

## ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМІЧНОГО ЗУСИЛЛЯ НАТЯГУ ВЕРХНЬОГО КІНЦЯ ВОДОВІДДІЛЬНОЇ КОЛОНИ ТА ВПЛИВУ НА НЬОГО ПАРАМЕТРІВ БУРОВОЇ СИСТЕМИ

О.О. Слабий

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,  
e-mail: burewisnyk@gmail.com

Зміна натягу верхнього кінця водовіддільної колони є істотним фактором, що впливає на динаміку її роботи. Тому вивчення амплітудно-частотних характеристик динамічного зусилля натягу і впливу на них основних параметрів натяжної системи є важливим для розуміння роботи водовіддільної колони.

В даній статті проаналізовано залежності між амплітудно-частотними характеристиками динамічного зусилля натягу верхнього кінця водовіддільної колони і вертикальною хитавицею бурового судна за умови забезпечення натягу натяжною системою водовіддільної колони канатного типу. Проведено аналіз зміни величини даного співвідношення відносно об'єму газового резервуару, сили тертя в гідроциліндрах і вивчено вплив на нього бортової, кільової, поздовжньої і поперечної хитавиці бурового судна. Отримані результати показують нелінійний вплив на АЧХ параметрів системи, а зміна параметрів натяжної системи призводить до впливу лише на окремих проміжках частот.

Ключові слова: натяжна система водовіддільної колони, динамічне зусилля натягу, бурове судно.

Изменение натяжения верхнего конца водоотделяющей колонны является существенным фактором, влияющим на динамику ее работы. Поэтому изучение амплитудно-частотных характеристик динамического усилия натяжения и влияния на них основных параметров натяжной системы является важным для понимания работы водоотделяющей колонны.

В данной статье проанализированы зависимости между амплитудно-частотными характеристиками динамического усилия натяжения верхнего конца водоотделяющей колонны и вертикальной качкой бурового судна при условии обеспечения натяжения натяжной системой водоотделяющей колонны канатного типа. Проведен анализ изменения величины данного соотношения относительно объема газового резервуара, силы трения в гидроцилиндрах и изучено влияние на него бортовой, килевой, продольной и поперечной качки бурового судна. Полученные результаты показывают нелинейный влияние на АЧХ параметров системы, а изменение параметров натяжной системы приводит к воздействию лишь на отдельных промежутках частот.

Ключевые слова: натяжная система водоотделяющей колонны, динамическое усилие натяжения, буровое судно.

Changing the tension of the upper end of the drilling riser is an important factor that influences the dynamics of its operation. Therefore, the study of amplitude and frequency characteristics of dynamic tension force and tension system parameters influence on them is important for our understanding of the drilling riser operation.

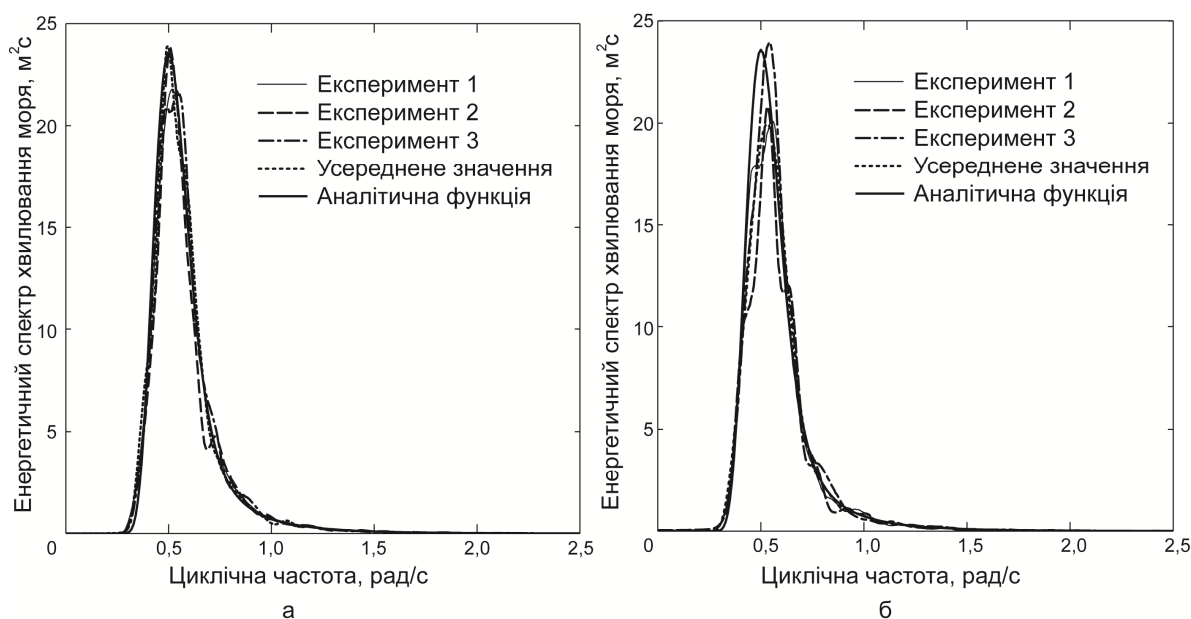
This article examines the dependences between the amplitude and frequency characteristics of dynamic tension force of the drilling riser upper end and drilling vessel heave if the wire drilling riser tension system makes tension. The analysis of change in the value of this ratio with respect to the volume of the gas tank and friction force in the hydraulic cylinders was conducted and the influence of pitch, roll, sway, and surge heave of the drilling vessel was studied. The obtained results suggest a non-linear effect on the amplitude and frequency characteristics of the system parameters and the tension system parameters change leads to an impact only on individual intervals of frequencies.

Key words: drilling riser tension system, dynamic tension force, drilling vessel

### Вступ

В процесі буріння свердловин на морі для захисту бурильної колони від негативного впливу навколишнього середовища і направлення її в свердловину використовують водовіддільну колону (ВК). Для забезпечення нормальної роботи якої і запобіганню виникнення в її перерізах критичних зусиль викликаних хитавицею ПБУ використовується складна система кріплення верхнього кінця ВК до палуби ПБУ, що побудована на принципі забезпечення сталого зусилля натягу. Основними елементами цієї системи є натяжна система водовіддільної колони (НСВК), телескопічна секція і сферичний шарнір. Однак НСВК, що працює за прин-

ципом гідропневматичної подушки через обмежений об'єм газового резервуару і наявність в системі сил тертя не в змозі забезпечити стає зусилля натягу, що спричиняє додаткові збурення в роботі ВК. Хоча в переважній більшості досліджень з вивчення динаміки роботи ВК вважають, що зусилля натягу верхнього кінця є сталим [1, 2, 3, 4, 5], або приймають, що амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) переміщення верхнього кінця ВК лінійно залежить від вертикальної хитавиці ПБУ [6, 7], однак такі припущення недостатньо враховують конструктивні особливості НСВК, особливо при нерегулярному хвилюванні моря. Тому вивчення АЧХ динамічного зусилля натягу ВК, впливу



а)  $\delta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 3.3$ ,  $\omega_p = 0.5$ , б)  $\delta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 3.3$ ,  $\omega_p = 0.7$

**Рисунок 1 – Порівняння отриманих спектральних щільностей хвилюванням моря із аналітичними**

на них основних параметрів НСВК і порівняння їх із АЧХ вертикальної хитавиці ПБУ, яка є основним фактором, що викликає збурення, дозволить краще зрозуміти процеси, що проходять в НСВК і уточнити існуючі моделі ВК в умовах нерегулярного хвилювання моря.

**Мета дослідження**

Метою дослідження є аналіз залежності між АЧХ вертикальної хитавиці ПБУ і динамічним зусиллям натягу ВК натяжною системою канатного типу та оцінка впливу на неї основних параметрів системи.

**Методика дослідження**

Методом досліджень вибрано чисельний експеримент, виконаний на основі розробленої нами математичної моделі НПВК канатного типу, що складається з восьми натяжних пристроїв, побудованої на платформі математичного моделювання SystemModeler. Опис моделі якого подано в роботі [8]. Задача розв'язувалась чисельним методом за допомогою програмного модуля DASSL з наступними параметрами: досліджуваний проміжок 0-1000 с; крок ітерації 0,01 с; точність числового розв'язку  $1 \cdot 10^{-6}$ . Для уникнення помилок, викликаних випадковим вибором частот і кутів фаз зсуву при моделюванні хвилювання моря, для кожного набору даних проводилось три експерименти з іншими випадковими величинами.

При моделюванні вивчався вплив на зміну динамічного зусилля натягу ВК таких параметрів, як об'єм газового резервуару високого тиску ( $V$ ), курсовий кут бурового судна ( $\delta$ ), енергетичний спектр хвилювання моря і величина сили тертя в гідроциліндрі. Море моделювалось енергетичним спектром JONSWAP з різними

вхідними параметрами – піковою частотою  $\omega_p$  і коефіцієнтом загострення спектру  $\gamma$ . Об'єм газового резервуару брався рівним 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 і 96 м<sup>3</sup>, а сила тертя в гідроциліндрі бралась з коефіцієнтами 0; 0,25; 0,5; 0,75 і 1, від номінальної. АЧХ параметрів системи отримували шляхом використання методу швидкого перетворення Фур'є до результатів розв'язку математичної моделі. Після цього знаходили спектральну щільність параметрів за наступною формулою:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} |X(\omega)|^2, \quad (1)$$

де  $S_{\eta\eta}(\omega)$  – енергетична спектральна щільність;

$X(\omega)$  – результат швидкого перетворення

Фур'є функції  $x(\omega)$ ;

$\omega$  – циклічна частота.

У зв'язку з тим, що отримані графіки розподілу спектральної щільності є порізаними, проведено їхнє згладжування шляхом застосування вікна Хаміннга з параметром  $N = 20$ . Для оцінки точності методу результати згладжування порівнювались з аналітичним спектром. Результати цього порівняння для деяких експериментів зображено на рис. 1. Як бачимо вони дають добру збіжність. Математична викладка процедури згладжування наступна:

$$S_{ii}^*(\omega) = \text{ifft}(\text{fft}(S_{ii}(\omega)) \cdot \text{fft}(W(N))), \quad (2)$$

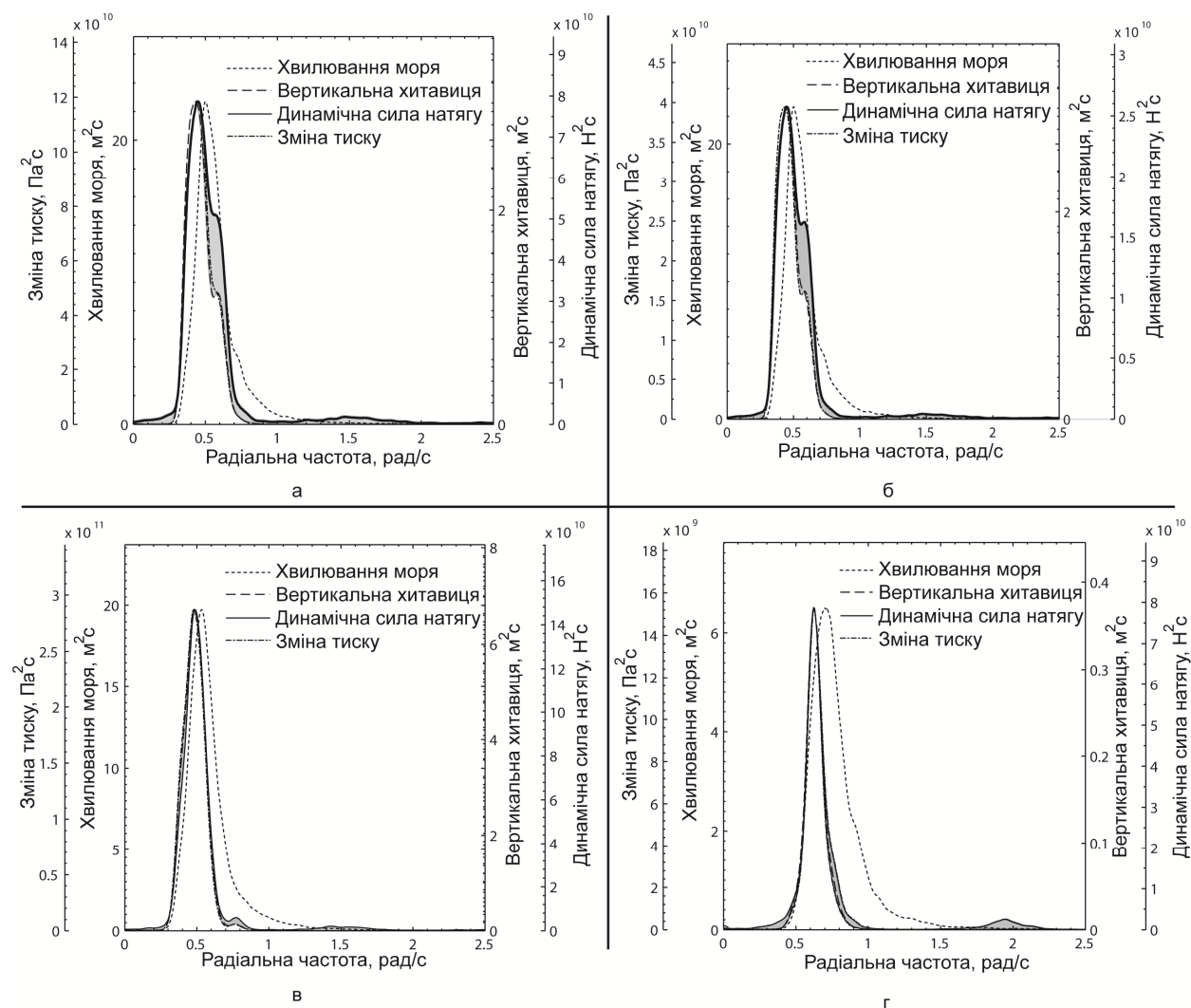
де  $\text{ifft}$  – зворотне перетворення Фур'є;

$\text{fft}$  – швидке перетворення Фур'є;

$W$  – вікно Хаміннга;

$S_{ii}(\omega)$  – не згладжена функція;

$S_{ii}^*(\omega)$  – згладжена функція.



а)  $\delta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 3.3$ ,  $\omega_p = 0.5$ ,  $V = 72\text{м}^3$ ; б)  $\delta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 3.3$ ,  $\omega_p = 0.5$ ,  $V = 96\text{м}^3$ ;  
 в)  $\delta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 3.3$ ,  $\omega_p = 0.5$ ,  $V = 48\text{м}^3$ ; г)  $\delta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 5.0$ ,  $\omega_p = 0.7$ ,  $V = 48\text{м}^3$

**Рисунок 2 – Порівняння спектральних щільностей розподілу енергії хвилювання моря, вертикальної хитавиці ПБУ, динамічного зусилля затиску і зміни тиску в газовому резервуарі за різних параметрів моделі (а, б), сила тертя рівна половині від нормальної (в, г)**

**Аналіз отриманих результатів**

При порівнянні спектральних щільностей вертикальної хитавиці ПБУ і динамічного зусилля натягу ВК (рис. 2), зауважимо, що існують три проміжки частот, де графік спектральної щільності динамічного зусилля натягу має виражене відхилення від графіку спектральної щільності вертикальної хитавиці (ділянки затемнені сірим фоном). Із цього можна зробити висновок, що співвідношення між спектральними щільностями має нелінійний характер, для дослідження якого використаємо оператор амплітудної характеристики (ОАХ), який визначається формулою:

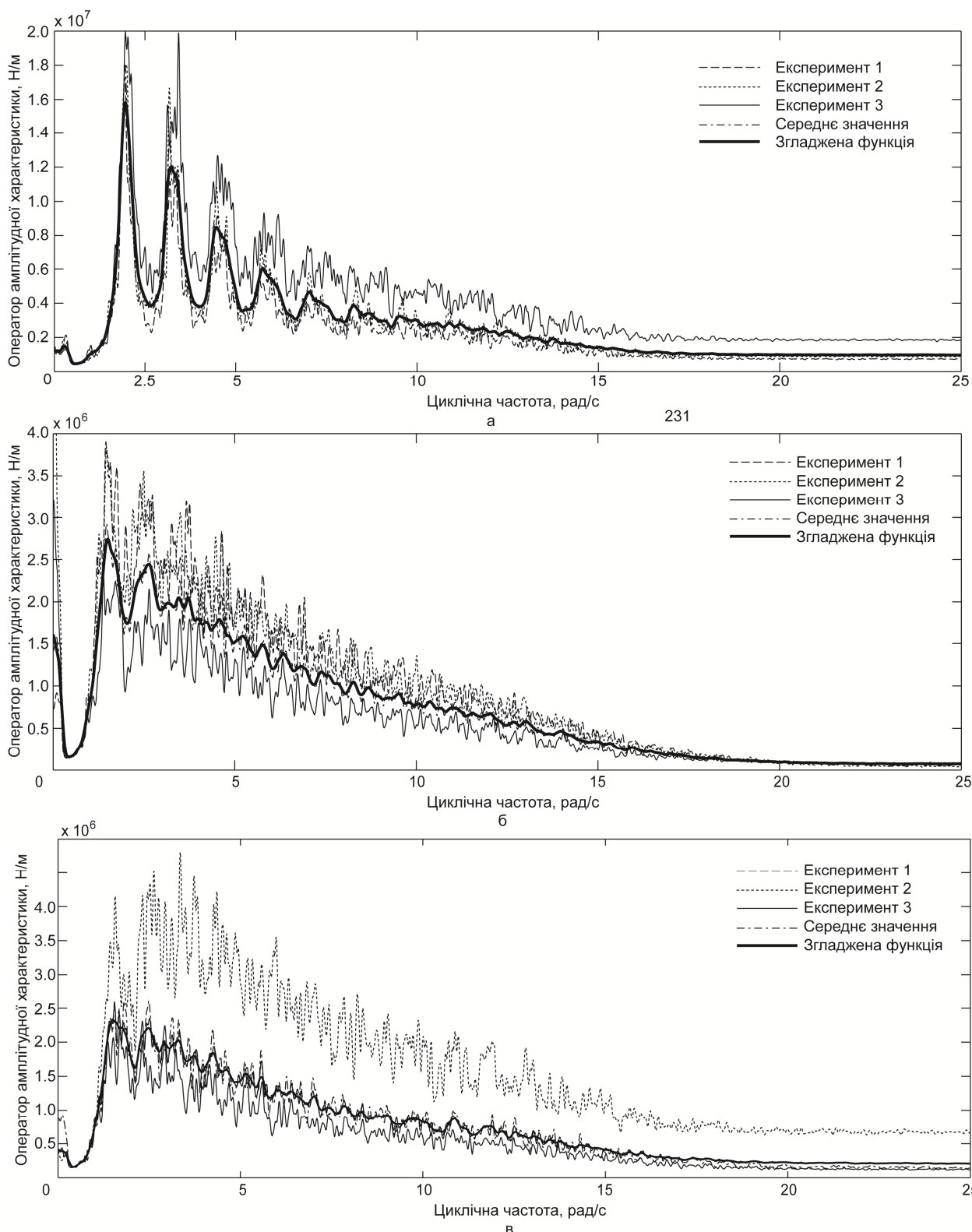
$$H_{zt}(\omega) = \sqrt{\frac{S_u(\omega)}{S_{\eta z}(\omega)}} \quad (3)$$

де  $H_{zt}(\omega)$  – ОАХ;

$S_u(\omega)$  – спектральна щільність динамічного зусилля натягу;

$S_{\eta z}(\omega)$  – спектральна щільність вертикальної хитавиці ПБУ.

Деякі з розрахованих ОАХ подано на рис. 3. За отриманими графіками можна зробити висновок, що визначені функції ОАХ є однотипними, мають екстремуми в однакових діапазонах частот, величина яких залежить від параметрів системи. Мінімальні значення ОАХ спостерігаються на низьких несучих частотах вертикальної хитавиці ПБУ з подальшим ростом при збільшенні несучої частоти. На графіках ОАХ виділяються максимальні екстремуми в околі частот рівних  $3\omega_p$  і  $5\omega_p$ . На нашу думку поява таких екстремумів спричинена наявністю в конструкції НПВК поліспасти і різницею між статичним і динамічним тертям, що виникає в гідроциліндрі. Вплив таких параметрів системи, як сили тертя в гідроциліндрі, об'єм газового резервуару і спектр хвилювання моря, на величину ОАХ є нерівномірним, тому вивчення



**Рисунок 3 – Графіки оператора амплітудної характеристики, розраховані за результатами експериментів**

цього впливу проводитимемо шляхом досліджень функції співвідношення між двома ОАХ, що визначається формулою:

$$f_n(\omega) = \frac{H_{ji}(\omega)}{H_{jb}(\omega)}, \quad (4)$$

де  $f_n(\omega)$  – функція співвідношення двох ОАХ;  
 $H_{ji}(\omega)$  – ОАХ, розраховане для експерименту зі зміненими параметрами системи;  
 $H_{jb}(\omega)$  – ОАХ, розраховане для експерименту з базовими параметрами.

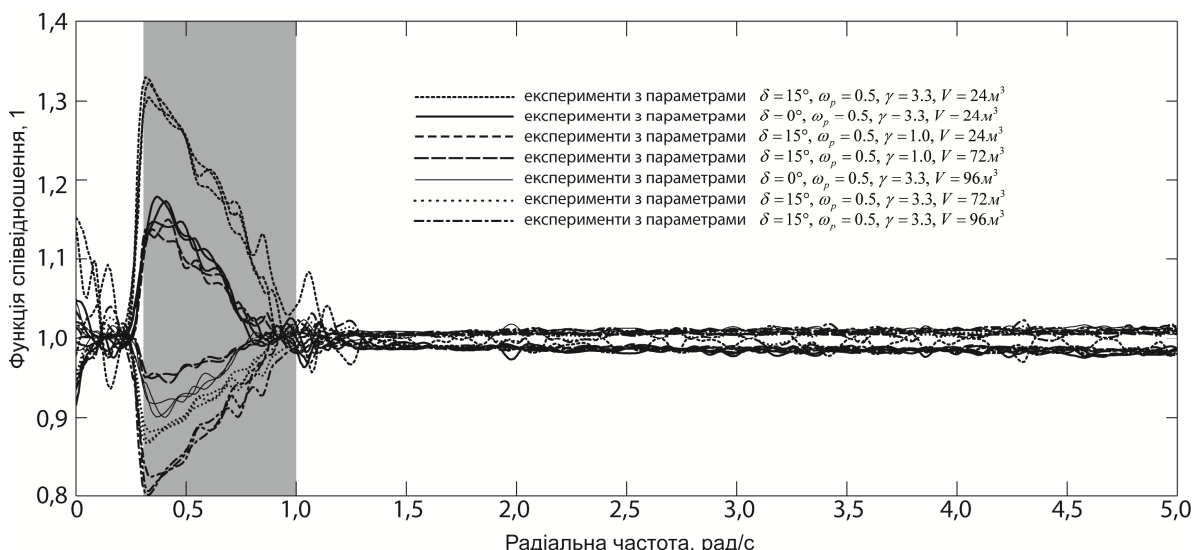


Рисунок 4 – Залежність між операторами амплітудної характеристики за різних об’ємів газового резервуара (сірим фоном виділено діапазон несучих частот вертикальної хитавиці)

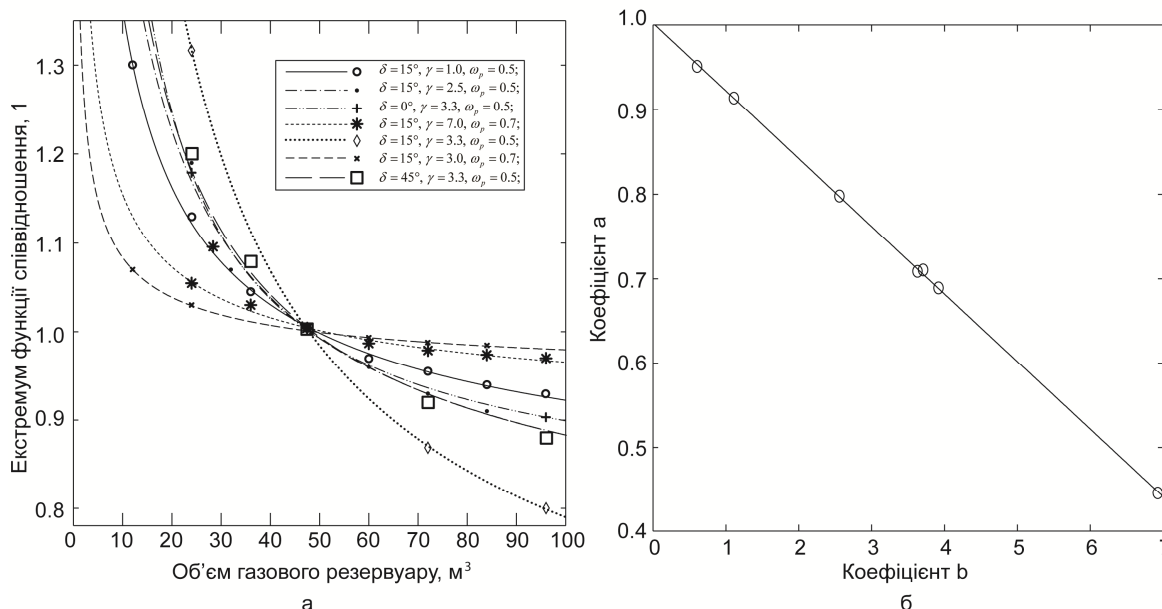


Рисунок 5 – Залежність максимального значення співвідношення між ОАХ від зміни об’єму газового резервуара

**Вплив об’єму газового резервуару**

Вивчення впливу об’єму газового резервуару відбувалось шляхом аналізу функцій співвідношення розрахованих відносно ОАХ за базового об’єму НСВК – 48 м<sup>3</sup>. Отримані функції співвідношення показано на рис. 4. Вони мають нелінійний характер і показують, що основний вплив зміна об’єму газового резервуару на ОАХ чинить в діапазоні низьких несучих частот вертикальної хитавиці ПБУ. Співвідношення між ОАХ поза діапазоном несучих частот вертикальної хитавиці приблизно рівне одиниці, тому впливом об’єму газового резервуару на ОАХ в даних діапазонах частот можна знехтувати.

Аналіз відношення між значеннями екстремумів функції  $f_n(\omega)$  і зміною об’єму газового резервуару (рис. 5, а) свідчить, що він має

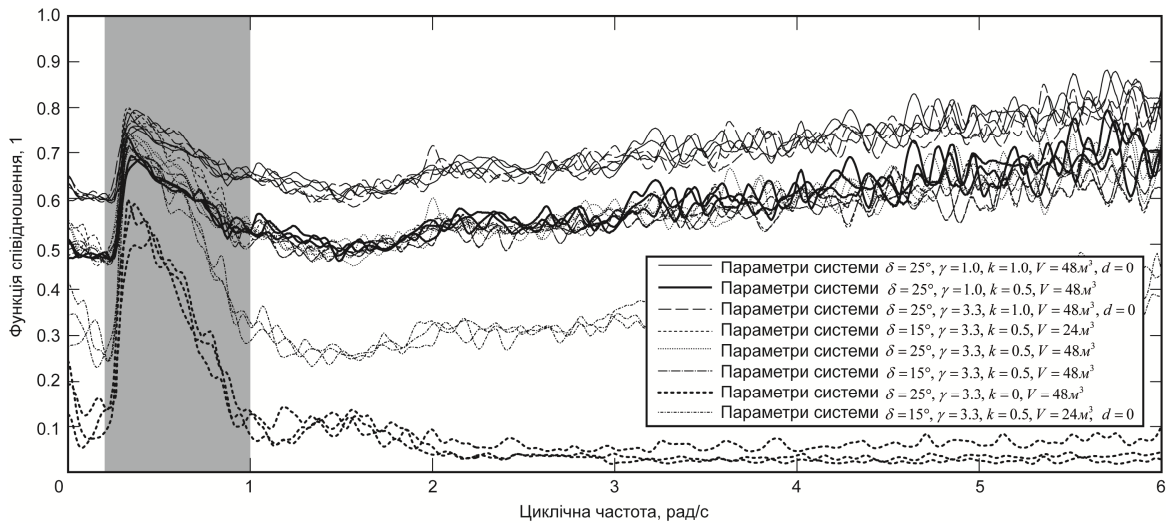
нелінійний характер і добре апроксимуються наступною функцією:

$$y(V) = \frac{b}{\frac{1}{V^{\gamma_g}}} + a, \quad (5)$$

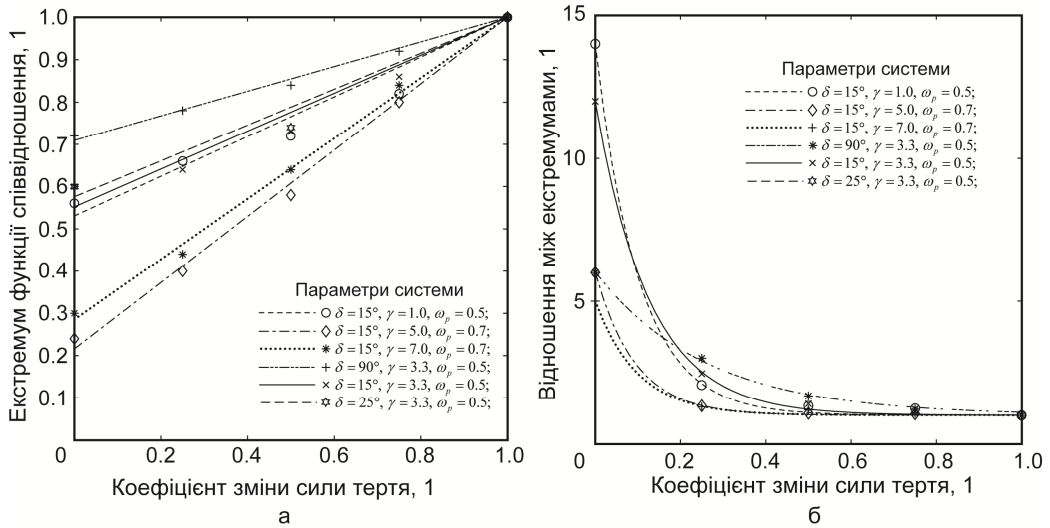
де  $y(V)$  – апроксимуюча функція;  
 $\gamma_g$  – показник адиабати робочого газу за даного тиску;  
 $a$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимації.

Аналіз відношення між коефіцієнтами апроксимації (рис. 5, б) вказує на виражену лінійну залежність між ними, причому при зменшенні  $\omega_p$  і збільшенні  $\gamma$  спостерігається ріст коефіцієнта  $b$  і зменшення коефіцієнта  $a$ . З отриманих результатів можна зробити висновок, що вплив на динамічне зусилля натягу ВК





**Рисунок 6 – Залежність між операторами амплітудної характеристики за різних значень сили тертя в гідроциліндрах (сірим фоном виділено діапазон несучих частот вертикальної хитавиці)**



*а) зміна максимального екстремуму відносно коефіцієнта  $k$ ; б) зміна співвідношення між максимальним і мінімальним значенням функції відносно коефіцієнту  $k$*

**Рисунок 7 – Залежності величини екстремумів функції співвідношення від коефіцієнта сили тертя**

об'єму газового резервуара спостерігається виключно в діапазоні несучих частот вертикальної хитавиці, величина якого залежить від об'єму газового резервуара, показника адиабати робочого газу і параметрів хитавиці ПБУ.

**Вивчення впливу сили тертя на ОАХ**

В досліджуваній системі сила тертя в гідроциліндрі складається із чотирьох складових: тертя Кулона, тертя Стрібека (ефекти прилипання), в'язкого тертя і додаткового тертя, викликаного деформацією ущільнення внаслідок різниці тиску в робочих камерах. Вплив тертя на ОАХ вивчався шляхом аналізу функцій співвідношення, розрахованих за формулою (4), для систем, в яких величина тертя змінювалась на коефіцієнт  $k$  відносно номінальної або система досліджувалась за відсутності певного виду тертя. Окремі функції співвідношення зображено на рис. 6.

За графіками слід зазначити, що зміна сили тертя в гідроциліндрі здійснює вплив на ОАХ на всьому діапазоні досліджуваних частот, однак найбільший вплив спостерігається поза діапазоном несучих частот вертикальної хитавиці, величина якого приблизно рівна коефіцієнту  $k$ . На графіках спостерігається екстремум в зоні низьких несучих частот вертикальної хитавиці, який залежить від значень функції спектральної щільності вертикальної хитавиці. Окрім цього спостерігаються локальні екстремуми в околі частот  $3\omega_p$  і  $5\omega_p$ , величина яких збільшується зі зменшенням амплітуди пікової частоти вертикальної хитавиці. Цей фактор і аналіз графіка спектральної щільності динамічного зусилля натягу за відсутності зусилля тертя в гідроциліндрі вказує на те, що сили тертя є основним чинником, який викликає локальні екстремуми в околі частот  $3\omega_p$  і  $5\omega_p$  функції

спектральної щільності динамічного зусилля натягу ВК.

Аналіз зміни відношення між максимальним екстремумом функції в зоні низьких несучих частот вертикальної хитавиці і її мінімальним значенням відносно коефіцієнту  $k$  свідчить, що вона має нелінійний характер, а отримані експериментальні дані добре апроксимуються кривою:

$$f(k) = a \cdot \exp(-bk) + 1, \quad (6)$$

де  $f(k)$  – апроксимуюча функція;

$a$  і  $b$  коефіцієнти апроксимації. Величина коефіцієнтів апроксимації залежить від пікової частоти і висоти амплітуди на даній частоті і зменшуються при зменшенні даних величин.

Дослідження впливу окремих сил тертя на ОАХ свідчить, що жодна із них не чинить особливого впливу на окремих діапазонах частот, а спостерігається вплив аналогічний впливу від зменшення загальної сили тертя на середню величину сили тертя, якою нехтували.

#### Аналіз впливу бортової, кільової, по- вздожньої і поперечної хитавиці на ОАХ

Вивчення впливу проводилось шляхом аналізу функції співвідношення розрахованої за формулою (4) між двома експериментами: перший коли на ПБУ діяло п'ять видів хитавиці і другий коли діяла тільки вертикальна хитавиця. Із отриманих результатів можна сказати, що вплив чотирьох видів хитавиці на ОАХ спостерігається в усьому діапазоні частот, є хаотичним і не має виражених діапазонів частот, де спостерігаються екстремуми. Величина максимальної зміни ОАХ може складати до 12%, що вказує на достатній вплив хитавиць ПБУ, відмінних від вертикальної, на динамічне зусилля натягу ВК.

#### Висновки

В результаті проведеного аналізу АЧХ динамічного зусилля натягу ВК при нерегулярному хвилюванні моря і впливу на них основних параметрів НСВК отримано наступні результати:

– виявлено, що АЧХ динамічного зусилля натягу ВК найкраще корелюються із АЧХ вертикальної хитавиці ПБУ, однак вони мають свої особливості. Так на АЧХ динамічного зусилля натягу спостерігаються додаткові локальні екстремуми в околі частот  $3\omega_p$  і  $5\omega_p$ , що спричинені силою тертя в гідроциліндрах НСВК, а співвідношення між АЧХ динамічного зусилля натягу ВК і вертикальної хитавиці має нелінійний характер, мінімум якого спостерігається в околі низьких несучих частот вертикальної хитавиці;

– вплив зміни об'єму газового резервуара на АЧХ динамічного зусилля натягу має нелінійний характер, спостерігається в зоні несучих частот вертикальної хитавиці і досягає екстремуму в околі низьких частот. Виявлено нелінійну залежність величини екстремуму відносно об'єму газового резервуару, коефіцієнту адіабати робочого газу і АЧХ вертикальної хитавиці;

– аналіз впливу сили тертя в гідроциліндрі на динамічне зусилля натягу ВК свідчить, що зміна сили тертя впливає на АЧХ на всьому діапазоні частот, а найбільший вплив спостерігається поза діапазоном несучих частот вертикальної хитавиці. Визначено, що локальні екстремуми в околі частот  $3\omega_p$  і  $5\omega_p$ , на графіках спектральної щільності динамічного зусилля натягу з'являються під впливом сили тертя в гідроциліндрі;

– вплив бортової, кільової, по-  
вздожньої і поперечної хитавиці на ОАХ може складати до 12%, тому нехтувати ним при розрахунках не варто.

#### Література

- 1 Athisakul C., Huang T., Chucheeepsakul S. Large strain static analysis of marine risers via a variational approach // The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference. – Kitakyushu, Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002. – С. 164-170.
- 2 Rizwan K. A., Kaur, Singh S. P., Suhail A. Nonlinear Dynamics Analysis of Marine Risers under Random Loads for Deepwater Fields in Indian Offshore // The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering. Elsevier, 2011. – pp. 1334-1342.
- 3 Morooka C.K., Coelho F.M., Shiguemoto D.A., Francis R., Matt C. G. C. Dynamic behavior of a top tensioned riser in frequency and time domain The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006.
- 4 Otteren A. A mathematical model for dynamic analysis of a flexible marine riser connected to a floating vessel // Modelling, identification and control. – 1982. – Т. 3, № 4. – pp. 187-209.
- 5 Sexton R. M., Agbezuge L. K. Random Wave and Vessel Motion Effects on Drilling Riser Dynamics // Offshore Technology Conference. – Houston, Texas, 1976.
- 6 Tikhonov V. S., Safronov A. I. Effect of fluid column dynamics on longitudinal vibrations of an ultra deepwater riser covered by an orifice plug // Ocean Engineering. – 2002. – Т. 29, № 1. – pp. 99-112.
- 7 Tikhonov V.S., Safronov A.I., Gelfgat M.Y., Grebtsov N. N., Podrazhansky A. M. Selection of parameters and bending vibrations of deepwater drilling aluminium riser in random waves – 1998.
- 8 Слабий О. О. Дослідження динамічної складової натягу водовіддільної колони за нерегулярної хитавиці бурового судна // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 1(50). – С. 119-131.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
16.04.14

Рекомендована до друку  
професором **Векериком В.І.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Никифорчиним О.М.**  
(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)