрового навантаження з урахуванням фактичного характеру його розподілу.

Основний матеріал і результати. Розв'язання задач стійкості циліндричних оболонок полягає у визначенні критичних навантажень і відповідних до них форм втрати стійкості [11, 12]. Рішення рівняння стійкості циліндричної оболонки при дії зовнішнього тиску за відповідних граничних умов зводиться до рішення двовимірної задачі на власні значення. Розв'язання таких задач в аналітичному вигляді можливо отримати тільки шляхом застосування якихось математичних прийомів та спрощень. Проте, алгоритми таких рішень дуже громіздкі, і використання їх для інженерних задач не завжди можливе. Гарною альтернативою аналітичним методам є метод скінченних елементів (FEM), який дозволяє вирішувати поставлені задачі, ураховуючи основні конструктивні особливості розглянутих споруд і фактичні закони розподілення діючих на них зовнішніх навантажень.

Моделювання виконувалося із застосуванням програмного комплексу ЛІРА-САПР. Для скінченно-елементної моделі оболонки використовувалися універсальні прямокутні оболонкові елементи KE41 та KE341. Відзначені скінченні елементи мають по 6 ступенів свободи у кожному вузлі: u , v , w , du/dx , dv/dy , dw/dz .

При виборі граничних умов на торцях досліджуваних оболонок враховувалося, що стосовно РВС всі можливі рішення вузлів сполучення циліндричної стінки з дном і покрівлею відповідають пружним затисканням з жорсткістю, що знаходиться між шарнірним і жорстким закріпленнями. У роботі було прийнято наступні варіанти граничних умов: вільне обпирання і жорстке затиснення обох торців оболонки. Вказані граничні умови прийнято виходячи з того, що у технічній літературі є багато результатів розрахунків та випробувань оболонок з такими граничними умовами [11, 12]. Це дозволило порівнювати результати розрахунків з відомими рішеннями, і виконувати оцінку достовірності отримуваних результатів. Шарнірне обпирання забезпечувалося заборонаю переміщень v і w по торцях оболонки, а жорстке затиснення, відповідно, заборонаю лінійних і кутових переміщень. Необхідно також відзначити, що при шарнірному закріпленні оболонки, щоб уникнути її переміщення як жорсткого цілого, в одному з вузлів нижнього торця накладалося обмеження позовжнього переміщення, тобто $u=0$.

Подання оболонки у вигляді скінченно-елементної моделі виконувалося з урахуванням рекомендацій [13, 14]. Спочатку приймалося довільне розбиття оболонки. При цьому кількість скінченних елементів по колу n_y приймалася кратною числу хвиль n_0 власної форми втрати стійкості оболонки при рівномірному зовнішньому тиску. Значення n_0 визначалося за відомою формулою [11]:

$$n_0 = \sqrt[4]{6 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{1 - \mu^2} \cdot \sqrt{r/l} \sqrt{r/t}} \approx 2,7 \cdot \sqrt{r/l} \sqrt{r/t}, \quad (3)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона.

Це забезпечувало отримання кроку сітки по колу n_y в межах $(1/20 \div 1/35)$ від діаметру циліндричної стінки. Кількість скінченних елементів у позовжньому напрямку n_x визначалася виходячи з вимоги рівності розмірів скінченних елементів [10]. Для прийнятого розбиття оболонки виконувався розрахунок стійкості, визначалися критичні навантаження та форми втрати стійкості. На наступному етапі сітка скінченних елементів згущувалася, і знову виконувався розрахунок стійкості. Таким чином, виконувався ряд послідовних розрахунків із поступовим згущенням сітки на кожному етапі. Розрахунки припинялися, якщо розбіжність між двома сусідніми рішеннями не перевищувала 5%.

Результати розрахунків для оболонок з геометричними параметрами $r/t = 500 \div 3000$; $Z = l^2/rt \sqrt{1 - \mu^2} = 1000$ наведено у табл. 1, 2 і на рис. 1.

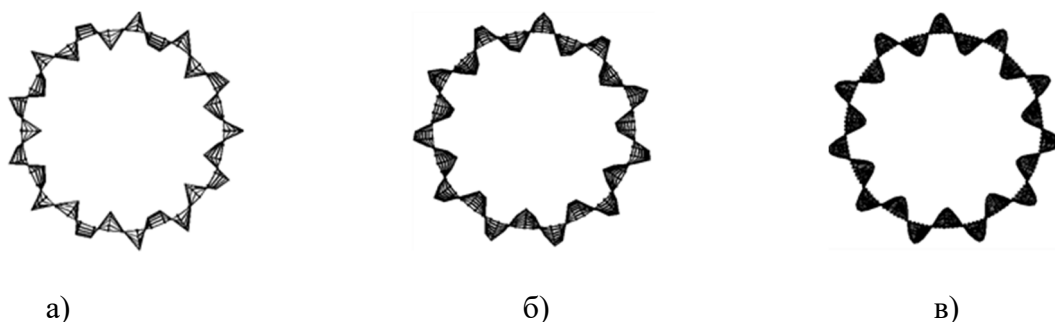


Рис. 1. Форми втрати стійкості оболонки з геометричними параметрами $r/t = 500$, $Z = 1000$ при розбитті на СЕ: а – $n_y \times n_x = 44 \times 10$; б – $n_y \times n_x = 77 \times 18$; в – $n_y \times n_x = 143 \times 33$

Також у табл. 1, 2 наведено критичні значення вітрового тиску q_{crw} , отримані у ПК ЛІРА-САПР для розглянутих оболонок.

Таблиця 1. Критичні навантаження для оболонок із $Z = 1000$ (шарнірне обпирання)

r / t	n_0	Кільк. елем. в $\frac{1}{2}$ хвилі	$n_y \times n_x$	q_{cr} , кПа	$q_{cl\#1}$, кПа	δ , %	q_{crw} , кПа
500	11	7	77×18	24,688	23,382	5,3	33,71
		10	110×25	24,531		4,9	
		11	143×33	24,531		4,9	
		16	176×42	24,531		4,9	
1500	18	4	72×10	2,734	2,598	5	3,44
		6	108×14	2,734		5	
		8	144×19	2,656		2,2	
		10	180×24	2,656		2,2	
		12	216×28	2,656		2,2	
3000	26	3	78×7	0,748	0,650	15	0,81
		5	130×12	0,684		5	
		7	182×17	0,680		4,6	
		9	234×22	0,679		4,4	
		11	286×27	0,678		4,3	

Таблиця 2. Критичні навантаження для оболонок із $Z = 1000$ (жорстке затиснення)

r / t	n_0	Кільк. елем. в $\frac{1}{2}$ хвилі	$n_y \times n_x$	q_{cr} , кПа	$q_{cl\#2}$, кПа	δ , %	q_{crw} , кПа
500	11	7	77×18	34,79	35,073	0,8	46,28
		10	110×25	34,491		1,7	
		11	143×33	34,394		2	
		16	176×42	34,394		2	
1500	18	4	72×10	4,062	3,897	4,2	4,82
		6	108×14	3,828		1,8	
		8	144×19	3,75		3,9	
		10	180×24	3,75		3,9	
3000	26	12	78×8	1,062	0,975	8,9	1,13
		3	104×10	1,0		2,6	
		5	156×15	0,938		3,9	
		7	182×17	0,938		3,9	
		9	208×21	0,938		3,9	

Результати, наведені у табл. 1, 2 показують, що при деякій кількості скінченних елементів $n_y \times n_x$ в FEM-моделі оболонки рішення задачі стабілізується і стає постійним для кількох сусідніх розбиттів, які складають діапазон ефективного розбиття оболонки на СЕ.

Для практичних цілей можна керуватися рекомендаціями щодо кількості скінченних елементів $n_{ef,y}$ в одній півхвилі оболонки, наведеними у табл. 3.

Таблиця 3. Кількість скінченних елементів $n_{ef,y}$ СЕ в $\frac{1}{2}$ хвилі оболонки

n_0	$n_{ef,y}$
8÷11	13÷16
12÷14	10÷15
15÷20	7÷12
20÷31	7÷9

Отримані числові значення критичного тиску порівнювалися також з відомими теоретичними рішеннями. Для шарнірно обпертих оболонок [11]:

$$q_{cl,N\#1} = 0,92 \cdot E \cdot (r/l) \cdot (t/r)^{5/2}, \quad (4)$$

де E – модуль Юнга.

У випадку жорсткого затиснення [1, 11]:

$$q_{cl,N\#2} = 1,5 \cdot q_{cl,N\#1}, \quad (5)$$

де $q_{cl,N\#1}$, $q_{cl,N\#2}$ – критичні значення тиску, відповідно, для випадку шарнірного обпирання і жорсткого затиснення.

Порівняння значень критичного рівномірного тиску, отриманих для аналізованих оболонок, з відповідними аналітичними значеннями показало, що при шарнірному обпиранні відхилення числових критичних навантажень від аналітичних не перевищують 5% при прийнятому ефективному розбитті оболонок на скінченні елементи.

У разі жорсткого затиснення торців оболонок відхилення отриманих критичних навантажень при ефективному розбитті оболонок на СЕ від відповідних аналітичних значень знаходяться в діапазоні 5-9%, що також є достатньою точністю отриманих результатів.

Необхідно додати, що у випадку жорсткого затиснення оболонки мають кількість хвиль випинання n_0^* форми втрати стійкості оболонки більшу, ніж аналогічний параметр n_0 шарнірно обпертих оболонок, див. рис. 2. Очевидно, ця обставина пояснюється впливом жорсткого затиснення торців оболонки.

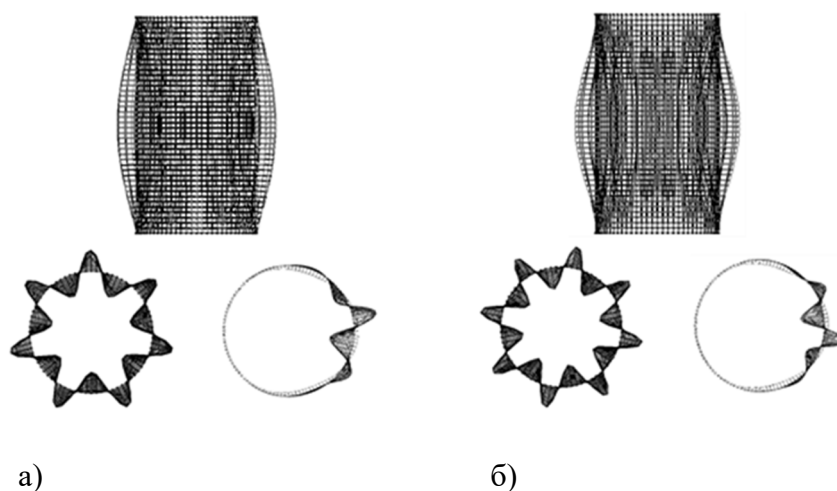


Рис. 2. Форми втрати стійкості оболонки з $r/t = 500$, $Z = 6000$ при рівномірному і вітровому тиску для варіантів граничних умов: а – шарнірне обпирання; б – жорстке затискання

Також розрахунки показали, що для всіх розглянутих оболонок критичне значення вітрового тиску перевищує критичний рівномірний тиск, і таке перевищення складає 19-40%.

Висновки. Отримано, що при деякому розбитті $n_y \times n_x$ оболонки на скінченні елементи рішення задачі стабілізується і стає постійним для кількох сусідніх розбиттів, які складають діапазон ефективного розбиття оболонки на СЕ.

Для визначення ефективних параметрів FEM-моделей РВС при дії зовнішнього тиску на практиці можна керуватися рекомендаціями табл. 3.

Отримано, що відхилення числових значень критичного рівномірного тиску для аналізованих оболонок при прийнятому ефективному розбитті оболонок на СЕ від відповідних аналітичних значень становить 5-9%, що є достатньою точністю отриманих результатів.

Для всіх розглянутих оболонок отримане числове критичне значення вітрового тиску перевищує критичний рівномірний тиск, і таке перевищення складає 19-40%. Отриманий висновок добре узгоджується з раніше виконаними дослідженнями [1, 2], проте геометричні параметри розглянутих в [1, 2] оболонок суттєво відрізняються від геометрії РВС.

Література

1. Кабанов В. В. Предельное состояние и устойчивость цилиндрической оболочки при неоднородном неосесимметричном давлении / В. В. Кабанов, Г. И. Курцевич, В. Д. Михайлов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1978. – № 4. – с. 129–134.
2. Андреев Л. В. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации / Л. В. Андреев, Н. И. Ободан, А. Г. Лебедев. – М. : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 207 с.
3. Godoy L. A. Buckling of aboveground storage tanks with conical roof / L. A. Godoy, J. C. Mendes-Degro // Third International Conference on Thin-Walled Structures. – Elsevier Science Ltd. – 2001. – P. 661–668.
4. Godoy L. A. Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks / L. A. Godoy, F. G. Flores // J. Structural Engineering and Mechanics. – 2002. – Vol. 13, no. 5. – P. 79–89.
5. Maraveas C. Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes / C. Maraveas, G. A. Balokas, K. D. Tsavdaridis // J. Thin-Walled Structures. – 2015. – № 95. – P. 152–160.
6. EN 1993–1–6:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1–6: Strength and Stability of Shell Structures. – Brussels: Centr. Secr., 2006. – 94 p.
7. EN 1993–4–2:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4–2: Tanks. – Brussels: Centr. Secr., 2007. – 114 p.
8. API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage – [Twelfth Edit.]. – 2013. – 511 p.
9. ВБН В.2.2–58.2–94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Відомчі будівельні норми України. – Вид. офіц. – Київ : Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
10. ДБН В.2.6–163.2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с.
11. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – 2-е изд., переработ. и доп. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
12. Григолюк Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек / Э. И. Григолюк, В. В. Кабанов. – М. : Наука, 1978. – 359 с.
13. Городецкий А. С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций : уч. пособ. / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарев. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.

14. Петренко В. Д. К вопросу о дискретизации конечно-элементных моделей / В. Д. Петренко, А. Л. Тюткин // Строительство, материаловедение, машиностроение. Диагностика в строительстве. – Дн-вск, 2002. – С. 123–128.

References

- [1] V. V. Kabanov, H. I. Kurtsevych, V. D. Mykhailov, “Predelnoe sostoianye y ustoichyost tsylindrycheskoi obolochky pry neodnorodnom neosesymmetrychnom davlenyy,” *Yzv. AN SSSR. Mekhanyka tverdoho tela*, no 4, pp. 129–134, 1978.
- [2] L. V. Andreev, N. Y. Obodan, A. H. Lebedev, *Ustoichyost obolochek pry neosesymmetrychnoi deformatsyy*. M. : Hl. red. fiz.-mat. lyt., 1988.
- [3] L. A. Godoy, J. C. Mendes-Degro, “Buckling of aboveground storage tanks with conical roof,” Third International Conference on Thin-Walled Structures, 2001, pp. 661–668.
- [4] L. A. Godoy, F. G. Flores, “Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks,” *J. Structural Engineering and Mechanics*, vol. 13, no. 5, pp. 79–89, 2002.
- [5] C. Maraveas, G. A. Balokas, K. D. Tsavdaridis, “Numerical evaluation on shell buckling of empty thin-walled steel tanks under wind load according to current American and European design codes,” *J. Thin-Walled Structures*, no. 95, pp. 152–160, 2015.
- [6] EN 1993–1–6:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1–6: Strength and Stability of Shell Structures. Brussels: Centr. Secr., 2006. 94 p.
- [7] EN 1993–4–2:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4–2: Tanks. Brussels: Centr. Secr., 2007. 114 p.
- [8] API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage. [Twelfth Edit.]. 2013. 511 p.
- [9] VBN V.2.2–58.2–94. Rezervuary vertykalni stalevi dlia zberihannia nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa. Kyiv: Derzhkomnaftohaz. 1994. 98 p.
- [10] DBN V.2.6–163.2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2014. 199 p.
- [11] A. S. Volmyr, *Ustoichyost deformyruemykh system*, M. : Nauka, 1967.
- [12] Э. Y. Hryholiuk, V. V. Kabanov, *Ustoichyost obolochek*, M. : Nauka, 1978.
- [13] A. S. Horodetskyi, V. S. Shmukler, A. V. Bondarev, *Ynformatsyonnye tekhnolohyy rascheta y proektyrovannia stroytelnykh konstruktsiy : uch. posob.*, Kh. : NTU “KhPY”, 2003.
- [14] V. D. Petrenko, A. L. Tiutkyn, “K voprosu o dyskretyzatsyy konechno-elementnykh modelei,” *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye. Dyahnostyka v stroytelstve*, pp. 123–128, 2002.

DETERMINING THE EFFECTIVE PARAMETERS OF FEM MODELS OF CYLINDRICAL TANKS SUBJECTED TO WIND-TYPE LOAD

Yehorov Ye.A., Sc. D., Professor,
yehorov.yevhenii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-0242-0260

Ivchenko Yu.V., Ph. D., Associate Professor,
ivchenko.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1318-991X

Ivchenko O.M., postgraduate stud.,
ivchenko.oleksandr@pdaba.edu.ua

ESU “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, USUST

Abstract. Introduction. The paper investigates the stability of steel vertical cylindrical tanks under wind load. Cylindrical tanks as thin-walled structures are vulnerable to compressive loads. The analysis of the behaviour of tanks under wind pressure, which can cause a loss of stability, is important. **Analysis of publications.** An overview of research works on the behaviour of thin-walled

shells and tanks under external pressure is presented. It has been found that for the class of problems under consideration, critical loads do not always coincide with the limit loads. The difference in results depends on the nature of the load and the accuracy of determining the initial state of the shells. The ranges of relevance of the simplified calculation models were established. However, the geometric parameters of the studied shells do not correspond to the geometric parameters of the tanks. An analysis of the design standards methodology showed its shortcomings. This is an insufficient consideration of the geometric parameters of the tanks, the conditions of shell anchoring and the actual nature of the wind load distribution. This failure to take into account can lead to significant errors in the determination of critical loads. This can lead to a risk to the tanks safe operation. **The aim of the study** is to determine the effective parameters of FEM-models of cylindrical tanks for analysing their behaviour under wind load, taking into account the actual nature of its distribution. **Main material and results.** The calculations were carried out in the LIRA software package of the computer-aided design system. Different variants of boundary conditions were considered: free support and rigid clamping of the shell ends. The finite element mesh was gradually thickened to ensure convergence of the results. Refinement was stopped if the difference between two consecutive solutions did not exceed 5%. **Conclusions.** It is shown that the solution of the problem stabilises at some partitioning of the $ny \times nx$ shell into finite elements. For several adjacent partitions, the solution of the problem becomes constant. Such discretization was taken as the range of effective discretization of the shell into FEs. Recommendations for determining the effective parameters of FEM models of the tanks under the action of external pressure are given. It was found that the deviation of the numerical values of the critical uniform pressure for the analysed shells from the corresponding analytical values was 5-9%. This is a sufficient accuracy of the results obtained. The calculated numerical critical value of the wind pressure exceeds the critical uniform pressure for the considered shells. This excess is 19-40%.

Key words: cylindrical shell, wind load, critical pressure, FEM model.