

УДК 624.953:624.07

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.56.984

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ

ЄГОРОВ Є. А.¹, докт. техн. наук, проф.,ІВЧЕНКО Ю. В.^{2*}, канд. техн. наук,КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т. А.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: yehorov.yevhenii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

^{2*} Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 420-35-71, e-mail: ivchenko.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1318-991X

³ Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kovtun-horbachova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

Анотація. Постановка проблеми. Досліджено особливості напружено-деформованого стану циліндричних оболонок за вітрового тиску з урахуванням його фактичного розподілу на споруди циліндричної форми. **Мета роботи** – отримання якісної картини розподілу напружень і деформацій у циліндричній стінці резервуара за вітрового навантаження, визначення впливу вітрового навантаження як на міцність, так і на стійкість резервуара. **Практична значимість.** Відомо, що напруження, зумовлені дією вітрового навантаження, через їх невелике значення безпечні з позицій міцності, водночас, отримання числових значень основних компонентів напружено-деформованого стану резервуара за вітрового навантаження має певне практичне значення. **Завдання** – розв'язання задачі деформування циліндричної оболонки за зовнішнього нерівномірного тиску вітрового типу. **Зміст досліджень.** Рішення задачі деформування виконувалось у лінійній постановці для циліндричних оболонок із геометричними параметрами, що відповідають геометричним параметрам вертикальних резервуарів об'ємом 1 000...30 000 м³. Розв'язання задачі проводилось для декількох навантажень оболонки вітровим тиском різної інтенсивності $q = (0,2...1,2) q_{срв}$. Така постановка задачі дозволила дослідити особливості напружено-деформованого стану циліндричних оболонок при дії вітрового тиску як за малих значень зовнішнього навантаження, так і за значень тиску, близьких до критичних, що важливо з позицій стійкості оболонок. **Висновки.** Статичний розрахунок оболонок при дії вітрового тиску показав, що превалюють мембранні напруження кільцевого напрямку. Другі за величиною – мембранні напруження меридіонального напрямку. Розподіл цих напружень за периметром оболонки відповідає епюрі вітрового тиску. Головна особливість епюр згинальних напружень – це їх хвильовий характер за периметром оболонки. Епюри радіальних переміщень w і деформовані схеми оболонок також мають хвильовий характер. Величина таких хвильових відхилень несуттєва, проте їх довжина близька до довжини хвиль випинання оболонки у разі втрати нею стійкості. Таким чином, процес деформування циліндричних оболонок за вітрового тиску має у цілому стійкий характер. Саме по собі вітрове навантаження безпечно з боку міцності. Проте отриманий характер деформування, а саме хвильові відхилення поверхні оболонки, може суттєво впливати на стійкість оболонки, що вимагає додаткових досліджень.

Ключові слова: напружено-деформований стан; циліндричний резервуар; зовнішній тиск; вітрове навантаження

FEATURES OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS UNDER EXTERNAL PRESSURE

YEHOROV Yev.A.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,IVCHENKO Yu.V.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.),KOVTUN-HORBACHOVA T.A.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: yehorov.yevhenii@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7199-192X

^{2*} Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 420-35-71, e-mail: ivchenko.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1318-991X

³ Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: kovtun-horbachova.tetiana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

Abstract. The paper investigates the features of the stress-deformed state of cylindrical shells under wind pressure, taking into account its actual distribution on cylindrical structures. *The purpose of the work* is to obtain a qualitative picture of the distribution of stresses and deformations in the cylindrical wall of the tank under wind load, to determine the effect of wind load on both the strength and stability of the tank. *Practical significance.* It is known that the stresses caused by the action of the wind load, due to their small value, are safe from the point of view of strength, at the same time, obtaining quantitative values of the stress-deformed state main components of the tank under wind load has a certain practical significance. *The task* is to solve the problem of deformation of the cylindrical shell under external uneven pressure of the wind type. *Content of research.* The solution of the deformation problem was performed in a linear formulation for cylindrical shells with geometric parameters corresponding to the geometric parameters of vertical tanks with a volume of 1,000...30,000 m³. The solution of the problem was carried out for several loads of the shell with wind pressure of different intensity $q = (0,2...1,2) q_{crw}$. Such formulation of the problem made it possible to investigate the features of the stress - deformed state of cylindrical shells under wind pressure both at small values of the external load and at pressure values close to the critical ones, which is important from the standpoint of shell stability. *Conclusions.* The static calculation of the shells under wind pressure showed that membrane stresses in the annular direction prevail. Membrane stresses in the meridional direction are the second largest. The distribution of these stresses along the perimeter of the shell corresponds to the wind pressure plot. The main feature of the bending stress graphs is their wave character along the perimeter of the shell. Plots of radial displacements w and deformed shells also have a wave character. The size of such wave deviations is insignificant, but their length is close to the length of the waves of the shell protrusion when it loses its stability. Thus, the process of deformation of cylindrical shells under wind pressure is generally stable. The wind load itself is safe from the strength point of view. However, the obtained nature of the deformation, namely the wave deviations of the surface of the shell, can significantly affect the stability of the shell, which requires additional research.

Keywords: *stressed-deformed state; cylindrical tank; external pressure; wind load*

Вступ, аналіз стану проблеми, постановка задачі. Ще до початку повномасштабного вторгнення росії в Україну вітчизняні експерти у нафтогазовій галузі неодноразово порушували питання про необхідність розвитку нафтотранспортної системи країни, створення стратегічного запасу нафти з метою підвищення надійності забезпечення України нафтою та нафтопродуктами. Зокрема, розглядалися питання будівництва нафтових терміналів із зведенням резервуарів об'ємом до 120 тис. м³.

На жаль, таке масштабне будівництво поки що відкладене. Разом із тим, з початком війни, питання забезпечення нафтопродуктами потреб економіки і фронту стоїть ще гостріше, по-перше, через постійні ворожі атаки на енергетичний комплекс країни, і, по-друге, через майже повне знищення ворогом вітчизняної галузі нафтопереробки. Отож, на перший план виходить необхідність будівництва великої кількості нових резервуарів і розвиток

інфраструктури для транспортування нафтопродуктів країною.

Згідно з розробленими на сьогодні типовими рішеннями сталевих вертикальних циліндричних резервуарів об'єм резервуарів вказаного типу складає 100...50 000 м³. Один з основних несних елементів вертикальних резервуарів є циліндрична стінка. Для резервуарів різного об'єму геометричні параметри стінки мають такі відношення: $l / r = 0,6...2,5$; $r / t = 600...3 800$ (l , r , t – довжина, радіус і товщина циліндричної стінки). Таким чином, циліндрична стінка резервуарів належить до класу дуже тонкостінних оболонок. Несна здатність циліндричної стінки резервуара визначається її міцністю і стійкістю.

Враховуючи той факт, що в процесі експлуатації на резервуар діє цілий комплекс стискних навантажень – це, насамперед, власна вага конструкцій стінки і покрівлі, вага снігу, вакуум і вітрове навантаження, – можна зробити висновок,

що для таких конструкцій проблема стійкості постає однією з найважливіших.

І, якщо розрахунок стінки за дії осьових навантажень достатньо добре досліджений у технічній літературі [3; 4], питання розрахунку циліндричної стінки за зовнішнього тиску, зокрема, за вітрового навантаження, потребують більш детального вивчення.

Згідно з нормами проектування [5] вітрове навантаження на споруди циліндричної форми являє собою нерівномірний зовнішній тиск з активною (стискальною) зоною по периметру оболонки, яка становить приблизно 70° залежно від геометричних параметрів стінки, і пасивною (розтягнутою) зоною, що діє на решту периметра оболонки. Згідно з нормами проектування [2] у розрахунку резервуару на стійкість нерівномірний вітровий тиск замінюється рівномірним зовнішнім тиском. При цьому коефіцієнт зведення має одне й те саме значення для усіх резервуарів, незважаючи на великі відмінності їх геометричних параметрів. Таким чином, постає необхідність у розв'язанні задачі стійкості циліндричної оболонки за дії зовнішнього тиску вітрового типу.

У праці [1] встановлено, що за дії нерівномірного зовнішнього тиску, що характеризується сильним докритичним згином оболонок, розрахунок стійкості з використанням лінійної моментної моделі докритичного стану оболонки дає суттєві похибки. Такі похибки виникають внаслідок того, що при цьому не враховуються великі докритичні прогини, перебудова докритичної форми оболонки у випадку збільшення на неї навантаження.

У такому разі необхідно проводити нелінійний розрахунок стійкості оболонки. Слід зазначити, що розв'язання задач такого типу дуже добре реалізоване у різних сучасних програмних комплексах («ЛІРА», «СЕЛЕНА», «ANSYS» тощо). Проте розв'язання задачі стійкості циліндричної оболонки за нерівномірного зовнішнього тиску вітрового типу у нелінійній постановці вимагає ретельного задання

вихідних даних, виконання самої задачі, аналізу отриманих результатів і спричинює певні витрати часу.

Враховуючи вищевикладене, проводиться дослідження особливостей напружено-деформованого стану циліндричних оболонок за вітрового тиску з урахуванням його фактичного розподілу.

Мета роботи. Задачу деформування циліндричної оболонки за зовнішнього нерівномірного тиску розв'язували з метою отримання якісної картини розподілу напружень і деформацій у циліндричній стінці резервуара за вітрового навантаження, визначення впливу вітрового навантаження як на міцність, так і на стійкість резервуару. З джерел [6] відомо, що напруження, зумовлені дією вітрового навантаження, через їх невелике значення безпечні з позицій міцності, водночас, отримання числових значень основних компонентів напружено-деформованого стану резервуара за вітрового навантаження має певне практичне значення.

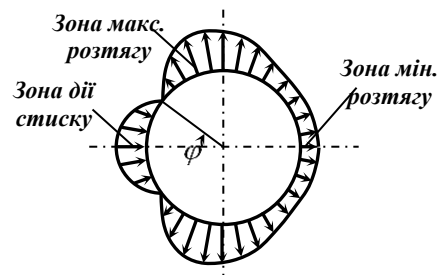


Рис. 1. Схема дії вітрового тиску на циліндричну оболонку

Зміст досліджень. Розв'язання задачі деформування виконувалось у лінійній постановці для циліндричних оболонок із такими геометричними параметрами: $r/t = 1500$, $l/r = 0,8 \div 1,6$, що відповідає геометричним параметрам вертикальних резервуарів об'ємом 1 000–30 000 м³. Як граничні умови розглядалось шарнірне (варіант 1) і жорстке (варіант 2) закріплення обох торців оболонки. Задачу розв'язували для декількох завантажень оболонки вітровим тиском різної інтенсивності $q = (0,2; 0,4; 0,8; 1,2) \cdot q_{crv}$, де $0,2 \div 1,2$ – значення вітрового навантаження у місці дії

максимуму активної частини вітрового тиску, тобто при $\varphi = 0^\circ$.

Така постановка задачі дозволила дослідити особливості напружено-деформованого стану циліндричних оболонок при дії вітрового тиску як за малих значень зовнішнього навантаження, так і за значень тиску, близьких до критичних, що важливо з позицій стійкості оболонок.

Аналіз отриманих значень компонентів НДС виконувався за найбільш характерними

перерізами. За периметром оболонки розглядалися перерізи, розташовані у зоні дії максимального активного тиску ($\varphi = 0^\circ$), максимального пасивного ($\varphi = 70^\circ$) і мінімального пасивного тиску ($\varphi = 180^\circ$). За довжиною оболонки розглядався переріз посередині оболонки, де напруження і переміщення є найбільшими.

Розподіл напружень по периметру оболонки і їх характерні значення наведено на рисунках 2, 3.

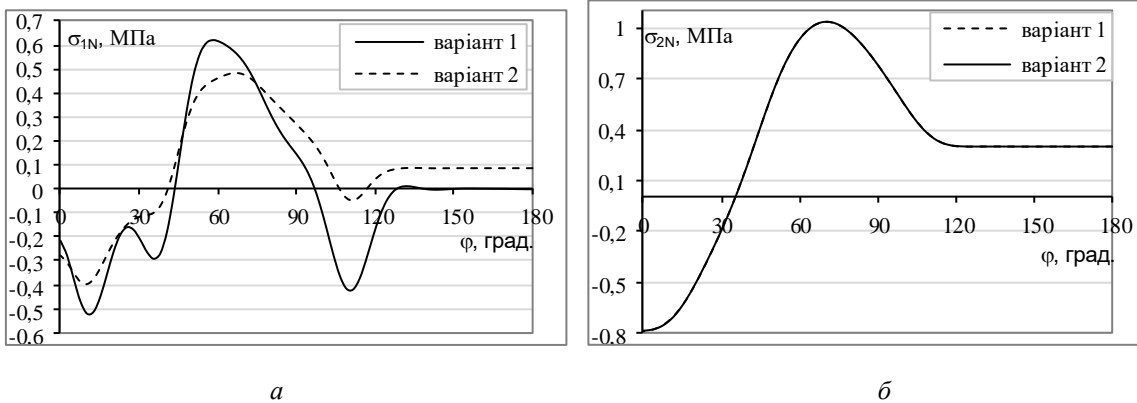


Рис. 2. Епюри мембранних меридіональних (а) і кільцевих (б) напружень у кільцевому перерізі $x = l/2$ оболонки

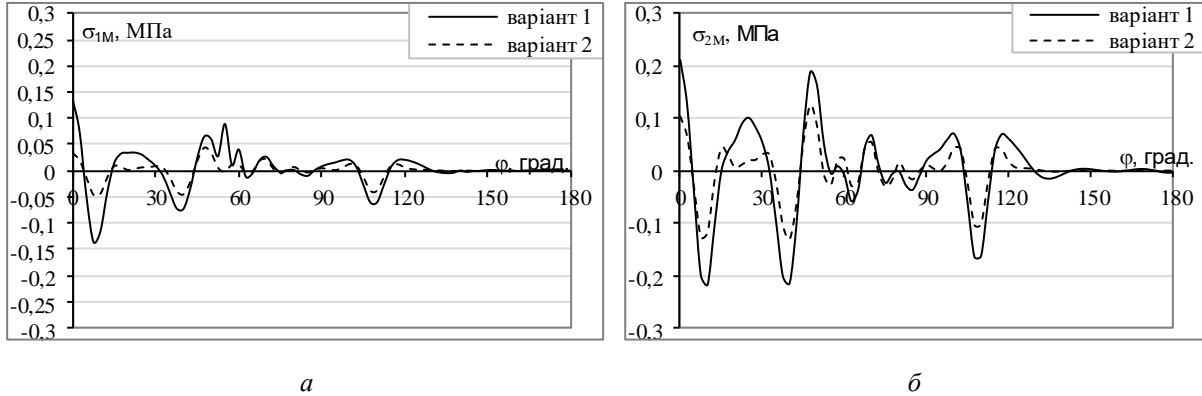


Рис. 3. Епюри згинальних меридіональних (а) і кільцевих (б) напружень у кільцевому перерізі $x = l/2$ оболонки з $r/t = 1500$, $l/r = 0,8$

Із графіків видно, що у всіх випадках загальний характер розподілу мембранних кільцевих і меридіональних напружень близький до розподілу вітрового тиску. Необхідно також додати, що в отриманих результатах простежується залежність:

$$\sigma_{1N} = \mu \cdot \sigma_{2N}; \quad (1)$$

$$\sigma_{1M} = \mu \cdot \sigma_{2M}, \quad (2)$$

де σ_{1N} , σ_{2N} – мембранні напруження, відповідно, меридіонального і кільцевого

напрямоків; σ_{1M} , σ_{2M} – згинальні напруження, відповідно, меридіонального і кільцевого напрямків; μ – коефіцієнт Пуассона.

З аналізу результатів отримано, що у всіх зонах за периметром оболонки деформування поверхні по висоті оболонки відбувається за однією півхвилею (рис. 4, 5), що також добре видно на деформованих схемах оболонок (рис. 6).

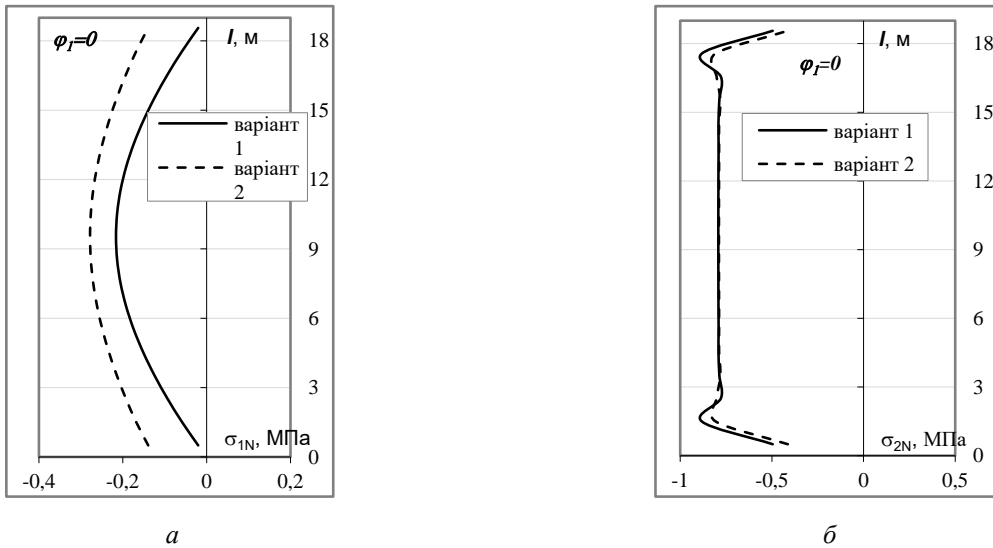


Рис. 4. Етюри мембранних меридіональних (а) і кільцевих (б) напружень в оболонці з $r/t=1500$, $l/r=0,8$

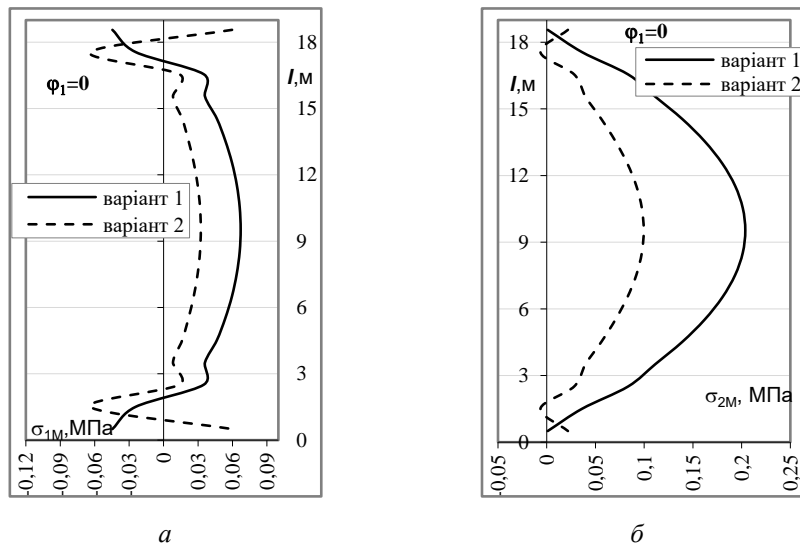


Рис. 5. Етюри згинальних меридіональних (а) і кільцевих (б) напружень в оболонці з $r/t=1500$, $l/r=0,8$

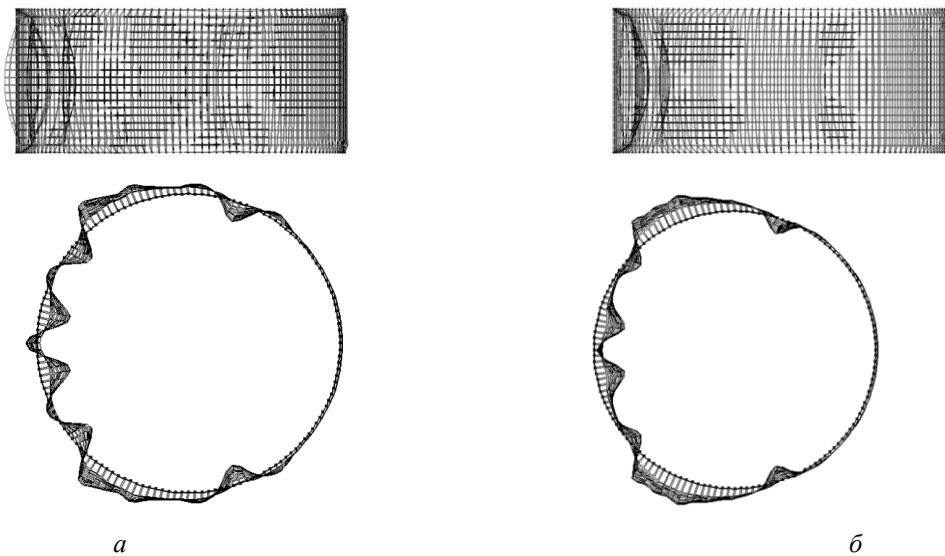


Рис. 6. Деформовані схеми шарнірно обп'єтої (а) і жорстко затисненої (б) оболонки з $r/t=1500$, $l/r=0,8$

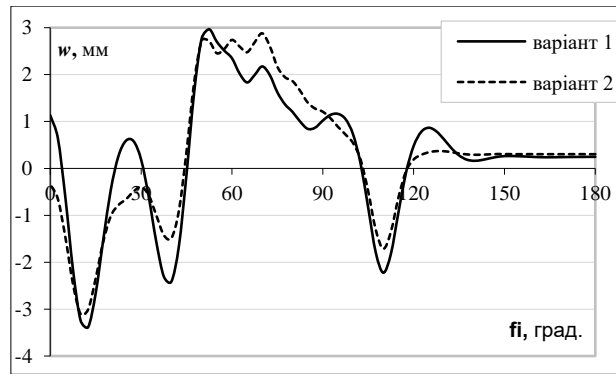


Рис. 7. Радіальні переміщення у кільцевому перерізі $x = l/2$ оболонки з параметрами $r/t = 1500$, $l/r = 0,8$

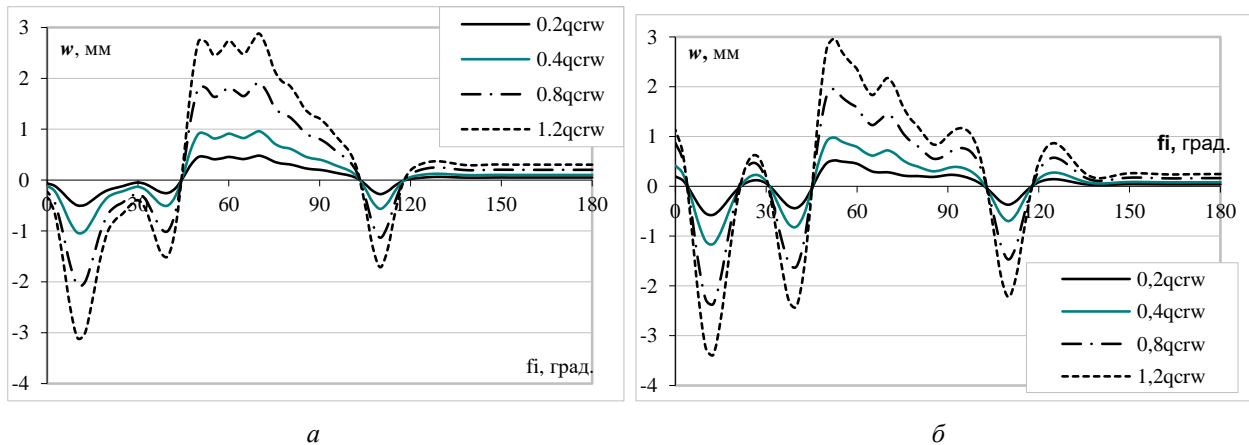


Рис. 8. Радіальні переміщення шарнірно опертій (а) і жорстко затисненої (б) оболонки з параметрами $r/t = 1500$, $l/r = 0,8$

У напружено-деформованому стані, викликаному вітровим тиском, чітко можна виділити зони «крайового ефекту», що розташовані поблизу закріплених торців оболонки.

На наведених схемах деформування оболонок видно виникнення хвильових відхилень поверхні оболонки. Встановлено, що у всіх випадках хвилеутворення більш помітне на ділянці активного вітрового тиску.

Також досліджено особливості поведінки циліндричних оболонок за поступового зростання вітрового тиску.

На рисунку 8 наведено графіки залежності радіального переміщення w від величини навантаження, побудовані для оболонки з параметрами $r/t = 1500$, $l/r = 0,8$ для випадків шарнірного і жорсткого закріплення. Необхідно зазначити, що критичне значення вітрового тиску для розглянутої оболонки при шарнірному

обпиранні складає $q_{crw}^{N1} = 3,23$ кПа, при жорсткому затисненні – $q_{crw}^{N2} = 4,38$ кПа. Значення переміщень отримані для таких завантажень: $(0,2; 0,4; 0,8; 1,2) \cdot q_{crw}$.

Із графіків видно, що переміщення оболонки наростають поступово, пропорційно збільшенню вітрового тиску. Загальна спрямованість переміщень відповідає епюрі вітрового навантаження, перебудов форми деформування оболонок не спостерігається у випадку розглянутих варіантів умов закріплення оболонок.

Висновки

Статичний розрахунок оболонок за вітрового тиску показав, що превалюють мембранні напруження кільцевого напрямку. Розподіл цих напружень за периметром оболонки повністю відповідає епюрі вітрового тиску. У всіх випадках величина кільцевих напружень не перевищувала 12...18 МПа.

Другими за величиною стали мембранні напруження меридіонального напрямку. Загальна картина розподілу цих напружень також відповідає епюрі вітрового тиску, але при цьому на епюрах σ_{1N} з'являються незначні хвильові відхилення.

Згинальні напруження у середній частині оболонки дуже незначні ($\sigma_{2M} = 0,12 \dots 0,20$ МПа), при цьому можна чітко виділити зони «крайового ефекту», розміщені поблизу закріплених торців оболонки. Головна особливість епюр згинальних напружень – це їх хвильовий характер.

Характеру епюр напружень відповідають епюри радіальних переміщень w і деформовані схеми оболонок, які також мають хвильовий характер. Це вказує, що

вже за невеликих значень вітрового тиску $q_w = (0,12 \dots 0,15) \cdot q_{cr,w}$ по периметру оболонки, і особливо в зоні активного вітрового тиску, виникають хвильові відхилення. Величина таких відхилень несуттєва, проте їх довжина близька до довжини хвиль випинання оболонки у разі втрати нею стійкості.

Процес деформування циліндричних оболонок за вітрового тиску має у цілому стійкий характер. Саме по собі вітрове навантаження безпечно з боку міцності. Проте отриманий характер деформування, а саме хвильові відхилення поверхні оболонки, можуть суттєво впливати на стійкість оболонки, що вимагає додаткових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андреев Л. В., Ободан Н. И., Лебедев А. Г. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации. Москва : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 207 с.
2. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Вид. офіц. Київ : Держкомнафтогаз, 1994. 98 с. (Відомчі будівельні норми України).
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва : Наука, 1967. 984 с.
4. Григолюк Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек. Москва : Наука, 1978. 359 с.
5. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. 75 с. (Державні будівельні норми України).
6. Сафарян М. К., Шутов В. Е. Расчет стальных вертикальных цилиндрических резервуаров большой емкости на действие ветровой нагрузки. *Экспресс-информация ВНИИГазпрома*. 1968. № 1. С. 15–22.

REFERENCES

1. Andreev L.V., Obodan N.Y. and Lebedev A.H. *Ustoichyvost obolochek pry neosesymetrychnoi deformatsyy* [Stability of shells under non-axisymmetric deformation]. Moscow : Gl. red. fyz.-mat. lit. Publ., 1988, 207 p. (in Russian)
2. VBN V.2.2-58.2-94. *Rezervuary vertykalni stalevi dlia zberihannia nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa* [Vertical steel tanks for storing oil and oil products with saturated vapor pressure not higher than 93.3 kPa]. Publ. offic. Kyiv : Derzhkomnaftohaz, 1994. 98 p. (Departmental Building Norms of Ukraine). (in Ukrainian)
3. Volmyr A.S. *Ustoichyvost deformyruemikh system* [Stability of deformable systems]. Moscow : Nauka Publ., 1967, 984 p. (in Russian)
4. Hryholiuk E.Y. and Kabanov V.V. *Ustoichyvost obolochek* [Shell stability]. Moscow : Nauka Publ, 1978, 359 p. (in Russian)
5. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia* [Loads and influences. Design standards]. Publ. offic. Kyiv : Minbud Ukrainy, 2006, 75 p. (State Building of Ukraine). (in Ukrainian)
6. Safarian M.K. and Shutov V.E. *Raschet stalnikh vertykalnikh tsylindricheskykh rezervuarov bolshoi emkosty na deistvie vetrovoi nahruzky* [Calculation of steel vertical cylindrical tanks of large capacity for the action of wind load]. *Ekspress-ynformatsiya VNIIGazproma* [Express-VNIIGazprom information]. 1968, no. 1, pp. 15–22. (in Russian)

Надійшла до редакції 14.04.2023.