

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 624.014, 624.953, 621.642.39, 66.083.4

DOI 10.31649/2311-1429-2021-1-77-87

В. О. Попов¹
А. В. Попова²

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕЗЕРВАРУ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ МЕТАНОЛУ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ ВПЛИВІВ

¹Вінницький національний технічний університет,
²Донецький національний університет імені Василя Стуса

У статті розроблена методика аналітичного моделювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій великорозмірних ємностей для зберігання органічних рідин під дією кліматичних та технологічних впливів на прикладі резервуару для зберігання метанолу об'ємом 20 000 м³. При моделюванні враховано наявність дефектів і пошкоджень, накопичених спорудою протягом тривалої експлуатації, в тому числі і недосконалість форми. В результаті аналізу можливих розрахункових ситуацій виявлено, що найбільш небезпечним станом для ємності є технологічний вплив від вакууму, який може виникати при аварійному спустошенні ємності та може призвести до появи граничного стану споруди, особливо в місцях, що зазнали понаднормативних прогинів і деформацій. Верифіковано найбільш напружені та перевантажені ділянки, а також, найбільш вірогідні граничні стани.

Виявлені при візуальному та інструментальному обстеженні дефекти споруди, серед яких, понаднормативні прогини елементів сферичного даху, локальні випучування фрагментів циліндричної обичайки, підтверджують вказані висновки, та, опосередковано свідчать, що споруда при експлуатації піддавалася впливам, які призвели до появи граничного стану втрати стійкості форми. Визначено залишкові коефіцієнти запасів міцності та стійкості споруди.

На основі виконаних міцнісних розрахунків рекомендовано обмежити корисний об'єм заповнення резервуару до 70 % номінальної місткості. Розроблений технологічний регламент з подальшої безпечної експлуатації споруди, а також, окреслено напрямки подальших наукових досліджень за цією тематикою.

Ключові слова: резервуар, ємність, метанол, напружено-деформований стан, технологічні і кліматичні впливи, підсилення конструкцій.

Вступ

Ця наукова робота узагальнює результати досліджень з аналітичної оцінки міцності, стійкості і довговічності великорозмірних резервуарів, які використовуються для потреб хімічної промисловості на прикладі резервуару для зберігання метанолу загальним об'ємом 20 000 м³, який розташований на території Одеського припортового заводу у м. Южне.

Конструкція ємності, що розглядається, являє собою металевий вертикальний циліндричний безкаркасний резервуар для зберігання метанолу, виготовлений з листової сталі (рис. 1) який, згідно з [1, 2] конструктивно складається з:

- листового днища;
- циліндричної листової стінки (обичайки) змінної по висоті товщини, що захищена жалюзійним екраном з південного боку;
- тонколистового сферичного даху, вирішеного у вигляді збірних секториальних щитів, які сходяться у центральному кільці. Щити мають металевий каркас з двотаврів, швелерів та кутиків;
- опорного кільця жорсткості в місці приєднання даху до стінки (обичайки);
- сервісних майданчиків для обслуговування піногенераторів та інших технологічних агрегатів.

Ємність встановлена на залізобетонному плитно-кільцевому ростверку, який передає навантаження на скельний ґрунт основи через систему паль (рис. 2).

Клас наслідків (відповідальності) ємності – СС-3 (значні наслідки) [3].



Рисунок 1 – Загальний вигляд ємності

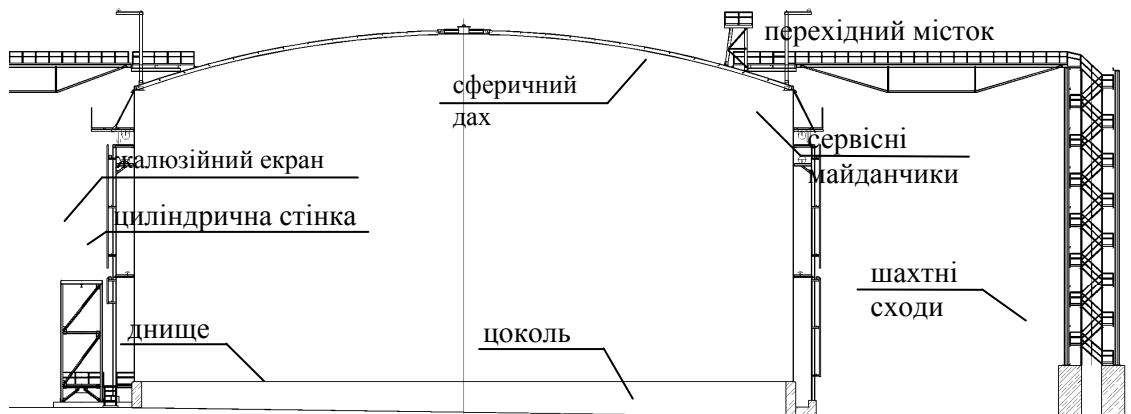


Рисунок 2 – Конструктивна схема ємності

Габаритні розміри ємності:

| | |
|--|-------------------------|
| - внутрішній діаметр обичайки | 39,9 м; |
| - висота циліндричної частини | 17,89 м; |
| - радіус сферичного даху | 60,0 м; |
| - висота сегмента сферичного даху | 3,4 м; |
| - загальна висота споруди від рівня цоколя | 21,52 м; |
| - корисний об'єм | 20 000 м ³ . |

Основна частина

В процесі обстеження споруди за методикою, викладеною у [9, 10] було встановлено, що, її окремі елементи зазнали пошкоджень, що можуть впливати на загальний технічний стан, найбільш суттєві з яких наведені нижче:

- ознаки втрати стійкості сегментів даху, понаднормативні вигини (ями) зашивки даху;
- понаднормативне відхилення верхнього кільця сферичного даху від горизонталі;
- локальні відхилення від циліндричної форми, окремі понаднормативні відхилення фрагментів обичайки від вертикалі (характер та локалізація вигинів може свідчити про місцеву втрату стійкості конструкції ємності під вакууму по першій формі);
- на металоконструкціях даху, днища і обичайки (особливо, на перших двох нижніх рівнях) виявлене масове ураження поверхневою корозією;
- стик окрайка днища до бетонного кільцевого ростверку не герметизований.

Для вибіркового контролю геометрії бічних стінок було вибрано найбільш небезпечні ділянки. Виявлені в процесі інструментального контролю відхилення стінок ємності від вертикалі у поза експлуатаційному (порожньому) стані на цих ділянках знаходяться в межах від -40 до $+129$ мм, що перевищує гранично встановлені відхилення $f_u = \pm 0,005 \cdot H_e = \pm 90$ (мм) та, місцями, перевищує допустимі відхилення для відповідного місцевого відхилення поясу (± 12 мм / 1 м.п., $f_u = \pm 0,005 \cdot H_{рівня}$ [1, табл. 8].

З метою визначення фактичних значень втрат перерізів основних будівельних металоконструкцій ємності від корозії з допомогою ультразвукового товщиноміра було проведено вибіркового контролю товщини стінок обичайки, днища та елементів кришки споруди згідно з вимогами [1]. Товщинометрія виконувалася у 2014 та 2018 роках. Встановлено, що найбільшого корозійного зносу зазнали окремі елементи днища, знос яких, місцями складає до 15 ... 17%. Корозійний знос конструкцій стінок менше встановлених розрахункових зносів за період 30-річної експлуатації (втрати перерізу до 5%). Корозійний знос листових елементів зашивки даху не перевищує 10%.

Результати обстеження, загалом, свідчать, що найбільш суттєві дефекти зосереджені на кришці та обичайці стан яких повинен бути уточнений за результатами розрахунків [9, 10].

Для оцінки надійності та довговічності будівельних конструкцій ємності, з урахуванням результатів візуального та інструментального обстеження, було виконано аналітичне моделювання напружено-деформованого стану ємності. При цьому, згідно з проектом, можливі такі режими робочих станів.

1-й – гідростатичні випробування, які виконують під час капітальних і поточних ремонтів, а також, після понаднормативних і понад проектних впливів. Випробування здійснюються шляхом заповнення 100% циліндричної частини резервуару морською водою.

2-й – робочий. Заповнення ємності на 95% об'єму циліндричної частини робочою рідиною (метанолом) з надлишковим тиском інертних газів 500 мм вод. ст.

3-й – вакуум 50 мм вод. ст. при змінному рівні рідини (випорожнення ємності у аварійних умовах).

4-й – стан нормальної експлуатації. Робочий надлишковий тиск інертних газів – 400 мм вод. ст., гідростатичний тиск від заповнення ємності метанолом на висоту до 12,8 м (71,5%) робочої висоти.

5-й – вакуум 25 мм вод. ст. (експлуатаційний стан в момент викачки робочої рідини).

Для подальшого попереднього аналізу напружено-деформованого стану конструкцій ємності виконано оціночні аналітичні розрахунки міцності та стійкості елементів споруди.

Зважаючи на ступінь зношеності ємності загалом, та її конструктивних елементів зокрема, у подальшому враховано дві найбільш невідповідні розрахункові ситуації (варіанти завантаження).

Варіант 1. Гідростатичні випробування заповненням ємності на 100% циліндричної частини + кліматичні впливи (снігові відкладення + ожеледні відкладення) + корисні впливи на сервісні майданчики. Гідростатичні випробування виконуються морською водою. Загальна висота стовпа рідини (морської води) густиною $\rho_e = 1,01 \text{ т/м}^3$ в момент випробування рівна загальній висоті за виключенням місця приєднання елементів даху, тобто $h_p = 17,88 \text{ м}$ (стан випробування). На цьому етапі, у випадку недостатньої міцності, буде виявлена гранична висота наповнення h_{pu} .

Варіант 2. Вакуум $p_e = -0,5 \text{ кПа}$ з розрахунковим вітровим тиском + снігові відкладення (поза експлуатаційний стан, ємність порожня). На цьому етапі, у випадку недостатнього запасу стійкості стінки, буде виявлений граничний від'ємний тиск (вакуум) $p_{ви}$.

Кліматичні навантаження та впливи на конструкції споруди прийняті згідно з нормативним документом [4]. Кліматичні впливи складаються з вітрових впливів (рис. 3), ожеледі, вітри при ожеледі, снігових та температурних впливів. Термін експлуатації складає 30 років згідно з додатком В [4]. Фактичний термін експлуатації споруди, зведеної у 1988 році, – більше 30 років.

Розглянемо випадок невідповідного стану при радіальному розтязі елементів гідростатичним впливом при випробуваннях. В цій розрахунковій ситуації власна вага конструкцій, навантаження від снігу та ожеледі чинить стискаючий осьовий вплив на елементи ємності. Водночас, гідростатичний вплив від морської води при випробуваннях розтягує елементи ємності у

радіальному напрямку [1, 5, 11]. Нескінченно малий елемент, вирізаний з тіла ємності, по безмоментній теорії, знаходиться у напружено-деформованому стані, зображеному на рис. 4,а).

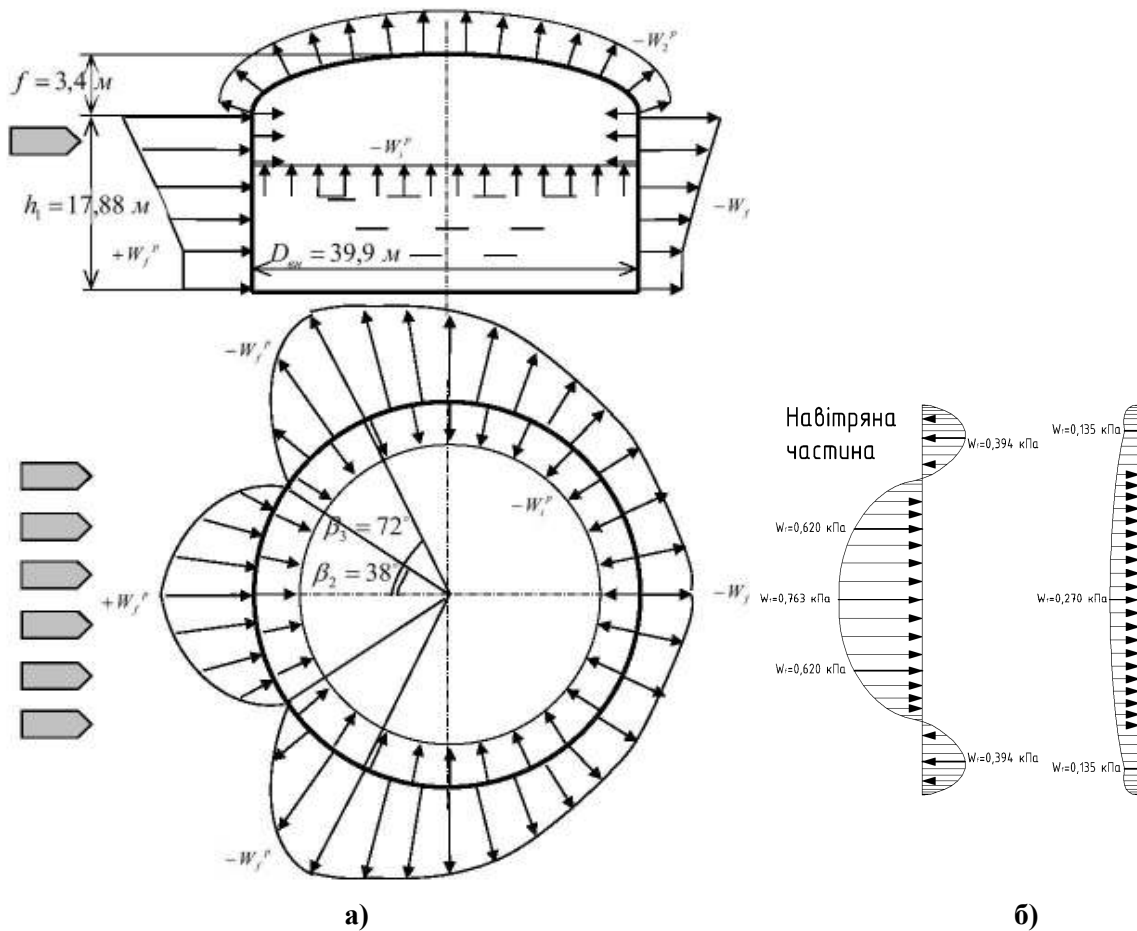


Рисунок 3 – Вітрове навантаження на ємність: а – схема прикладання вітрового впливу, б – вітрові навантаження в проекції на вісь споруди

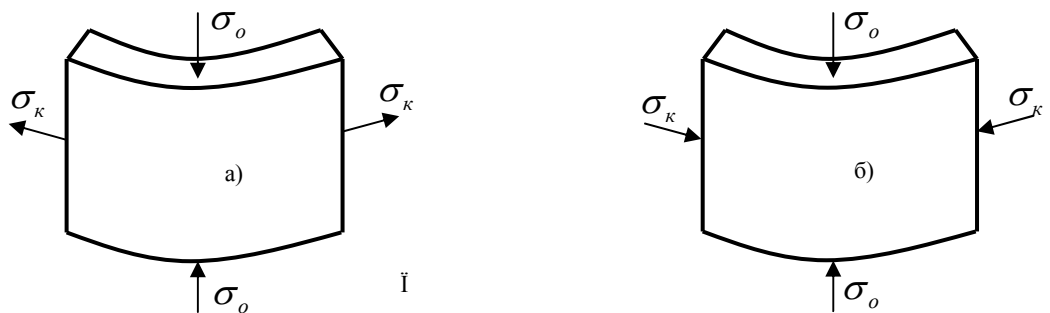


Рисунок 4 – Напружений стан елемента циліндричної обичайки (стінки) ємності: а – при гідростатичних випробуваннях, б – при вакуумі та порожній ємності в момент ураганного вітру

Загальні осьові стискаючі напруження σ_o складаються з напружень від власної ваги металоконструкцій ємності $p_{\Sigma gi}^p$, тиску на стінки від корисних впливів на сервісні майданчики $p_{\Sigma Fp}$, ваги снігу p_{sm} і ожеледі p_{ice}^p :

$$\sigma_o^p = p_{\Sigma gi}^p + p_{\Sigma Fp} + p_{sm} + p_{ice}^p \quad (1)$$

Радіальні (кільцеві) напруження σ_k викликані гідростатичним тиском від морської води. При розрахункових впливах кільцеві напруження рівні:

$$\sigma_k^p = \frac{p_i \cdot D_{вн}}{2 \cdot \Delta_i} \quad (2)$$

Значення σ_o^p та σ_k^p , обчислені за (1) та (2) зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Гідростатичні випробування морською водою, вага снігу та ожеледі, корисні впливи на металокопструкції смності

| Ділянка по висоті, м | Товщина стінки, мм | Гідростатичний тиск, кПа | Тиск на стінку, МПа, від | | | Напруження у стінці, МПа | |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|----------|--------------------------|--------------|
| | | | Ваги конструкцій | Корисних впливів | Снігу | Осьові | Кільцеві |
| | | | $P_{\Sigma gi}^p$ | $P_{\Sigma Fp}$ | P_{sm} | σ_o^p | σ_k^p |
| 1,83 (цоколь) | 17 | 248,3 | 2,467 | 1,58 | 0,63 | -4,68 | +292 |
| 3,32 | 16 | 227,6 | 2,456 | | | -4,67 | +284 |
| 4,81 | 14 | 206,9 | 2,632 | | | -4,84 | +295 |
| 5 | 14 | - | - | | | - | - |
| 10 | 14 | - | - | | | - | - |
| 13,75 | 13 | 82,8 | 1,841 | | | -4,10 | +129 |
| 19,72 (верхній обріз обичайки) | 13 | - | - | - | - | - | |

Еквівалентні напруження для оболонок, які працюють за безмоментною теорією, визначаються за [5, формула (14.1)]:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \text{ [МПа]}.$$

За умови, що дотичні напруження малі у порівнянні з нормальними:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_k^2 - (\sigma_k \cdot \sigma_o)^2}, \text{ [МПа]} \quad (3)$$

Наближені значення еквівалентних напружень з урахуванням корозійного зносу можна розрахувати за формулою (4):

$$\sigma_{екв, \max} = \sigma_{екв} \cdot \frac{\Delta_i}{\min\{\Delta_{i, \min}, S_{n, \min}\}}, \text{ [МПа]} \quad (4)$$

Для найбільш навантажених фрагментів листів обичайки (в рівні нижнього обрізу листів відповідної товщини) значення еквівалентних напружень без урахування корозійного зносу $\sigma_{екв}$ та з урахуванням зносу $\sigma_{екв, \max}$ зведені у табл. 2.

Гранично допустимі напруження в металі бічної стінки визначаємо за формулою (5):

$$[\sigma] = \gamma_c \cdot R_y, \text{ [МПа]}, \quad (5)$$

де R_y – розрахунковий опір прокату [5, табл. Г.2], $\gamma_{c1} = 0,7$ – коефіцієнт умов роботи стінки в рівні днища при розрахунку міцності, $\gamma_{c2} = 0,8$ – те саме для інших елементів стінки [5, табл. 5].

Для сталі С 325 нижнього поясу товщиною 17 мм класу С325 з $R_y = 315 \text{ МПа}$ за даними табл. Г.2 [5]: $[\sigma] = 0,7 \cdot 315 = 220,5 \text{ (МПа)}$. Співвідношення між $\sigma_{екв}^{\max}$ та $[\sigma]$ являється коефіцієнтом використання перерізу $\alpha = \sigma_{екв}^{\max} / [\sigma]$. Результати розрахунку зведені у табл. 2.

Гідростатичні випробування. Розрахункова таблиця.

| Рівень | Марка сталі за проектом (клас сталі) | Ділянка по висоті, м | Товщина стінки, мм | | | Еквівалентні напруження, МПа | | Розрахунковий опір прокату за [4, табл. Г.2] МПа | Допустимі напруження, МПа | Коефіцієнт вистання переріз |
|------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|---------|----------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | | | Проектна | За результатами товщинометрії | | Без урахування корозійного зносу | З урахуванням корозійного зносу | | | |
| | | | | 2014 р. | 2018 р. | | | | | |
| Δ_i | $S_{n, \min}$ | $\Delta_{i, \min}$ | $\sigma_{екв}$ | $\sigma_{екв}^{\max}$ | R_y | [σ] | α | | | |
| 1 | 09Г2С-12-1 (С295) | 1,83 (цоколь) | 17 | 15,6 | 16,8 | 294,4 | 320,8 | 285 | 199,5 | 1,61 |
| 2 | | 3,32 | 16 | 15,2 | 15,9 | 286,4 | 301,5 | 285 | 228 | 1,33 |
| 3...8 | | 4,81 | 14 | 13,0 | 13,3 | 297,5 | 320,4 | 285 | 228 | 1,41 |
| 9...11 | ВСтЗПс5-1 (С255) | 13,75 | 13 | 12,1 | 12,5 | 131,1 | 140,9 | 240 | 192 | 0,74 |

З табл. 2 добре видно, що стінка ємності перевантажена та не може сприймати розрахункових навантажень, які виникають при гідростатичних випробуваннях. Вирішальним для міцності стінки є перший (нижній) рівень листів проектною товщиною 17 мм (перевантаження на 61%).

Гранично допустима висота морської води, якою слід випробовувати ємність:

$$h_{pu} \approx \frac{2 \cdot \Delta_1 \cdot 0,9 \cdot [\sigma]}{\rho_e \cdot g \cdot D_{en} \cdot \gamma_{fm1} \cdot \gamma_n^I}, [M], \quad (6)$$

де коефіцієнтом 0,9 враховано перехід від еквівалентних напружень до кільцевих напружень розтягу та ефекти зростання напружень внаслідок порушення геометричної форми ємності.

$$h_{pu} = \frac{2 \cdot 17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 199,5 \cdot 10^6}{1010 \cdot 10 \cdot 39,9 \cdot 1,1 \cdot 1,25} = 11,0 (M).$$

Розглянемо випадок радіального стиску стінок вакуумом всередині ємності, вакуум від вітру та осьовий стиск вагою конструкцій і сніговим впливом.

Згідно з проектними даними будівельні конструкції ємності мають витримувати вакуум $p_e = -0,5 \text{ кПа}$. Коефіцієнт надійності за вакуумом $\gamma_{fm2} = 1,2$. Розрахунковий вакуум: $p_e^p = p_e \cdot \gamma_{fm2} \cdot \gamma_n^I = -0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = -0,75 \text{ (кПа)}$.

В результаті вітрового впливу всередині ємності може утворюватися додаткове розрідження (вакуум) $-W_i^p = -(0,511 \dots 0,708) \text{ кПа}$.

Кільцеві стискаючі напруження обчислюємо за формулою (7):

$$\sigma_{\kappa}^p = \frac{(p_e^p + W_i^p) \cdot D_{en}}{2 \cdot \Delta_c}, [MПа], \quad (7)$$

де $\Delta_c = \frac{\sum \Delta_i \cdot n_i}{\sum n_i} = 14,08 \text{ (мм)}$ – середня товщина стінки резервуара, $h_{ниж} = 1,49 \text{ м}$ і $h_{верх} = 1,99 \text{ м}$ –

висота поясів, відповідно, нижніх та верхніх рівнів.

Згідно з [5, п. 14.2.5] умова стійкості замкненої циліндричної оболонки обертання, що знаходиться під впливом двох стискаючих зусиль:

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_c} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \right) \leq 1. \quad (8)$$

Розрахункова таблиця. Вакуум, вітрове навантаження та вага снігу, що впливають на металоконструкції ємності

| Рівень | Ділянка по висоті, м | Проектна товщина стінки, мм | Тиск на стінку, МПа, від | | | Вакуум, кПа, від | | Напруження у стінці, МПа | |
|--------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------|--------------------------|--------------|
| | | | Ваги конструкцій | Корисних впливів | Снігу | Розрідження | Вітру | Осьові | Кільцеві |
| | | | Δ_i | $P_{\Sigma gi}^p$ | $P_{\Sigma Fp}$ | P_{sm} | P_e^p | $-W_i^p$ | σ_o^p |
| 1 | 1,83 (цоколь) | 17 | 2,467 | 1,58 | 0,63 | -0,75 | -0,708 | -4,68 | -3,9 |
| 2 | 3,32 | 16 | 2,456 | | | | | -4,67 | -3,9 |
| 3...8 | 4,81 | 14 | 2,632 | | | | | -4,84 | -3,9 |
| 9...11 | 13,75 | 13 | 1,841 | | | | | -4,10 | -3,9 |

У нашому випадку коефіцієнт γ_n врахований при визначенні величин σ_1 та σ_2 : $\sigma_o^p = \sigma_1 \cdot \gamma_n$, $\sigma_k^p = \sigma_2 \cdot \gamma_n$. Критичні напруження при цьому позначимо $\sigma_{cr, 1} = \sigma_{o, cr}$, $\sigma_{cr, 2} = \sigma_{k, cr}$. Оскільки при розрахунку стійкості $\gamma_c = \gamma_{c3} = 1,0$, формула (8) набуває вигляду (9):

$$\frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o, cr}} + \frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k, cr}} \leq 1. \tag{9}$$

Радіальні критичні напруження.

Співвідношення висоти резервуару до радіуса основи резервуару: $H_c / r = 17,89 / 19,95 = 0,892$.

Критичні напруження в циліндричній оболонці при впливі вакууму та стиску оболонки від вітру, за умови $0,5 < \left(\frac{H_c}{r} = 0,892\right) < 10$, визначаються за формулою (10), яка еквівалентна формулі (14.13) [5]:

$$\sigma_{k, cr} = 0,55 \cdot \gamma_{fm2} \cdot E \cdot \left(\frac{r}{H_c}\right) \cdot \left(\frac{\Delta_c}{r}\right)^{3/2}, \text{ [МПа]} \tag{10}$$

де $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ – модуль пружності сталі за табл. Б.1 [5].

Таким чином, критичні напруження при радіальному стиску ємності від вакууму:

$$\sigma_{k, cr} = 0,55 \cdot 1,2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{19,95}{17,89}\right) \cdot \left(\frac{14,08 \cdot 10^{-3}}{19,95}\right)^{3/2} = 2,834 \text{ (МПа)} \cdot$$

Осьові критичні напруження.

Визначаємо співвідношення висоти радіуса основи резервуару до середньої товщини стінки:

$$\frac{r}{\Delta_c} = \frac{19,95}{14,08 \cdot 10^{-3}} = 1,417 \cdot 10^3 > 300 \cdot$$

Критичні напруження в циліндричній оболонці при впливі осьових стискаючих сил можна обчислити по формулі (11):

$$\sigma_{o, cr} = \frac{c_i \cdot E \cdot \Delta_i}{r}, \text{ [МПа]}, \tag{11}$$

де Δ_i – товщина стінки ємності на відповідному рівні, c_i – коефіцієнт стійкості оболонок, який обчислюється інтерполяцією за [5, табл. 14.1] в залежності від співвідношення Δ_i / r .

Величина осової критичної сили для різних рівнів стінки та коефіцієнти використання перерізу стінки $\alpha = \frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o,cr}} + \frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k,cr}}$ наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Розрахункова таблиця.

| Рівень | Ділянка по висоті, м | Товщина стінки, мм | Співвідношення | Коефіцієнт стійкості | Фактичні стискаючі напруження, МПа | | Співвідношення | | Коефіцієнт використання |
|--------|----------------------|--------------------|----------------|----------------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| | | | | | Осьові | Кільцеві | $\frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o,cr}}$ | $\frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k,cr}}$ | |
| | | | | | σ_o^p | σ_k^p | $\sigma_{o,cr}$ | $\sigma_{k,cr}$ | |
| 1 | 1,83 (цоколь) | 17 | 1 174 | 0,0765 | -4,68 | -3,9 | 0,348 | 1,376 | 1,724 |
| 2 | 3,32 | 16 | 1 247 | 0,0751 | -4,67 | -3,9 | 0,376 | 1,376 | 1,752 |
| 3...8 | 4,81 | 14 | 1 425 | 0,0715 | -4,84 | -3,9 | 0,468 | 1,376 | 1,844 |
| 9...11 | 13,75 | 13 | 1 535 | 0,0693 | -4,10 | -3,9 | 0,441 | 1,376 | 1,817 |

З табл. 5 добре видно, що для всіх рівнів обичайки $\alpha > 1$. Умова стійкості не виконана. Стійкість циліндричної стінки ємності не забезпечена. Найбільший коефіцієнт використання спостерігається у 3-му рівні обичайки товщиною 14 мм: $\alpha_{max} = 1,844$.

Оцінимо величину допустимого вакууму у ємності. За умови $\alpha_u = 1,0$, формула (9) набуває вигляду $\sigma_{ки}^p = (1 - \sigma_o^p / \sigma_{o,cr}) \cdot \sigma_{k,cr}$. З формули (7) отримуємо вираз, що дозволяє оцінити граничний рівень вакууму:

$$p_{ви}^p = \left(\frac{2 \cdot \Delta_c \cdot (1 - \sigma_o^p / \sigma_{o,cr}) \cdot \sigma_{k,cr} - W_i^p}{D_{ви}} \right), \text{ [кПа]}. \quad (12)$$

Підставляючи відомі значення у формулу (12) отримуємо граничний розрахунковий рівень вакууму:

$$p_{ви}^p = - \left(\frac{2 \cdot 14,08 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,468) \cdot 2,834 \cdot 10^6 - 0,708 \cdot 10^3}{39,9} \right) = -0,356 \text{ (кПа)}.$$

Граничний нормативний рівень вакууму:

$$p_{ви} = p_{ви}^p / \gamma_{fm2} \cdot \gamma_n^I = -0,356 / (1,2 \cdot 1,25) = -0,237 \text{ (кПа)} = -23,7 \text{ (мм вод.ст)}.$$

Висновки

В результаті аналізу моделі напружено-деформованого стану конструкції ємності для зберігання метанолу встановлено. Металоконструкції ємності, внаслідок тривалої, більше 30-ти річної, експлуатації, зазнали втрат від корозії, механічних пошкоджень та деформацій елементів, що суттєво знизило міцність, жорсткість, надійність та довговічність споруди. Дефекти, в основному, зосереджені на сферичному даху та циліндричній обичайці. Аналітичними розрахунками, виконаними за методикою, викладеною у [5], встановлено, що умови міцності та стійкості бічних стінок металоконструкцій ємності при впливі проектних навантажень із забезпеченням нормативних запасів з надійності та довговічності, не виконуються, що опосередковано підтверджується виявленими викривленнями геометрії.

Загальні рекомендації з подальшої експлуатації споруди (технічний регламент).

1. Виконати наскрізний геодезичний контроль стінок ємності, що дозволить встановити її дійсну деформовану форму для виконання уточнених розрахунків напружено-деформованого стану.

2. Передбачити заходи з припинення витоків з інженерних мереж і технологічних резервуарів, забезпечити надійне відведення від споруд поверхневих вод для запобігання погіршення властивостей ґрунтів внаслідок замочування, відновити вимощення.

3. На основі дефектування, виконати ремонтно-відновлювальні роботи несучих та огорожувальних конструкцій ємності, технологічних площадок, шахтних сходів та драбин, а також інших елементів комплексу зберігання і перевантаження метанолу.

4. Експлуатаційні обмеження:

4.1. Зниження граничної висоти заповнення ємності при гідростатичних випробуваннях шляхом заповнення морською водою з проектною висоти $h_p = 17,88 \text{ м}$ до гранично допустимого $h_{pu} = 11,0 \text{ м}$. Тому розрахункова місткість 1 резервуара знижується з 20 000 до 13 750 м³ метанолу (близько 70% ємності).

4.2. Зниження допустимого рівня вакууму всередині ємності з проектного $p_e = -0,5 \text{ кПа}$ до $p_{ви} = -0,237 \text{ кПа}$ (нормативне значення).

5. Для уточнення напружено-деформованого стану споруди, оцінки її сейсмостійкості та локалізації ділянок, що потребують підсилення необхідні подальші ґрунтовні дослідження, які повинні включати розробку моделі сейсмічного впливу на споруду та високо деталізоване моделювання самої споруди методом скінчених елементів з урахуванням недосконалостей геометрії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. ВБН В.2.2-58.2-94. / Держкомнафтогаз. – К.: Укрнафтопродукт, 1994. – 98 с. – (Відомчі будівельні норми України).
2. Генкин А. Э. Оборудование химических заводов: Учеб. пособие для техникумов. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. Шк., 1986. – 280 с.: ил.
3. Система забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. ДБН В.1.2-14-2009. К.: Мінбуд України, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
4. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-:2006. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
5. Сталеві конструкції. Норми проектування. ДБН В.2.6-168:2014. На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013. [Дата надання чинності 01.01.2015 р.] – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Національний стандарт України).
6. Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013. Київ, Мінрегіон України, 2013 – 37 с.
7. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Введ. з 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.
8. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд. ДБН В.3.1-1-2002. Держкомітет України з будівництва і архітектури. Київ. 2003, 82 с. – (Національний стандарт України).
9. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. К., «ДПУкрНДНЦ»: Мінрегіон України, 2017. – 44 с. – (Національні стандарти України).
10. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. К., «ДПУкрНДНЦ»: Мінрегіон України, 2017. – 80 с. – (Національний стандарт України).
11. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 57 с. – (Будівельні норми і правила).
12. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. Введ. взамен ГОСТ 14782-76, ГОСТ 22368-77. Министерство путей сообщения СССР. – (Міждержавний стандарт).
13. СТО-СА-03.003-2009. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия. М., 2009 – 77 с.

REFERENCES

1. Rezervuary vertykal'ni stalevi dlya zberihannya nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa. VBN V.2.2-58.2-94. / Derzhkomnaftohaz. – K.: Ukrnaftoprodukt, 1994. – 98 s. – (Vidomchi budivel'ni normy Ukrainy).
2. Henkyn A. É. Oborudovanye khymycheskykh zavodov: Ucheb. posobyey dlya tekhnikumov. – 4-e yzd., pererab. Y dop. – M.: Vyssh. Shk., 1986. – 280 s.: yl.
3. Systema zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Zahal'ni pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel', sporud, budivel'nykh konstruktсий ta osnov. DBN V.1.2-14-2009. K.: Minbud Ukrainy, 2009. – 37 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrainy).
4. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. DBN V.1.2-:2006. [Na zaminu SNyP 2.01.07-85 (krim rozdil 10)]. [Chynnyy vid 2007-01-01] – K.: Minbud Ukrainy, 2006. – 71 s. – (Derzhavni budivel'ni normy Ukrainy).
5. Stalevi konstruktсийi. Normy proektuvannya. DBN V.2.6-168:2014. Na zaminu DBN V.2.6-163:2010 u chastyini rozdil 1 ta DSTU B V.2.6-194:2013. [Data nadannya chynnosti 01.01.2015 r.] – K.: Minrehion Ukrainy, 2014. – 199 s. – (Natsional'nyy standart Ukrainy).

6. Vyznachennya klasu naslidkiv (vidpovidal'nosti) ta katehoriyi skladnosti obyektiv budivnytstva. DSTU-N B V.1.2-16:2013. Kyiv, Minrehion Ukrayiny, 2013 – 37 s.
7. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya. DSTU B V.1.2-3:2006. Vved. Z 1 sichnya 2007 r. na zaminu rozdlu 10 SNyP 2.01.07-85. K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 10 s.
8. Remont i pidsylennya nesuchykh i ohorodzhual'nykh budivel'nykh konstruksiy i osnov promyslovykh budynkiv ta sporud. DBN V.3.1-1-2002. Derzhkomitet Ukrayiny z budivnytstva i arkhitektury. Kyiv. 2003, 82 s. – (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
9. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. DSTU-N B V.1.2-18:2016. K., «DPUkrNDNTS»: Minrehion Ukrayiny, 2017. – 44 s. – (Natsional'ni standarty Ukrayiny).
10. Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh budivel'nykh konstruksiy, shcho ekspluatuyut'sya. DSTU B V.2.6-210:2016. K., «DPUkrNDNTS»: Minrehion Ukrayiny, 2017. – 80 s. – (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
11. SNyP 2.09.03-85. Sooruzhennya promyshlennykh predpryyaty. TSYTP Hosstroya SSSR, 1986. – 57 s. – (Budivel'ni normy i pravyla).
12. HOST 14782-86. Kontrol' nerazrushayushchyy. Soedynennya svarnye. Metody ul'trazvukovye. Vved. vzamen HOST 14782-76, HOST 22368-77. Mynysterstvo putey soobshchenyya SSSR. – (Mizhderzhavnyy standart).
13. STO-SA-03.003-2009. Sosudy u apparaty. Normy u metody rascheta na prochnost'. Raschet na seysmycheskye vozdeystviya. M., 2009 – 77 s.

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Попова Аліна Володимирівна – студент. Факультет хімії, біології та біотехнологій, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, e-mail: alina.popova260702@gmail.com

V. Popov¹
A. Popova²

ANALYTICAL MODELING OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE METHANOL STORAGE TANK UNDER THE TECHNOLOGICAL AND CLIMATIC ACTIONS

¹Vinnytsia National Technical University
²Vasyl Stus Donetsk National University

The paper contains the analytical modeling of the stress-strain state of the structures of the large-sized tanks for storing organic liquids under the technological and climatic actions on the example of a tank for storing methanol with a volume of 20,000 m³.

The modeling took into account the defects and damages accumulated by the structure during long-term operation, including the form's imperfection. As a result of the analysis of probable design situations have been revealed that the most unfavorable and dangerous for tanks structures are technological effects from vacuum which occur during emergency emptying of the tank and can lead to the occurrence of limiting states of the structure. This is especially true in areas that already have excess bends and deformations. Have been verified the most stressed and congested areas, as well as the most probable limit states.

Defects of the structure were revealed as a result of visual and instrumental examination, namely, the excess deflections of the spherical roof elements, local protrusions of the cylindrical shell fragments, confirm these findings. Defects indirectly indicate that the structure during operation have been under the influence of unfavorable factors, which led to the appearance of the limiting state of loss of shape stability.

Have been determined the residual safety and stability factors of the structure.

Have been recommended to limit the useful volume of filling the tank to 70% of the nominal capacity based on the stress-strain calculations.

Have been developed the technological regulations for further safe operation of the facility and outlined directions for further scientific research on this topic.

Key words: tank, methanol, stress-strain state, static and dynamic effects, technological and climatic influences reinforcement of structures.

Popov Vladimir O. – Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty for Civil Engineering, Thermal Power Engineering and Gas Supply, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Popova Alina V. – student, Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia city, e-mail: alina.popova260702@gmail.com

В. А. Попов¹
А. В. Попова²

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ МЕТАНОЛА ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ И КЛИМАТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

¹Винницкий национальный технический университет
²Донецкий национальный университет имени Василя Стуса

В статье разработана методика аналитического моделирования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций крупноразмерных емкостей для хранения органических жидкостей под климатическим и технологическим воздействием на примере резервуара для хранения метанола объемом 20 000 м³.

При моделировании учтены дефекты и повреждения, накопленные сооружением в течение длительной эксплуатации, в том числе и несовершенство формы. В результате анализа вероятных расчетных ситуаций выявлено, что наиболее неблагоприятным и опасным для конструкций емкости являются технологические воздействия от вакуума, которые возникают при аварийном опорожнении емкости и могут привести к возникновению предельных состояний сооружения, особенно на участках, которые уже имеют сверхнормативные изгибы и деформации. Верифицированы наиболее напряженные и перегруженные участки, а также, наиболее вероятные предельные состояния.

Выявленные в результате визуального и инструментального обследования дефекты сооружения, в числе которых, сверхнормативные прогибы элементов сферической крыши, локальные выпячивания фрагментов цилиндрической обечайки, подтверждают указанные выводы, и, косвенно свидетельствуют, что сооружение при эксплуатации находилось под действием неблагоприятных факторов, которые привели к появлению предельного состояния потери устойчивости формы. Определены остаточные коэффициенты запаса прочности и устойчивости сооружения.

На основании выполненных прочностных расчетов рекомендовано ограничить полезный объем заполнения резервуара до 70% номинальной вместимости. Разработан технологический регламент дальнейшей безопасной эксплуатации сооружения, а также, очерчены направления дальнейших научных исследований по этой тематике.

Ключевые слова: резервуар, емкость, метанол, напряженно-деформированное состояние, технологические и климатические воздействия, усиление конструкций.

Попов Владимир Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, Факультет строительства, теплоэнергетики и газоснабжения, Винницкий национальный технический университет, Винница, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Попова Алина Владимировна – студент. Факультет химии, биологии и биотехнологий, Донецкий национальный университет имени Василя Стуса, Винница, e-mail: alina.popova260702@gmail.com