

**ЛАПЕНКО О.І.**

Д-р технічних наук, проф.,
зав. каф., Національний
авіаційний університет,
м. Київ, Україна,
e-mail: my-partner@ukr.net,
тел.: + 38 (066) 200-67-27,
ORCID: 0000-0002-2029-0792

**МАХІНЬКО Н.О.**

Канд. технічних наук, доц.,
Національний авіаційний
університет,
м. Київ, Україна,
e-mail: pasargada1985@gmail.com,
тел.: + 38 (050) 304-50-72,
ORCID: 0000-0001-8120-6374

ВПЛИВ ПРОФІЛЮВАННЯ ЛИСТІВ НА ЖОРСТКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена вивченню впливу профілювання металевих листів на опір деформуванню стінки циліндричної силосної ємності зберігання, що розглядається як оболонка обертання з вертикальними ребрами жорсткості, змінною за висотою товщиною листів, що мають гладку або хвилясту фактуру. Досліджено чинники, від яких залежить ефективність профілювання, та здійснено порівняльний аналіз жорсткісних характеристик профільованих та плоских панелей за різними схемами завантажень. Виконано аналіз радіальних переміщень корпусу відповідно до безмоментної теорії оболонок і зроблено висновки щодо кількісної оцінки залежності товщини профільованих листів та їх жорсткісних характеристик. Наведено наочні приклади для відображення характеру деформації циліндричних оболонок під дією асиметричного навантаження. Доведено, що при класичному згині тонких пластин, що працюють як мембрани, використання профільованих листів є більш ефективним. Профілювання листів також знижує радіальні переміщення корпусу оболонки при асиметричному навантаженні, при цьому ефект цього зниження найбільш виражений для тонких листів з більш «частим» кроком хвилі. Було встановлено, що при осесиметричному завантаженні циліндричної оболонки обертання рівномірно розподіленим навантаженням профілювання листів не впливає на величину радіальних переміщень корпусу. Огинаюча прогинів для оболонки з профільованих листів носить плавний характер, що добре узгоджується з епюрою вітрового тиску, а для оболонки з плоских листів має хвилеподібний характер. У всіх випадках зі зростанням товщини оболонки частота появи хвиль зменшується.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: циліндрична оболонка, профільований лист, параметри хвилі, жорсткість, лінія прогину.

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛИСТОВ НА ЖЕСТКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКостей ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЗЕРНА

ЛАПЕНКО А.И. Д-р технических наук, проф., зав. каф., Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина,
e-mail: my-partner@ukr.net,
тел.: +38 (066) 200-67-27,
ORCID: 0000-0002-2029-0792

МАХІНЬКО Н.А. Канд. технических наук, доц., Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина,
e-mail: pasargada1985@gmail.com,
тел.: +38 (050) 304-50-72,
ORCID: 0000-0001-8120-6374

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена изучению влияния профилирования металлических листов на сопротивление деформированию стенки цилиндрической силосной емкости хранения, которая рассматривается, как оболочка вращения с вертикальными ребрами жесткости, переменной по высоте толщиной листов, имеющих гладкую или волнистую фактуру. Исследованы факторы, от которых зависит эффективность профилирования и осуществлен сравнительный анализ жесткостных характеристик профилированных и плоских панелей с различными схемами загрузки. Выполнен анализ радиальных перемещений корпуса в соответствии с безмоментной теорией оболочек и сделаны выводы относительно количественной оценки зависимости толщины профилированных листов и их жесткостных характеристик. Приведены наглядные примеры для отображения характера деформации цилиндрических оболочек под действием асимметричной нагрузки. Доказано, что при классическом изгибе тонких пла-



стин, працюючих як мембрани, використання профільованих листів являється більш ефективним. Профілювання листів також знижує радіальні переміщення корпусу оболочкі при асиметричній нарузці, при цьому ефект цього зниження найбільш виражений для тонких листів з більш «частим» шагом волни. Було встановлено, що при осесиметричній зарузці циліндричної оболочкі вращення рівномірно розподіленої нарузкою профілювання листів не впливає на величину радіальних переміщень корпусу. Огибаюча прогиба для оболочкі з профілюваних листів носить плавний характер, що добре згодиться з епіюрою ветрового тиснення, а для оболочкі з плоских листів має хвилясту форму. Во всіх випадках з ростом товщини оболочкі частота появи хвиль зменшується.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: циліндрична оболочка, профілюваний лист, параметри хвилі, жорсткість, лінія прогиба.

EFFECT OF PROFILED WALL ON THE STIFFNESS CHARACTERISTICS OF STRUCTURES FOR GRAIN STORAGE

LAPENKO O.I. Dr, Prof., Head of a Chair, National Aviation University,
Kyiv, Ukraine
e-mail: my-partner@ukr.net,
tel.: +38 (066) 200-67-27,
ORCID: 0000-0002-2029-0792

MAKHINKO N.O. PhD, Ass. Prof., National Aviation University,
Kyiv, Ukraine
e-mail: pasargada1985@gmail.com,
tel.: +38 (050) 304-50-72,
ORCID: 0000-0001-8120-6374

ABSTRACT

The paper is focused on the impacts of profiling metal sheets on the rigidity of the walls of silos. Steel vertical cylindrical structure for storing grain is considered as a shell of rotation with vertical ring stiffeners. The thickness of sheets, from which the shell is tiled, varies in height, and the texture of the sheets can be both flat and wavy. Wavy leaves have increased bending stiffness. They are less sensitive to local loss of stability due to the influence of wind loads and the presence of local defects in the form of bends and dents. The paper is investigating the factors that affect the effectiveness of profiling. The analysis are compared the stiffness characteristics of profiled and flat panel for different ways of loading. The analysis of radial displacements of shells was performed in full accordance with the momentless theory of shells, that is without edge effect. Numerical results show that, the larger thickness of profiled sheets, the smaller their rigidity. The examples are given to show deformation of cylindrical shell for asymmetric loads. It is interesting to note, for a classic

bending of plates that function as a membrane, that using the profiled sheets is more effective. Profiling of steel sheets reduces radial displacements of the shell with asymmetric load. The effect of this decrease is most pronounced for thin sheets with more "frequent" wave steps. It is also found that profiling has no impact on radial displacements of cylindrical shell of revolution, with axisymmetric uniformly distributed load. Envelope deflection for cylindrical shell of profiled panels has a smooth transition. It is in good agreement with the diagram of wind pressure. However, the deflection curve for cylindrical shell of flat panels has wave shape. In all cases, with increasing thickness of the shell, the frequency of waves decreases.

KEY WORDS: cylindrical shell, profiled sheet, wave parameters, stiffness, deflection curve.

ВСТУП

Наша країна являється одним із ключових гравців в секторі виробництва та експорту зернових культур. В цьому процесі найважливішою технологічною операцією є процедура переробки та зберігання зерна, що вимагає наявності відповідних комплексів, котрі повинні забезпечувати необхідні умови для якісного утримання насінневих культур. Перевага в даному сегменті надається промисловим металевим ємностям різної конструктивної форми. Основні вимоги для даного типу споруд ґрунтуються на загальнотехнічних характеристиках міцності, жорсткості та стійкості, а також економічній доцільності.

Сучасні сталеві ємності для зберігання зернових культур зайняли провідні позиції на елеваторному ринку. Незважаючи на достатньо довгий період практичного виробництва та експлуатації споруд даного типу, розрахунок їх несучих конструктивних елементів і комплексне вивчення їх загальних характеристик на сьогоднішній день не отримали достатнього розвитку. Зокрема це стосується дослідження впливу профілювання листів на жорсткісні характеристики стінки металевих силосів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Пошуку та вдосконаленню конструктивних рішень сталевих ємностей для сипучих матеріалів присвячено багато робіт вітчизняних та зарубіжних науковців [1 - 3]. Підґрунтям даної проблематики є теоретична база щодо створення та розрахунку тонкостінних просторових конструкцій, що закладена у фундаментальних роботах [4 - 6].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Сталева вертикальна циліндрична ємність являє собою оболонку обертання, що підкріплена вертикальними ребрами жорсткості. Товщина листів, з яких набирається корпус ємності, змінюється по висоті, а фактура листів може бути як гладкою, так і хвилястою. Відомо, що хвилясті листи мають



збільшену жорсткість на згин, а тому менш чутливі до місцевої втрати стійкості при впливі вітрового навантаження та присутності локальних дефектів у вигляді погнутостей і викривлень. Параметри хвилі – висота та крок, у різних виробників приймають власні значення, що обумовлені промисловими аспектами, і не піддаються єдиній аргументації. Саме тому визначення жорсткісних характеристик хвилястих листів, ступеня впливу на них зазначених параметрів, а також загальна оцінка ефективності профілювання є першочерговим завданням при розрахунку циліндричних ємностей зберігання.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

Типовий профіль хвилястого листа можна подати у вигляді синусоїдальної кривої, що представлено на рис. 1.

Ордината кожної точки даного графіку обчислюється за тригонометричним виразом вигляду

$$z_w(x) = h_w \sin(2\pi x / \ell_w), \quad (1)$$

де інтервал значень змінної x знаходиться в межах $0 \leq x \leq L_w$; L_w – ширина горизонтальної проекції профілюваного листа; h_w та ℓ_w – параметри хвилі, відповідно висота та крок.

Площу поперечного перерізу листа можна визначити за формулою

$$A_w = t_w y_w = t_w \int_0^{L_w} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} z_w(x)\right)^2} dx, \quad (2)$$

де t_w і y_w – відповідно товщина листа та довжина синусоїдальної кривої.

Підставивши вираз (1) в (2) та виконавши ряд елементарних перетворень, отримуємо

$$A_w = t_w \int_0^{n_w \ell_w} \sqrt{1 + (2\pi h_w / \ell_w)^2 \cos^2(2\pi x / \ell_w)} dx, \quad (3)$$

де n_w – кількість періодів синусоїдального профіля за довжиною листа (наприклад, завод «LUBNYMASH» використовує розрахункову ширину листа

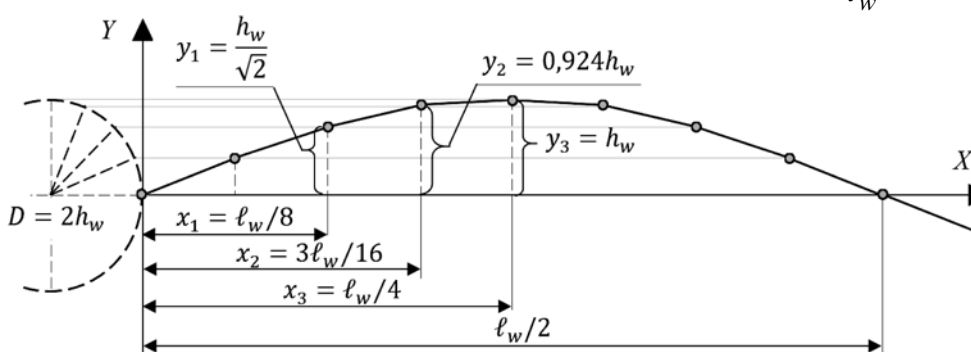


Рис. 1. Синусоїдальна крива профілюваного листа

$L_w=1152$ мм, при періоді хвилі $\ell_w=128$ мм, що відповідає $n_w = 9$).

Інтеграл (3) не виражається через елементарні функції і його значення повинні визначатися за допомогою спеціальних таблиць еліптичних інтегралів другого роду, що спричинює ряд незручностей в практичних інженерних розрахунках. Інший шлях – це розрахунки за допомогою чисельних методів, проте і в цьому випадку не завжди вдається отримати бажаний результат. Наприклад, за допомогою системи комп'ютерної математики Mathcad, інтеграл (3) обчислюється лише для певних значень h_w та ℓ_w . Для знаходження «незручних» системі величин необхідно виконати ряд математичних спрощень та перетворень. З урахуванням цього, запропоновано спрощений метод розрахунку параметрів синусоїдального профілю, що базується на заміні вихідної кривої групою відрізків. Графічний приклад зображено на рис. 1.

Виконана заміна дозволяє формули для площі та моменту інерції поперечного перерізу профілюваного листа представити у вигляді

$$A_w = \frac{n_w t_w h_w}{4} \psi_1(\delta_w), \quad J_w = \frac{n_w t_w h_w^3}{12} \psi_2(\delta_w); \quad (4)$$

$$\psi_1(\delta_w) = 2\sqrt{32 + \delta_w^2} + \sqrt{12 + \delta_w^2} + \sqrt{1.5 + \delta_w^2}; \quad (5)$$

$$\psi_2(\delta_w) = \sqrt{32 + \delta_w^2} + 2\sqrt{12 + \delta_w^2} + 2.78\sqrt{1.5 + \delta_w^2}, \quad (6)$$

де $\delta_w = \frac{\ell_w}{h_w}$ – відношення довжини періоду профіля до його висоти.

Для порівняння площі та моменту інерції поперечного перерізу профілюваного та плоского листів наведемо співвідношення відповідних характеристик

$$\Delta A_w = \frac{0,25\psi_1(\delta_w)}{\delta_w}, \quad \Delta J_w = \frac{\lambda_w^2 \psi_2(\delta_w)}{\delta_w}, \quad (7)$$

де $\lambda_w = \frac{h_w}{t_w}$ – безрозмірний параметр, для якого введемо назву гнучкості хвилі.

Відповідно до формул (6) і (7) прослідковуються два важливі висновки. По-перше, відношення площ ΔA_w поперечних перерізів профілюваного та плоского листів не залежать від їх товщини. По-друге, збільшення товщини листа з величини t_{w1} до t_{w2} призводить до зменшення відношення моментів інерції ΔJ_w профілюваного та плоского листів на величину



$$\mu_w = \frac{\Delta J_{w2}}{\Delta J_{w1}} = \left(\frac{t_{w1}}{t_{w2}} \right)^2. \quad (8)$$

Таким чином ефективність профілювання листів при збільшенні їх товщини знижується.

В табл. 1 виконано розрахунок зниження даної ефективності по відношенню до товщини $t_{w1} = 1$ мм – найменшої товщини листів, що використовуються при виробництві сталевих циліндричних ємностей. В останній графі наведено значення моментів інерції, що розраховані для $l_w = 128$ мм та $h_w = 7$ мм.

З таблиці можна побачити, що жорсткісні характеристики профілюваних листів товщиною 1 мм більші за плоскі у 287 разів, а листів товщиною 3 мм – в 32 рази. Таким чином, перехід на профілювані листи товщиною 2 мм призводить до зниження жорсткісних характеристик листів у 4 рази, а перехід на листи 3 мм – більш, ніж у 9 разів.

Варто виявити практичну користь профілюваних листів. Для цього була здійснена серія розрахунків плоскої та профілюваної панелей товщиною 1 мм та 3 мм. Розглядалися три варіанти параметрів синусоїдальної хвилі таким чином, щоб ширина горизонтальної проекції листа залишалася постійною та рівною значенню – 1152 мм, а характеристики профілю h_w , l_w і n_w приймалися, відповідно, $h_w = 7\sqrt{9}\sqrt{11}$ мм, $l_w = 128\sqrt{144}\sqrt{192}$ мм, $n_w = 9\sqrt{9}\sqrt{8}\sqrt{6}$.

До порівняльного аналізу жорсткісних характеристик було обрано чотири типи панелей, що зображені на рис. 2 та було залучено чотири схеми завантажень, що наведені на рис. 3.

Варіанти панелей та схем завантажень:

- панель розміром 1152x1152 мм, що шарнірно оперта по контуру та завантажена рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю $p = 30$ кН/м²;
- циліндрична оболонка обертання, діаметром $D_w = 11000$ мм та висотою $2 L_w$, що завантажена зсередини рівномірно розподіленим навантаженням $p = 30$ кН/м²;
- циліндрична оболонка обертання, діаметром $D_w = 11000$ мм та висотою $2 L_w$, що завантажена зовні рівномірно розподіленим навантаженням $p = 30$ кН/м²;
- циліндрична оболонка обертання, діаметром $D_w = 11000$ мм та висотою $2 L_w$, що завантажена зовні нерівномірним навантаженням з розподілом по периметру, відповідно до епюри вітрового тиску в нормах ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи». Інтенсивність навантаження прийнята рівною $p = 21,6$ кН/м².

Таблиця 1. Порівняльний аналіз жорсткісних характеристик профілюваних листів

t_{w2} , мм	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
μ_w	1,0	0,44	0,25	0,16	0,11
ΔJ_w	287	128	72	46	32

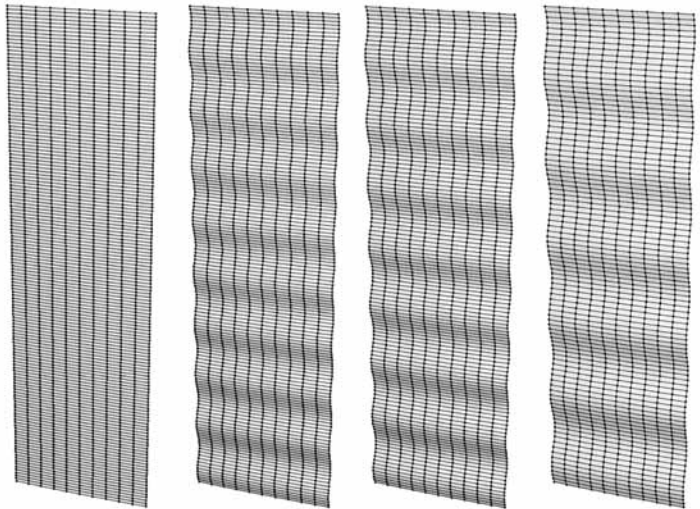


Рис. 2. Варіанти панелей для дослідження жорсткісних характеристик

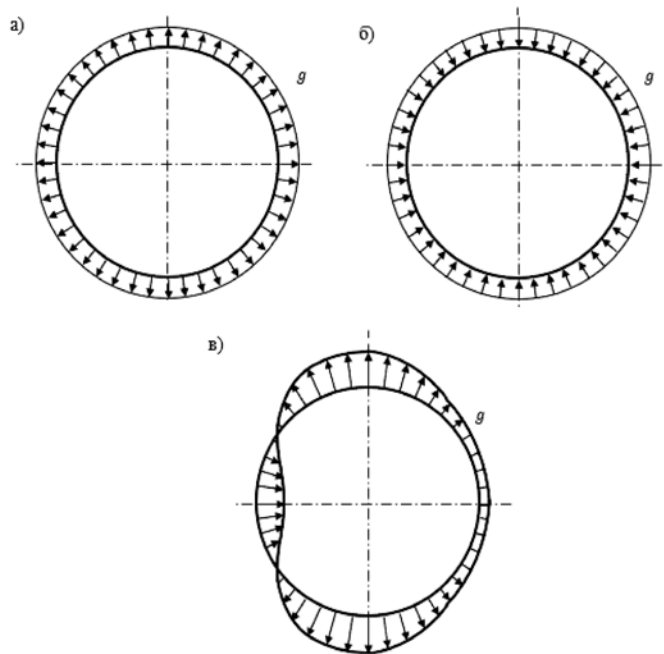


Рис. 3. Схеми завантажень плоских та профілюваної панелей ємностей: а - згин панелей, закріплених по контуру; б - рівномірно завантажена оболонка обертання; в - оболонка обертання, завантажена відповідно епюрі вітрового тиску

У виконаних розрахунках були прийняті величини $L_w = H_w = 1152$ мм, $D_w = 11000$ мм, $t_{w,max} = 3$ мм, що відповідає значенню $\beta \approx 6,34$. Отже, прийнята для аналізу висота оболонки є достатньою.

Результати розрахунку наведено у табл. 2.

З аналізу даних табл. 2 можливо зробити наступні важливі висновки. Використання профілюваних листів, замість плоских, при кла-



сичному згині тонких пластин, що працюють як мембрани, є більш ефективним. В цей же час, при осесиметричному завантаженні циліндричної оболонки обертання рівномірно розподіленим навантаженням, котре викликає як зусилля розтягу, так і зусилля стиску, профілювання листів не впливає на величину радіальних переміщень корпусу оболонки w_z , а самі вони можуть бути оцінені за класичною формулою безмоментної теорії:

$$w_z = \frac{pD_w^2}{4Et_w}, \quad (9)$$

де E – модуль пружності матеріалу.

Профілювання листів знижує радіальні переміщення корпусу оболонки при асиметричному навантаженні. При цьому, ефект цього зниження найбільш виражений для тонких листів з більш «частим» кроком хвилі. Це пояснюється тим, що при асиметричному навантаженні, наприклад, вітровому, виникають зони локальних впливів, що викликають в оболонці місцеві згинальні моменти та поперечні сили. Опір місцевому згину у профільованих листах, особливо тонких, кращий, ніж у плоских, що і позначається на величині радіального прогину. Окрім цього, висота оболонки H_w впливає на величину прогину – зі збільшенням висоти відповідно зростає і прогин. Тому для отримання адекватного числового результату розглядати окремий сегмент оболонки некоректно.

Для наочності на рис. 4 наведено характер деформації оболонок, що складені з плоских та профільованих листів під дією асиметричного навантаження, описаного епюрою вітрового тиску.

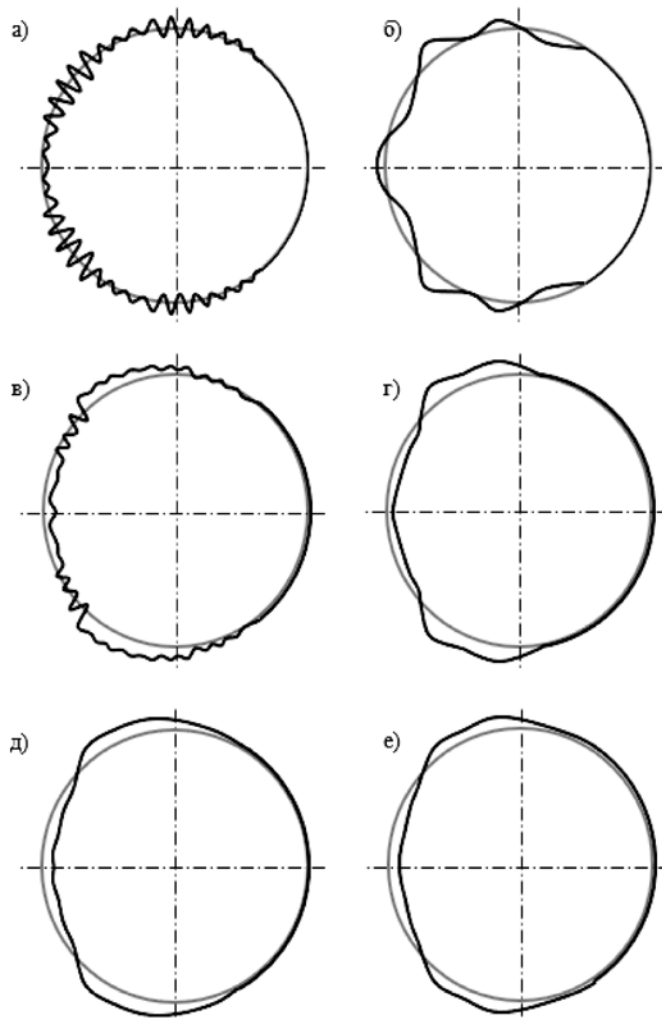


Рис. 4. Деформування ємностей, що складені з плоских (а - в) та профільованих (г - е) листів: (а, г) товщиною 1 мм; (б, д) товщиною 3 мм; (в, е) товщиною 10 мм

Таблиця 2. Порівняльний аналіз характеристик жорсткості плоскої та профільованих панелей за схемами завантажень

Характеристики панелі			Максимальний прогин при товщині листа			
			$t_w = 1$ мм		$t_w = 3$ мм	
h_w , мм	l_w , мм	n_w	плоский	профіл.	плоский	профіл.
Схема № 1. Згин панелей, що закріплені по контуру						
7	128	9	11350	26,8	420,4	8,9
9	144	8		16,8		5,6
11	192	6		12,0		4,0
Схеми № 2 і № 3. Рівномірно завантажена оболонка обертання						
7	128	9	4,4	4,3	1,4	1,4
9	144	8				
11	192	6				
Схема № 4. Оболонка обертання, завантажена відповідно епюрі вітрового тиску						
7	128	9	31,0	21,9	2,8	2,9
9	144	8		27,4		3,0
11	192	6		35,6		3,3

Можна помітити, що в оболонці з профільованих листів огинаюча прогинів носить плавний характер, що добре узгоджується з епюрою вітрового тиску, в той же час крива прогинів оболонки з плоских листів має хвилеподібний характер. Частота появи хвиль зменшується зі зростанням товщини оболонки. Так, при товщині $t_w = 10$ мм хвилі практично зникають. Порівняння лінії прогинів оболонок, складених з плоских та профільованих листів, при такій товщині, очевидно, буде ідентичним.



ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз показників опору деформуванню профільованих листів показав, що зі збільшенням товщини листа їх жорсткісні характеристики погіршуються. Для товщини 1 мм відношення моментів інерції профільованого та гладкого листів становить 287, перехід на профільовані листи товщиною 2 мм призводить до зниження жорсткісних характеристик листів у 4 рази (відношення моментів інерції – 72), а перехід на листи 3 мм – більш, ніж у 9 разів (відношення моментів інерції – 32).

При класичному згині тонких пластин, що працюють як мембрани, використання профільованих листів є більш ефективним. Проте при осесиметричному завантаженні циліндричної оболонки обертання рівномірно розподіленим навантаженням, котре викликає як зусилля розтягу, так і зусилля стиску, профілювання листів не впливає на величину радіальних переміщень корпусу.

При асиметричному навантаженні профілювання листів знижує радіальні переміщення корпусу оболонки. Дане явище найбільш виражене для тонких листів з більш «частим» кроком хвилі.

Огинаюча прогинів для оболонки з профільованих листів носить плавний характер, що добре узгоджується з епюрою вітрового тиску, в той же час крива прогинів оболонки з плоских листів має хвилеподібний характер. Зі зростанням товщини оболонки частота появи хвиль зменшується, практично зникаючи при досягненні значення товщини листа 10 мм.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Качуренко В.В. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов / В.В. Качуренко, Д.О. Банников. – Днепропетровск : Новая идеология, 2016. – 168 с.
2. Michael Rotter J. Structural and Functional Design of Metal Silos. – Florida, United States : CRC Press. – 400 p.
3. Кузнецов И.М. Пространственная работа гибкого металлического силоса с наружным стержневым каркасом : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Кузнецов Игорь Михайлович. – М. : РГОТУПС, 2000. – 137 с.
4. Власов В.З. Избранные труды : в 3 т. Т.1: Очерк научной деятельности «Общая теория оболочек». Статьи / В.З. Власов. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 528 с.
5. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек / А.Л. Гольденвейзер. – М. : Наука, 1976. – 512 с.
6. Лессинг Е.Н. Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессинг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. – М. : Стройиздат, 1970. – 490 с.

7. Кан С.Н. Строительная механика оболочек / С.Н. Кан. – М. : Машиностроение, 1966. – 508 с.

REFERENCES

1. Kachurenko V.V. Konstruktivnyie resheniia stalnykh ymkostei dla sypuchikh materialov / V.V. Kachurenko, D.O. Bannikov. – Dnepropetrovsk : Novaia ideologia, 2016. – 168 p.
2. Michael Rotter J. Structural and Functional Design of Metal Silos. – Florida, United States : CRC Press. – 400 p.
3. Kuznetsov I.M. Prostranstvennaia rabota gibkogo metallicheskogo silosa s naruzhnym sterzhnevym karkasom. Doktor's thesis. – M. : RGOTUPS, 2000. – 137 p.
4. Vlasov V.Z. Izbrannyie trudy : v 3 t. T.1: Ocherk nauchnoi deiatelnosti «Obshchaia teoriia obolochek». Stati / V.Z. Vlasov. – M. : Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1962. – 528 p.
5. Goldenveyzer A.L. Teoriia uprugikh tonkikh obolochek / A.L. Goldenveyzer. – M. : Nauka, 1976. – 512 p.
6. Lessing E.N. Listovyye metallicheskie konstruksii / E.N. Lessing, A.F. Lileev, A.G. Sokolov. – M. : Stroyizdat, 1970. – 490 p.
7. Kan S.N. Stroitelnaia mekhanika obolochek / S.N. Kan. – M. : Mashinostroenie, 1966. – 508 p.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2017г.