
Науково-технічні проблеми нафтогазової інженерії

УДК [622.24.085.5+622.24.084.32]:004.942

DOI: 10.31471/1993-9868-2019-2(32)-18-28

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОД АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЇ ВОДОВІДІЛЬНОЇ КОЛОНИ НА ПОЗДОВЖНІ КОЛИВАННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

О. О. Слабий

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: burewisyuk@gmail.com

Робота присвячена вивченню впливу поперечних коливань водовіддільної колони на поздовжні коливання бурильної колони та зміну динамічної складової осьового зусилля на долоті при бурінні свердловин з плаваючих засобів в умовах глибокого моря. Оцінка впливу проводилась шляхом порівняльного аналізу результатів імітаційного моделювання роботи бурової системи в програмному середовищі на базі мови Modelica. Для цього створено імітаційну модель, що дає змогу вивчати роботу системи «бурове судно – натяжна система водовіддільної колони – водовіддільна колона – компенсатор вертикальних коливань бурильної колони – бурильна колона» при нерегулярному хвилюванні моря, що задається енергетичним спектром JONSWAP. Вплив деформації водовіддільної колони на осьові коливання бурильної колони врахований шляхом внесення в «класичне» рівняння осьових коливань бурильної колони нелінійного члена поздовжньо-поперечної деформації. Поперечна деформація бурильної колони визначалась, виходячи із припущення про співпадіння осей деформації водовіддільної і бурильної колон в процесі роботи. Проведено серію числових експериментів при хвилюванні моря від трьох до шести балів за умови відсутності впливу морських течій та активному режимі роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони. Одержані результати показують, що найбільший вплив деформації водовіддільної колони на осьові коливання бурильної колони спостерігається в перерізі на рівні гирла свердловини, де амплітуда поздовжніх коливань зростає до 4 разів. Загалом деформація водовіддільної колони спричинює зростання коефіцієнта динамічності роботи долота на 4-7% для досліджуваної компоновки бурової системи.

Ключові слова: бурильна колона; водовіддільна колона; осьові коливання; поперечні коливання, динаміка складних систем; імітаційне моделювання; осьове зусилля на долоті, Modelica.

Работа посвящена изучению влияния поперечных колебаний водоотделяющей колонны на продольные колебания бурильной колонны и изменение динамической составляющей осевого усилия на долоте при бурении скважин из плавающих средств в условиях глубокого моря. Оценка воздействия проводилась путем сравнительного анализа результатов имитационного моделирования работы буровой системы в программной среде на базе языка Modelica. Для этого создана имитационная модель, позволяющая изучать работу системы «буровое судно – натяжная система водоотделяющей колонны – водоотделяющая колонна – компенсатор вертикальных колебаний бурильной колонны – бурильная колонна» при нерегулярном волнении моря что задается энергетическим спектром JONSWAP. Влияние деформации водоотделяющей колонны на осевые колебания бурильной колонны учтено путем внесения в «классическое» уравнение осевых колебаний бурильной колонны нелинейного члена продольно-поперечной деформации. Поперечную деформацию бурильной колонны определяли, исходя из предположения о совпадении осей деформации водоотделяющей и

бурильної колонни при їх роботі. Проведена серія численних експериментів при волненні моря от трех до шести баллов, отсутствия действия морских течений и активном режиме работы компенсатора вертикальных перемещений бурильной колонны. Полученные результаты показывают, что наибольшее влияние деформации водоотделяющей колонны на осевые колебания бурильной колонны наблюдается в сечении на уровне устья скважины, где амплитуда продольных колебаний возрастает до 4 раз. В общем, для исследуемой компоновки буровой системы деформация водоотделяющей колонны вызывает рост коэффициента динамичности работы долота на 4-7%.

Ключевые слова: бурильная колонна; водоотделяющая колонна; осевые колебания; поперечные колебания, динамика сложных систем; имитационное моделирование; осевое усилие на долоте, Modelica.

The article deals with the study of the effect of drilling riser transverse vibrations on the longitudinal vibrations of the drill string and the change of the dynamic component of weight on the bit when drilling wells from floating drilling vessel in deep sea conditions. The impact assessment was carried out by comparing the results of the simulation of the drilling system in the software based on the Modelica language. For this purpose, a simulation model has been created to enable the study of the operation of the «drill ship – riser wire tension system – drilling riser – drill string heave compensator – drill string» system in the case of irregular sea agitation obtained from decomposition the JONSWAP energy spectrum. The influence of the deformation of the drilling riser on the axial vibrations of the drill string is taken into account by introducing into the "classical" equation of the axial vibrations of the drill string the nonlinear term of the longitudinal-transverse strain. The drill string transverse deformation was determined based on the assumption that the axes of deformation of the drilling riser and drill string were coincident in the course of operation. A series of simulation experiments was carried out in the case from three to six WMO sea state code, absence of action of sea currents and active mode of work of the drill string heave compensator. The obtained results show that the greatest influence of the deformation of the drilling riser on the axial vibrations of the drill string is observed in the section at the level of the well head, where the amplitude of longitudinal vibrations increases up to 4 times. In general, the deformation of the drilling riser causes the growth of the dynamic impact factor of weight on the drill bit to increase by 4-7% for the investigated structure of the drilling system.

Key words: drill string; drilling riser; longitudinal vibration; transverse vibrations, dynamics of complex systems; simulation modeling; weight of bit, Modelica.

Вступ

На сьогоднішній день при бурінні свердловин в умовах моря для захисту бурильної колони від негативного впливу навколишнього середовища використовують водовіддільну колону. Хоча водовіддільна колона володіє значно більшою жорсткістю в порівнянні із бурильною колоною, однак під дією гідродинамічних сил, спричинених хвилюванням моря і морськими течіями, вона все ж зазнає значних статичних і динамічних деформацій, що, в свою чергу, неминуче впливає на роботу бурильної колони. Зважаючи на це дослідження роботи системи «водовіддільна колона – бурильна колона» є важливим для забезпечення ефективної і безаварійної роботи бурової системи при бурінні свердловин на морі.

Дана робота присвячена вивченню впливу деформації водовіддільної колони на осьові коливання бурильної колони і зміну динамічної складової осьової сили на долоті.

Аналіз публікацій

Питанню вивчення взаємодії системи «водовіддільна колона – бурильна колона» присвячено дуже мало робіт, що обумовлено як складністю досліджуваного об'єкта, так і відсутністю розробленої на сьогодні достатньо точної математичної моделі динаміки роботи

більш спрощеної і узагальненої еквівалентної системи типу «труба в трубі», що омивається потоком рідини. Зважаючи на це, в існуючих роботах, де розглядалась проблематика моделювання системи «водовіддільна колона – бурильна колона», для вирішення окремих прикладних задач моделювання роботи системи проводилось із прийнятими багатьма припущеннями і спрощеннями. Так, в роботі [1] розглянуто питання впливу вібрацій, спричинених зривом вихрив потоку рідини, що омиває водовіддільну колону, на динаміку роботи бурильної колони та їх можливе підсилення при зміні частоти обертання бурильної колони. Для цього побудовано модель системи в середовищі кінцево-елементного моделювання, де бурильна колона представлена балкою Тимошенка, а водовіддільна колона описується за допомогою «класичного» рівняння, що наведене у профільних стандартах DIN і ANSI. Взаємодія двох колон у поперечному напрямку описується пружно-в'язким тілом, що, на думку авторів, характеризує властивості промивальної рідини, яка перебуває у міжтрубному просторі. Також за допомогою методів чисельних елементів у роботі [2] здійснено спробу оцінити контактні сили, що виникають між бурильною і водовіддільною колонами в залежності від зміщення плавучої бурової установки. Однак спрощене

представлення контактних сил, відсутність в роботі опису зовнішніх сил, що діють на систему, та граничних умов моделі не дають змоги адекватно оцінити запропоновану модель.

В роботі [3] проведено оцінку напружень, які виникають у бурильній колоні, внаслідок прогину, спричиненого відхиленням верхнього і нижнього сферичних шарнірів водовіддільної колони. Для цього створено кінцево-елементну модель і проведено аналіз напружено-деформованого стану бурильної колони з врахуванням геометрії бурильних замків при різних кутах відхилення шарнірних секцій водовіддільної колони.

Питання врахування впливу бурильної колони на зміну динаміки роботи водовіддільної колони в площині дії векторів швидкостей потоку рідини, що її омиває, розглянуто в роботі [4]. Для цього авторами проведено модифікацію «класичного» рівняння поперечних коливань водовіддільної колони за допомогою додатку, який моделює зусилля, що діють на водовіддільну колону з боку бурильної в точках їх контактування. Взаємодія двох колон описана функцією Гавісайда та пружно-фрикційний тілом. Отримані результати підтвердили значний вплив бурильної колони на величину поперечної деформації водовіддільної колони. Тихонов В. С. і Сафронов А. І. [5] аналізували напружено-деформований стан системи «водовіддільна колона – бурильна колона», що застосовуються для розвідувального буріння, виходячи із припущення збігу їх осевих ліній. Ними отримані обмеження щодо зміщення ПБУ від гирла свердловини залежно від заданого запасу міцності бурильних труб.

Висвітлення невирішених частин проблеми, якій присвячена стаття

Аналіз існуючих публікацій показує, що на сьогодні ще залишається багато невирішених питань стосовно взаємодії водовіддільної та бурильної колон. Зокрема не оцінено вплив деформації водовіддільної колони на поздовжні коливання в бурильній колоні. Зважаючи на це, було сформульовано задачу досліджень, яка полягає в оцінці впливу поперечної деформації водовіддільної колони на осеві коливання бурильної колони та зміну осевого зусилля на долоті.

Досліджувана система

За об'єкт дослідження обрано систему, розрахункова схема якої зображена на рис. 1. Вона складається із бурового судна 5, на палубі якого змонтована бурова вежа 2, та натяжної

системи водовіддільної колони 4. Натяжна система водовіддільної колони утримує водовіддільну колону 6, що сполучає палубу бурового судна з гирлом свердловини. У водовіддільній колоні знаходиться бурильна колона, що складається із секції бурильних труб 7, секції ОБТ 8, бурового амортизатора 9 та тришарошкового долота 10, яка приводиться в рух верхнім приводом 3. Верхній кінець бурильної колони утримується компенсатором вертикальних переміщень бурильної колони підкронблочного типу з гібридним режимом роботи, що змонтований на вершині бурової вежі. Під час роботи на систему діє нерегулярне хвилювання моря, що спричинює хитавицю бурового судна і деформацію водовіддільної колони разом із бурильною колоною, що знаходиться в ній.

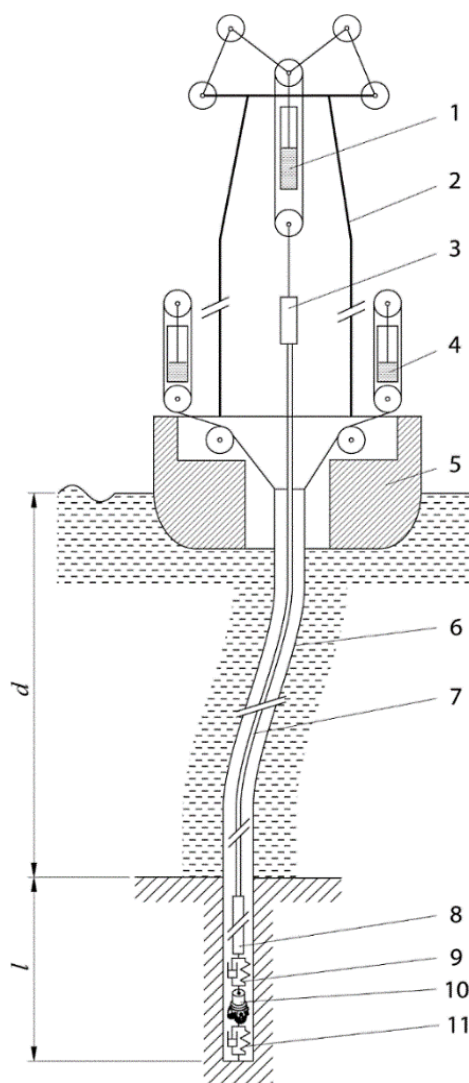


Рисунок 1 – Фізична модель системи

Побудова моделі системи

Дослідження роботи даної системи проводилось шляхом побудови її моделі в мові моделювання Modelica з подальшим порівняльним

аналізом отриманих результатів імітаційного моделювання. Одною із переваг обраного підходу є можливість синтезування мультидомених топологічних імітаційних моделей складних систем шляхом їх агрегації з імітаційних моделей окремих елементів досліджуваного об'єкта. При створенні моделі системи, яка розглядається, було використано створену модель натяжної системи водовіддільної колони, опис якої наведено в роботі [6], та модель компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони з гібридним режимом роботи, яка описана в роботах [7; 8].

Секцію бурильної колони, що знаходиться у водовіддільній колоні, через складність досліджуваного об'єкта моделювали, виходячи із наступних припущень:

– осі деформації водовіддільної і бурильної колон в першому наближенні приймаємо суміщеними, зважаючи на те, що величина поперечних коливань водовіддільної колони є значно більшою за різницю радіусів колон;

– силовим впливом з боку бурильної колони на роботу водовіддільної колони нехтуємо, зважаючи, що його величина не співмірна із гідродинамічними зусиллями, які сприймає водовіддільна колона.

Виділимо одиничний елемент колон труб (рис. 2), прикладемо до нього зовнішні сили, що діють в процесі роботи, і, виходячи із описаних вище припущень, складаємо за принципом Д'Аламбера приріст пружної сили з врахуванням нелінійного члена поздовжньо-поперечної деформації [9]

$$\varepsilon = \frac{\partial u_d}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

виштовхувальної сили рідини, сили ваги, тертя та інерції та, здійснивши перехід $dz \rightarrow 0$, одержимо диференціальне рівняння поздовжніх коливань секції бурильної колони з врахуванням впливу деформації водовіддільної колони:

$$E_d A_d \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_d}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z} \right)^2 \right) - \rho_d \frac{\partial^2 u_d}{\partial t^2} - \eta_d \frac{\partial u_d}{\partial t} + k_a \rho_d g = 0, \quad (2)$$

де u_d – поперечне переміщення перерізу z бурильної колони в момент часу t ;

ρ_d – маса погонного метра бурильної труби;

η_d – коефіцієнт в'язкого тертя;

k_a – коефіцієнт плавучості;

g – пришвидшення вільного падіння;

E_d – модуль пружності матеріалу бурильних труб;

A_d – площа поперечного перерізу бурильної труби;

w_R – поперечне переміщення перерізу z водовіддільної та бурильної колон в момент часу t , що обчислюється із наступного рівняння [10]:

$$-\rho_R \frac{\partial^2 u_R}{\partial t^2} - \rho_R k_b g + E_R A_R \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_R}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z} \right)^2 \right) - \lambda \frac{\partial u_R}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (p_e A_e - p_i A_i) + \eta S_i + C_{M\tau} \frac{\rho_w \pi D_{ei}^2}{4} \frac{\partial u_w}{\partial t} + C_{D\tau} \frac{\rho_w D_{ed}}{2} \left(u_w - \frac{\partial u_R}{\partial t} \right) \left| u_w - \frac{\partial u_R}{\partial t} \right| = 0; \quad (3)$$

$$-\rho_R \frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + E_R A_R \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_R}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z} \right)^2 \right) \frac{\partial w_R}{\partial z} + E_R A_R \left(\frac{\partial u_R}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 w_R}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} - \rho_f A_i \left(\frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + v_f^2 \frac{\partial^2 w_R}{\partial z_1^2} + 2v_f \frac{\partial^2 w_R}{\partial z \partial t} \right) + C_{Mn} \frac{\rho_w \pi D_{ei}^2}{4} \frac{\partial w_w}{\partial t} - C_A \frac{\rho_w g \pi D_e^2}{4} \frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + C_{Dn} \frac{\rho_w D_{ed}}{2} \left(w_w - \frac{\partial w_R}{\partial t} \right) \left| w_w - \frac{\partial w_R}{\partial t} \right| = 0; \quad (4)$$

$$p_e = \rho_w (d - z) g, \quad (5)$$

$$p_i = \rho_f (d - z) g + \rho_f \frac{v_f^2}{2} + \rho_f \frac{f v_f^2}{D_i} (d - z),$$

де k_b – коефіцієнт компенсування ваги колони секціями поплавків;

S_i – периметр отвору водовіддільної колони;

λ – коефіцієнт демпфування водовіддільної колони;

A_i – площа поперечного перерізу отвору водовіддільної колони;

p_e і p_i – зовнішній і внутрішній тиски, що діють на колону з боку моря і промивальної рідини;

D_{ei} , D_{ed} – зведений діаметр інерції і опору водовіддільної колони;

C_{Mn} і $C_{M\tau}$ – нормальний і тангенціальний коефіцієнти інерції;

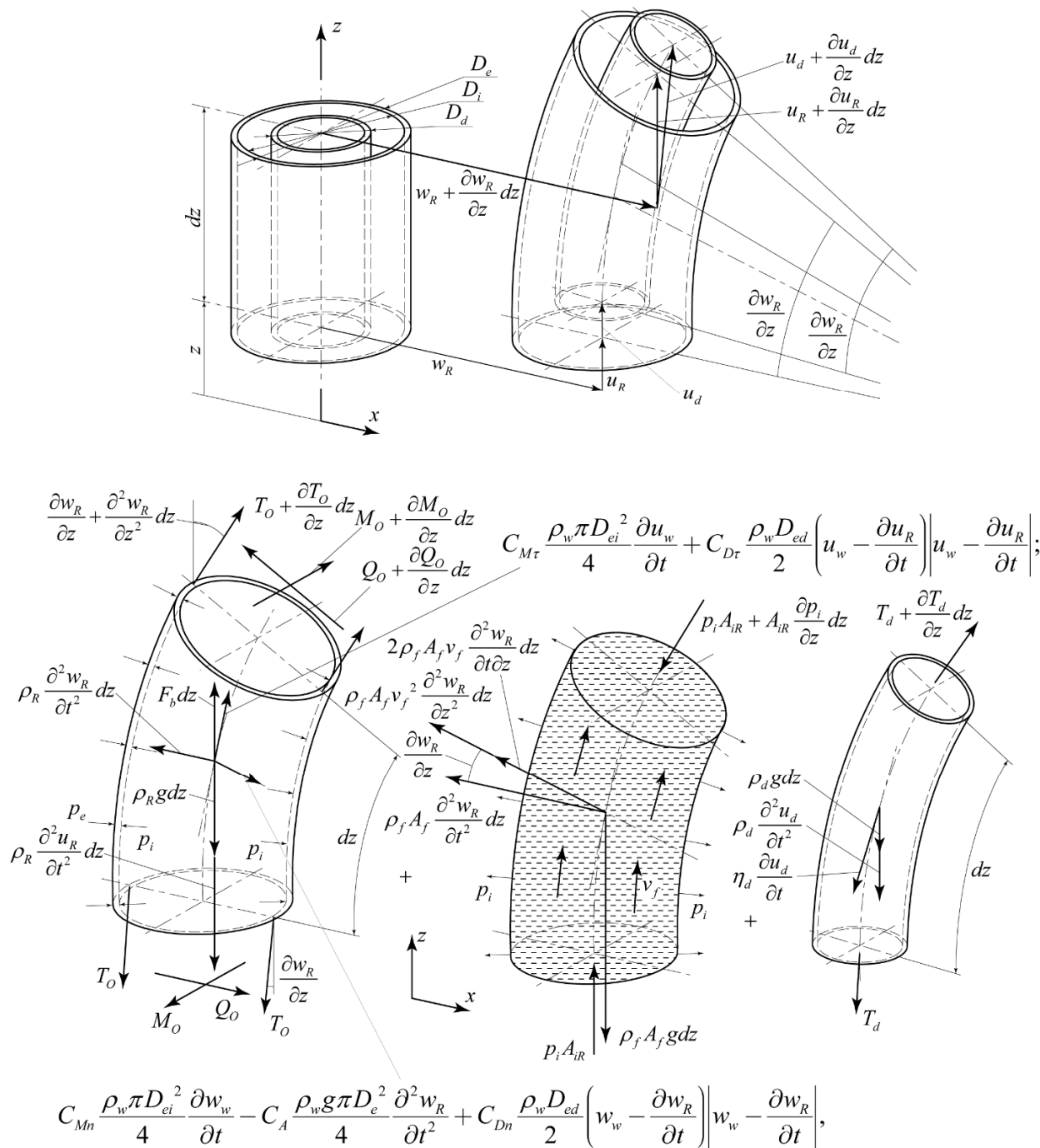


Рисунок 2 – Одиничний елемент водовіддільної колони із промивальною рідиною та бурильною колоною, що знаходяться в ньому, із відображенням прикладених зусиль

C_{Dn} і C_{Dr} – нормальний і тангенціальний коефіцієнти опору;

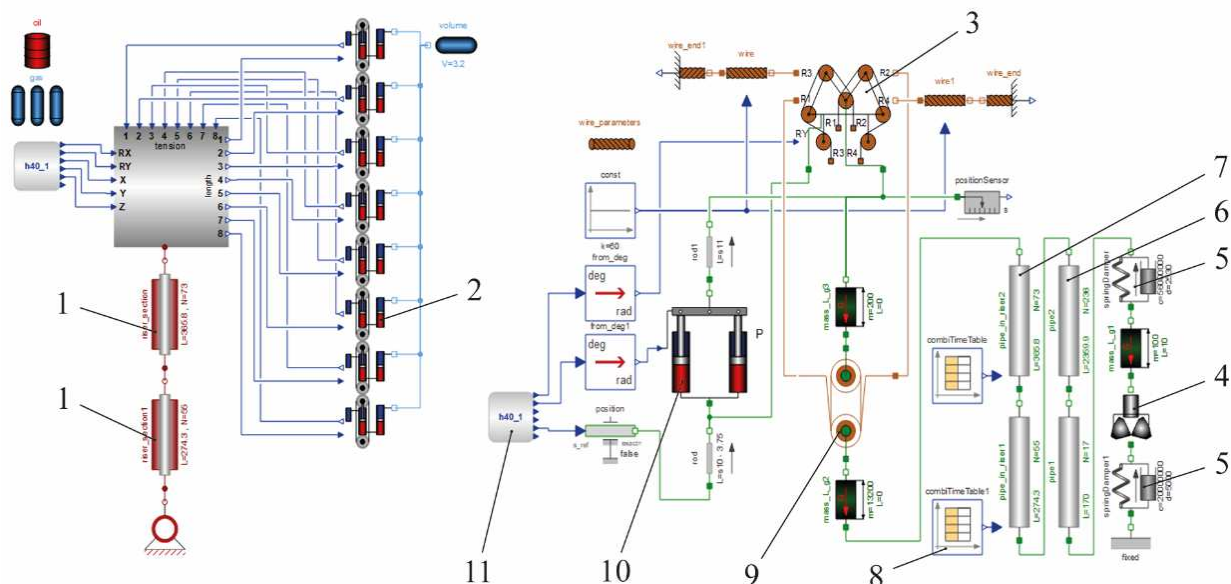
C_A – коефіцієнт приєднаної маси води;

u_w і w_w – вертикальна і горизонтальна складові швидкості потоку рідини, що омиває водовіддільну колону, яка визначаються за спектральною теорією хвилювання моря шляхом розкладання енергетичного спектру хвилювання моря JONSWAP.

Секцію бурильної колони, що знаходиться у свердловині, описуємо за допомогою «класичного» рівняння поздовжніх коливань, що враховує силу ваги, інерційну силу, силу в'язкого тертя промивальної рідини до стінок колони і описується рівнянням [11]:

$$E_d A_d \frac{\partial^2 u_d}{\partial z^2} = \rho_d \frac{\partial^2 u_d}{\partial t^2} + \eta_d \frac{\partial u_d}{\partial t} + k_a \rho_d g. \quad (6)$$

Для вирішення рівняння сформуємо його граничні умови:



Графічне представлення моделей: 1 – секції водовіддільної колони; 2 – натяжного пристрою водовіддільної колони; 3 – компенсатора зміни довжини талевого канату; 4 – тришарошкового долота; 5 – пружно-в'язкого тіла; 6 – секції бурильних труб без врахування деформації водовіддільної колони; 7 – секції бурильних труб, що враховують деформацію водовіддільної колони; 9 – системи талевої блок-кранблок; 10 – гідропневматичної системи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони; 11 – генератора хвилювання моря

Рисунок 3 – Графічне представлення імітаційних моделей досліджуваної системи

– при описі роботи шарошкового долота:

$$u_d(z, t)_\zeta = u_d(z, t)_{\zeta-1} + z_b(t);$$

$$z_b(t) = \sum_{i=0}^3 a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i);$$

$$E_d A_d \frac{\partial u_d(z, t)_\zeta}{\partial z} + E_d A_d \frac{\partial u_d(z, t)_{\zeta-1}}{\partial z} z -$$

$$- m_b g - m_b \frac{\partial^2 u_d(z, t)_{\zeta_2}}{\partial t^2} = 0, \quad (7)$$

де a_i – амплітуда коливань;

ω_i – циклічна частота коливань;

φ_i – фазовий кут зміщення коливань шарошкового долота, які вибираються за рекомендаціями, поданими у [11];

– при описі роботи наддолотного амортизатора та породи на вибої, які моделюються пружно-в'язкими тілами:

$$E_d A_d \frac{\partial u_d(z, t)_\zeta}{\partial z} + E_d A_d \frac{\partial u_d(z, t)_{\zeta-1}}{\partial z} = 0;$$

$$E_d A_d \frac{\partial u_d(z, t)_\zeta}{\partial z} + k_2 (u_d(z, t)_\zeta - u_d(z, t)_{\zeta-1}) +$$

$$+ \eta_2 \frac{\partial}{\partial t} (u_d(z, t)_\zeta - u_d(z, t)_{\zeta-1}) = 0. \quad (8)$$

В результаті отримана модель бурильної колони, яка враховує одночасний вплив трьох чинників збурень: роботу долота, роботу компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони і деформацію водовіддільної колони.

Імітаційна модель

Виходячи із прийнятих припущень, роботу досліджуваної системи вивчають у два етапи. На першому етапі проводиться дослідження роботи системи «бурове судно – натяжна система водовіддільної колони – водовіддільна колона», результати чисельного моделювання якої слугують вихідними даними для дослідження роботи системи «бурове судно – компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони – бурильна колона», яка вивчається на наступному етапі. Оскільки на даний час мова Modelica [12] не підтримує можливість опису моделей за допомогою диференціальних рівнянь з частинними похідними при створенні імітаційних моделей коливань водовіддільної колони та бурильної колони було застосовано чисельний метод ліній (Numeric Method of Lines, NMOL) [13], згідно з яким за допомогою центральної кінцево-різницевої схеми другого порядку диференціальні рівняння з частинними похідними (2-8) перетворені в системи звичайних диференціальних рівнянь. В результаті отримано дві

Таблиця 1 – Основні геометричні та механічні параметри секцій водовіддільної колони

№	Параметри	21 дюймова секція	
		З поплавками	Без поплавків
1	Вага секції без поплавків, Н	158552	158552
2	Довжина секції, м	22,86	22,86
3	Вага поплавків для секції, Н	98216	0
4	Вага зануреної секції із поплавками, Н	2869,1	137783
5	Компенсування ваги поплавками, %	97,92	0
6	Приведений діаметр опору D_{ed} , мм	1410	1049
7	Коефіцієнт опору C_{Dn}	1,00	1,00
8	Коефіцієнт опору C_{dt}	0,03	0,03
9	Приведений діаметр інерції D_{ei} , мм	1410	952,5
10	Коефіцієнт інерції C_{Dn}	1,9	1,9

Таблиця 2 – Основні геометричні та механічні параметри секцій бурильної колони

№	Параметри	Бурильні труби	ОБТ
1	Зовнішній діаметр, дюйм	5 ⁷ / ₈	6 ⁵ / ₈
2	Площа поперечного перерізу, м ²	0.00646	0.0284
3	Маса погонного метра, кг/м	66.953	222.87
4	Коефіцієнт в'язкого тертя, Нс/м	45	250

Таблиця 3 – Основні параметри досліджуваної системи

№	Параметр	Величина
Натяжна система водовіддільної колони		
1	Кількість натяжних пристроїв	8
2	Тип натяжних пристроїв	Одинарні
3	Діаметр гідроциліндра, мм	470
4	Об'єм газового резервуару високого тиску, м ³	3,2
5	Робоча рідина	Eriffon 818
6	Робочий газ	азот
7	Сили тертя в гідроциліндрах від номінального зусилля, %	1,5
Компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони		
8	Діаметр гідроциліндра пасивної системи, м	0,53
9	Діаметр гідроциліндра активної системи, м	0,22
10	Діаметр штоку гідроциліндра пасивної системи, м	0,25
11	Діаметр штоку гідроциліндра активної системи, м	0,1
12	Діаметр гідропневматичного акумулятора, м	0,44
13	Об'єм газового резервуару високого тиску, м ³	13,5
14	Діаметр талевого тросу, м	0,0508
15	Робоча рідина	Errifon 818
16	Робочий газ	азот
17	Маса поршня і штока гідроциліндра, кг	3697
18	Відстань між талевим блоком і кронблоком, м	10
Інші параметри системи		
19	Густина морської води ρ_w , кг/м ³	1025
20	Густина промивальної рідин ρ_f , кг/м ³	1200

імітаційні моделі, графічне представлення яких подано на рисунку 3, що дають змогу провести наближену оцінку впливу деформації водовіддільної колони під дією нерегулярного хвилювання моря на осьові коливання бурильної колони.

З використанням створеної моделі здійснено серію чисельних експериментів при нерегулярному хвилюванні моря, що становить від 1 до 6 балів для системи, яка складається із водовіддільної колони з двох секцій: секції із поплавками довжиною 365,8 м, секції без поплавків

довжиною 274,3 м та бурильної колони, що складається із секції бурильних труб діаметром 5½ загальною довжиною 2000 м та секції ОБТ 6½ загальною довжиною 170 м, бурового амортизатора із характеристиками: $k_2 = 5,6 \times 10^6$ Н/м, $\eta_2 = 2,53 \times 10^4$ Нс/м та трьохшарошкового долота. Інші параметри системи наведені в таблицях 1-3. Дослідження проводилось на проміжку часу 0-1000 с з інтервалом дискретизації 0,001 с.

Аналіз одержаних результатів

Оцінку впливу водовіддільної колони на поздовжні коливання бурильної колони і зміну осьової сили на долоті проводимо шляхом порівняльного аналізу результатів імітаційного моделювання бурової системи при різній висоті хвилювання моря з врахуванням або нехтуванням впливу деформації водовіддільної колони.

На рисунку 4 наведено результати імітаційного моделювання для перерізів бурильної колони, що знаходяться над гирлом свердловини і над наддолотним амортизатором при шестибальному хвилюванні моря.

З отриманих результатів видно, що поперечні коливання водовіддільної колони спричиняють значне зростання амплітуди осьових коливань бурильної колони. Аналіз амплітудно-частотних характеристик поздовжніх коливань бурильної колони показує, що вплив водовіддільної колони спостерігається на частотах, кратних 0,25 та 2 пікової частоти енергетичного спектру хвилювання моря. Аналогічні результати імітаційного моделювання спостерігаються при інших висотах хвилювання моря.

Для кращого розуміння впливу водовіддільної колони на збурення коливань по довжині бурильної колони на рисунку 5 наведено розподіл максимальних і середньоквадратичних значень поздовжніх переміщень і динамічної складової осьової сили, що виникає в перерізах бурильної колони при різній висоті нерегулярного хвилювання моря. Отримані результати показують, що вплив деформації водовіддільної колони на зміщення гака талевого блоку практично відсутній, однак спостерігається зростання амплітуди поздовжніх коливань бурильної колони в перерізах секцій, які знаходяться у водовіддільній колоні, максимальні значення яких спостерігаються в перерізі бурильної колони над гирлом свердловини. Розмах поздовжніх коливань в даному перерізі до чотирьох разів більший в порівнянні із результатами моделювання без врахування впливу водовіддільної колони. В подальшому амплітуда коливань під дією сил в'язкого тертя між стінками буриль-

льних труб і промивальною рідиною зменшується (але повністю не зникає) і чинить вплив на роботу долота. Так, коефіцієнт динамічності роботи долота з врахуванням впливу деформації водовіддільної колони для досліджуваної компоновки зростає при висоті хвилювання моря $H_{1/3} = 3,0$ з 1,3 до 1,35, при $H_{1/3} = 4,0$ м з 1,26 до 1,32, при $H_{1/3} = 6,0$ м з 1,28 до 1,37.

Висновки

1. Врахування впливу деформації водовіддільної колони на осьові коливання бурильної колони призводить до зростання коефіцієнта динамічності роботи долота на 4-7% при 3-6 бальному хвилюванні моря для заданої компоновки бурової системи.

2. Найбільший вплив з боку водовіддільної колони спостерігається у перерізі бурильної колони над гирлом свердловини, де амплітуда поздовжніх коливань зростає у 4 рази, а динамічна осьова сила – на 10-30%.

3. Отримані результати дослідження можна використовувати, як уточнення до вже існуючих моделей та методик оцінки вібронантаженості бурильного інструменту в процесі буріння свердловин на морі для подальшого обґрунтування вибору його конструкції та режимів роботи.

Література

1. Al-Batati N., Hashim F. M., Pao K. S. Simulation of Drill String Vibration inside Well Bore due to Riser's Oscillation. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014. Vol. 7. No 1. P. 174–182. DOI: 10.19026/rjaset.7.237.
2. Chun-jie H., Tie Y., Yuan-song T. The analysis on coupling vibration of drill string and marine riser in deep-water drilling. *The International Journal of Multiphysics*. 2013. Vol. 7. No 1. P. 53–60. DOI: 10.1260/1750-9548.7.1.53.
3. Inoue T., Sakura K., Fukui T., Kyo M. Fatigue Strength Evaluation of Drill Pipe for Challenging Scientific Drilling Operations. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*. Bangkok, Thailand: Society of Petroleum Engineers, 2014-08-25.
4. Liao M., Zhou Y., Su Y., Lian Z., Jiang H., Manoach E., Stoykov S., Wiercigroch M. Dynamic Analysis of a Drillstring-Riser System Drilling in Deep Water. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 148. No 7. P. 16010. DOI: 10.1051/mateconf/201814816010.

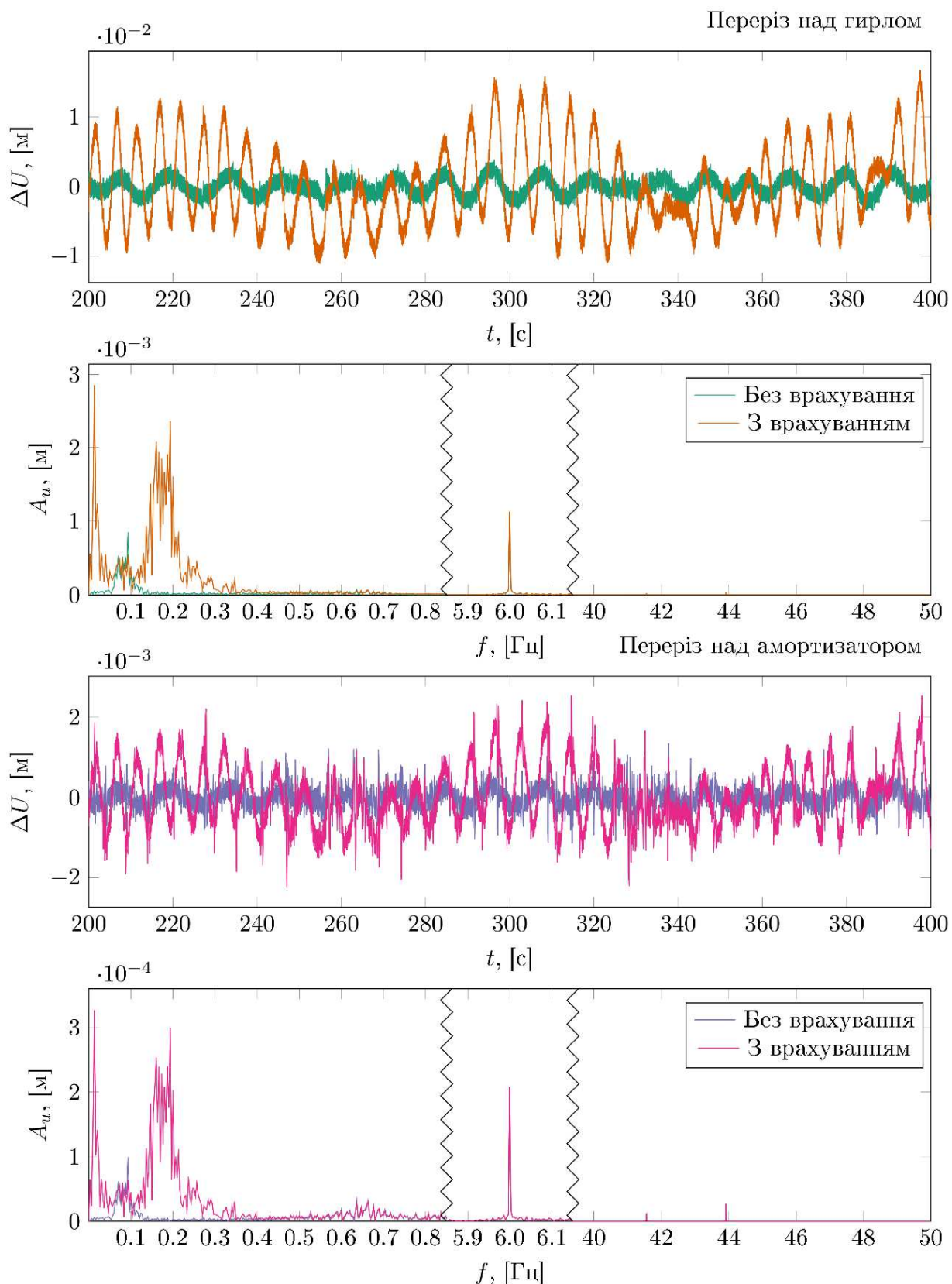


Рисунок 4 – Результати імітаційного моделювання поздовжніх коливань ΔU в окремих перерізах бурильної колони і їх амплітудно-частотні характеристики з врахуванням та без врахування впливу на бурильну колону з боку водовіддільної колони

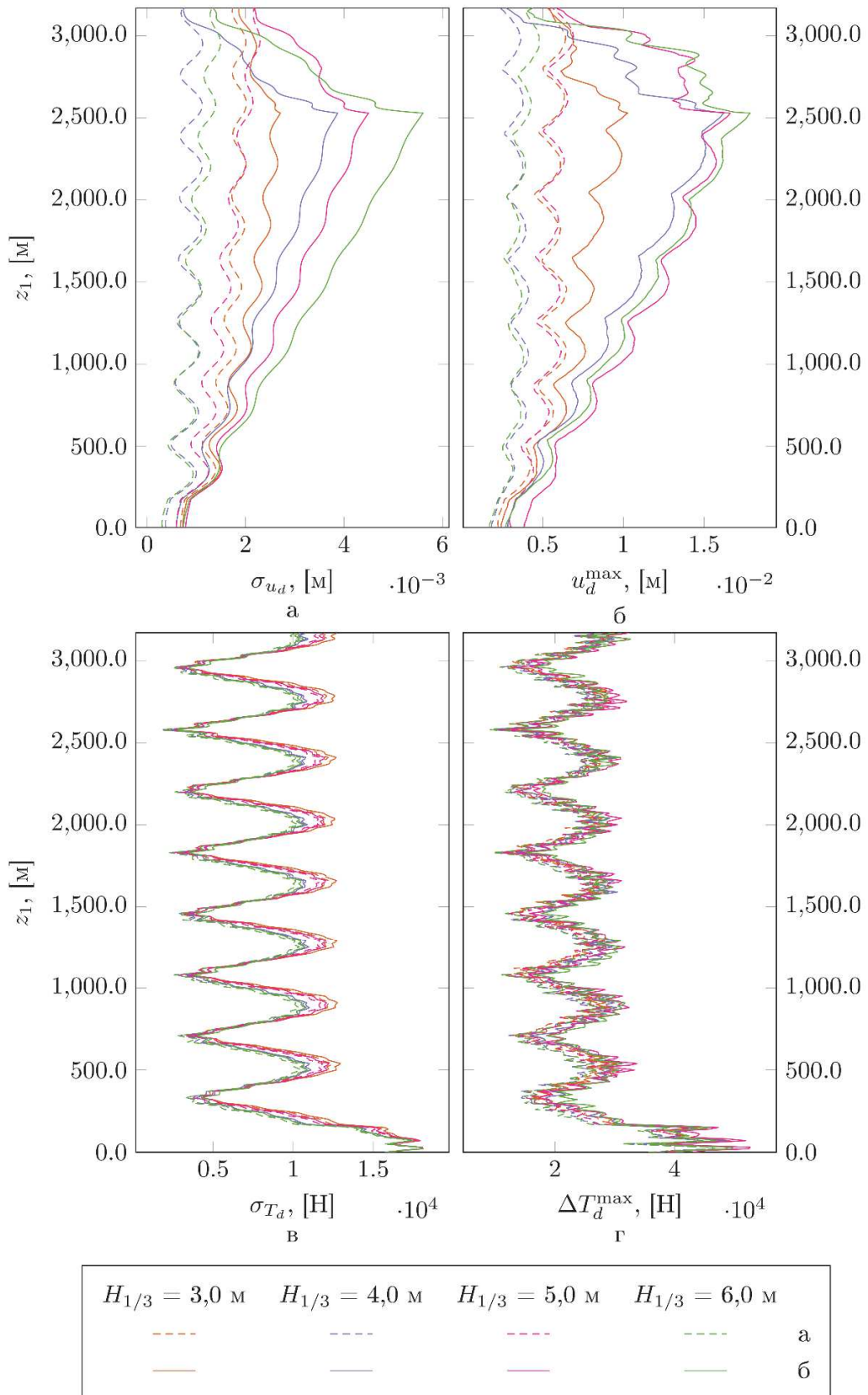


Рисунок 5 – Розподіл середньоквадратичних і максимальних значень осевих переміщень перерізів бурильної колони u_d і динамічних складових зусиль натягу ΔT_d , що виникають в них по довжині бурильної колони z_1 з врахуванням та без врахування впливу на бурильну колону з боку водовіддільної колони

5. Tikhonov V. S., Safronov A. I. Calculation of the stress-strain state of a deep-water drilling column over time. *Strength of Materials*. 1995. Vol. 27. No 8. P. 470–475. DOI: 10.1007/BF02209345.
6. Слабий О. О. Дослідження амплітудо-частотних характеристик динамічного зусилля натягу верхнього кінця водовіддільної колони та впливу на нього параметрів бурової системи. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 2(51). С. 88–94.
7. Слабий О. О. Побудова математичної моделі компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони підкронблочного типу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 3(52). С. 88–100.
8. Слабий О. О. Дослідження роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони із активною підсистемою замкненого циклу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 4(57). С. 27–35.
9. Keber M., Wiercigroch M. Dynamics of a vertical riser with weak structural nonlinearity excited by wakes. *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 315. No 3. P. 685–699. DOI: 10.1016/j.jsv.2008.03.023.
10. Slabyi O. Studying the coupled axial and lateral oscillations of the drilling riser under conditions of irregular seaways. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. No 7(93). P. 27–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.132661.
11. Векерик В. И. Совершенствование технологии углубления скважин изменением динамики работы бурильного инструмента: дис. д-р. техн. наук: 05.15.10, Ивано-Франковский институт нефти и газа. Ивано-Франковск, 1991. 749 с.
12. Fritzon P. Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2014.
13. Meyer G. H. The time-discrete method of lines for options and bonds. New Jersey: World Scientific Pub, 2015. 269 p.
3. Inoue T., Sakura K., Fukui T., Kyo M. Fatigue Strength Evaluation of Drill Pipe for Challenging Scientific Drilling Operations. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*. Bangkok, Thailand: Society of Petroleum Engineers, 2014-08-25.
4. Liao M., Zhou Y., Su Y., Lian Z., Jiang H., Manoach E., Stoykov S., Wiercigroch M. Dynamic Analysis of a Drillstring-Riser System Drilling in Deep Water. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 148. No 7. P. 16010. DOI: 10.1051/mateconf/201814816010.
5. Tikhonov V. S., Safronov A. I. Calculation of the stress-strain state of a deep-water drilling column over time. *Strength of Materials*. 1995. Vol. 27. No 8. P. 470–475. DOI: 10.1007/BF02209345.
6. Slabyi O. O. Doslidzhennia amplitudo-chastotnykh kharakterystyk dynamichnoho zusyillia natiahu verkhnoho kintsia vodoviddilnoi kolony ta vplyvu na noho parametriv burovoi systemy. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2014. No 2(51). P. 88–94.
7. Slabyi O. O. Pobudova matematychnoi modeli kompensatora vertykalnykh peremishchen burylnoi kolony pidkronblochnoho typu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2014. No 3(52). P. 88–100.
8. Slabyi O. O. Doslidzhennia roboty kompensatora vertykalnykh peremishchen burylnoi kolony iz aktyvnoiu pidsystemoiu zamknenoho tsykladu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2015. No 4(57). P. 27–35.
9. Keber M., Wiercigroch M. Dynamics of a vertical riser with weak structural nonlinearity excited by wakes. *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 315. No 3. P. 685–699. DOI: 10.1016/j.jsv.2008.03.023.
10. Slabyi O. Studying the coupled axial and lateral oscillations of the drilling riser under conditions of irregular seaways. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. No 7(93). P. 27–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.132661.
11. Vekeryk V. Y. Sovershenstvovanye tekhnolohyy uhlubleniya skvazhyn yzmenenyem dynamyky roboty burylnoho ynstrumenta: dys. d-r. tekhn. nauk: 05.15.10, Yvano-Frankovskiy ynstitut nefty y haza. Yvano-Frankovsk, 1991. 749 p.
12. Fritzon P. Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2014.
13. Meyer G. H. The time-discrete method of lines for options and bonds. New Jersey: World Scientific Pub, 2015. 269 p.

References

1. Al-Batati N., Hashim F. M., Pao K. S. Simulation of Drill String Vibration inside Well Bore due to Riser's Oscillation. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014. Vol. 7. No 1. P. 174–182. DOI: 10.19026/rjaset.7.237.
2. Chun-jie H., Tie Y., Yuan-song T. The analysis on coupling vibration of drill string and marine riser in deep-water drilling. *The International Journal of Multiphysics*. 2013. Vol. 7. No 1. P. 53–60. DOI: 10.1260/1750-9548.7.1.53.