

УДК 539.3

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СТОХАСТИЧНУ ПОВЕДІНКУ ПАЛИВНОГО РЕЗЕРВУАРА

**О.О. Лук'янченко<sup>1</sup>**,  
канд. техн. наук

**Ю.В. Ворона<sup>1</sup>**,  
канд. техн. наук

**О.В. Костіна<sup>1</sup>**,  
канд. техн. наук

**О.В. Геращенко<sup>1</sup>**,  
канд. техн. наук

<sup>1</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

Побудовані імовірнісні моделі вітрового навантаження з урахуванням обмежених метеорологічних даних місцевості у вигляді квазістаціонарного диференціального випадкового процесу та послідовності екстремальних значень вітрового навантаження, яке описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля. За допомогою неперервного вейвлет-перетворення отримані частотно-часові вейвлет-спектри відрізків реалізацій вітрового навантаження. Застосовані базисні неортогональні нормовані вейвлет-функції Морле (Morlet), Пауля (Paul) та «мексиканський капелюх» (Mexican Hat). Досліджена нелінійна поведінка паливного резервуара в системі із захисною ємністю за допомогою модифікованого методу Ньютона-Рафсона при статичній дії вітру. Виконано модальний аналіз системи методом Ланцоша. Застосовано спектральний метод оцінки відгуків системи у вигляді переміщень, напружень та прискорень при дослідженні її стохастичної поведінки.

**Ключові слова:** імовірнісна модель, вітрове навантаження, вейвлет-аналіз, спектральний аналіз, метод скінчених елементів, резервуар.

**Вступ.** Вітрове навантаження відноситься до кліматичних факторів, які носять випадковий характер і мають значний вплив на будівельні споруди. Аналіз сучасних вітчизняних, зарубіжних теоретичних і експериментальних досліджень показав, що існуючі нормативні документи і методики потребують уточнення і розвитку [1-6]. Важливим напрямком є вдосконалення математичних моделей вітрового навантаження на споруди, які розташовані в важкодоступних місцях і знаходяться в несприятливих умовах експлуатації. Особливо це стосується відповідальних споруд, аварії на яких можуть призвести до значних екологічних катастроф. До таких споруд відноситься паливний резервуар на українській антарктичній станції Академік Вернадський [7-10]. Можливість адекватного подання та встановлення розрахункових проектних значень вітру за порівняно невеликими обсягами метеорологічних даних дає імовірнісне

моделювання. Багато дослідників використовують моделі квазістаціонарного диференціального випадкового процесу та послідовності екстремальних значень вітрового навантаження, яка описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля [1, 2, 4, 6]. Для формування моделей реалізація вітрового навантаження розділяється на характерні однакові за тривалістю відрізки, на кожному з яких визначаються характеристики вітру. До них відносяться середня швидкість вітру, яка осереднена за деякий проміжок часу; максимальна швидкість вітру з повторюваністю за деякий період часу та коефіцієнти поривчастості (пульсації) вітру. Імовірнісні моделі навантаження подаються у вигляді розподілу цих характеристик.

Для моделювання стаціонарних і нестаціонарних стохастичних впливів все частіше застосовуються методи вейвлет-аналізу [11-15]. Це пов'язано з гострою потребою отримати адекватні математичні моделі як зовнішніх впливів так і стохастичних коливань споруд з якісними характеристиками їх стану в частотно-часовому просторі, які дозволять прогнозувати стохастичну поведінку споруд. Область застосування вейвлет-аналізу і надалі розширюється.

В статті на основі обмеженої кількості метеорологічних даних місцевості, які отримані фахівцями Національного антарктичного наукового центру України, авторами виконано математичне моделювання вітрового навантаження. Побудовані імовірнісні моделі вітру у вигляді квазістаціонарного диференціального випадкового процесу та послідовності екстремальних значень вітрового навантаження, яка описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля. Для цього зроблена вибірка характеристик вітрового навантаження по відрізках його реалізації в один день з 5-ти хвилинним осередненням. Виконано вейвлет-аналіз наявної реалізації вітрового потоку з метою визначення домінантних частот і для уточнення імовірнісної моделі вітру у вигляді послідовності його екстремальних (максимальних) значень. За допомогою неперервного вейвлет-перетворення отримані частотно-часові вейвлет-спектри відрізків реалізацій вітру в один день. Застосовані базисні неортогональні нормовані вейвлет-функції Морле (Morlet), Пауля (Paul) та «мексиканський капелюх» (Mexican Hat). Побудована скінченноелементна модель паливного резервуара в системі з захисною ємністю. Виконано модальний аналіз системи. Досліджена нелінійна поведінка складної просторової конструкції за допомогою модифікованого методу Ньютона-Рафсона при статичній дії навантаження. Застосовано спектральний аналіз відгуків системи у вигляді переміщень, напружень та прискорень при оцінці її стохастичної поведінки.

**1. Математичне моделювання вітрового навантаження.** З урахуванням обмеженої кількості наявних метеорологічних даних (три місяці 30.03.-29.06.2009 р.) авторами використана вибірка характеристик вітру по відрізках реалізації вітрового навантаження в один день з 5-ти хвилинним осередненням (рис. 1).

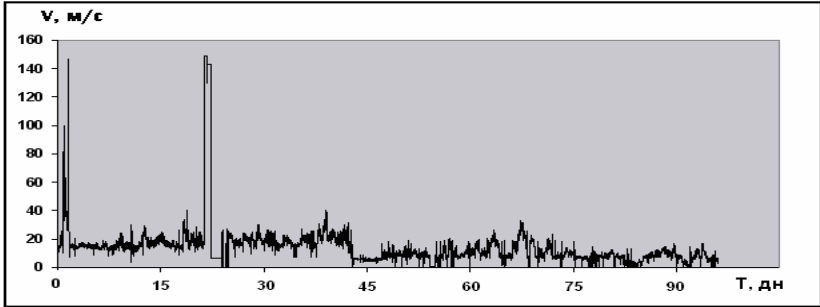


Рис. 1 Реалізації вітрового потоку на Антарктичній станції (30.03.-29.06.2009)

В реалізації вітрового потоку має місце дані за один день з постійною швидкістю  $149 \text{ м/с}$ , яка пов'язана з неполадками приладу запису і не врахована в подальших розрахунках авторами. Середня і максимальна швидкості вітру, коефіцієнт його поривчастості (пульсації), що визначені для побудови імовірнісних моделей вітрового навантаження у вигляді квазістаціонарного диференціального випадкового процесу та послідовності екстремальних значень вітру представлені на рис. 2.

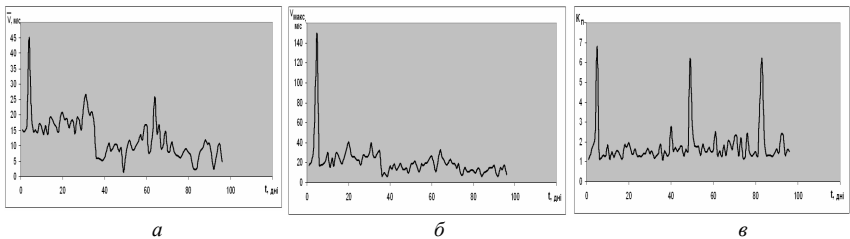


Рис. 2. Зміна середньої (а) і максимальної (б) швидкостей та коефіцієнту поривчастості (в) вітру за часом

Обчислені статистичні характеристики вітру за 97 днів:

1. Математичне сподівання: середньої швидкості  $12,474 \text{ м/с}$ ; максимальної швидкості  $20,809 \text{ м/с}$ ; коефіцієнту поривчастості  $1,765$ .

2. Стандарт: середньої швидкості  $0,943 \text{ м/с}$ ; максимальної швидкості  $0,959 \text{ м/с}$ ; коефіцієнту поривчастості  $0,921$ .

Результати дослідження середньої швидкості вітру показали, що повторюваність вітру зі швидкістю 20 м/с становить 93,4 %. Повторюваність коефіцієнтів поривчастої вітру, що не перевищують 1,8, становить близько 74 %. Статистичні характеристики середньої швидкості вітру та коефіцієнту поривчастості добре узгоджуються з результатами дослідників, наведеними в монографіях [1, 2, 4].

**1.1. Імовірнісні моделі вітрового навантаження.** В роботі формуються дві імовірнісні моделі вітрового навантаження. Модель квазістаціонарного випадкового диференційованого процесу представляється у вигляді

$$V = V_{cp} \left[ 1 + \sum (K_{ni} - 1) \cdot \sin \omega_i t \right], \quad (1)$$

де  $K_{ni}$  – коефіцієнт поривчастості вітру;  $\omega_i = 2\pi / \tau_i$  – кругові частоти поривів вітру ( $\tau_i$  – тривалість дії пориву вітру з відповідним коефіцієнтом поривчастості).

Модель вітрового навантаження у вигляді послідовності екстремальних (максимальних) значень описується подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля з густиною та інтегральною функцією відповідно

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left[ \frac{\alpha - x}{\beta} - \exp \left( \frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right]; \quad F(x) = \exp \left[ -\exp \left( \frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right], \quad (2)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – параметри, що визначаються через математичне сподівання  $M$  та стандарт  $S$  вибірки максимумів за формулами

$$\alpha = M - k_a S; \quad \beta = k_b S. \quad (3)$$

Перехідні коефіцієнти  $k_a$  та  $k_b$  визначаються з урахуванням обсягу вибірки екстремумів  $N = 27\,648$  за таблицею Гумбеля, яка може бути апроксимована за формулами

$$k_a = 0,45 + 0,34N^{-0,69} = 0,791; \quad k_b = 0,78 + 1,54N^{-0,75} = 0,781. \quad (4)$$

В результаті обчислень визначені параметри  $\alpha = 20,081$  і  $\beta = 0,719$ . Періоди повторюваності дії вітру для різних максимальних значень швидкості вітрового навантаження обчислені за формулою

$$T = 1 / \left[ 1 - F(x) \right]. \quad (5)$$

На рис. 3, а представлена інтегральна функція розподілу Гумбеля реалізації вітрового потоку на антарктичній станції. Подвійний експоненціальний закон розподілу Гумбеля, яка описує вибірку максимумів швидкості вітру представлено на рис. 3, б.

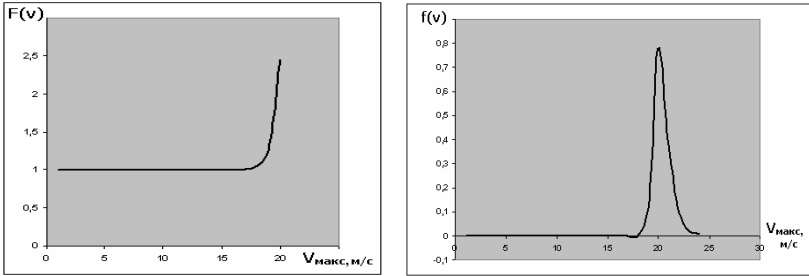


Рис. 3. Імовірнісна модель вітрового навантаження: *a* - інтегральна функція розподілу Гумбеля; *b* - подвійний експоненціальний закон розподілу Гумбеля

В таблиці 1 представлені значення обчислених параметрів вітру.

Таблиця 1

Макс. швидкість, $V_{\text{макс}}, \text{ м/с}$	Інт. функція $F(x)$	Закон розподілу $f(x)$	Період повт. $T^*$
1	1	0	3,291E+11
2	1	0	81995441554
3	1	0	20426155547
4	1	0	5088399167
5	1	0	1267580554
6	1	0	315769343
7	1	0	78661898
8	1	0	19595613
9	1	0	4881500
10	1,000001	0	1216039
11	1,000003	0	302929
12	1,000013	0	75462
13	1,000053	0	18798
14	1,000214	0	4682
15	1,000858	0	1166
16	1,003447	4,1E-124	290,112
17	1,013909	6,01E-30	71,896
18	1,057015	6,05E-07	17,539
19	1,249306	0,113097	4,011
20	2,443733	0,77812	0,692
21	36,12011	0,376607	0,0284

$T^*$  – період повторюваності дії вітру з 5-хвилиним осередненням

Період повторюваності дії вітру з максимальною швидкістю  $20,809 \text{ м/с}$ , яка є математичним сподіванням цієї характеристики, дорівнює  $T = T^* \cdot 300 = 0,126 \times 300 = 37,8 \text{ с}$ . Вітрове навантаження подається у вигляді спектру максимальних значень швидкості вітру на відповідних частотах, які обчислюються з періодом повторюваності згідно даних таблиці 1.

**1.2. Застосування теорії і методів вейвлет-перетворення для аналізу реалізації вітрового потоку.** Виникненню теорії і методів вейвлет-аналізу послужив той факт, що за допомогою перетворення Фур'є не можливо проаналізувати сигнали в «об'єднаному» частотно-часовому просторі. Поняття вейвлет (wavelet – маленька хвиля) з'явилося на початку 1980-х років в різних дисциплінах, включаючи математику, фізику та інженерні науки. Інженер-геофізик Морле запропонував вейвлет-перетворення як новий математичний метод аналізу сейсмічних сигналів, які є нестационарними стохастичними процесами. Гроссман, фізик-теоретик, отримав точну формулу зворотного вейвлет-перетворення. Морле і Гроссман детально вивчили безперервне вейвлет-перетворення і запропонували теорію вейвлетів, як новий метод частотного аналізу сигналів. Математик Мейер сформулював математичні положення теорії вейвлетів. Першим значним досягненням вейвлет-аналізу стала побудова Добеші, Гроссманом і Мейером розкладань по неортогональним вейвлетам. Орто-нормальні базиси з гладких вейвлет-функцій були побудовані Мейером і Лемаром. Мейер і Малла запропонували загальну процедуру побудови ортонормального вейвлет-базису, що привело до розробки процедури кратномасштабного аналізу. Баттл і Лемар запропонували процедуру побудови ортогональних вейвлет-сплайнів. Добеші розробив теорію створення вейвлет-базису, який дозволив суттєво пояснити зв'язок між безперервним і дискретним вейвлет-аналізом. Концепція фреймів була детально вивчена Добеші. Ця робота сприяла створенню нових алгоритмів в чисельному аналізі, в методах граничних елементів, скінченних елементів, чисельному розв'язанню диференціальних рівнянь в частинних похідних. Область застосування вейвлет-аналізу і надалі розширюється [11-15].

В роботі застосовано вейвлет-аналіз наявної реалізації вітрового потоку з метою визначення домінантних частот і для уточнення імовірнісної моделі вітру у вигляді послідовності його екстремальних (максимальних) значень швидкості. При побудові частотно-часових вейвлет-спектрів реалізацій вітру в один день застосовано методику неперервного вейвлет-перетворення, яка наведена в роботі [11]. Використані базисні неортогональні нормовані вейвлет-функції Морле (Morlet), Пауля (Paul) та «мексиканський капелюх» (Mexican Hat). Материнські вейвлети подано у вигляді двомірних матриць в комплексній формі. Значення найменших масштабів вейвлетів, кроків по часу та масштабу (частоти) приймалися з

урахуванням рекомендацій, що наведені в [11]. Виконано вейвлет-перетворення 97 реалізацій вітрового потоку за один день. Визначались Фурьє-періоди, з урахуванням яких експоненціально збільшувались масштаби вейвлетів до 44 значень. Як приклад, на рисунках 4 - 6 представлені вейвлет-спектри амплітуд реалізацій вітру за три дні для трьох базисних вейвлет-функцій.

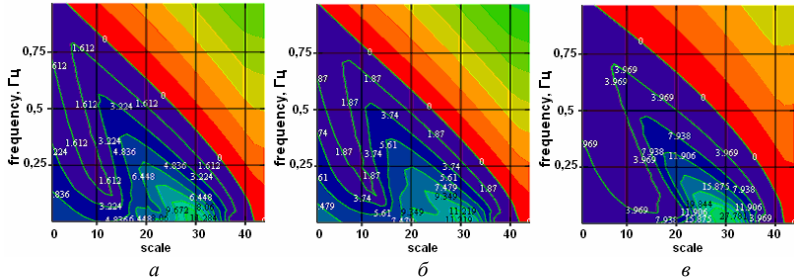


Рис. 4. Вейвлет-спектри амплітуд реалізацій вітру за один день (вейвлет Морле)  
 $a$  – 11.04.2009;  $b$  – 15.04.2009;  $c$  – 21.04.2009

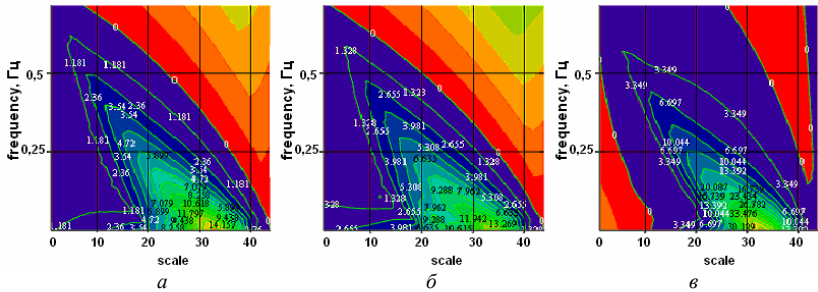


Рис. 5. Вейвлет-спектри амплітуд реалізацій вітру за один день (вейвлет Пауля):  
 $a$  – 11.04.2009;  $b$  – 15.04.2009;  $c$  – 21.04.2009

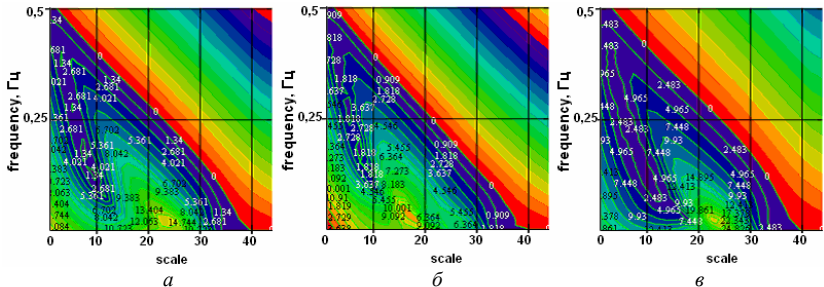


Рис. 6. Вейвлет-спектри амплітуд реалізацій вітру за один день (вейвлет «мексиканський капелюх»):  
 $a$  – 11.04.2009;  $b$  – 15.04.2009;  $c$  – 21.04.2009

Вейвлет-спектри (Фур'є-образи), які отриманні за допомогою базисних вейвлетів Морле та Пауля є схожими. Домінантною частотою вітрового потоку у 87 % вейвлет-спектрів є частота  $0,029 \text{ Гц}$ , яка локалізована в однаковому часі для різних реалізацій (рис. 4, 5). При застосуванні вейвлета «мексиканський капелюх» (рис. 6) вейвлет-спектри містять дві основні частоти  $0,031 \text{ Гц}$  та  $0,12 \text{ Гц}$ , з подібним часом локалізації. Основна частота вітрового потоку в імовірнісній моделі (табл. 1), яка відповідає математичному сподіванню максимальної швидкості вітру  $20,809 \text{ м/с}$ , дорівнює  $1/37,8=0,026 \text{ Гц}$ . Можна зробити висновок, що домінантні частоти вітру, які отримані за допомогою вейвлет-аналізу (вейвлети Морле та Пауля) і при побудові імовірнісної моделі у вигляді послідовності екстремальних значень вітру близькі за значенням (різниця  $1,1\%$ ).

В подальших розрахунках вітрове навантаження моделюється у вигляді імовірнісної моделі з подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля вибірки максимальної швидкості вітру і стохастичними характеристиками, що наведені в табл. 1.

**2. Формування скінченноелементної моделі паливного резервуара в системі із захисною ємністю.** Резервуар для дизельного палива являє собою металевий циліндр висотою  $5,96 \text{ м}$  і діаметром  $6,63 \text{ м}$ . Резервуар з паливом знаходиться в середині захисної металеві циліндричної оболонки висотою  $6,58 \text{ м}$  і діаметром  $6,96 \text{ м}$ . Стінки оболонок є зварними з листів прокату товщиною  $5 \text{ мм}$ . Сталеві труби для закачування та відбору палива мають діаметр  $3 \text{ дюйма}$  та довжину  $0,16 \text{ м}$ . Товщина покрівель оболонок  $4 \text{ мм}$ . Оболонки виготовлені з матеріалу СтЗпс.2 (ГОСТ 14637). Фізичні характеристики матеріалу для сталевих конструкцій приймаються такими: густина прокату –  $7850 \text{ кг/м}^3$ ; коефіцієнт лінійного розширення –  $0,12 \cdot 10^{-4}$ ; модуль пружності –  $2,06 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ , модуль зсуву –  $0,79 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ; коефіцієнт поперечної деформації –  $0,3$ . На основі методу скінченних елементів із застосуванням програмного комплексу NASTRAN [16] побудована математична модель складеної конструкції у вигляді системи двох з'єднаних циліндричних оболонок (рис. 7, а). Стінки оболонок розбиті по колу на  $64$  частини, по висоті – на  $20$  і змодельовані у вигляді сукупності чотирьохкутних плоских скінченних елементів зі шістьма степенями вільності. В місцях кріплення двох труб, які моделюються стержневими елементами, застосовані трьохкутні плоскі елементи. Покрівлі оболонок моделюються плоскими двомірними чотирьохкутними і трикутними скінченними елементами (рис. 7, б). У вузлах нижньої кромки внутрішнього резервуару обмежені переміщення по твірній і радіусу, повороти навколо радіусу і дотичної. Вузли нижньої кромки захисної ємності жорстко закріплені (рис. 7, в).



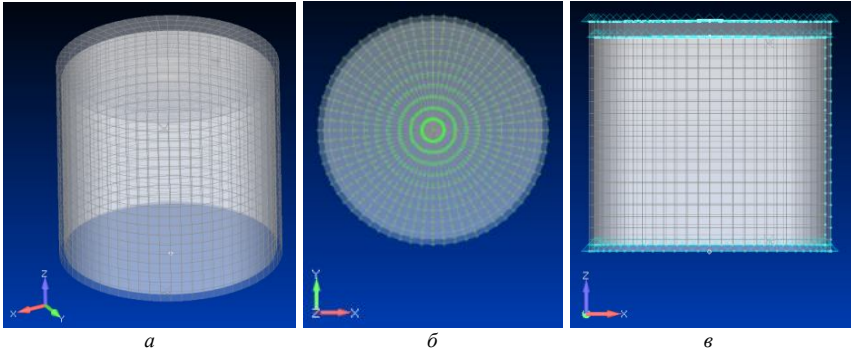


Рис. 7. Скінченноелементна модель системи двох з'єднаних оболонок

### 3. Дослідження напружено-деформованого стану системи при дії вітрового навантаження

**3.1. Статична поведінка системи при дії вітру.** В роботі досліджено стан системи двох з'єднаних оболонок при статичній дії навантаження. Граничний розрахунковий тиск на стінку та покрівлю захисної ємності, визначений за допомогою нормативного документу [4]. На рис. 8 показано розподіл вздовж кола та твірної захисної ємності статичної складової вітрового навантаження при максимальній швидкості  $V_{\text{макс.ср}} = 45 \text{ м/с}$ .

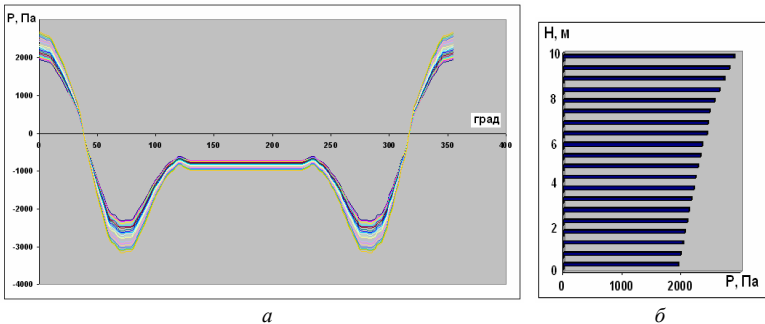


Рис. 8. Розподіл статичної складової вітрового навантаження на захисну ємність: а – вздовж кола; б – вздовж твірної

На покрівлю захисної ємності діє вітер у вигляді рівномірного тиску зі значенням  $1945 \text{ Па}$ . Напружено-деформований стан системи досліджений при розв'язанні нелінійної задачі статки за допомогою модифікованого методу покрокового навантаження Ньютона-Рафсона. На рис. 9 представлені переміщення і напруження в елементах системи.

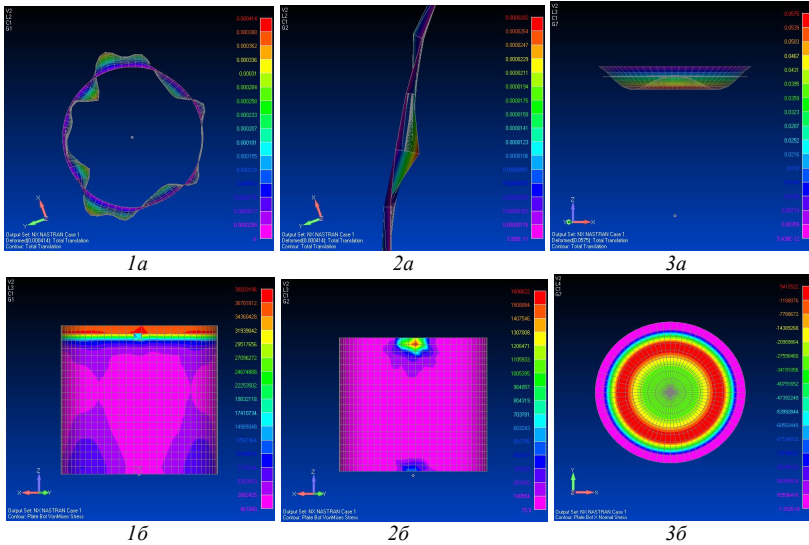


Рис. 9. Стан захисної ємності (1), паливного резервуара (2) та покрівлі (3) при статичній дії вітру: а – переміщення; б – напруження

Результати дослідження напружено-деформованого стану захисної ємності при дії граничного розрахункового значення статичної складової вітрового навантаження (рис. 9) показали, що максимальні еквівалентні напруження спостерігаються в елементах верхнього поясу і складають  $39,21 \text{ МПа}$ . Коефіцієнт запасу стійкості дорівнює  $187/39,21=4,77$  ( $187 \text{ МПа}$  є допустимим напруженням в елементах верхнього поясу). Видно, що з'єднання двох оболонок має вплив на напружений стан паливного резервуара. Максимальні напруження  $1,61 \text{ МПа}$  спостерігаються біля верхнього патрубку для закачування палива і значно менші за напруження в стінці захисної ємності. Максимальне напруження в покрівлі захисної ємності дорівнює  $5,41 \text{ МПа}$ . Покрівля паливного резервуара не напружена. Максимальні переміщення в стінці захисної ємності складають  $0,41 \text{ мм}$ , в стінці паливного резервуара –  $0,28 \text{ мм}$ ; в покрівлі захисної ємності –  $0,058 \text{ мм}$ .

**3.2. Модальний аналіз системи.** При дослідженні динамічних характеристик захисної ємності в системі із паливним резервуаром і покрівлями застосовано процедуру розв'язання задачі на власні коливання методом Ланцоша. Визначені 70 власних частот і форм коливань системи, які частково представлені на рис. 10.

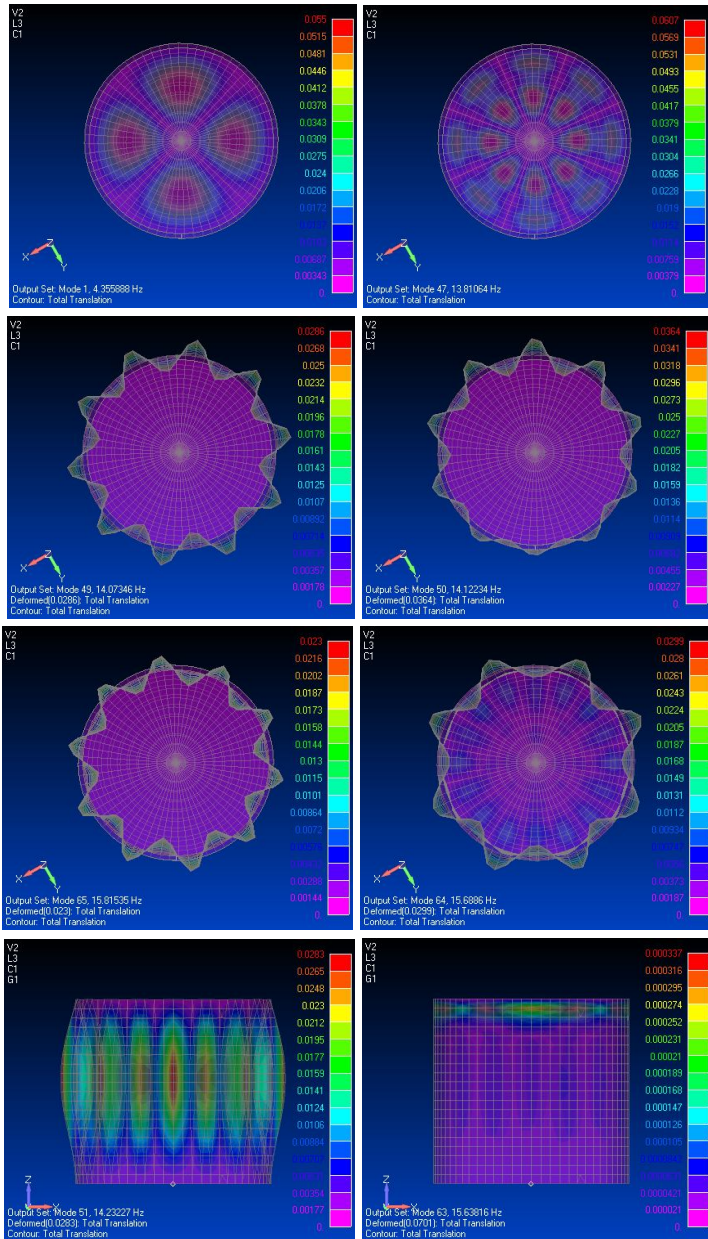


Рис. 10. Форми і частоти власних коливань системи

Спектр власних частот коливань системи щільний. В діапазоні частот 4,356-14,036 Гц спостерігається деформація лише покрівель оболонок. Мають місце симетричні і несиметричні вм'ятини та випучини. На першій частоті власних коливань системи 4,356 Гц деформується лише покрівля захисної ємності, на частоті 4,874 Гц (5-а форма) – покрівля паливного резервуара. На частоті 14,073 Гц (49-а форма) починає деформуватися захисна ємність. Спостерігаються регулярні і нерегулярні деформації стінки з різною кількістю півхвиль (10, 12, 9, 11) в радіальному напрямку. На частоті 15,814 Гц (65-а форма) починає деформуватися стінка паливного резервуара. Вздовж кола мають місце регулярні і нерегулярні деформації стінки резервуара. Деформація стінок захисної ємності та резервуара вздовж твірних має вигляд однієї півхвилі або вм'ятин. Сумісна деформація стінок оболонок та покрівель спостерігається з 64-тої форми коливань (15,689 Гц).

Отримані результати модального аналізу дозволять дослідити стохастичну поведінку системи.

**3.3. Дослідження стохастичної поведінки системи.** Аналіз впливу стохастичної складової вітрового навантаження виконано за допомогою спектрального аналізу відгуку скінченноелементної моделі у вигляді переміщень, напружень та прискорень. Використана імовірнісна модель вітрового навантаження з характеристиками, що наведені в таблиці 1. На рис. 11 представлені спектри відгуків у вигляді переміщень вузлів захисної ємності (1) і паливного резервуара (2), які розташовані в нижніх поясах оболонок біля патрубку для зливання палива.

Видно, що спектри відгуків вузлів оболонок в радіальному напрямку (рис. 11, а) мають три піки. Вони розташовані на частотах вітрового навантаження, які збігаються з частотами власних коливань системи, де вперше спостерігаються деформації покрівель двох оболонок та стінки захисної ємності. Бачимо, що максимальний відгук в меридіональному напрямку (рис. 11, б) спостерігається на частотах 5,19 Гц для захисної ємності та 5,72 Гц для паливного резервуара. Переміщення вузла захисної ємності вздовж осей  $x$  і  $y$  не перевищують 0,0048 мм, вздовж осі  $z$  – 0,0011 мм. Максимальні переміщення вузла паливного резервуара по трьох напрямках не перевищують 0,0008 мм.

На рис. 12 представлені спектри відгуків у вигляді переміщень вузлів захисної ємності (1) і паливного резервуара (2), які розташовані в верхніх поясах оболонок біля патрубку для закачування палива.

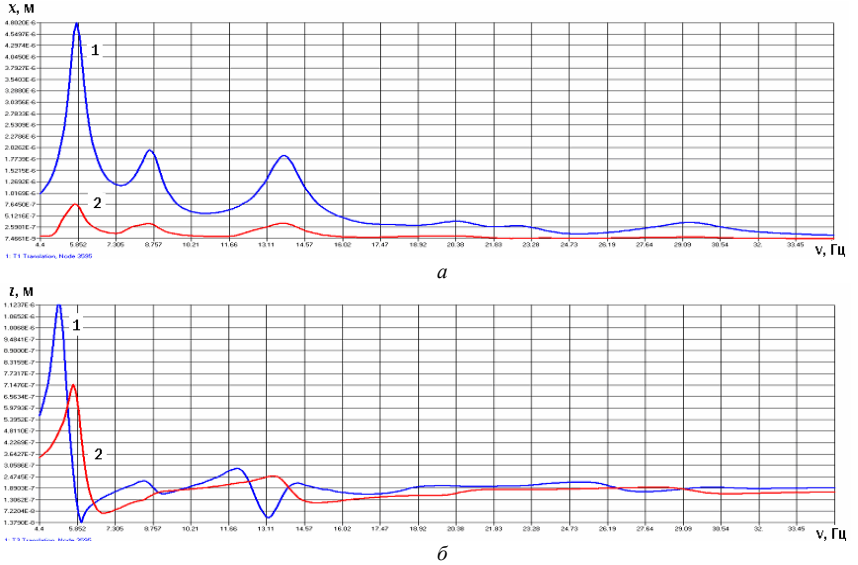


Рис. 11. Спектральний відгук вузлів нижніх поясів захисної смності (1) та паливного резервуара (2) у вигляді переміщень:  $a$  – вздовж осі  $X(Y)$ ,  $b$  – вздовж осі  $Z$

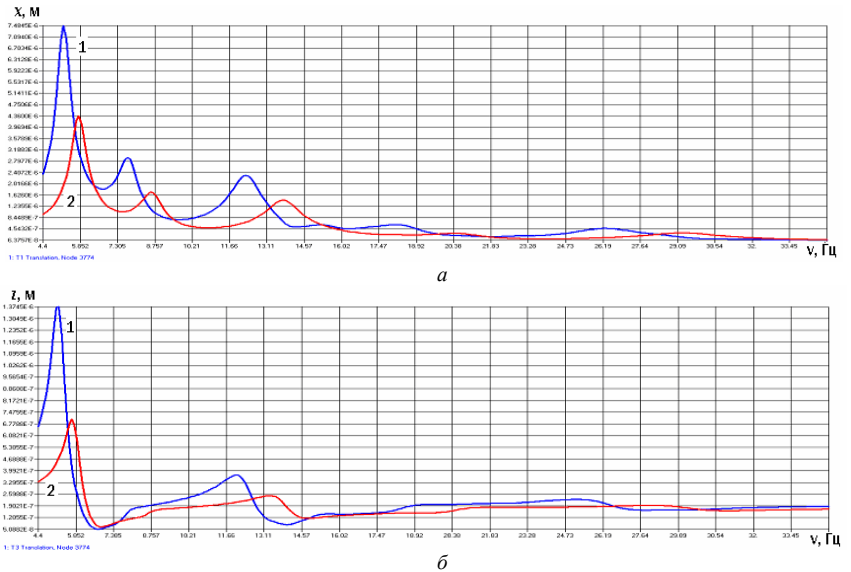


Рис. 12 Спектральний відгук вузлів верхніх поясів захисної смності (1) та паливного резервуара (2) у вигляді переміщень:  $a$  – вздовж осі  $X(Y)$ ,  $b$  – вздовж осі  $Z$

Видно, що спектри відгуків вузлів верхніх поясів оболонок в радіальному напрямку мають три піки (рис. 12, *a*). Максимальні переміщення вузлів захисної ємності (1) і паливного резервуара (2) спостерігаються на частотах вітрового навантаження з деяким зміщенням. Спектральний відгук оболонок в меридіональному напрямку (рис. 12, *б*) подібне до відгуку, що подано на рис. 11, *б*. Переміщення захисної ємності вздовж осі  $x(y)$  не перевищують 0,0075 мм, вздовж осі  $z$  – 0,0014 мм. Переміщення паливного резервуара вздовж осі  $x(y)$  не перевищують 0,0044 мм, вздовж осі  $z$  – 0,0007 мм. Можна зробити висновок, що максимальні переміщення вузлів верхніх поясів оболонок біля патрубку для закачування палива (рис. 12) більші за максимальні переміщення вузлів нижніх поясів оболонок в місці розташування патрубка для зливу палива (рис. 11).

Спектральні відгуки системи у вигляді прискорень вузлів нижніх поясів і верхніх поясів оболонок в радіальному напрямку представлені відповідно на рис. 13, *a* та рис. 13, *б*.

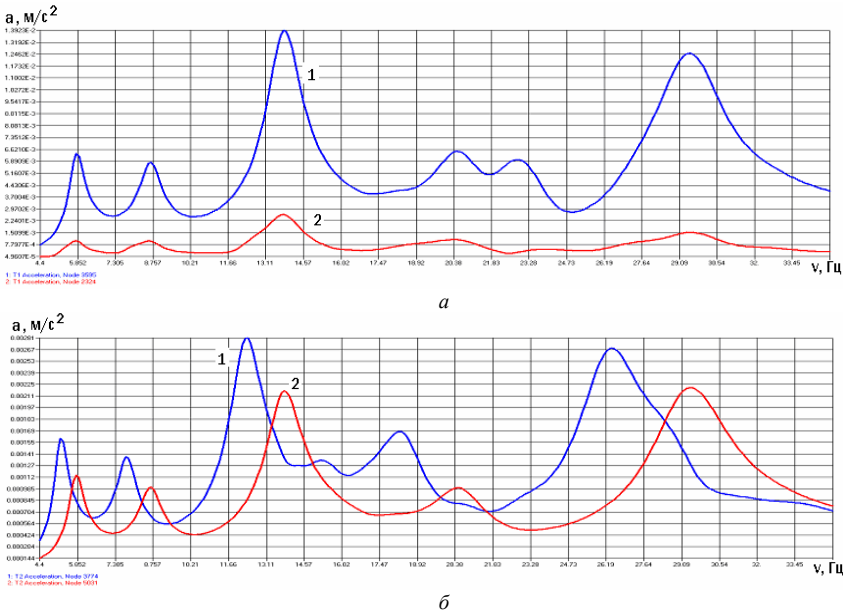


Рис. 13. Спектральний відгук системи у вигляді прискорень вузлів оболонок:  
*a* – нижніх поясів ; *б* – верхніх поясів

Бачимо, що спектри прискорень містять шість і п'ять піків. Максимальні прискорення спостерігаються на частотах вітрового

навантаження, що збігаються з власними частотами коливань системи, на яких одночасно деформуються стінки оболонок і їх покрівлі. Максимальні прискорення вузлів захисної ємності не перевищують  $0,0138 \text{ м/с}^2$  в нижньому поясі та  $0,0282 \text{ м/с}^2$  – в верхньому поясі. Максимальні прискорення вузлів паливного резервуара дорівнюють  $0,0025 \text{ м/с}^2$  в нижньому поясі та  $0,0219 \text{ м/с}^2$  – в верхньому поясі. Максимальні прискорення вузлів захисної ємності та паливного резервуара не перевищують нормативних [4].

Спектральний аналіз відгуку системи показує, що вплив стохастичної складової вітрового навантаження є максимальним в діапазоні частот 4,3-15 Гц. Ці частоти співпадають з частотами власних коливань покрівел та першими частотами власних коливань захисної ємності та паливного резервуара.

На рис. 14 представлено напружений стан захисної ємності і паливного резервуара при дії стохастичної складової вітрового навантаження з частотою 5,19 Гц. Зображено ізолінії нормальних напружень в елементах ємності вздовж осей  $X$  і  $Y$  та дотичних напружень вздовж площини  $XU$  відповідно.

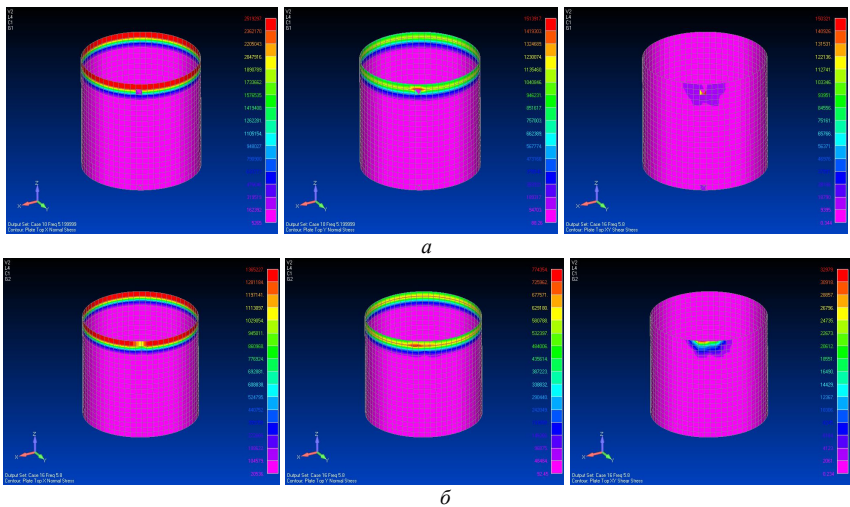


Рис. 14. Напружений стан оболонок при частоті вітрового навантаження 5,19 Гц:  
а – захисної ємності; б – паливного резервуара

Напружений стан оболонок при дії вітрового навантаження з частотою 30,9 Гц представлено на рис. 15.

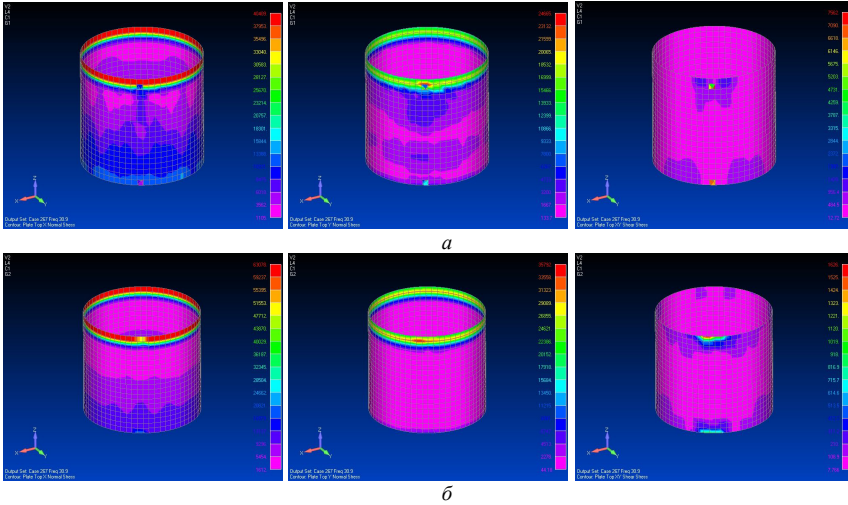


Рис. 15. Напружений стан оболонок при частоті вітрового навантаження 30,9 Гц:  
 а – захисної ємності; б – паливного резервуара

Видно, що більш напруженими є верхні пояси двох оболонок та місця розташування патрубків для закачування та зливу палива. Максимальні напруження спостерігаються в елементах верхнього поясу захисної ємності 2,519 МПа і 1,365 МПа – в елементах верхнього поясу паливного резервуара.

Максимальні напруження в елементах захисної ємності при дії стохастичної складової вітрового навантаження складають 6,14% від напружень, що виникають в захисній ємності від дії статичної складової навантаження.

**Висновок.** При наявності обмежених метеорологічних даних місцевості вітрове навантаження може бути представлено у вигляді квазістаціонарного диференціального випадкового процесу та послідовності екстремальних значень вітрового навантаження з подвійним експоненціальним законом розподілу Гумбеля. Застосування базисних неортогональних нормованих вейвлет-функцій Морле (Morlet), Пауля (Paul) та «мексиканський капелюх» (Mexican Hat) дають змогу виконати неперервне вейвлет-перетворення реалізацій вітрового навантаження, побудувати його частотно-часові вейвлет-спектри і уточнити домінантні частоти. Спектральний аналіз відгуків системи показав, що стохастичний вплив вітрового навантаження на паливний резервуар і захисну ємність є незначним. Це обумовлено загальною висотою захисної ємності 6,58 м з урахуванням розміщення її над рівнем океану 4 м.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Клаф Р., Пензиен Дж.* Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
2. *Аугустини Г., Баратта А., Кашиасти Ф.* Вероятностные методы в строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
3. *Баженов В.А., Дехтярюк С.С.* Імовірнісні методи розрахунку конструкцій. Випадкові коливання пружних систем. – К.: КНУБА, 2005. – 420 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2007. – 60 с.
5. *Баженов В.А., Дехтярюк С.С., Ворона Ю.В.* Динаміка споруд. – К.: ПАТ Віпол, 2012. – 342 с.
6. *Пашинський В.А.* Імовірнісні моделі для розрахунків надійності та нормування кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції // Строительная механика и строительные конструкции: Сборник статей посвященный восьмидесятилетию А.В. Перельмутера. – М.: Издательство СКАД СОФТ, 2013. – 323-332 с.
7. *Баженов В.А., Лук'янченко О.О., Костіна О.В., Герашченко О.В.* Вплив навантаження на частоти власних коливань складної оболонкової конструкції// Опір матеріалів та теорія споруд. К.: КНУБА, 2013. – Вип.91. – С.49-58.
8. *Luk'yanchenko O.O., Vorona Y.V., Kostina O.V., Kuzko O.V.* Evaluation of metal corrosion impact on load bearing capacity of the fuel reservoir// Ukrainian Antarctic Journal.– 2015. – №14, Page 246-255.
9. *Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bouraou N.I., Kuz'ko O.V.* Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. – Strength of Materials:Volume 48, Issue 3 (2016), pp 401–410.
10. *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 Vol. 27 (2016), P. 53-60.
11. *Christopher Torrence and Gilbert P. Compo.* A Practical Guide to Wavelet Analysis / Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol. 79(1998), No. 1, Page 61-98.
12. *Percival D.B., Walden A.T.* Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge University Press, 2000, 622 p.
13. *Dobeshi I.* Desyat' lektsiy po veyvletam [Ten Lectures on Wavelets]. Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» publ., 2001, 454 p.
14. *Addison P.S.* The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Institute of Physics, 2002, 358 p.
15. *Мкртычев О.В., Решетов А.А.* Применение вейвлет-анализа для получения характеристик акселерограмм // Вестник МГСУ. 2013, № 7. – С. 59-67.
16. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. - М.: ДМК Пресс, 2001.- 448 с.

## REFERENCES

1. *Clough R., Penzien J.* Dinamika sooruzheniy [Dynamics of structures]. – М.: Stroyizdat, 1979. – 320 p. (rus)
2. *Augusti G., Baratta A., Kashiati F.* Veroyatnostnyie metody v stroitelnom proektirovanii [Probabilistic methods in building design]. – М.: Stroyizdat, 1988. – 584 s. (rus)
3. *Vazhenov V.A., Dekhtyariuk Ie.S.* Imovirnisni metody rozrakhunku konstruktzii. Vypadkovi kolyvannia pruzhnykh system [Probabilistic methods of structure analysis. Random oscillations of elastic systems]. – К.: KNUBA, 2005. - 420 p. (ukr)
4. ДБН В.1.2-2:2006. Derzhavni budivelni normy Ukrainyiny. Systema zabezpechennia nadiinoshti ta bezpeky budivelnykh ob'iektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. [National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. Loads and effects. Design codes.] – К.: Minbud Ukrainy, 2007. – 60 p. (ukr)

5. *Bazhenov V.A., Dekhtiariuk Ie.S. Vorona Yu.V.* Dynamika sporud [Dynamics of structures]. – K.: PAT Vipol, 2012. – 342 p. (ukr)
6. *Pashynskiy V.A.* Imovirnisni modeli dlia rozrakhunkiv nadiinosti ta normuvannia klimatychnykh navantazhen i vplyviv na budivelni konstruksii // Stroitelnaia mekhanyka y stroitelnye konstruksyy: Sbornyk statei posviashchennoi vosmudesiatyletiu A.V. Perelmutera. [Probabilistic models for the reliability analysis and standardization of environmental loads and impacts on the constructions // Structural mechanics and constructions: A collection of articles dedicated to the A.V. Perelmouter 80 anniversary.] – M.: Yzdatelstvo SKAD SOFT, 2013. – 323-332 p. (ukr)
7. *Bazhenov V.A., Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Gerashchenko O.V.* Vplyv navantazhennia na chastyi vlasnykh kolyvan skladnoi obolonkovi konstruksii [The impact of loading on the complex shell structure natural frequencies] // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2013. – Issue. 91. - K.: KNUBA. - P. 49-58. (ukr)
8. *Luk'yanchenko O.O., Vorona Yu.V., Kostina O.V., Kuzko O.V.* Evaluation of metal corrosion impact on load bearing capacity of the fuel reservoir // Ukrainian Antarctic Journal.– 2015. – №14, Page 246-255.
9. *Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bouraou N.I., Kuz'ko O.V.* Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. – Strength of Materials: Volume 48, Issue 3 (2016), pp 401–410.
10. *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 Vol. 27 (2016), Page 53-60.
11. *Christopher Torrence and Gilbert P. Compo* A Practical Guide to Wavelet Analysis/ Bulletin of the American Meteorological Society. – Vol. 79(1998), No. 1, Page 61-98.
12. *Percival D.B., Walden A.T.* Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge University Press, 2000, 622 p.
13. *Dobeshi I.* Desyat' lektsiy po veyvletam [Ten Lectures on Wavelets]. Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» publ., 2001, 454 p.
14. *Addison P.S.* The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Institute of Physics, 2002, 358 p.
15. *Mkrtychev O.V., Reshetov A.A.* Primenenie veyvlet-analiza dlya polucheniya karakteristik akselerogramm [Application of wavelet analysis for the determination of accelerograms characteristics] // Herald MGSU. - 2013, # 7. – P. 59-67. (rus)
16. *Shimkovich D.G.* Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows [Structural analysis in MSC/NASTRAN for Windows] - M.: DMK Press, 2001.- 448 p. (rus)

*Luk'yanchenko O.O., Vorona Yu.V., Kostina O.V., Geraschenko O.V.*

#### **ANALYSIS OF THE WIND LOADING INFLUENCE ON THE FUEL RESERVOIR STOCHASTIC BEHAVIOR**

The fuel reservoir at the Ukrainian Antarctic station Academician Vernadsky refers to responsible structures which could lead to significant environmental disasters when damaging. Mathematical models of wind load on buildings located in hard-to-reach places and are in unfavorable conditions of exploitation require improvement and development. Meanwhile only probabilistic modeling gives possibility of adequate representation of the design values of wind under relatively small volumes of meteorological data. Such models of wind load were constructed in the form of a quasistationary differential random process and a sequence of extreme values of wind load which are described by the Gumbel double exponential distribution. The wavelet spectra of wind realizations were investigated with the help of continuous wavelet transform in the time-frequency space. The non-orthogonal normalized wavelet basis functions of different types (Morlet, Paul and the Mexican Hat) were used. With the help of modern FEM software a mathematical model of a complex structure was built in the form of a system of two connected cylindrical shells. The static nonlinear behavior of a fuel reservoir combining with a protective capacity was investigated by the modified Newton-Raphson method. The analysis of the stress-

strain state of the protective capacity showed that the maximum equivalent stresses locates in the upper belt. The combination of two shells in one system affects the stress state of the fuel reservoir even under the influence of wind. So maximum stresses are observed in the reservoir near the upper fuel nozzle. A modal analysis of the complex shell system was carried out by the Lanczos algorithm. The construction eigenfrequency spectrum was found to be dense. There are regular and irregular deformations of the walls of the both protective and fuel reservoirs with a different number of half-waves along the directrix. There is one half-wave along the generators of both shells with slight deformations near the branch pipes. The spectral method for estimation of system responses (displacements, stresses and accelerations) was applied for the analysis of its stochastic behavior. The maximum responses are observed at the eigenfrequencies.

**Keywords:** probabilistic model, wind loading, wavelet analysis, spectral analysis, finite element method, reservoir.

*Лукьянченко О.А., Ворона Ю.В., Костина Е.В., Геращенко О.В.*

#### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТОПЛИВНОГО РЕЗЕРВУАРА**

Построены вероятностные модели ветровой нагрузки с учетом ограниченных метеорологических данных местности в виде квазистационарного дифференциального случайного процесса и последовательности экстремальных значений ветровой нагрузки, которая описывается двойным экспоненциальным законом распределения Гумбеля. С помощью непрерывного вейвлет-преобразования получены частотно-временные вейвлет-спектры отрезков реализаций ветра. Используются базисные неортогональные нормированные вейвлет-функции Морле (Morlet), Пауль (Paul) и Мексиканская шляпа (Mexican hat). Исследовано нелинейное поведение топливного резервуара в системе с защитной емкостью при статическом действии ветра с помощью модифицированного метода Ньютона-Рафсона. Выполнен модальный анализ системы методом Ланцоша. Применен спектральный метод оценки откликов системы в виде перемещений, напряжений и ускорений при исследовании ее стохастического поведения.

**Ключевые слова:** вероятностная модель, ветровая нагрузка, вейвлет-анализ, спектральный анализ, метод конечных элементов, резервуар.

УДК 539.3

*Лук'яченко О.О., Ворона Ю.В., Костіна О.В., Геращенко О.В.* **Аналіз впливу вітрового навантаження на стохастичну поведінку паливного резервуара** // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – Вип. 97. – С. 152-171.

*Застосовано спектральний метод дослідження стохастичної поведінки паливного резервуара в системі із захисною ємністю при дії вітрового навантаження. Побудова імовірнісних моделей навантаження виконана за допомогою вейвлет-перетворення реалізацій вітрового потоку.*

*Luk'yanchenko O.O., Vorona Yu.V., Kostina O.V., Geraschenko O.V.* **Analysis of the wind loading influence on the fuel reservoir stochastic behavior** // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2016. – Issue. 97. – P. 152-171.

*A spectral method for the analysis of stochastic behavior of the fuel tank with a protective capacity under the wind loading was applied. Probabilistic models of the loading were built using wavelet transform of wind flow realizations.*

*Лукьянченко О.А., Ворона Ю.В., Костина Е.В., Геращенко О.В.* **Анализ влияния ветровой нагрузки на стохастическое поведение топливного резервуара** // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2016. – Вип. 97. – С. 152-171.

*Применен спектральний метод дослідження стохастического поведения топливного резервуара в системе с защитной емкостью при действии ветровой нагрузки. Построение вероятностных моделей нагрузки выполнено с помощью вейвлет-преобразования реалізацій вітрового потоку.*

**Автор:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту будівельної механіки КНУБА ЛУК'ЯНЧЕНКО Ольга Олексіївна

**Адреса робоча:** 03680, Київ, Повітрофлотський пр. 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ользі Олексіївні

**Робочий тел.:** +38(044)241-54-20

**Мобільний тел.:** +38(067)931-30-27

**E-mail:** [tush\\_lu@meta.ua](mailto:tush_lu@meta.ua)

**Автор:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри будівельної механіки КНУБА ВОРОНА Юрій Володимирович

**Адреса робоча:** 03680, Київ, Повітрофлотський пр. 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ВОРОНИ Юрію Володимировичу

**Робочий тел.:** +38(044)245-48-29

**Мобільний тел.:** +38(050)750-13-61

**E-mail:** [yuvv@ukr.net](mailto:yuvv@ukr.net)

**Автор:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри будівельної механіки КОСТИНА Олена Володимирівна

**Адреса робоча:** 03680, Київ, Повітрофлотський пр. 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, КОСТИНІЙ Олені Володимирівні

**Робочий тел.:** +38(044)241-54-20

**Мобільний тел.:** +38(098)275-19-93

**E-mail:** [kl0867@meta.ua](mailto:kl0867@meta.ua)

**Автор:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА ГЕРАЩЕНКО Олег Валерійович

**Адреса робоча:** 03680, Київ, Повітрофлотський пр. 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ГЕРАЩЕНКУ Олегу Валерійовичу

**Робочий тел.:** +38(044)241-54-20

**Мобільний тел.:** +38(095)661-6052

**E-mail:** – [olg\\_guera@ukr.net](mailto:olg_guera@ukr.net)