

УДК 539.3

Розрахунок на міцність великопрогонових залізобетонних оболонок із зовнішнім листовим армуванням методом скінченних елементів

Цихановський В. К., д.т.н., Кордун О. І.

ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського», Україна

Анотація. Проведено дослідження напружено-деформованого стану комбінованої оболонкової конструкції вертикального циліндричного резервуару великої місткості.

Аннотация. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния комбинированной оболочечной конструкции вертикального цилиндрического резервуара большой емкости.

Abstract. The research of stress-and-strain of the combined shell construction of vertical large cylinder tank is provided.

Ключові слова: нелінійне деформування, метод скінченних елементів, система нелінійних рівнянь, ітераційні методи.

Вступ. Запропонована нова конструктивна схема комбінованої конструкції резервуарів великого об'єму для зберігання нафтопродуктів. Як один з варіантів пропонується конструкція вертикального циліндричного резервуару із постійним покриттям із висячої тонколистової оболонки з циклічно розташованими ребрами – нитками скінченої жорсткості. Зовнішній вигляд конструкції резервуару об'ємом 140 000 м³ наведений на рис. 1. Пропонується суцільна оболонкова комбінована механічна система, яка включає каркас із кільцевих ребер, з'єднаних стійками з металевого прокату та власне саму тонколистову оболонку, конструктивна схема каркасу наведена на рис. 2. Таким чином маємо тонколистову оболонку днища із сталюю приведеною товщиною 5,5 мм, циліндричну оболонку з перемінною товщиною в межах від 10-25 мм, а також тонку залізобетонну оболонку покриття із зовнішнім листовим армуванням. Комбінована конструкція оболонки наступна: тонколистова оболонка товщиною 4 мм розміщується на радіальних і кільцевих елементах, так званої «постелі», яка опирається на каркас зовнішнього і внутрішнього опорних контурів. В якості стабілізуючого засобу використовується тонкий залізобетонний шар, що укладається по поверхні тонколистової оболонки і може включатися в роботу покриття як залізобетонний елемент із зовнішнім листовим армуванням.

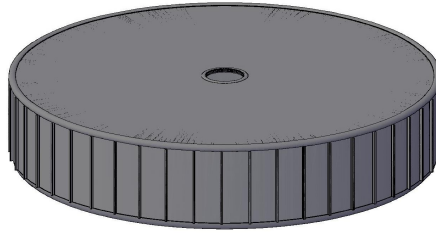


Рис. 1. Зовнішній вигляд конструктивної схеми циліндричного резервуару об'ємом 140000 м³

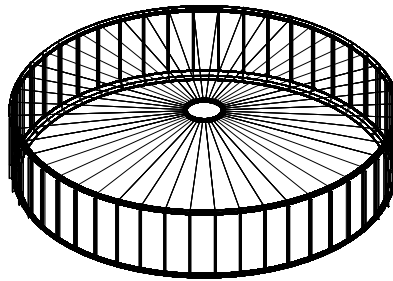


Рис. 2. Конструктивна схема каркасу оболонкової конструкції циліндричного резервуару з висячим покриттям з тонколистової оболонки

Методи дослідження. Розглянута конструкція відноситься до класу сильнонелінійних механічних систем [1, 2], які мають певні особливості: велика кінематична рухомість конструкції в цілому і, втрата місцевої стійкості окремих фрагментів з розвитком локальних зон пластичних деформацій та суттєва неоднорідність конструктивних елементів. Для дослідження таких комбінованих полегшених систем найбільш придатні чисельні методи. В даній роботі використовується найбільш ефективний із чисельних методів – метод скінченних елементів на основі моментної схеми, принципи якої викладені в [1, 2].

Метод скінченних елементів (МСЕ) відноситься до варіаційних методів, тому для отримання розв'язуючих рівнянь МСЕ використовується перший принцип віртуальної роботи у загальних криволінійних координатах, співвідношення нелінійної теорії пружності і пластичності у приростах [1, 2]:

$$\int_V (\hat{\sigma}' + C_4^{(e,p)} \cdot \hat{\gamma}) \cdot \delta \hat{\gamma} dV + \int_V \rho u \cdot \delta \ddot{u} dV - \int_V \bar{\rho} \cdot \delta \ddot{u} dV - \int_S \bar{q} \cdot \delta \ddot{u} ds = 0, \quad (1)$$

де: $\hat{\sigma}'$ – другий тензор початкових напружень Піола-Кірхгоффа; $\hat{\gamma}$ – тен-

зор приростів скінченних деформацій Коши-Гріна; \ddot{u}, \ddot{u} – вектори приростів переміщень і прискорень; \vec{p}, \vec{q} – узагальнені вектори об'ємних і поверхневих сил, що діють на тверде тіло.

З використанням (1) розроблені співвідношення методу скінченних елементів, що покладені в основу методології дослідження сильнонелінійних оболонкових систем з використанням спеціальних алгоритмів у рамках так званого поточного лагранжевого формулювання із залученням методів подовження за параметром збурення, Ньютона-Кантаровича, регуляризації та блочної релаксації [1, 2].

Побудова розрахункової схеми і дискретної моделі. Для ілюстрації можливості запропонованої методології нелінійного деформування механічних систем розглянемо конкретну комбіновану конструкцію, яка має достатньо складну конфігурацію, топологію та вимагає певного структурного моделювання окремих конструктивних елементів з різними фізико-механічними характеристиками.

На рис. 3 наведена розрахункова схема конструкції резервуара, яка включає половину загальної конструкції циліндричного резервуару, тому що зовнішні впливи мають тільки одну площину симетрії. Конструкція циліндричного резервуару має наступні зовнішні виміри: діаметр 100,0 м, висота 21,0 м, відповідні розміри розрахункового фрагменту наведені на рис. 3 в см (при чисельній реалізації використовувалася технічна система вимірів – см, кг, кгс/см² та інші).

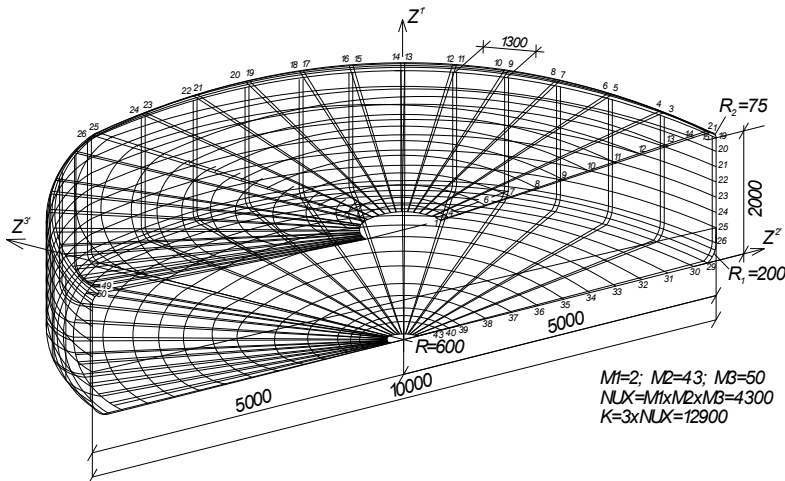


Рис. 3. Розрахункова схема і дискретна модель конструкції резервуара (всі розміри в см)

Геометрія дискретної моделі описується точковим каркасом з використанням глобальної системи координат $OZ^1Z^2Z^3$, супутньої лагранжевої системи координат $X^1X^2X^3$, напрямки якої співпадають з напрямками сіткових координат $S_1S_2S_3$ – правої з початком у вузлі 1 (дивись рис. 3). Описання геометрії оболонки складної форми здійснюється послідовним використанням аналітичних рівнянь набору канонічних поверхонь:

- циліндра – серединна бокова поверхня резервуару;
- кругової плити – днище резервуару;
- сферичної лінзи – серединна поверхня оболонки покриття;
- верхнього чвертьтору – для стику циліндричної поверхні із сферичною лінзою;
- нижнього чвертьтору – для стику циліндричної поверхні із днищем.

При використанні аналітичних виразів для описання поверхні канонічних поверхонь введені деякі параметри, за допомогою яких зручно управляти формою при завданні початкової форми, наприклад для сферичної лінзи канонічне рівняння у діаметральному перерізі набуває виразу:

$$z = z_c - \sqrt{\frac{R_0^2 + f_0^2}{4f_0^2} - x^2} + R_d - f_0, \quad (2)$$

де: f_0 – стріла провису сферичної лінзи, яка може змінюватися у межах $(0,02 \div 0,03)$ від величини діаметру лінзи (резервуару); R_0 – радіус круга на стику лінзи і верхнього чвертьтору в глобальній системі координат; $R_d = \frac{R_0^2 + f_0^2}{2f_0}$ – радіус кривизни серединної поверхні оболонки лінзи; x – координати вузлів горизонтальної проекції радіального перерізу лінзи.

Вдало описана геометрія забезпечує відповідні властивості матриці системи лінеаризованих розв'язуючих рівнянь і відповідну швидкість збігу ітераційних процесів.

Для побудови скінченно-елементної моделі на базі універсального оболонкового елемента, який дозволяє при певних умовах однаково описувати фрагменти самої оболонки і елементів каркасу [1, 2], треба виконувати структурне моделювання – зводити реальні форми елементів каркасу (прокатні) до еквівалентних, подібних до форми універсального елемента. Зазначена процедура здійснюється з використанням теорії подібності та умов адекватності згинної і поздовжньої жорсткості реального перерізу елементів каркасу та еквівалентного перерізу [3].

Зовнішні впливи і навантаження. Навантаження і впливи для розрахунку конструкції резервуару визначені відповідно до директивних будівельних норм [4]. Вітрове навантаження передбачено найбільшим для України:

$$W_0 = 600 \text{ Па} = 60 \text{ кгс} / \text{м}^2 . \quad (3)$$

При визначенні аеродинамічних коефіцієнтів згідно з [4] за параметрами шуканої конструкції передбачено:

- на циліндричній поверхні враховано 4-и ділянки з різними значеннями аеродинамічного коефіцієнту, з використанням на кожній ділянці тригонометричних функцій для визначення поточного значення інтенсивності вітрового тиску між граничними значеннями;
- на висячому покритті відповідно до [3] маємо від'ємне значення аеродинамічного коефіцієнту при інтенсивності вітрового навантаження:

$$q_6 = -38,5 \text{ кгс} / \text{м}^2 . \quad (4)$$

Із урахуванням усіх комбінацій навантажень відповідно до [3] при чисельній реалізації передбачено об'ємне навантаження – власна вага і 14-ть типів поверхневого навантаження.

Сіткова область скінченно-елементної моделі має розміри 2x43x50 (M1=2, M2=43, M3=50 – граничні значення відповідних сіткових координат – S_1, S_2, S_3), що відповідає числу розв'язуючих рівнянь (без урахування накладених в'язів)

$$k = 3 \cdot NUX ; NUX = M1 \cdot M2 \cdot M3 = 2 \cdot 43 \cdot 50 = 4300 ; k = 3 \cdot 4300 = 12900 . \quad (5)$$

Чисельні результати розрахунку. Таким чином розрахункова схема має 12900 нелінійних рівнянь, які розв'язуються за 150 кроків за методом подовження по параметру збурення. На кожному кроці розв'язується нелінійна система за методом Ньютона-Канторовича в комбінації з класичним методом Ньютона при виникненні локальних зон пластичних деформацій, цей процес здійснюється за 6-8 ітерацій на кожному кроці.

При чисельному розв'язку задачі розглянуті наступні характерні комбінації зовнішнього статичного впливу:

- максимальне навантаження без урахування вітру;
- повне навантаження з урахуванням снігу на половині розрахункового фрагменту;
- максимальне повне навантаження з урахуванням вітрового тиску;
- максимальне навантаження без урахування гідростатичного внутрішнього тиску.

За аналізом виконаних розрахунків найбільш критичним є варіант з урахуванням всіх постійних і тимчасових навантажень та максимального навантаження вітрового тиску. За цим варіантом отримані чисельні результати, деякі наведені у табл. 1, з урахуванням отриманої інформації побудовані: епюри вузлових переміщень в площині симетрії $OZ^{2'}$ ($-Z^{2'}$), які наведені на рис. 4; епюри згинних моментів і поздовжніх зусиль у зовнішньому і внутрішньому контурах покриття резервуару, що наведені на рис. 5, б; епюри згинних моментів і поздовжніх зусиль для характерних ребер-стійок на циліндрі резервуару, які наведені на рис. 5, а.

Таблиця 1

Переміщення вузлів дискретної моделі резервуару в діаметральному перерізі

Перерізи в площині $OZ^{1'}$ ($+Z^{2'}$)								
NN п/п	NN вузлів СЕ моделі	$U_n^{1'}$, см	$U_n^{2'}$, см		NN п/п	NN вузлів СЕ моделі	$U_n^{1'}$, см	$U_n^{2'}$, см
1	1	-30,96	-0,17		23	45	-2,00	+9,45
2	3	-30,82	-0,18		24	47	-1,74	+8,37
3	5	-30,78	-0,18		25	49	-1,54	+5,11
4	7	-30,08	-0,17		26	51	-1,49	+3,07
5	9	-27,49	-0,16		27	53	-1,14	+1,80
6	11	-26,45	-0,11		28	55	-0,47	+1,07
7	13	-25,89	-0,05		29	57	0	+0,89
8	15	-25,90	+0,02		30	59	0	+0,83
9	17	-25,79	+0,08		31	61	0	+0,85
10	19	-25,85	+0,14		32	63	0	+0,77
11	21	-25,53	+0,19		33	65	0	+0,68
12	23	-24,91	+0,22		34	67	0	+0,58
13	25	-21,90	+0,06		35	69	0	+0,49
14	27	-12,34	-0,7		36	71	0	+0,39
15	29	-5,30	-1,35		37	73	0	+0,31
16	31	-3,64	-1,48		38	75	0	+0,22
17	33	-3,06	-1,32		39	77	0	+0,16
18	35	-2,66	-0,92		40	79	0	+0,10
19	37	-2,51	-0,39		41	81	0	+0,06
20	39	-2,48	+1,38		42	83	0	+0,02
21	41	-2,38	+5,3		43	85	0	+0,02
22	43	-2,22	+8,24					

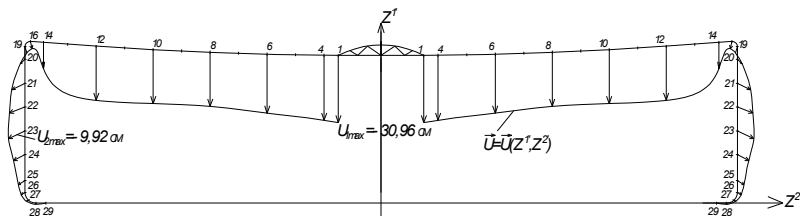


Рис. 4. Епюри переміщень в радіальному перерізі дискретної моделі конструкції резервуару (ординати вектора переміщень наведені в табл. 1)

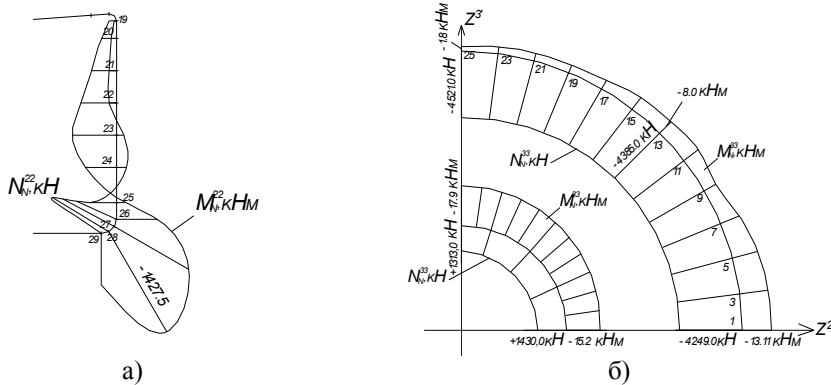


Рис. 5. Епюри згинних моментів і поздовжніх зусиль:

а) у ребрах-стійках циліндричного фрагменту; б) у зовнішньому і внутрішньому контурах резервуару

Відповідно за значеннями компонент тензора напружень у фрагментах самої оболонки між ребрами були уточнені вставки поясів циліндру резервуару із листової сталі до 12 мм товщиною і передбачено використання листового прокату підвищеної міцності для класу сталі С52/40, для якої $\sigma_m = 4000$ кгс/см². Максимальне кільцеве напруження у зазначеному поясі циліндру досягає $\sigma_{2021}^{33} = 4039,6$ кгс/см², тобто маємо ділянку оболонки в нейтральному стані на граничній межі, а ми і поставили мету зробити розрахунок за граничним станом.

Висновки

Розглянута нова конструктивна схема резервуару для нафтопродуктів, яка суттєво відрізняється від стандартних конструктивних схем циліндричних резервуарів [5, 6], через успішний розв'язок оптимальної задачі з використанням варіювання параметрів геометрії і жорсткості конструктивних елементів, є достовірною перспектива для проведення подальших досліджень з метою надання відповідних рекомендацій по запровадженню більш оптимальних конструктивних схем для циліндричних резервуарів.

За остаточними розрахунками наведеного прикладу з відповідним уточненнями обчислені витрати металопродукції для виготовлення запропонованого виробу, тобто маємо: загальна вага конструкції резервуару дорівнює $G_v^o = 1586,0$ т. Якщо порівнювати із стандартними варіантами для такого ж об'єму, то маємо деяку економію металопродукції на 1000 м³ нафтопродуктів:

$$g_v = \frac{G_v^o}{V_n} = \frac{1586,0}{140} = 11,33 \frac{t}{1000 m^3}.$$

Стандартний питомий показник розходу металопродукції згідно до [5,6] дорівнює

$$g_q = 12,41 \frac{m}{1000m^3}. \quad \text{Тоді матеріалоемність зменшується на}$$
$$\Delta g_q = \frac{(12,41 - 11,33) \cdot 100}{12,41} = 8,7\%.$$

Величини переміщень елементів конструкції не перевищують критичних і допустимих, так максимальне переміщення покриття дорівнює $U_1' = -30,96$ см, що складає $\frac{U_{\max}}{L_{np}} = \frac{30,96}{10000} \cong \frac{1}{323}$, тобто у межах норми для конструкції висячих оболонкових систем [1, 2]. Максимальне переміщення ребра-стійки складає $U_{4259}^2 = -9,92$ см, тобто відношення $\frac{U_{4259}^2}{H_{cm}} = \frac{9,92}{80,0} \cong \frac{1}{8} < \frac{1}{4}$, теж знаходиться у межах норми для відповідних конструкцій.

На основі використання існуючої автоматизованої програмної системи наукових досліджень SINDOM [2] отримана фактично нова адаптована методика дослідження комбінованих конструкцій з використанням тонких залізобетонних оболонок із зовнішнім листовим армуванням у якості покриттів циліндричних резервуарів великої місткості.

Література

- [1] Шимановський О.В. Теорія і розрахунок сильно нелінійних конструкцій / О.В. Шимановський, В.К. Цихановський. – К.: Сталь, 2005. – 432с.
- [2] Баженов В.А. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / А.В. Баженов, В.К. Цихановський, В.М. Кислоокій. – К.: КНУБА, 2000. – 388с.
- [3] Цихановський В.К. Несущая способность комбинированных оболочечных конструкций с учётом развития пластических деформаций / В.К. Цихановський, С.М. Козловец, Н.А. Костыра // Промислове будівництво та інженерні споруди, – 2008. – №3. – С. 17 – 21.
- [4] ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
- [5] Сафарян М. К. Проектирование и сооружение стальных резервуаров для нефтепродуктов. / Сафарян М. К., Иванцов О. М. – Гостоптехиздат, 1961. – 328 с.
- [6] Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. / Сафарян М. К. - М.: Недра, 1987. – 200с.

Надійшла до редколегії 5.07.2010 р.