УДК 622.242.4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВОДОВІДДІЛЬНОЇ КОЛОНИ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМУ ХВИЛЮВАННІ МОРЯ

О. О. Слабий

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15;
e-mail: burewisnyk@gmail.com

В роботі описано математичну модельпоперечних коливань водовіддільної колони при нерегулярному хвилюванні моря з урахуванням непостійної величини натягу верхнього кінця водовіддільної колони натяжною системою. На основі отриманої математичної моделі створено імітаційну модель в мові мультифізичного моделювання Modelica. За результатами імітаційних експериментів проведено аналіз напружено-деформованого стану водовіддільної колони при різних величинах значущої висоти хвилювання моря.

Ключові слова: *водовіддільна колона, поперечні коливання, імітаційна модель, Modelica, нерегулярне хвилювання моря.*

Вступ

На сьогоднішній день більшість досліджень динаміки роботи водовіддільної колони проводять шляхом вивчення її теоретичних моделей, що зумовлено значною вартістю натурних експериментів і обмеженням властивим дослідженням на масштабованих моделях. При побудові математичних моделей водовіддільну колону зазвичай представляють секційним пустотілим натягнутим стрижнем круглого перерізу, який описують згідно теорії балок Ейлера-Бернуллі [1-4]. Складність розв'язку отриманих моделей полягає у потребі врахування гідродинамічних сил, викликаних омиванням водовіддільної колони потоком морської води, які мають виражені нелінійні властивості. Більшість дослідників вдавались до дослідження динаміки роботи водовіддільної колони з постійним у часі зусиллям натягу колони при регулярному хвилюванні моря з подальшою лінеаризацією нелінійних членів у математичнійї моделі. Такий підхід дозволяє в першому приближенні визначити критичні перерізи водовіддільної колони, однак не дає можливості вивчати динаміку роботи водовіддільної колони в реальних умовах роботи, а також оцінити вплив на динаміку роботи колони натяжної системи.

Враховуючи вищесказане дослідження динаміки роботи водовіддільної колони при нерегулярному хвилюванні моря з урахуванням

особливостей її кріплення до плавучої бурової установки дозволить краще зрозуміти процеси, що проходять в ній.

Механічна модель досліджуваного об'єкту

За об'єкт дослідження обрано водовіддільну колону, що використовується при бурінні свердловини в умовах моря глибиною d, розрахункова схема якої подана на рис. 1а. Вона представляє собою нарощений із секцій пустотілий стрижень круглого січення з постійними параметрами по довжині, по якому протікає промивальна рідина густини ρ_f, із сталою швидкістю v_f. Нижній кінець водовіддільної колони шарнірно закріплено над гирлом свердловини в точці A, а верхній E утримується плавучою буровою установкою за допомогою натяжної системи водовіддільної колони, яку представляємо у вигляді приведеного пружного і фрикційного елементу, що з'єднані з верхнім кінцем водовіддільної колони E через сферичний шарнір, які покликані охарактеризувати основні процеси, що протікають в натяжні системі – політропне стискування газу і наявне тертя в гідроциліндрах і гідропневматичних акумуляторах. Водовіддільну колону характеризуємо довжиною L, зовнішнім D_e і внутрішнім D_i діаметрами, площею A_R поперечного січення, масою ρ_R одиниці довжини колони, модулем Юнга E_R і моментом інерції її перерізу I_R.

В процесі роботи під дією зовнішніх гідродинамічних сил плавуча бурова установка зміщується із точки D, яка є проекцією гирла свердловини на поверхню спокійного моря, в деяку точку F, відстань між якими задаємо у вигляді хитавиць плавучої бурової установки: поздовжньої – $\xi_x(t)$ і вертикальної – $\xi_z(t)$. В процесі роботи з боку моря на водовіддільну колону діє змінне гідродинамічне навантаження, що спричинює її поперечну деформацію, величину якої описуємо функцією $w(z_1,t)$. Морське середовище представляємо, як сумарну дію стаціонарної морської течії, що задається у вигляді кусково-лінійного градієнту швидкості потоку рідини $V_C(z_2)$ і нерегулярного вітрового хвилювання моря, яке моделюємо розкладаючи енергетичний спектр хвилювання моря JONSWAP і описуємо функцією $V_w(z_2,t)$.

Для зручності побудови математичної моделі задаємося двома системами координат:

- x_1z_1 – пов'язаної із гирлом свердловини A, відносно якої проводимо побудову математичної моделі водовіддільної колони;
- x_2z_2 – пов'язаної із точкою D, що є проекцією гирла свердловини на поверхню спокійного моря. В даній системі описується хвилювання моря і визначається швидкість і пришвидшення точок потоку рідини, що омиває водовіддільну колону.

Перехід між системами координат наступний:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ z_1 + d \end{bmatrix}. \quad (1)$$

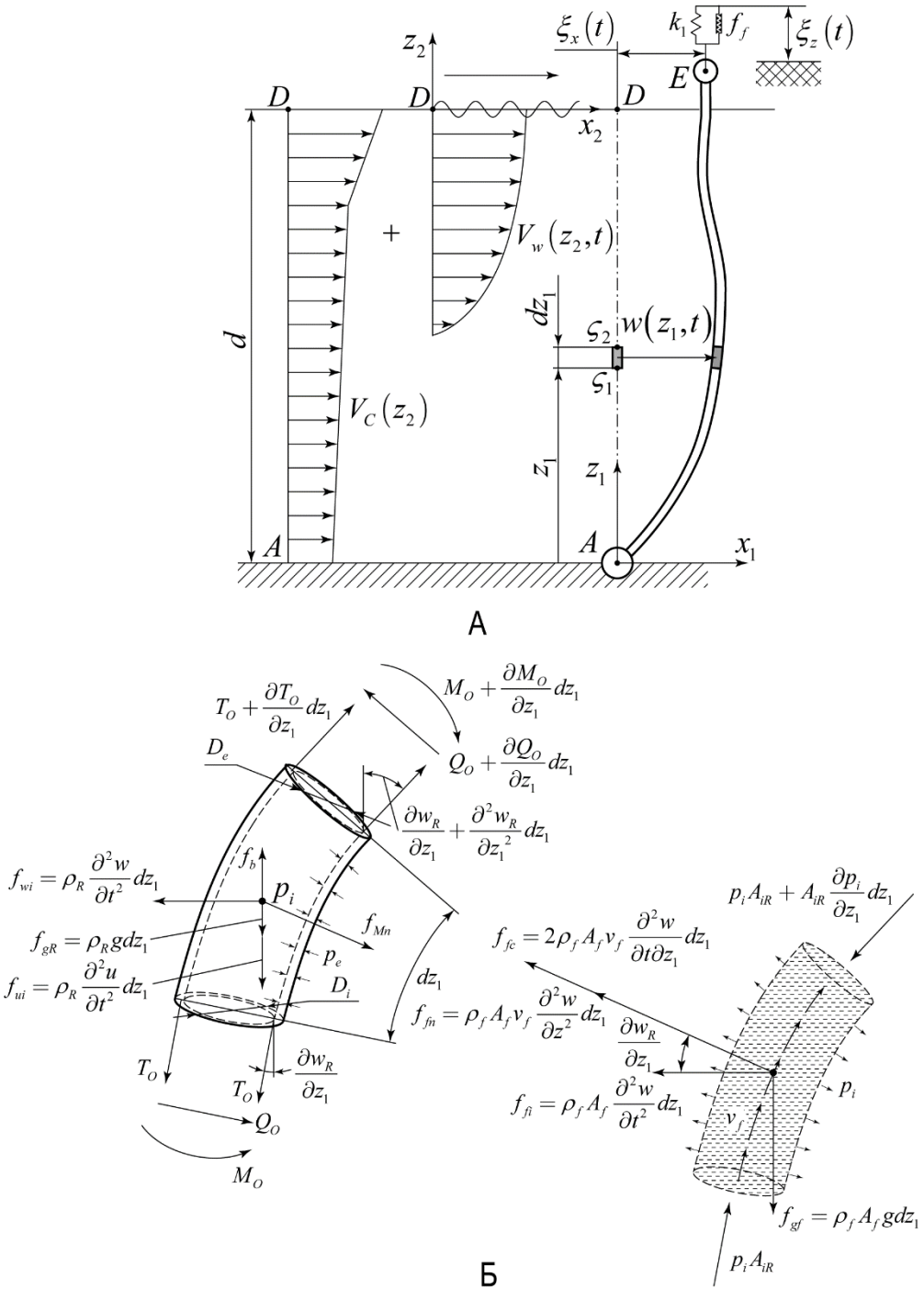


Рис. 1. Розрахункова схема досліджуваного об’єкту

Математична модель поперечних коливань водовіддільної колони

Для отримання математичної моделі водовіддільної колони виділимо елемент довжини dz_1 приклавши до нього наступні внутрішні сили: осьове зусилля натягу T_O, поперечне згинаюче зусилля Q_O і згинаючий момент M_O, а також активні та інерційні сили, що діють на нього в процесі роботи: силу ваги елементу колони f_{gR}, гідродинамічне зусилля з боку моря f_M, інерційне зусилля від поперечного переміщення елементу водовіддільної колони f_{iR} і інерційні сили від переносного f_{if}, доцентрового f_{in} і Коріолісового f_{ic} пришвидшення промивальної рідини, що протікає в елементі водовіддільної колони. Застосувавши принцип Д'аламбера, теорію ефективного натягу [5], приймаючи, що $\sin\frac{\partial w}{\partial z_1}\cong\frac{\partial w}{\partial z_1}$ і $\cos\frac{\partial w}{\partial z_1}\cong 1$, і здійснивши перехід $dz_1\to 0$ отримаємо наступне рівняння поперечних коливань водовіддільної колони:

$$-E_R I_R\frac{\partial^4 w}{\partial z_1^4}-\rho_R\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\frac{\partial T_O}{\partial z_1}\frac{\partial w}{\partial z_1}+T_O\frac{\partial^2 w}{\partial z_1^2}-\rho_f A_i\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+v_f\frac{\partial^2 w}{\partial z_1^2}+2v_f\frac{\partial^2 w}{\partial z\partial t}\right)+f_M=0, \quad (2)$$

де f_M – гідродинамічна сила, що характеризує омивання колони і визначається згідно рівняння Морісона:

$$f_M=C_M\frac{\rho_w\pi {D_{ei}}^2}{4}\frac{\partial w_w}{\partial t}-C_A\frac{\rho_w g\pi {D_e}^2}{4}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+C_D\frac{\rho_w D_{ed}}{2}\left(w_w\right)\left|w_w\right|, \quad (3)$$

де D_{ei}, D_{ed} – приведений діаметр інерції і опору водовіддільної колони; C_M – коефіцієнт інерції; C_D –коефіцієнт опору; C_A – коефіцієнт приєднаної маси води; w_w – горизонтальна складова швидкості потоку рідини що омиває водовіддільну колону, яка визначається шляхом розкладання енергетичного спектру хвилювання моря:

$$\begin{aligned}
&S_\eta(\omega)=\frac{ag^2}{\omega^5}\exp\left(-\beta\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)\right)\gamma^a;\\
&\mu(t)=\sum_{n=1}^{400}\zeta_n\sin(\omega_n t+\varepsilon_n),\ \varepsilon_n\in\{0...2\pi\},\ \Delta\omega=\frac{5\omega_p}{400};\\
&\omega_n\in\{\Delta\omega(n-1)..\Delta\omega\cdot n\},\ k_n=\frac{\omega_n^2}{g},\ \zeta_n=\sqrt{2\cdot S_{\zeta\zeta}(\omega_n)\Delta\omega}; \quad (4)\\
&w_w(z_2,t)=v_C(z_2)+\sum_{n=1}^{400}\zeta_n\omega_n\exp(k_n z_2)\cos(\omega_n t+\varepsilon_n);\\
&\frac{\partial w_w(z_2,t)}{\partial t}=\sum_{n=1}^{400}\zeta_n\omega_n^2\exp(k_n z_2)\sin(\omega_n t+\varepsilon_n),
\end{aligned}$$

де $S_\eta(\omega)$ – енергетичний спектр; ω_p – пікова частота спектру; γ – коефіцієнт підсилення піку; $\mu(t)$ – стан поверхні моря; k – хвильове число; $w_w(z_2,t)$ – горизонтальна складова швидкості потоку рідини; $v_C(z_2)$ – градієнт швидкості морської течії.

Величина сили натягу колони визначаємо з умови спрощеної моделі поздовжніх коливань водовіддільної колони з урахуванням теорії ефективного натягу [5]:

$$E_R A_R \frac{\partial^2 u}{\partial z_1^{\,2}} - \rho_R \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \eta_i \frac{\partial u}{\partial t} - \rho_R k_A g + \frac{\partial}{\partial z_1}\left(p_e \frac{\pi D_e^{\,2}}{4} - p_i \frac{\pi D_i^{\,2}}{4} \right) = 0;$$
$$T_O(z_1) = E_R A_R \frac{\partial u}{\partial z_1}, \tag{5}$$

де k_A – коефіцієнт компенсування ваги колони поплавками; η_i – коефіцієнт в'язкого тертя; p_e і p_i – зовнішній і внутрішній тиск, що діє на колону з боку моря і промивальної рідини, що обчислюється за наступними формулами:

$$p_e = \rho_w (d - z_1) g;$$
$$p_i = \rho_f (d - z_1) g.$$

Для розв'язку системи накладемо на неї наступні граничні умови:

- секції водовіддільної колони поєднуються між собою згідно наступних правил:

$$u_i\big|_{z_1=l_i} = u_{i+1}\big|_{z_1=l_i},\ w_i\big|_{z_1=l_i} = w_{i+1}\big|_{z_1=l_i},\ \frac{\partial w_i}{\partial z_1}\bigg|_{z_1=l_i} = \frac{\partial w_{i+1}}{\partial z_1}\bigg|_{z_1=l_i};$$
$$E_R I_R \frac{\partial^2 w_i}{\partial z_1^{\,2}}\bigg|_{z_1=l_i} + E_R I_R \frac{\partial^2 w_{i+1}}{\partial z_1^{\,2}}\bigg|_{z_1=l_i} = 0;$$
$$E_R I_R \frac{\partial^3 w_i}{\partial z_1^{\,3}}\bigg|_{z_1=l_i} + E_R I_R \frac{\partial^3 w_{i+1}}{\partial z_1^{\,3}}\bigg|_{z_1=l_i} = 0; \tag{7}$$
$$E_R A_R \frac{\partial u_i}{\partial z_1}\bigg|_{z_1=l_i} + E_R A_R \frac{\partial u_{i+1}}{\partial z_1}\bigg|_{z_1=l_i} = 0,$$

- нижній кінець водовіддільної колони закріплений за допомогою ідеального шарніру:

$$u\big|_{z_1=0} = 0,\ w\big|_{z_1=0} = 0,\ \frac{\partial^2 w}{\partial z_1^{\,2}}\bigg|_{z_1=0} = 0; \tag{8}$$

- закріплення верхнього кінця водовіддільної колони моделюємо сферичним шарніром із пружно-фрикційним елементом:

$$\left.\frac{\partial^2 w}{\partial z_1^{\,2}}\right|_{z_1=L} = 0,\ \ w\big|_{z_1=L} = \xi_x(t),\ k_1 = \frac{p_0\gamma\tilde{A}^2}{v_0};$$

$$E_R A_R \left.\frac{\partial u}{\partial z_1}\right|_{z_1=L} + k_1\delta(t) - F_{col}\,\mathrm{sgn}\left(\frac{d\delta(t)}{dt}\right); \qquad (9)$$

$$\delta(t) = \xi_z(t) + d + l_{st} - u\big|_{z_1=L};$$

де p_0 – початковий тиск в пневмосистемі натяжного пристрою; v_0 – об'єм пневмосистеми натяжного пристрою; γ – коефіцієнт політропи, $\tilde{A}$ – приведена загальна робоча площа гідроциліндрів натяжного пристрою; F_{col} – сила тертя Амона-Кулона; l_{st} – різниця висот між палубою бурової установки і рівнем спокійного моря; $\xi_j(t)$ – хитавиця бурової установки в j-ому степені вільності:

$$\xi_j(t) = \sum_{n=1}^{N} \zeta_n H_j(\omega_n)\sin(\omega_n t + \varepsilon_n),$$

де $H_j(\omega_n)$ – оператор амплітудної характеристики хитавиці для j-того степеня вільності бурової установки, який визначається виходячи із геометрії корпусу, величини курсового кута і швидкості руху плавзасобу.

Вхідні дані і результати обчислень

На основі запропонованої математичної моделі динаміки роботи водовіддільної колони створена імітаційна модель досліджуваної системи в мові багатодоменного моделювання фізичних систем Modelica, що позволяє знаходити рішення в часові області у вигляді часових рядів.

Дослідження проводилось для водовіддільної колони діаметром 22 дюйма, що складається із наступних секції в порядку від ПБУ: 16 секцій із поплавками для глибини до 3000 футів довжиною 365,8 м і 10 секцій без поплавків довжиною 228,6 м. Основні параметри секцій водовіддільної колони зведено в табл. 1

Таблиця 1. Характеристики 558.8мм секції водовіддільної колони з товщиною стінки 28,6 мм [6]

Властивості	З поплавками	Без поплавків
Вага секції без поплавків, Н	158552	158552
Довжина секції, м	22,86	22,86
Вага поплавків для секції, Н	98216	0
Вага зануреної секції із поплавками, Н	2869,1	137783
Компенсування ваги поплавками	97,92%	0,00%
Діаметр опору, мм	1410	1049
Коефіцієнт опору	1,00	1,00
Діаметр інерції, мм	1410	952,5
Коефіцієнт інерції	2,00	2,00

В математичну модель системи включено натяжну систему водовіддільної колони канатного типу. Вона складається із 8 натяжних пристроїв з діаметром гідроциліндра d_C=470 мм із чотирьохкратним поліспастом і сховищем газу об'ємом v_O=60 м^3.

Початковий натяг водовіддільної колони визначаємо виходячи із розрахованого мінімально допустимого [7]:

$$T_{\min} = \frac{\left[W \cdot f_w - B \cdot f_b + A_i\left(\rho_m h_m - \rho_w h_w\right)\right] \cdot N}{R_f\left(N - n\right)}, \qquad (11)$$

де W – вага водовіддільної колони в зануреному стані (3583 кН); B – чисте виштовхувальне зусилля з боку поплавків (2160 кН); ρ_m – густина промивальної рідини (1200 кг/м^3); ρ_w – густина морської води (1025 кг/м^3); A_i – площа поперечного січення каналу водовіддільної колони (0,258 м^2); n – допустиме число аварійно відключених натяжних пристроїв (1); N – число натяжних пристроїв (8); f_w поправочний коефіцієнт на похибку маси секцій водовіддільної колони (1,05); f_b – коефіцієнт на похибку виштовхувальної сили в наслідок старіння і розгерметизації поплавків (0,96); R_f – поправковий коефіцієнт на похибку в натяжній системі, внаслідок відхилення тросів від вертикалі і втрат у механічній і гідравлічній підсистемах (0,9); h_w і h_m – довжина зануреної частини водовіддільної колони і висота стовпа промивальної рідни у водовіддільній колоні, приймаємо $h_w \approx h_m$ (594,4 м). В результаті отримаємо:

$$T_{\min} = \frac{\left[3{,}583 \cdot 10^6 \cdot 1{,}05 - 2{,}16 \cdot 10^6 + 0{,}258\left(1200 - 1025\right) \cdot 594{,}4\right] \cdot 8}{0{,}9\left(8 - 1\right)} = 2{,}18 \cdot 10^6 \left[H\right]. \qquad (12)$$

Приймаємо T_O=2,2 МН. Виходячи із цього, знаходимо зусилля, яке розвиває гідроциліндр натяжного пристрою, затребуваний тиск в пневмосистемі натяжної системи, приведений коефіцієнт жорсткості і сили тертя спрощеної моделі натяжної системи:

$$F_O = 4\frac{T_O}{N} = 4\frac{2.2 \cdot 10^6}{8} = 1.1 \cdot 10^6 \left[H\right];$$

$$P_O = \frac{4F_O}{\pi d_c^{\,2}} = \frac{4 \cdot 1.1 \cdot 10^6}{3.14 \cdot 0.47^2} = 6.34 \cdot 10^6 \left[Па\right]; \qquad (13)$$

$$k_1 = \frac{P_O \gamma A^2}{v_O} = \frac{6.34 \cdot 10^6 \cdot 1.42 \cdot \left(0.25 \cdot 3.14 \cdot 0.47^2 \cdot 8\right)^2}{60} = 289053\left[\frac{H}{м}\right];$$

$$F_{col} = 0.03 \cdot N \cdot P_O = 0.03 \cdot 8 \cdot 6.34 \cdot 10^6 = 264 \cdot 10^3 \left[H\right],$$

де F_O – зусилля натягу, яке забезпечує гідроциліндр натяжного пристрою.

Дослідження проводилось при нерегулярному хвилюванні моря із значущою висотою хвилі 2,0 м, 3,0 м, 4,0 м. Параметри енергетичного спектру вибирались із [6], а значення RAO для бурового судна WestNavigator взято із [8]. Морська течія задавалась лінійним градієнтом із швидкістю 0,5 м/с на дні моря і 1,2 м/с на поверхні моря. Розрахунок проводився на проміжку часу 1-200 с з кроком 0,1 с.

Отримані результати (рис. 2) моделювання свідчать, що при збільшенні значущої висоти хвилювання моря в перерізах водовіддільної колони починають спостерігатись менша кількість локальних екстремумів згинаючих сил і згинаючих моментів, одночасно із збільшенням їхньої величини, яка може сягати 54% від максимального значення. Найбільші величини згинаючого моменту в водовіддільній колоні спостерігаються в перерізі 48,87 м.

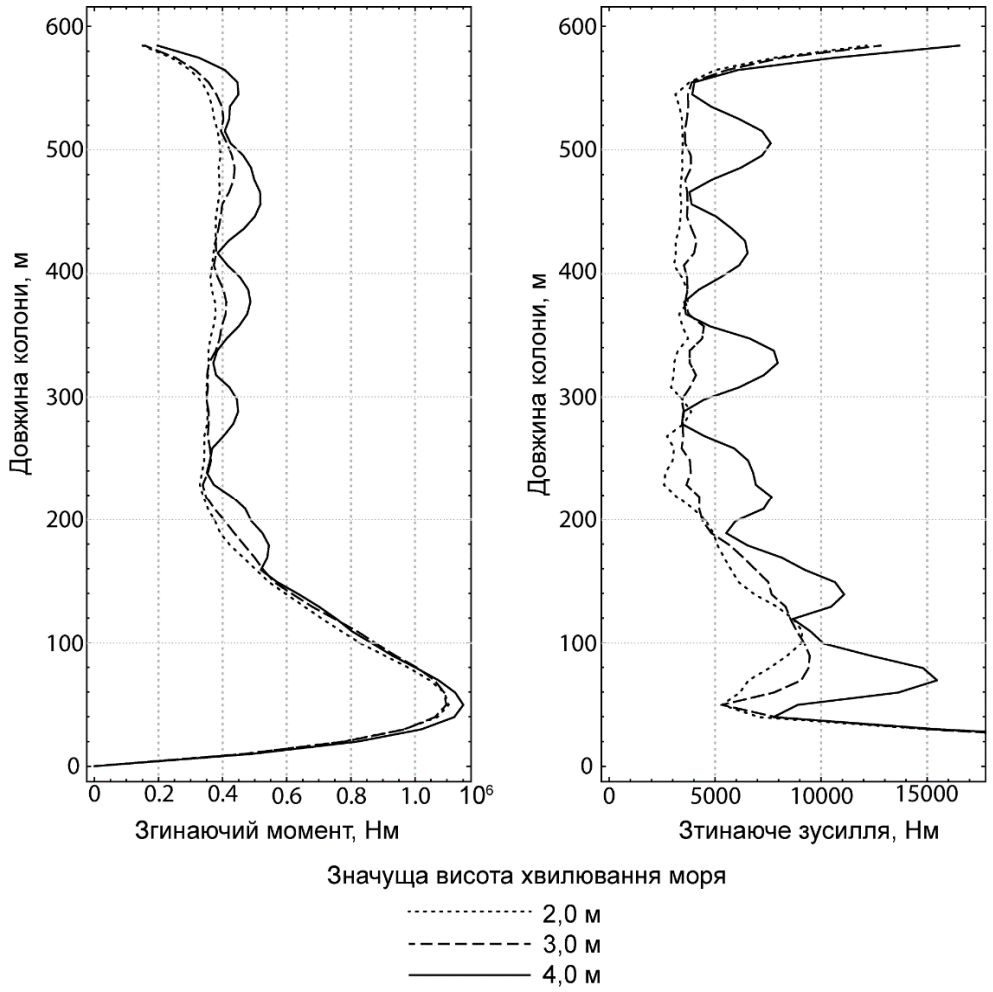
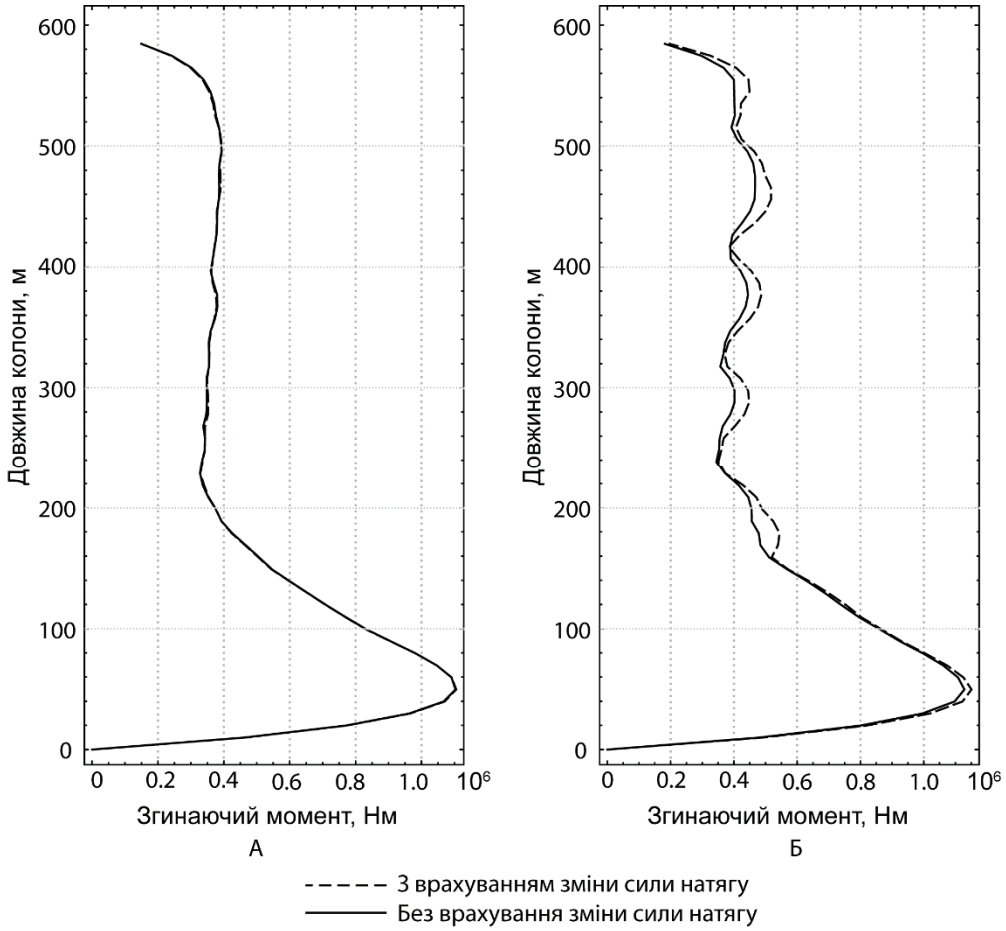


Рис. 2. Зміна згинаючого моменту і зтинаючого зусилля по довжині колони при різних значеннях значущої висоти хвилювання моря



А – значуща висота хвилювання 2,0 м;
Б – значуща висота хвилювання моря 4,0 м

Рис. 3. Результати обчислення величини згинаючих моментів в перерізах водовіддільної колони з сталою у часі і змінною силою натягу колони

Для дослідження характеру і величини впливу врахування змінного зусилля натягу при дослідженні поперечних коливань водовіддільної колони було проведено імітаційне моделювання для аналогічної компоновки водовіддільної колони за умови відсутності поздовжніх збурень. На рис. 3 наведено порівняння отриманих результатів обчислення згинаючого моменту для колони із врахуванням зміни зусилля натягу і без нього. Із отриманих результатів можна зробити висновок, що при невеликій значущій висоті хвилювання моря отримані результати в основному збігаються, і основний вплив на деформацію водовіддільної колони чинить морська течія, однак при збільшенні значущої висоти хвилювання моря спостерігається значне розходження графіків згинаючих моментів. Так при значущій висоті хвилювання моря 4,0 м величина знайденого згинаючого моменту в імітаційні моделі, яка враховує

зміну зусилля натягу в часі, є на 15% більша в локальному екстремумі 178,51 м і 3,1% більшою в глобальному екстремумі в січенні 48,87 м.

Висновки

1. Створено бібліотеку моделювання і на її основі імітаційну модель для дослідження динаміки роботи водовіддільної колони з урахуванням зміни зусилля натягу водовіддільної колони.

2. Отримані результати свідчать, що зі збільшенням значущої висоти хвилювання моря по довжині колони більш виражені локальні екстремуми згинаючих моментів і зтинаючих зусиль стають чітко вираженими.

3. Проводити дослідження динаміки роботи водовіддільної колони з урахуванням зміни зусилля натягу варто при значних величинах хвилювання моря, тоді обчислені значення згинаючих моментів і зтинаючих сил в локальних екстремумах на 10-15% більші за значення обчислені без урахування зміни зусилля натягу.

Література

1. Brouwers J.J. H. Analytical methods for predicting the response of marinerisers / J.J.H. Brouwers. – 1982.
2. Dareing, D.W. Natural Frecuencies of Marine Drilling Riser / D.W. Dareing, T. Huang // Journal of Petroleum Technology. – 1976. – P.813-818.
3. Wu M.C. Effectsof rigidity and internal flow on marine riser dynamics / M.C. Wu, J.Y.K. Lou // Applied Ocean Research. – 1991. – Vol. 13, №5. – P.235-244.
4. Otteren A.A Mathematical model for dynamic analisys of a flexibe marine riser connected to a floating vessel / A. Otteren // Modelling, indetification and control. – 1982. – Vol. 3, №4. – P.187-209.
5. Sparks, C.P. Fundamentalsof marine riser mechanics / C.P. Sparks. – Tulsa, Okla., USA: Penn Well, 2007. – 320 p.
6. Chakrabarti, S.K. Handbookof Offshore Engineering / S.K. Chakrabarti, Subrata. – London: Elsevier, 2005.
7. American Petroleum Institute. API-16QDesign, Selection, Operation and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems.
8. Anundsen, T. Operability comparison of three ultra-deepwater and harsh environment drilling vessels / Anundsen Thorgeir; University of Stavanger. – Stavanger, Norway, 2008. – 106 c.

Стаття надійшла до редакційної колегії 20.12.2016 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором ***Мойсишиним В.М.***
д.ф.-м.н., професором ***Векериком В.І.***

RESEARCH STRESS STRAIN STATE OF DRILLING RISER AT IRREGULAR SEA WAVES

O. O. Slaby
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str. 15;
e-mail: burewisnyk@gmail.com

In this paper describes a mathematical model of transverse vibrations drilling riser with irregular waves of the sea, taking into account the value of non-permanent tension riser upper end of the riser tension system. Based on the mathematical model are created a simulation model in multiphysics modeling language Modelica. According to the results of experiments analyzed the stress-strain state drilling riser for different values wave height.

Key words: *drilling riser, transverse vibrations, simulation model, Modelica, irregular sea waves.*