

УДК 539.3

## ВПЛИВ ПЕРФОРАЦІЇ НА СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ ГОФРОВАНОЇ ПАНЕЛІ ПРИ ДІЇ ВІТРУ

О.О. Лук'янченко<sup>1</sup>,

д-р техн. наук

С.О. Цибульник<sup>2</sup>,

канд. техн. наук

А.А. Козак<sup>1</sup>,

канд. техн. наук

О.В. Геращенко<sup>1</sup>,

канд. техн. наук

І.Д. Кара<sup>1</sup>,

канд. техн. наук

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03680, м. Київ, Україна, проспект Повітряних сил, 31

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
03056, м. Київ, Берестейський просп., 37

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.75-82

В будівельній практиці застосування огороджувальних панелей з перфорацією для захисних споруд є економічно вигідним, бо зменшує фінансові витрати на їх виготовлення, транспортування і встановлення. Але вплив перфорації на статичні і динамічні характеристики огороджувальних панелей є недостатньо дослідженим. З метою захисту від вітру будівель і споруд на українській антарктичній станції „Академік Вернадський” виконано розрахунок захисної споруди на міцність, стійкість і жорсткість за першою і другою групою граничних станів згідно вимог Державних будівельних норм України. Захисна споруда представлялась у вигляді огороджувальної гофрованої сталеваної панелі і опорних стійок. В статті наведено результати чисельного дослідження напружено-деформованого стану і стійкості огороджувальної гофрованої панелі, ширина і висота якої приймалась сталою, а товщина підбиралась згідно вимог щодо її міцності, стійкості і жорсткості. По висоті панелі розташовані чотири гофри у вигляді трапецій. Перфорація подана у вигляді круглих отворів по всій поверхні панелі. В програмному комплексі NASTRAN побудовані дві скінченно-елементні моделі огороджувальної панелі. Модель гофрованої панелі без перфорації змодельована у вигляді сукупності чотирьохкутних оболонкових скінченних елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі, яка містила 35161 елемент та 32540 вузлів. Скінченно-елементна модель огороджувальної панелі з перфорацією містила 383043 трикутні оболонкові скінченні елементи з шістьма ступенями вільності у вузлі та 211609 вузлів. З двох боків огороджувальної панелі по висоті накладені обмеження у вигляді защемлення з урахуванням жорсткого кріплення панелі до опорних стійок. Дія вітру на огороджувальну панель представлена у вигляді рівномірно розподіленого навантаженням, гранично розрахункові значення якого отримані згідно Державних будівельних норм України з використанням статистичних даних вітру на українській антарктичній станції. Основну увагу приділено дослідженню впливу перфорації на еквівалентні напруження, вузлові переміщення, критичні значення навантаження та форми втрати стійкості гофрованої панелі. Застосовані обчислювальні процедури розв'язання крайової задачі статичної і стійкості комплексу NASTRAN.

**Ключові слова:** гофрована панель, перфорація, вітер, метод скінченних елементів, статична крайова задача, стійкість.

**Вступ.** З метою захисту від вітру будівель і споруд на українській антарктичній станції „Академік Вернадський” виконано розрахунок захисної споруди на міцність, стійкість і жорсткість згідно вимог Державних будівельних норм України [1-4]. Захисна споруда представлялась у вигляді огороджувальної гофрованої сталеваної панелі і опорних стійок. В статті наведені результати дослідження напружено-деформованого стану і стійкості огороджувальної гофрованої панелі при дії вітру на основі методу скінченних елементів, який широко застосовується як у вітчизняній, так міжнародній практиці проектування будівельних конструкцій [5-8]. Застосовано обчислювальні процедури програмного комплексу NASTRAN [9-10]. Основну увагу приділено дослідженню впливу перфорації на еквівалентні напруження, вузлові переміщення, критичні значення навантаження та форми втрати стійкості гофрованої панелі задля полегшення її ваги, зменшення фінансових витрат на виготовлення, транспортування і будівництво захисної споруди.

### 1. Моделювання вітрового навантаження на огорожувальну панель захисної споруди

Державні будівельні норми України ДБН В.1.2-2:2006 „Навантаження і впливи” [1] поширюються на проектування будівельних конструкцій та основ будівель і споруд, що зводяться або реконструюються, і встановлюють основні положення та правила щодо визначення навантажень і впливів, а також їхніх сполучень.

Залежно від характеру навантажень та мети розрахунку згідно [1] використовуються чотири види розрахункових значень: граничне, експлуатаційне, циклічне і квазіпостійне. Для перевірки граничних станів першої групи використовуються граничні розрахункові значення навантажень. Для перевірки граничних станів другої групи навантаження встановлюються залежно від умов експлуатації конструкції.

Вітрове навантаження згідно [1] вважається змінним короткочасним навантаженням з граничним (перша група граничного стану) і граничним або експлуатаційним (друга група граничних станів) розрахунковими значеннями.

Граничне розрахункове значення вітрового навантаження  $W_m$  визначено згідно формули, наведеної в [1]

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C, \quad (1)$$

де  $\gamma_{fm} = 1,0$  – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження [1, 2];  $W_0$  – характеристичне значення вітрового тиску може бути визначено залежно від вітрового району [1]. В окремих випадках  $W_0$ , який має місце в даній роботі, допускається визначати характеристичне значення вітрового тиску шляхом статистичного оброблення результатів строкових вимірювань швидкості вітру. Середня швидкість вітру згідно метеорологічних даних Державної установи Національний антарктичний науковий центр України (ДУ НАНЦУ) за 2023 р. прийнята рівною  $V = 25$  м/с.

Характеристичне значення вітрового тиску визначено за формулою

$$W_0 = \rho V^2 / 2 = 1,28 \cdot 25^2 / 2 = 400,2 \text{ Па}, \quad (2)$$

де  $\rho = 1,28$  кг/м<sup>3</sup> – задана густина повітря.

Коефіцієнт  $C$  в рівнянні (1) визначено згідно [1] за формулою

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d = 1,26, \quad (3)$$

де  $C_{aer} = 0,8 + 0,6 = 1,4$  – аеродинамічний коефіцієнт;  $C_h = 0,9$  – коефіцієнт висоти споруди;  $C_{alt} = 1$  – коефіцієнт географічної висоти;  $C_{rel} = 1$  – коефіцієнт рельєфу;  $C_{dir} = 1$  – коефіцієнт напрямку;  $C_d = 1,0$  – коефіцієнт динамічності.

З урахуванням наведених коефіцієнтів граничне розрахункове значення вітрового навантаження згідно формули (1) дорівнює

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C = 1,0 \cdot 400,2 \cdot 1,26 = 504,25 \text{ Па}. \quad (4)$$

Розрахунок панелі за другою групою граничних станів потребує визначення експлуатаційного розрахункового значення вітрового навантаження згідно [1] за формулою

$$W_e = \gamma_{fe} \cdot W_0 \cdot C, \quad (5)$$

де  $\gamma_{fe}$  – коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження, визначений залежно від частки часу  $\eta$ , протягом якої можуть порушуватися умови другого граничного стану.

Якщо прийняти коефіцієнт  $\eta = 0,02$  як для об'єкту масового будівництва [1], то  $\gamma_{fe} = 0,21$ . Тоді експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження дорівнює

$$W_e = 0,21 \cdot 400,2 \cdot 1,26 = 105,9 \text{ Па}. \quad (6)$$

Бачимо, що значення експлуатаційного розрахункового вітрового навантаження  $W_e$  значно менше за граничне розрахункове значення  $W_m$ . Тому вважаємо доцільно виконати перевірку другої групи граничних станів на жорсткість захисної споруди від граничного, а не

експлуатаційного розрахункового значення вітрового навантаження  $W_m = 504,25$  Па. Згідно [1] для споруди висотою меншою за 10 м, тобто для огорожувальної гофрованої панелі висотою 3,6 м вітрове навантаження подається у вигляді статичного рівномірно розподіленого тиску.

В деяких випадках [1] при проектуванні унікальних споруд значення навантажень та коефіцієнти їхнього сполучення допускається встановлювати шляхом імовірнісного обґрунтування з використанням наявних статистичних даних Державної метеорологічної служби України, а також даними відомчих метеослужб, атестованих Державною метеорологічною службою України. В роботі з метою уточнення розрахункових значень вітрового навантаження враховані статистичні дані, які отримані раніше при імовірнісному моделюванні вітру у вигляді послідовності екстремальних значень. Для формування цієї моделі використовувалась вибірка характеристик вітру на відрізках його реалізації в один день з 5-ти хвилинним осередненням за три місяці 2009 р, отриманими вченими ДУ НАНЦУ. Результати дослідження характеристик вітру показали, що повторюваність коефіцієнтів поривчастої вітру з математичним сподіванням 1,765 становить близько 74%. Тому в роботі додатково досліджено напружено-деформований стан і стійкість огорожувальної панелі від вітру у вигляді рівномірно розподіленого тиску з гранично розрахунковим значенням

$$\tilde{W}_m = 1,765 \cdot 504,25 = 890 \text{ Па.} \quad (7)$$

## 2. Побудова скінченно-елементної моделі огорожувальної панелі

Розглянута огорожувальна гофрована панель захисної споруди від вітру шириною 3 м, висотою 3,6 м і різними товщини, яка приймала значення від 0,74 мм до 4 мм. Одна гофра мала вид трапеції загальною довжиною 0,9 м і висотою 0,098 м. В роботі для виготовлення огорожувальної панелі задано прокат тонколистовий із кремнемагнецевої сталі 10Г2С1 з підвищеною міцністю і стійкістю до низьких температур ДСТУ 8969-2019 [3]. Механічні характеристики сталі такі: модуль пружності  $E = 2,04 \cdot 10^{11}$  Па, модуль Юнга  $G = 0,6145 \cdot 10^{11}$  Па, коефіцієнт Пуасону  $\mu = 0,32$ , густина матеріалу  $\rho = 7790$  кг/м<sup>3</sup>. Тимчасовий опір сталі та границя текучості відповідно складали  $\sigma_B = 485$  МПа і  $\sigma_T = 335$  МПа.

Згідно Державних будівельних норм ДБН В.2.6-198:2014 „Сталеві конструкції. Норми проектування” [4] в розрахунках огорожувальної панелі за першою групою граничних станів на міцність за розрахунковий опір матеріалу прийнята границя текучості матеріалу з урахуванням коефіцієнту умов роботи 1,0 і коефіцієнту надійності за матеріалом  $\gamma_m = 1,05$

$$R_y = \sigma_T / \gamma_m = 335 / 1,05 = 319 \text{ МПа.} \quad (8)$$

Тобто, максимальні напруження в елементах панелі не повинні перевищувати розрахунковий опір сталі 10Г2С1  $R_y = 319$  МПа.

В розрахунках огорожувальної панелі за першою групою граничних станів на стійкість критичні значення вітрового навантаження  $W_{cr}$  повинні перевищувати граничні розрахункові значення вітру  $W_m = 504,25$  Па і  $\tilde{W}_m = 890$  Па.

В розрахунках огорожувальної панелі за другою групою граничних станів на жорсткість її максимальні прогини не повинні перевищувати 1/150 відстані між опорними стійками  $L = 3$  м, тобто

$$[f] = (1/150) \cdot L = (1/150) \cdot 3000 = 20 \text{ мм.} \quad (9)$$

В роботі побудовано дві скінченно-елементні моделі огорожувальної панелі без і з перфорацією в програмному комплексі NASTRAN [9-10]. Модель гофрованої панелі без перфорації змодельована у вигляді сукупності чотирьохкутних оболонкових скінченних елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі (рис. 1 (а)), яка містила 35161 елемент та 32540 вузлів. Скінченно-елементна модель огорожувальної панелі з перфорацією представлена на рис. 1 (б). Перфорація панелі подана у вигляді круглих отворів радіусом 12,5 мм. Застосовані трикутні оболонкові скінченні елементи з шістьма ступенями вільності у вузлі, при цьому модель панелі містила 383043 елементи і 211609 вузлів.

З двох боків огорожувальної панелі на вузли моделі по висоті накладені обмеження у вигляді защемлення з урахуванням жорсткого кріплення панелі до опорних стійок.

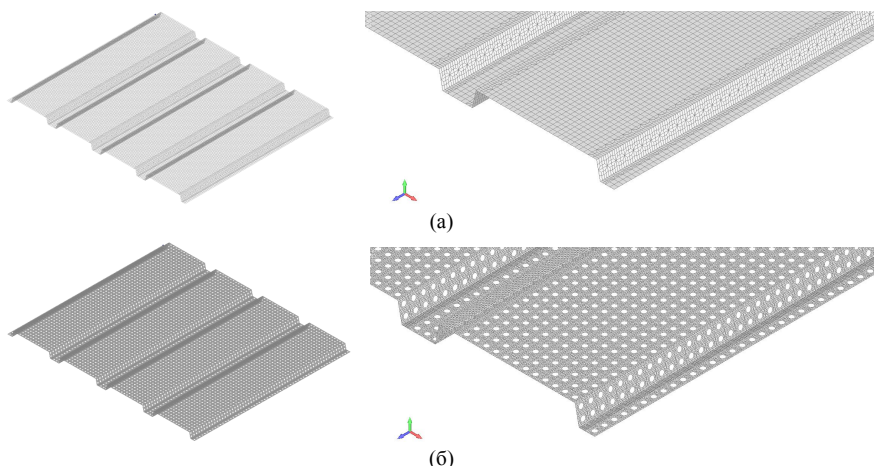


Рис. 1. Скінченно-елементна модель гофрованої панелі без (а) і з перфорацією (б)

### 3. Розрахунок напружено-деформованого стану гофрованої панелі від дії вітру

Розв'язана крайова задача статки огорожувальної панелі різної товщини методом Ньютона-Рафсона в лінійній постановці, який реалізовано в програмному комплексі NASTRAN [9-10]. Досліджено вплив вітрового навантаження з граничними розрахунковими значеннями  $W_m = 504,25$  Па і  $\tilde{W}_m = 890$  Па, який подано у вигляді рівномірно розподіленого статичного навантаження, на напружено-деформований стан огорожувальної панелі. Максимальні вузлові переміщення  $\Delta_{\max}$  і максимальні еквівалентні напруження  $\sigma_{\max}^e$  за Мізесом в елементах двох моделей гофрованої панелі перевірялись щодо вимог її розрахунку за першою групою граничних станів на міцність і за другою групою граничних станів на жорсткість. Результати розрахунку напружено-деформованого стану гофрованої панелі без перфорації при дії вітру наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики напружено-деформованого стану гофрованої панелі без перфорації при дії вітру

Товщина гофрованої панелі, м	Значення вітрового навантаження			
	$W_m = 504,25$ Па [1]		$\tilde{W}_m = 890$ Па	
	$\Delta_{\max}$ , м	$\sigma_{\max}^e$ , МПа	$\Delta_{\max}$ , м	$\sigma_{\max}^e$ , МПа
0,00074	0,05344	163,616	0,09426	288,564
0,001	0,02208	90,019	0,03895	158,763
0,0015	0,00687	40,550	0,01211	71,391
0,002	0,00307	23,088	0,00541	40,721
0,003	0,00103	11,299	0,00182	19,928
0,004	0,00049	7,508	0,00088	13,242

Видно, що максимальні вузлові переміщення гофрованої панелі без перфорації товщиною 0,00074 м і 0,001 м перевищують допустимий прогин  $[f] = 20$  мм, тобто не виконана вимога щодо її жорсткості за другою групою граничних станів, при інших товщинах вимога виконана. Максимальні напруження для всіх товщин панелі не перевищують розрахунковий опір сталі 10Г2С1  $R_y = 319$  МПа, тобто при перевірці гофрованої панелі без перфорації на міцність за першою групою граничних станів вимога виконана.

Як приклад, на рис. 2 (а), (б) представлені відповідно ізоплю сумарних вузлових переміщень і еквівалентні напруження в елементах моделі гофрованої панелі без перфорації товщиною 0,0015 м при дії вітру з граничним розрахунковим значенням  $W_m = 504,25$  Па.

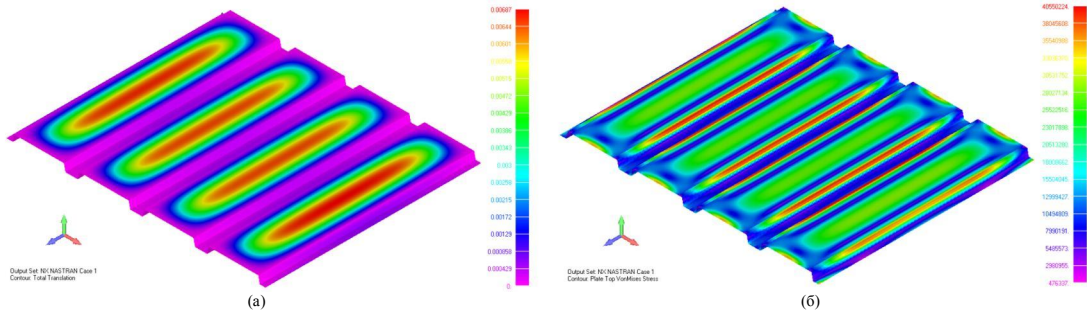


Рис. 2. Ізополю сумарних вузлових переміщень (а) і еквівалентні напруження (б) в елементах моделі гофрованої панелі без перфорації товщиною 0,0015 м

Результати розрахунку напружено-деформованого стану гофрованої панелі з перфорацією при дії вітру з граничними розрахунковими значеннями  $W_m = 504,25$  Па і  $\tilde{W}_m = 890$  Па наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики напружено-деформованого стану панелі з перфорацією при дії вітру

Товщина гофрованої панелі, м	Значення вітрового навантаження			
	$W_m = 504,25$ Па [1]		$\tilde{W}_m = 890$ Па	
	$\Delta_{\max}$ , м	$\sigma_{\max}^e$ , МПа	$\Delta_{\max}$ , м	$\sigma_{\max}^e$ , МПа
0,00074	0,06121	187,394	0,10815	330,912
0,001	0,02534	157,396	0,04477	277,961
0,0015	0,00792	68,698	0,01398	121,176
0,002	0,00355	38,599	0,00626	68,088
0,003	0,00119	18,726	0,00207	33,071
0,004	0,00058	12,442	0,00101	21,986

Видно, що максимальні вузлові переміщення моделі гофрованої панелі з перфорацією товщиною 0,00074 м і 0,001 м перевищують допустимий прогин  $[f] = 20$  мм, а при інших товщинах панелі вимога щодо її жорсткості за другою групою граничних станів виконана. Максимальні еквівалентні напруження в елементах панелі з перфорацією при всіх товщинах, крім товщини 0,00074 м при дії  $\tilde{W}_m = 890$  Па, не перевищують розрахунковий опір сталі 10Г2С1  $R_y = 319$  МПа і відповідають вимогам перевірки панелі на міцність за першою групою граничних станів. Як приклад, на рис. 3 представлені ізополю сумарних вузлових переміщень і еквівалентні напруження в елементах моделі гофрованої панелі з перфорацією товщиною 0,0015 м при дії вітру з граничним розрахунковим значенням  $W_m = 504,25$  Па.

#### 4. Розрахунок стійкості гофрованої панелі при статичній дії вітрового навантаження

Задача стійкості гофрованої огорожувальної панелі, яка реалізована в програмному комплексі NASTRAN [6], розв'язана в лінійній постановці методом Ланцоша. Отримано критичні значення вітрового навантаження і форми втрати стійкості гофрованої панелі без і з перфорацією.

Виконана перевірка панелі за першою групою граничних станів на стійкість при дії вітру з вимогою, щоб коефіцієнт запасу стійкості був  $K_{cr} > 1$  з урахуванням коефіцієнтів умови роботи 1,0. Коефіцієнт запасу стійкості гофрованої панелі при різних значеннях товщини (табл. 3) визначено за формулами

$$K_{cr} = W_{cr} / W_m \text{ та } \tilde{K}_{cr} = W_{cr} / \tilde{W}_m,$$

де  $W_{cr}$  – нижче значення критичного вітрового навантаження, Па;  $W_m = 504,25$  Па,  $\tilde{W}_m = 890$  Па – граничні розрахункові значення вітру.

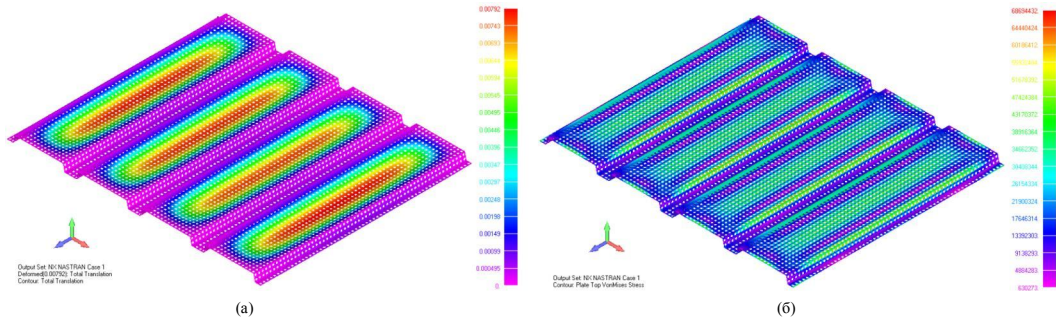


Рис. 3. Ізополя сумарних вузлових переміщень (а) і еквівалентні напруження (б) в елементах моделі гофрованої панелі з перфорацією товщиною 0,0015 м

Таблиця 3

Коефіцієнти запасу стійкості гофрованої панелі  $K_{cr} / \tilde{K}_{cr}$

Товщина гофрованої панелі, м	Моделі гофрованої панелі	
	без перфорації	з перфорацією
0,00074	0,355/0,201	0,314/0,178
0,001	0,875/0,496	0,775/0,439
0,0015	2,950/1,671	2,615/1,484
0,002	6,988/3,959	6,194/3,488
0,003	23,56/13,35	20,88/11,83
0,004	55,79/31,61	49,47/28,03

Бачимо, що статична стійкість гофрованої панелі без і з перфорацією товщиною більшою за 0,0015 м при дії вітру з граничними розрахунковими значеннями забезпечена, тобто виконана вимога перевірки панелі на стійкість за першою групою граничних станів.

Як приклад, на рис. 4 представлені нижчі форми втрати стійкості гофрованої панелі без і з перфорацією товщиною 0,0015 м при дії вітру  $W_m = 504,25$  Па. Нижча форма втрати стійкості панелі при дії вітру з граничним розрахунковим значенням  $\tilde{W}_m = 890$  Па має такий самий вид як на рис. 4.

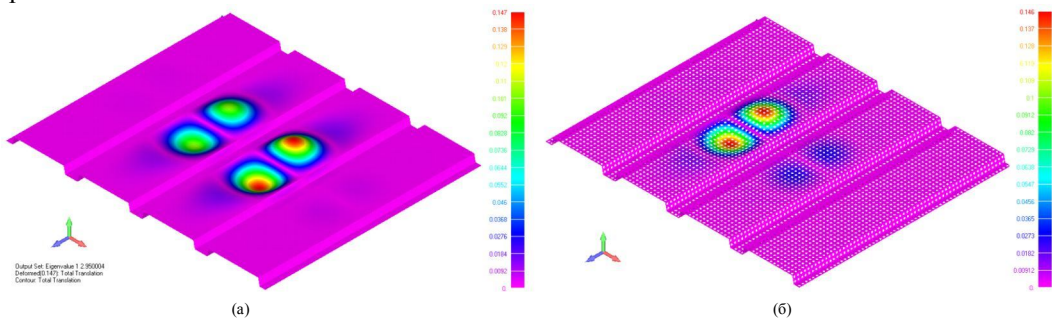


Рис. 4. Нижчі форми втрати стійкості гофрованої панелі без (а) і з перфорацією (б) товщиною 0,0015 м при дії вітру  $W_m = 504,25$  Па

**Висновок.** Питання застосування гофрованих панелей з перфорацією для захисних споруд є актуальним, але недостатньо дослідженим. Статичний розрахунок огорожувальної гофрованої сталеваної панелі довжиною 3 м і висотою 3,6 м при дії вітру показав, що товщина 0,0015 м задовольняє вимогам перевірки гофрованої панелі на міцність, жорсткість і стійкість згідно Державних будівельних норм України. Перфорація панелі збільшила максимальні переміщення приблизно на 12 %, еквівалентні напруження на 41 % і зменшила на 12 % критичне значення вітрового навантаження. Бачимо, що вплив перфорації на статичні характеристики даної

гофрованої панелі є значним лише на еквівалентні напруження, які при цьому не перевищують розрахунковий опір сталі 10Г2С1  $R_y = 319$  МПа і відповідають вимогам перевірки панелі на міцність за першою групою граничних станів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.1.2-2:2006. Державні будівельні норми України „Навантаження і впливи. Норми проектування”.
2. ГОСТ 27751-88. Державний стандарт України. Надійність будівельних конструкцій і основ.
3. ДСТУ 8969-2019. Прокат тонколистовий зі сталі підвищеної міцності.
4. ДБН В.2.6-198:2014. Державні будівельні норми „Сталеві конструкції. Норми проектування”.
5. Ray W. Clough, C.Philip Johnson. A finite element approximation for the analysis of thin shells // Int. J. Solids Struct., 1968. – 4, No.1. – P. 43-60.
6. Bouraou N.I., Luk'yanchenko O.O., Tsybulnik S.A., Shevchuk D.V. Vibration Condition Monitoring of the Vertical Steel Tanks // Vibrations in Physical Systems, – 2016. – Vol. 27. – pp. 53-60.
7. Лук'яненко О.О. Розв'язання проблеми надійності і безпеки оболонкових структур з недосконалістьми форми методами обчислювальної механіки. – Київ: Вид-во „Каравела”, 2019. – 197 с.
8. Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Vabyshchevych. The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
9. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К: НТТУ КПИ, 2011. – 317 с.
10. Jaecheol Koh Siemens NX Nastran: Tutorials for Beginners and Advanced Users. – ASIN: B0B19ZBZCM, 2022. – 566 p.

## REFERENCES

1. DBN V.1.2-2:2006. Derzhavni budivelni normy Ukrainy „Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia” [State building regulations of Ukraine “Loads and impacts. Design standards”].
2. HOST 27751-88. Derzhavnyi standart Ukrainy. Nadiinist budivelynh konstrukcii i osnov [State standard of Ukraine. Reliability of building structures and foundations].
3. DSTU 8969-2019. Prokat tonkolistovyi zi stali pidvyshchenoi mitsnosti [Rolled thin sheet of increased strength].
4. DBN V.2.6-198:2014. Derzhavni budivelni normy Ukrainy „Stalevi kostruktsii. Normy proektuvannia” [State building regulations of Ukraine “Steel structures. Design standards”].
5. Ray W. Clough, C.Philip Johnson A finite element approximation for the analysis of thin shells // Int. J. Solids Struct., 1968. – 4, No.1. – 43-60.
6. Bouraou N.I., Luk'yanchenko O.O., Tsybulnik S. A., Shevchuk D. V. Vibration Condition Monitoring of the Vertical Steel Tanks // Vibrations in Physical Systems, – 2016. – Vol. 27. – pp. 53-60.
7. Lukianchenko O.O. Rozv'iazannia problemy nadiinosti i bezpeky obolonkovykh struktur z nedoskonalostiamy formy metodamy obchysliuvalnoi mekhaniky [Decision of problem of reliability and safety of shell structures with shape imperfections by the methods of calculable mechanics]. – Kyiv: Vyd-vo „Karavela”, 2019. – 197 s (ukr).
8. Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Vorona Yu.V., Vabyshchevych M.O. The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
9. Rudakov K.N. FEMAP 10.2.0. Heometrycheskoe y konechno-elementnoe modelyrovanye konstruktsiyi [Geometrical and finite-element design of constructions]. – K: NTTU KPI, 2011. – 317 s.(rus).
10. Jaecheol Koh Siemens NX Nastran: Tutorials for Beginners and Advanced Users. – ASIN: B0B19ZBZCM, 2022. – 566 p.

Стаття надійшла 08.03.2024

Lukianchenko O.O., Tsybulnyk S.O., Kozak A.A., Gerashchenko O.V., Kara I.D.

#### INFLUENCE OF PERFORATION ON STATIC CHARACTERISTICS OF THE ENCLOSING CORRUGATED PANEL UNDER THE WIND ACTION

The application of the enclosing panels with perforation in construction practice for protective structures is economic advantageous due to reduction of financial costs for their production, transportation and installation. But influence of perforation on static and dynamic characteristics of the enclosing panels was not enough investigated. With the purpose of wind protection of the buildings and structures at the Ukrainian Antarctic station „Akademik Vernadsky” static stress and stability analyses of the protective structure were executed in according with the first and second groups of limit states of State building regulations of Ukraine. The protective structure as the enclosing corrugated steel panel and supporting columns was appeared. In the article the results of numeral research of the stress strain state and stability of the corrugated panel are presented. The panel width and height were accepted permanent, and a panel thickness was explored and accepted according to requirements for its stiffness, strength and stability. The four corrugations in the form of trapezoids are located along the panel height. Perforation of the panel in the form of round holes with a radius of 12.5 mm was presented. Two finite element models of the corrugated panel using the software NASTRAN were built. The corrugated panel without perforation model as a collection of rectangular shell finite elements with six degrees of freedom at the node was modeled. This model contained 35161 finite elements and 32540 nodes. The finite element model of the enclosing corrugated panel with perforation contained 383043 triangular shell finite elements with six degrees of freedom at the node and 211609 nodes. Boundary conditions were imposed on the modal nodes along the height on both sides of the corrugated panel in the form of fixing, taking into account its rigid attachment to the columns. Wind action on the enclosing panel was presented as uniform distributed static load, the limit calculation values of which were got according to State building regulations of Ukraine and statistical data of wind at the Ukrainian Antarctic station. The main

attention was given to research of influence of perforation on the corrugated panel equivalent stresses and displacements, critical values of wind load and form of loss of corrugated panel stability. Computational procedures of static stress and stability analyses of software NASTRAN were applied.

**Keywords:** corrugated panel, perforation, wind, finite element method, static stress analysis, stability.

УДК 539.3

*Лук'янченко О.О., Цибульник С.О., Козак А.А., Геращенко О.В., Кара І.Д. Вплив перфорації на статичні характеристики огорожувальної гофрованої панелі при дії вітру // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 75-82.*

*Досліджені статичні характеристики огорожувальної гофрованої сталеваної панелі захисної споруди від дії вітру. Застосовано обчислювальні процедури програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Оцінено вплив перфорації на еквівалентні напруження, вузлові переміщення, критичні значення навантаження та форми втрати стійкості гофрованої панелі.*

Табл. 3. Іл. 4. Бібліогр. 7 назв.

UDC 539.3

*Lukianchenko O.O., Tsybulnyk S.O., Kozak A.A., Gerashchenko O.V., Kara I.D. Influence of perforation on static characteristics of the enclosing corrugated panel under the wind action // Strength of Materials and Theory of Structures. – K.: KNUBA, 2024. – Issue 112. – P. 75-82.*

*Static characteristics of the enclosing corrugated steel panel of protective structure under the wind action were investigated. Calculated procedures of finite element analysis software NASTRAN were applied. Influence of perforation on equivalent stresses, nodal displacements, critical loads and forms of loss of corrugated panel stability was appraised.*

Tab. 3. Fig. 4. Ref. 7.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, професор кафедри будівельної механіки КНУБА, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ольга Олександрівна.  
**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ользі Олександрівні.

**Робочий тел.:** +38(044) 241-54-20.

**Мобільний тел.:** +38(095) 727-18-25.

**E-mail:** lukianchenko.oo@knuba.edu.ua, lukianch0907@meta.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-1794-6030>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Цибульник Сергій Олександрович.

**Адреса робоча:** 03056 Україна, м. Київ, проспект Берестейський, 37, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, ЦИБУЛЬНИКУ Сергію Олександровичу.

**Робочий тел.:** +38(044) 204-95-41

**Мобільний тел.:** +38(097) 331-46-59

**E-mail:** tsybulnik.s.a@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-4462-0936>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, КОЗАК Андрій Анатолійович.

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури КОЗАКУ Андрію Анатолійовичу.

**Робочий тел.:** +38(044)248-3237

**Мобільний тел.:** +38(066) 1997036

**E-mail:** kozak.aa@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-3192-1430>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, ГЕРАЩЕНКО Олег Валерійович.

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ГЕРАЩЕНКУ Олегу Валерійовичу.

**Робочий тел.:** +38(044)248-30-40

**Мобільний тел.:** +38(095)661-6052

**E-mail:** olg\_guera@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-1951-4805>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КАРА Ірина Дмитрівна.

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, Повітрофлотський пр., 31, Київський національний університет будівництва і архітектури КАРА Ірині Дмитрівні.

**Роб. тел.:** +38(044) 2415412

**E-mail:** karaidknuba@tutanota.com

**ORCIDID:** <https://orcid.org/0000-0003-4700-997X>