

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

СЛАБИЙ ОРЕСТ ОЛЕГОВИЧ

УДК 622.24.085.5 + 622.24.084.3

**ДИНАМІКА БУРИЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ПОГЛИБЛЕНІ
СВЕРДЛОВИН НА МОРІ З ПЛАВУЧИХ ЗАСОБІВ**

05.15.10 – Буріння свердловин

АВТОРЕФЕРАТ
Дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Івано–Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
МОЙСИШИН Василь Михайлович
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
завідувач кафедри вищої математики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
КУНЦЯК Ярослав Васильович,
ПрАТ «Науково-дослідне і конструкторське бюро бурового інструменту», м. Київ,
генеральний директор;

доктор технічних наук, доцент
СУДАКОВ Андрій Костянтинович,
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», м. Дніпро,
професор кафедри техніки розвідки родовищ
корисних копалин.

Захист відбудеться *«05» жовтня 2018 року о 10 годині* на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 в Івано–Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано–Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15.

Автореферат розіслано *« ____ » вересня 2018 року.*

**Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент**



І. М. Ковбасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Україна задовольняє свої паливно-енергетичні потреби за рахунок власних ресурсів менше, ніж на половину. Тому існує потреба у розробці нових родовищ вуглеводнів.

Найбільш перспективним у цьому напрямку залишається введення в експлуатацію економічної зони України в Чорному морі, де за оцінками експертів 2/3 прогнозованих запасів умовного палива знаходяться в умовах глибокого моря. На сьогоднішній день ведеться розробка родовищ, що залягають в умовах неглибокого моря, однак перспективи розробки глибоководної акваторії в умовах гострого дефіциту енергоресурсів є великими.

Процес буріння свердловин на морі вирізняється декількома ключовими факторами, зокрема неможливістю забезпечення стаціонарного положення бурової установки в процесі поглиблення свердловини, що призводить до потреби використання спеціальних технічних засобів для нівелювання негативного впливу хитавиці плавучої бурової установки на роботу водовіддільної і бурильної колон. Однак на практиці повністю нівелювати вплив хитавиці ПБУ на роботу бурової системи не вдається. Тому актуальною науково-практичною задачею є визначення закономірностей впливу параметрів хвилювання моря і хитавиці плавучої бурової установки на величини динамічних зусиль в перерізах водовіддільної і бурильної колон, а також на величину динамічного зусилля на долоті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи використані при виконанні комплексної цільової програми Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу «Науково-організаційні засади нарощення видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікація постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» спрямованої на реалізацію «Програми енергоощадливості», складової Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є побудова імітаційних моделей елементів бурової механічної системи для удосконалення технологічних процесів при бурінні свердловин на морі з плавучих засобів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі: вивчення сучасного стану досліджень процесу буріння свердловин на морі з плавучих засобів; створення ієрархічної моделі динаміки роботи механічної системи плавучої бурової установки; вивчення впливу хитавиці плавучої бурової установки на деформований стан водовіддільної колони; дослідження роботи бурильного інструменту при бурінні свердловин на морі.

Об'єкт дослідження – динаміка плавучої бурової установки та її вплив на процес буріння свердловини.

Предмет дослідження – математична модель роботи механічної системи «плавуча бурова установка – водовіддільна колона – бурильний інструмент» при поглибленні свердловин на морі із плавучих засобів.

Методи дослідження. Методичною основою досліджень є комплексний підхід до отримання моделей елементів і взаємозв'язків між ними. Побудову аналітичних моделей водовіддільної і бурильної колон здійснено шляхом

складання диференціальних рівнянь з частинними похідними, крайових та початкових умов. Математичні моделі систем утримання водовіддільної і бурильної колон описані сукупністю алгебраїчно-диференціальних рівнянь роботи їхніх окремих елементів та зв'язків між ними. Побудова імітаційної моделі бурових систем велась у об'єктно-орієнтованому середовищі моделювання фізичних систем на основі мови моделювання Modelica. Розв'язок отриманих моделей здійснено компілятором мови Modelica на основі системи розв'язку диференціально-алгебраїчних рівнянь CVODES. Аналіз отриманих часових рядів і визначення основних закономірностей впливу параметрів хвилювання моря і хитавиці плавучої бурової установки на динамічні характеристики бурильного інструменту проводились в середовищах комп'ютерної алгебри.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в подальшому розвитку підходів по дослідженню динаміки роботи бурових систем при бурінні свердловин на морі. При цьому:

1. Створено нову ієрархічна модель бурової системи для буріння свердловин на морі.

2. Створено нову модель динаміки системи «бурове судно – водовіддільна колона», яка враховує конструктивні та технологічні особливості роботи натяжної системи водовіддільної колони.

3. Уточнено оцінку впливу зміни зусилля натягу верхнього кінця водовіддільної колони на її напружено-деформований стан.

4. Створена нову нелінійну імітаційну модель динаміки механічної системи «бурове судно – компенсатор вертикальних коливань – бурильна колона», яка враховує одночасний вплив на динаміку системи хитавиці бурового судна, деформації водовіддільної колони та збурення породоруйнівного інструменту.

Практичні значення одержаних результатів.

1. Розроблено бібліотеку OffshoreDrill у мові моделювання Modelica, використання якої дозволяє створювати експрес-методом імітаційні моделі роботи довільних бурових систем.

2. Розроблено «Інструкція по використанню бібліотеки моделювання «OffshoreDrill» для створення імітаційних моделей роботи бурової системи при поглибленні свердловини на морі», впроваджену в навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) при виконанні магістерських робіт за спеціальностями 184 «Гірництво» і 185 «Нафтогазова інженерія та технології» та передану для впровадження в ДАТ «Чорноморнафтогаз».

3. Розроблено конструкцію бурового регулятора для накопичення і перерозподілу енергії поздовжньо-крутильних коливань бурильного інструменту. Одержано патент України на корисну модель № 114949.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно виконано огляд літературних джерел [15], виокремлено об'єкт досліджень, обрано методи дослідження, проведено декомпозицію досліджуваного об'єкта та його структурних елементів, підібрано математичні моделі, що описують їх роботу,

розроблено уточнену модель поздовжньо-поперечних коливань водовіддільної колони [8] та наближену математичну модель для врахування впливу деформації водовіддільної колони на поздовжні коливання бурильної колони. Розроблено бібліотеку імітаційних моделей окремих структурних елементів в мові Modelica [9] та у співавторстві з науковим керівником Мойсишиним В. М. розроблено інструкцію з її застосування [16] (описано імітаційні моделі, наведені в бібліотеці Offshore-Drill, особистий внесок 50%). Із застосуванням бібліотеки автором самостійно створено імітаційні моделі роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони з пасивним [4] та гібридним [5] режимами роботи, натяжної системи водовіддільної колони [2, 3, 10], систем «Бурове судно – натяжна система водовіддільної колони – водовіддільна колона» [7, 13, 14], «бурове судно – компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони – бурильна колона – долото» [6, 7, 11, 12] та проведено імітаційне моделювання їх роботи. Виконано аналіз отриманих результатів та досліджено вплив зміни жорсткості наддолотного амортизатора на осьову силу на долоті [7] та величину впливу деформації водовіддільної колони на поздовжні коливання бурильної колони за різної висоти нерегулярного хвилювання моря.

У співавторстві з Мойсишиним В. М. і Векериком В. І. розроблено конструкцію бурового регулятора (запропоновано використовувати планетарний роликотвинтовий механізм і хвильові пружини, зроблено креслення виробу на основі схеми його роботи, особистий внесок 33%) [17]. Побудована математичну модель роботи бурового регулятора та розглянуто окремі питання щодо проектування його планетарного роликотвинтового вузла [1] (виведено кінематичну умову роботоздатності планетарного роликотвинтового вузла, особистий внесок 50%).

Апробація роботи. Основні положення роботи обговорювались та доповідались на: Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів "Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії - 2012" (Івано-Франківськ, 2012); 11-тому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2013); Молодіжному форумі «Технічні і математичні науки: актуальні напрямки наукових досліджень XXI століття» (Воронеж, 2015); 4-тій Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика – 2015" (Івано-Франківськ, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 2016); Другій всеукраїнській науковій конференції «Прикладні задачі математики», присвяченій 55-річчю кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2016); спільних наукових семінарах кафедр прикладної механіки і вищої математики ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2015-2018 р.р.); наукових семінарах та засіданнях кафедри буріння нафтових і газових свердловин ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2012-2018 р.р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з яких 1 стаття у виданні включеному до міжнародних науково-метричних баз, 7 статей у фахових виданнях України, 6 тез наукових конференцій і симпозиумів, 1 патент

на корисну модель. При цьому 8 статей і 4 тези доповідей опубліковані одноосібно.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, основних висновків, списку використаних джерел, що містить 186 найменування та 6 додатків. Роботу викладено на 186 сторінках машинописного тексту, вона містить 73 рисунки і 12 таблиць.

Автор дисертації висловлює щире вдячність науковому керівнику доктору технічних наук, професору Мойсичину Василю Михайловичу за постійну допомогу та увагу при виконанні роботи, а також доктору технічних наук, професору Векеріку Василю Івановичу за сприяння, слушні поради і методичну допомогу під час виконання досліджень.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому** розділі проведено аналіз конструкцій плавучих бурових установок, що застосовують для буріння свердловин в умовах глибокого моря, та здійснено огляд підходів щодо моделювання та дослідження динаміки роботи їх окремих елементів.

Одним із напрямків подальшого нарощення видобутку нафти і газу є розробка родовищ глибоководного шельфу. На сьогоднішній день введені в експлуатацію бурові судна і напівзанурені бурові платформи здатні проводити буріння в умовах моря глибиною до 10000 футів. Однак висока вартість оренди даних установок призводить до того, що існує постійне зацікавлення у розширенні можливостей їх використання і збільшенні продуктивності їх роботи. Для цього варто розуміти природу і характер динамічних процесів, що виникають в буровій системі у процесі буріння свердловини на морі.

Особливістю роботи плавучої бурової установки (ПБУ) при бурінні свердловин в умовах глибокого моря є неможливість забезпечення незмінного положення ПБУ відносно гирла свердловини внаслідок хитамиці ПБУ і потреба подолання значної товщі води під дією хвилювання моря і морських течій. Хоча сучасні ПБУ мають спеціальне обладнання однак повністю нівелювати вплив хвилювання моря і хитамиці ПБУ не вдається. У процесі поглиблення свердловини в умовах глибокого моря на бурильну колону діють два незалежних чинники збурень: перші викликані хвилюванням моря, а другі породжені взаємодією породоруйнівного інструменту з вибоєм свердловини.

Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день через складність і багатофакторність досліджуваної системи більшість досліджень зосереджено на вивченні особливостей роботи окремих структурних елементів ПБУ шляхом побудови і аналізу їх математичних та імітаційних моделей роботи. Так багато зарубіжних дослідників зупинялись на дослідженнях динаміки роботи водовіддільної колони, натяжної системи водовіддільної колони, компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони з пасивним, гібридним і активним режимами роботи та інших структурних елементів ПБУ.

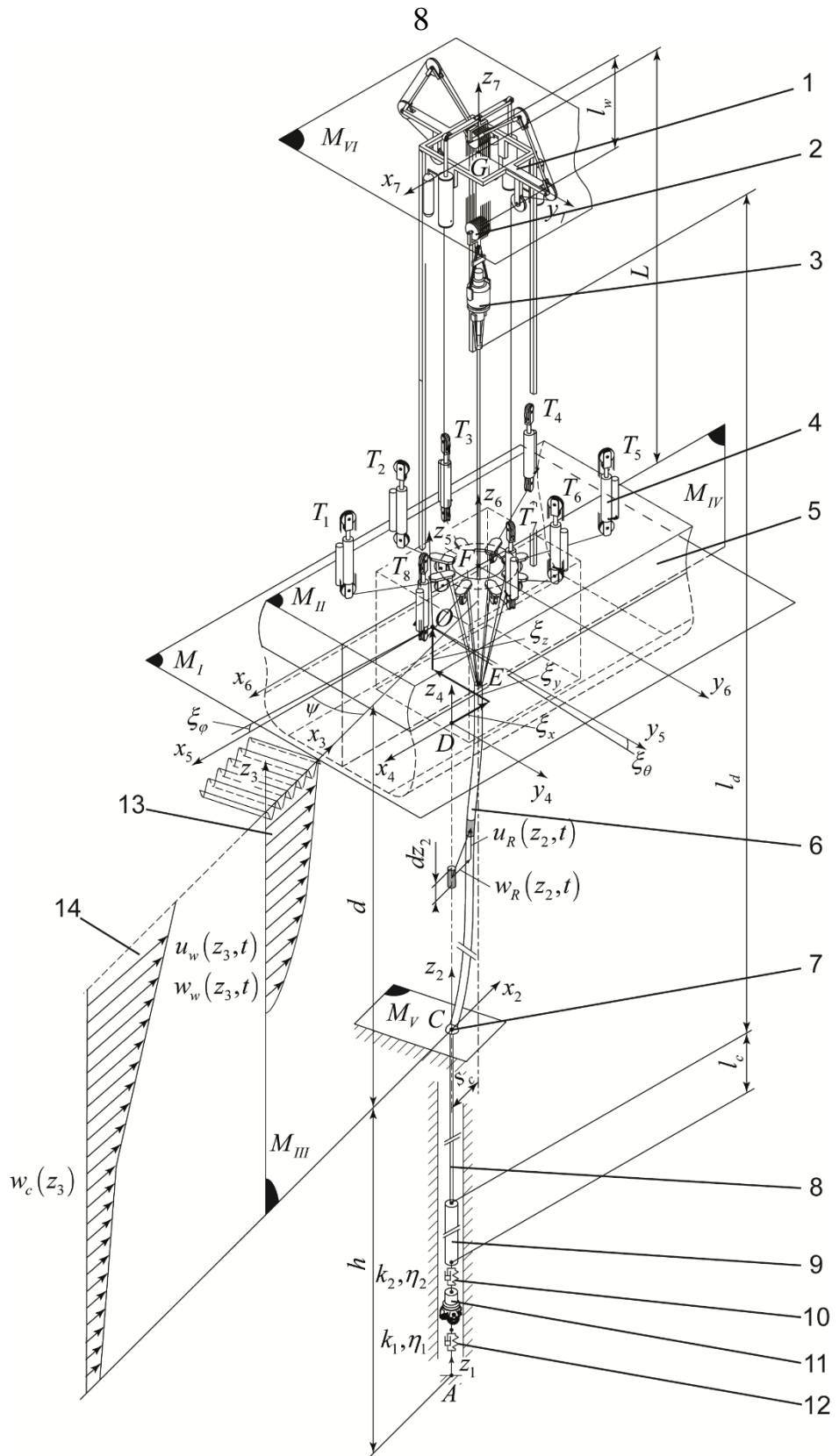
Можна виділити два основних напрямки для подальшого розвитку досліджень динаміки ПБУ. Перший напрямок полягає в удосконаленні існуючих математичних моделей роботи окремих елементів бурової системи шляхом врахування впливу нових факторів і уточнення опису існуючих, а другий – в побудові узагальненої моделі роботи декількох структурних елементів бурової установки, що дозволило б дослідити їх взаємний вплив на роботу один другого.

Тому визначення і вивчення залежностей між динамічними зусиллями на долоті, а також в перерізах водовіддільної і бурильної колон з одного боку та параметрами хвилювання моря і хитавиці ПБУ з другого боку є актуальною науково-практичною задачею.

У другому розділі, виходячи із особливостей досліджуваного об'єкту, обґрунтовано вибір методу досліджень, який полягає у побудові абстрагованої, мультидоменної, ієрархічної імітаційної моделі системи, фізичну модель якої зображено на рис. 1, у мові моделювання Modelica з подальшим аналізом результатів імітаційного моделювання її роботи за різних вхідних параметрів. Для цього здійснено декомпозицію досліджуваної системи і отримано її багаторівневу структурну схему, а також здійснено підбір математичних моделей окремих структурних елементів і описано порядок їх поєднання між собою. Окрім цього розроблено уточнену математичну модель поздовжньо-поперечних коливань водовіддільної колони, яка додатково враховує вплив зміни натягу верхнього кінця водовіддільної колони та інерційні і фрикційні силові фактори, що виникають внаслідок протікання промивальної рідини деформованою частиною водовіддільної колони. Вона описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned}
 & -\rho_R \frac{\partial^2 u_R}{\partial t^2} - \rho_R k_b g + E_R A_R \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\frac{\partial u_R}{\partial z_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z_1} \right)^2 \right) - \lambda_R \frac{\partial u_R}{\partial t} + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z_1} (p_e A_e - p_i A_i) + \rho_f \frac{f}{D_i} \frac{v_f^2}{2} A_i + f_{M\tau} = 0; \\
 & -E_R I_R \frac{\partial^4 w_R}{\partial z^4} - \rho_R \frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + E_R A_R \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\frac{\partial u_R}{\partial z_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z_1} \right)^2 \right) \frac{\partial w_R}{\partial z} + \\
 & + E_R A_R \left(\frac{\partial u_R}{\partial z_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z_1} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 w_R}{\partial z^2} - \rho_f A_i \left(\frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + v_f^2 \frac{\partial^2 w_R}{\partial z_1^2} + 2v_f \frac{\partial^2 w_R}{\partial z \partial t} \right) + f_{Mn} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де u_R і w_R – поздовжнє і поперечне переміщення перерізу водовіддільної колони; ρ_R – маса одиниці довжини водовіддільної колони; ρ_f і ρ_w – густина промивальної рідини і морської води; v_f – швидкість протікання промивальної рідини водовіддільною колоною; k_b – коефіцієнт компенсування ваги колони поплавками; S_i – периметр отвору водовіддільної колони; λ_R – зведений коефіцієнт структурного демпфування; A_R , A_i і A_e – площа отвору і січення



1 – компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони;
 2 – кронблок; 3 – верхній привід; 4 – натяжна система водовіддільної колони;
 5 – бурове судно; 6 – водовіддільна колони; 7 – нижній сферичний шарнір;
 8 – колони бурильних труб; 9 – колони обважнених бурильних труб;
 10 – наддолотний амортизатор; 11 – долото; 12 – порода на вибої;
 13 – нерегулярне хвилювання моря; 14 – морські течії.
 Рисунок 1 – Розрахункова схема досліджуваного об'єкту

водовіддільної колони та їх сума; p_e і p_i – зовнішній і внутрішній тиски, що діють на колону з боку моря і промивальної рідини, та обчислюється за наступними формулами:

$$p_e = \rho_w (d - z_2) g;$$

$$p_i = \rho_f (d - z_2) g + \rho_f \frac{v_f^2}{2} + \rho_f \frac{f v_f^2}{D_i} (d - z_2), \quad (2)$$

f_{Mn} і $f_{M\tau}$ – гідродинамічні сили, що виникають внаслідок омивання водовіддільної колони потоком рідини і обчислюються за допомогою рівняння Морісона:

$$f_{M\tau} = C_{M\tau} \frac{\rho_w \pi D_{ei}^2}{4} \frac{\partial u_w}{\partial t} + C_{D\tau} \frac{\rho_w D_{ed}}{2} \left(u_w - \frac{\partial u_R}{\partial t} \right) \left| u_w - \frac{\partial u_R}{\partial t} \right|;$$

$$f_{Mn} = C_{Mn} \frac{\rho_w \pi D_{ei}^2}{4} \frac{\partial w_w}{\partial t} - C_A \frac{\rho_w g \pi D_e^2}{4} \frac{\partial^2 w_R}{\partial t^2} + C_{Dn} \frac{\rho_w D_{ed}}{2} \left(w_w - \frac{\partial w_R}{\partial t} \right) \left| w_w - \frac{\partial w_R}{\partial t} \right|, \quad (3)$$

де D_{ei} , D_{ed} – зведені діаметри інерції і опору водовіддільної колони; C_{Mn} і $C_{M\tau}$ – нормальний і тангенціальний коефіцієнти інерції; C_{Dn} і $C_{D\tau}$ – нормальний і тангенціальний коефіцієнти опору; C_A – коефіцієнт приєднаної маси води.

Гранична умова кріплення низу водовіддільної колони описуються наступними рівняннями:

$$u_R|_{z_1=0} = 0, w_R|_{z_1=0} = 0, \frac{\partial^2 w_R}{\partial z_1^2} \Big|_{z_1=0} = 0. \quad (4)$$

Гранична умова кріплення верхнього кінця водовіддільної колони мають вигляд:

$$\frac{\partial^2 w_R}{\partial z_1^2} \Big|_{z_1=L} = 0, E_R I_R \frac{\partial^3 w_R}{\partial z_1^3} \Big|_{z_1=L} = Q_R(t), E_R A_R \left(\frac{\partial u_R}{\partial z_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R}{\partial z_1} \right)^2 \right) \Big|_{z_1=L} = T_R(t). \quad (5)$$

де T_R і Q_R – вертикальна і горизонтальна складові зусилля натягу, прикладені до верхнього кінця водовіддільної колони з боку натяжної системи.

Поздовжні коливання секції бурильних труб, що знаходяться у свердловині, описуємо рівняннями вигляду:

$$E_d A_d \frac{\partial^2 u_d(z_1, t)}{\partial z_1^2} = \rho_d \frac{\partial^2 u_d(z_1, t)}{\partial t^2} + \eta_d \frac{\partial u_d(z_1, t)}{\partial t} + k_b \rho_d g, \quad (6)$$

а коливання бурильних труб, що знаходяться у водовіддільній колоні, описуємо рівняннями, які враховують переносний рух, що надається бурильній колоні з боку водовіддільної:

$$E_d A_d \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\frac{\partial u_d(z_1, t)}{\partial z_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_R(z_3, t)}{\partial z_1} \right)^2 \right) - \rho_d \frac{\partial^2 u_d(z_1, t)}{\partial t^2} - \eta_d \frac{\partial u_d(z_1, t)}{\partial t} - k_b \rho_d g = 0, \quad (7)$$

де $u_d(z_1, t)$ – переміщення перерізу z_1 секції бурильної колони; A_d – площа поперечного перерізу бурильної колони; ρ_d – маса одиниці довжини бурильної

колони; k_b – коефіцієнт плавучості; η_d – коефіцієнт в'язкого тертя; E_d – модуль Юнга матеріалу секції бурильної колони.

Також у розділі наведено порядок декомпозиції компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони підкронблочного типу, представлено математичні моделі роботи талевої системи та М-подібного важільного механізму запобігання зношенню талевого кантату, подано математичні моделі гідравлічних і пневматичних елементів підсистем компенсатора та алгоритм управління його активної підсистеми. Наведено порядок декомпозиції натяжної системи водовіддільної колони, що складається з восьми одинарних натяжних пристроїв, представлено математичні моделі структурних елементів натяжного пристрою водовіддільної колони та описано порядок розрахунку довжини тросів між палубою ПБУ і натяжним кільцем водовіддільної колони, визначено величини і напрямки зусиль, що прикладаються до верхнього кінця водовіддільної колони з боку натяжної системи.

У третьому розділі подано порядок створення імітаційної моделі системи «Бурове судно – натяжна система водовіддільної колони – водовіддільна колона» та проведено аналіз результатів імітаційного моделювання її роботи за різної висоти нерегулярного хвилювання моря та наявності або відсутності морських течій. Одержані результати порівняно із результатами класичної моделі поперечних коливань водовіддільної колони з незмінним у часі зусиллям натягу.

Аналіз результатів імітаційного моделювання досліджуваної системи показав, що внаслідок особливостей роботи натяжної системи спостерігається виражена нелінійна зміна зусилля натягу верхнього кінця водовіддільної колони. Її максимальна величина складає 5,8 % до статичної при хвилюванні моря $H_{1/3} = 3,0$ м і зростає до 7,6 % при хвилюванні моря $H_{1/3} = 6,0$ м. Це вказує на те, що натяжна система є одним із основних чинників, який впливає на динаміку роботи водовіддільної колони. Подання натяжної системи за допомогою спрощених еквівалентних моделей в часовій і частотній областях не дозволяє з достатньою точністю охарактеризувати її роботу. На рис. 2 наведено розподіл максимальних Δw_R^{\max} і середньоквадратичних σ_{w_R} значень амплітуд поперечних коливань водовіддільної колони по її довжині, отриманих за результатами імітаційного моделювання при різній висоті хвилювання моря і відсутності або наявності морської течії.

Отримані результати свідчать, що розроблена модель демонструє вищі розрахункові значення поперечних коливань в перерізах водовіддільної колони. Так, величина середньоквадратичного відхилення σ_{w_R} для критичного січення 55,86 м при хвилюванні моря $H_{1/3} = 6,0$ м, обчислена за запропонованою моделлю, є на 22 % більшою у порівнянні із класичною моделлю, а для критичного січення 39,9 м при $H_{1/3} = 3,0$ м – більшою на 30,3%. Подібні результати зберігаються і для інших критичних січень водовіддільної колони. В середньому розходження між отриманими значеннями σ_{w_R} для двох моделей по всій довжині водовіддільної колони складає 47,2% при висоті хвилювання моря $H_{1/3} = 4,0$ м,

41,3 % при $H_{1/3} = 5,0$ м та 37,3% при $H_{1/3} = 6,0$ м і має подальшу тенденцію для зменшення при зростанні висоти хвилювання моря.

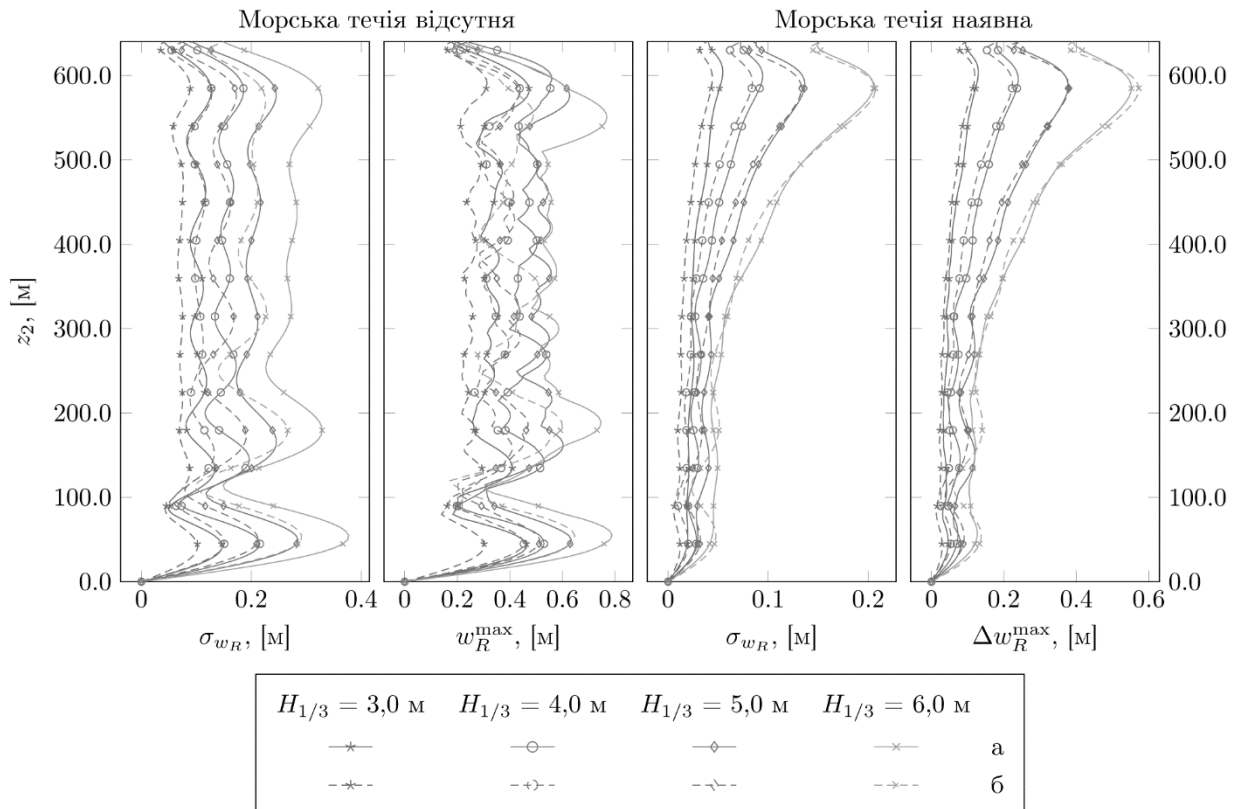


Рисунок 2 – Розподіл середньоквадратичних і максимальних значень амплітуди поперечних коливань по довжині водовіддільної колони, що обчислені за пропонованою (а) і класичною (б) моделлю за різної висоти хвилювання моря і наявності або відсутності морської течії

Аналогічні результати отримано і при аналізі розподілу згинаючих моментів по довжині водовіддільної колони.

У четвертому розділі описано процес побудови імітаційних моделей системи «бурове судно – компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони – бурильна колона – наддолотний амортизатор – долото – порода на вибої» для вивчення динаміки її роботи за різної висоти нерегулярного хвилювання моря, пасивного і гібридного режимів роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони, з урахуванням або нехтуванням впливу деформації водовіддільної колони на роботу бурильної колони. На рис. 3 подано графічні представлення створених імітаційних моделей.

Отримані результати показують, що внаслідок особливості роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони виникає динамічна складова зусилля на гаку, яка складає $\pm 1,8\%$ від статичної при хвилювання моря до $H_{1/3} = 2,0$ м і зростає до $\pm 4,3\%$ при $H_{1/3} = 6,0$ м. Абсолютні значення динамічної складової осьової сили на гаку талевого блоку при пасивному режимі компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони складають 72 кН при $H_{1/3} = 2,0$ м, 97 кН при $H_{1/3} = 4,0$ м і 155 кН при $H_{1/3} = 6,0$ м (статичне зусилля на гаку рівне 1,61 МН). При гібридному режимі роботи компенсатора

вертикальних переміщень бурильної колони переміщення його гака не перевищує 0,01 м при всіх значеннях величини вертикальної хитавиці, а величина динамічної складової не перевищує 60 кН.

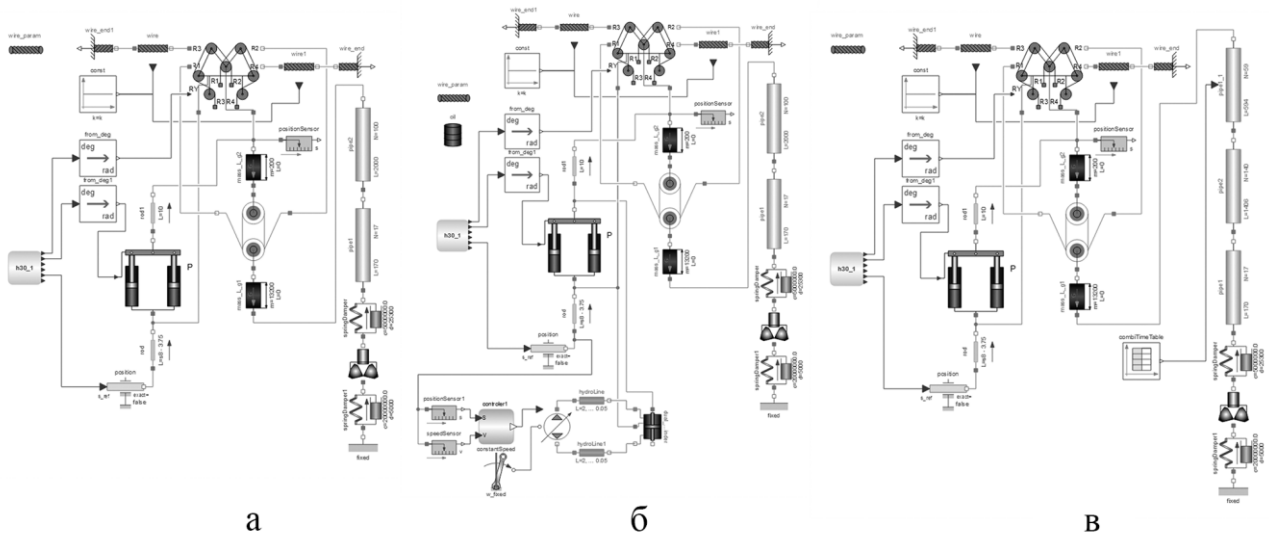


Рисунок 3 – Графічні представлення імітаційних моделей в мові Modelica для дослідження роботи системи «ПБУ–компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони – бурильна колона» з пасивним (а) та гібридним (б) режимами роботи компенсатора та врахуванням впливу деформації водовіддільної колони (в)

Аналіз розподілу максимальних і середньоквадратичних значень поздовжніх переміщень і динамічної складової осьової сили по довжині бурильної колони при пасивному і гібридному режимах роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони показує, що величина поздовжніх переміщень лінійно спадає від верхнього кінця бурильної колони до її низу, однак швидкість спадання залежить від величини переміщення гака талевого блоку компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони. Згідно з результатами розрахунків при хвилюванні моря $H_{1/3} = 1.2$ м величина максимального переміщення перерізу бурильної колони над віброзахисним пристроєм у 5,75 рази менша за переміщення її верхнього кінця, а максимальні зміщення долота у 5,79 разів менші за переміщення верхнього кінця БК при хвилювання моря $H_{1/3} = 4.0$ м, ці співвідношення складають 8,42 і 20,42 разів відповідно, а при хвилюванні моря $H_{1/3} = 6.0$ м – 10,25 і 28,77 разів. При гібридному режимі роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони поздовжні коливання, викликані хитавицею ПБУ, гасяться у верхній частині бурильної колони і відчутного впливу на роботу породоруйнівного інструменту не чинять.

Дослідження впливу деформації водовіддільної колони на динаміку роботи бурильної колони засвідчують (рис 4) значне збільшення розмаху поздовжніх коливань в січenni колони на рівні гирла свердловини. В подальшому амплітуди поздовжніх коливань і динамічних складових осьових сил

зменшуються по довжині колони, а тому їхній вплив на роботу долота незначний (зростання коефіцієнта динамічності не перевищує 5%).

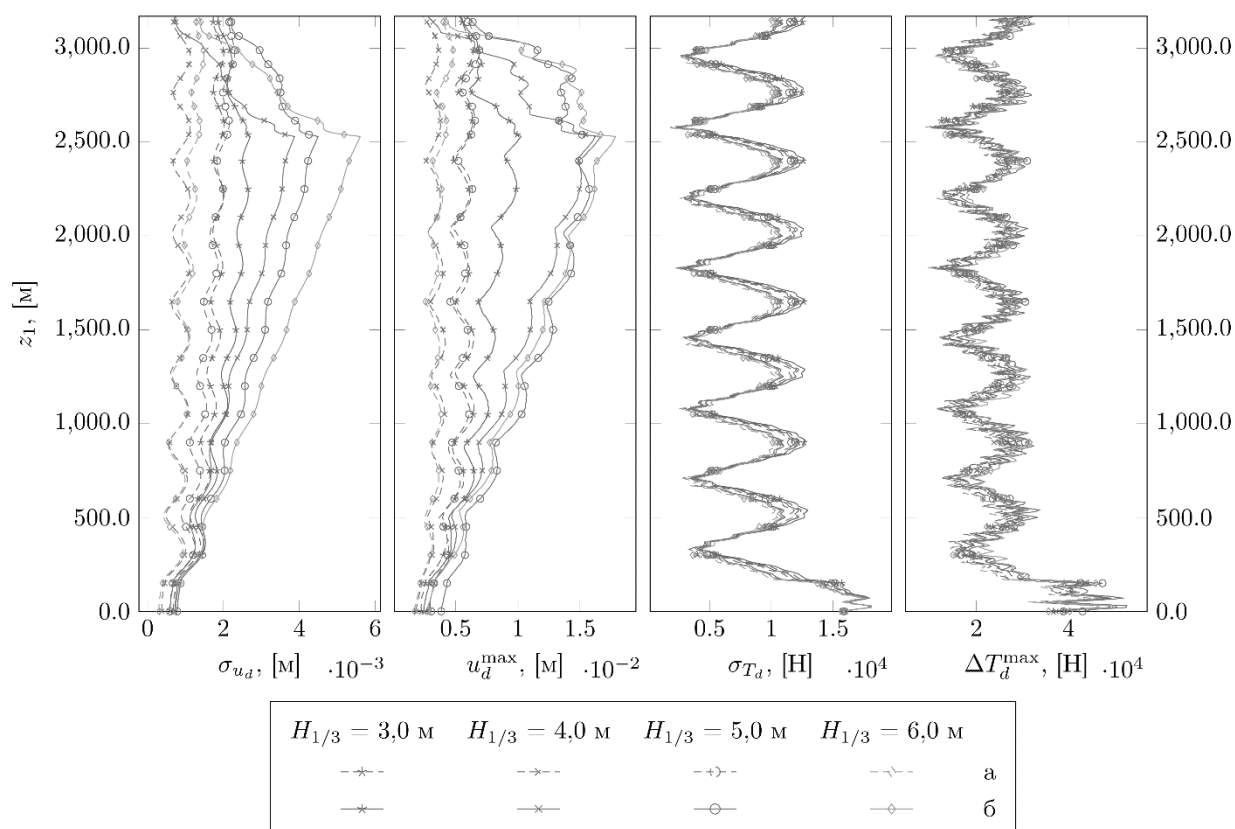


Рисунок 4 – Розподіл максимальних і середньоквадратичних значень амплітуди динамічної складової поздовжніх коливань і осьової сили в перерізах бурильної колони по її довжині за різної висоти хвилювання моря з урахуванням впливу деформації водовіддільної колони (б) або його нехтуванням (а)

Проведено дослідження впливу зміни жорсткості наддолотного амортизатора на коефіцієнт динамічності роботи породоруйнівного інструменту за різної висоти нерегулярного хвилювання моря і пасивному режимі роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони, які наведені на рис 5. Отримані результати показують, що вплив вертикальної хитавиці ПБУ на бурильну колону призводить до збільшення коефіцієнта динамічності роботи долота на 0,12–0,35 одиниці. При збільшенні жорсткості наддолотного амортизатора з 2,5 до 10 МН/м відбувається лінійне зменшення впливу хитавиці ПБУ на коефіцієнт динамічності долота на 5-7%. Зменшення жорсткості наддолотного амортизатора веде до зменшення величина динамічної складової осьової сили на долоті. Це відбувається за рахунок зменшення впливу енергії «грунтової» частоти долота, в результаті чого значно зростає вплив вертикальної хитавиці, яка змінює свій внесок з 15% (при значущій висоті хвиль 3,0 м і жорсткості амортизатора 10 МН/м) до 85% (при значущій висоті хвиль 6,0 м і жорсткості амортизатора 2,5 МН/м). Вплив зміни жорсткості наддолотного амортизатора на величину зменшення амплітуди коливань, спричинених вертикальною хитавицею ПБУ, має різнонаправлений характер і залежить від

величини хитавиці. Так, при збільшенні жорсткості амортизатора з 2,5 до 10 МН/м внесок хитавиці ПБУ в динамічну складову осьової сили на долоті змінюється від -8,4% при $H_{1/3} = 3,0$ м до +0,4% при $H_{1/3} = 6,0$ м.

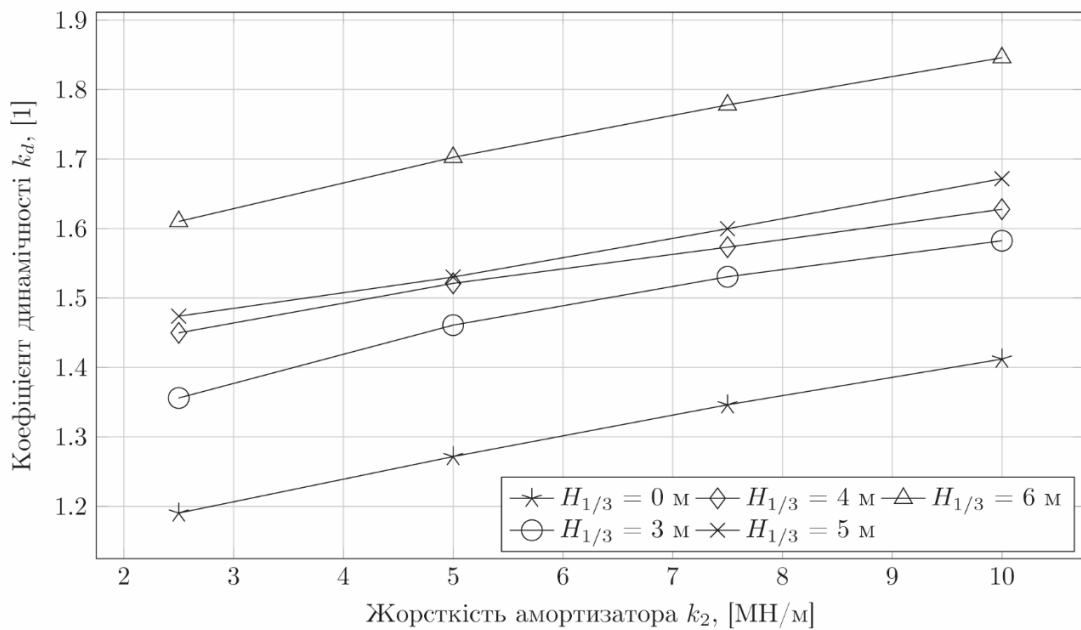


Рисунок 5 – Зміна коефіцієнта динамічності роботи долота від жорсткості наддолотного амортизатора і висоти хвилювання моря

У п'ятому розділі описано розроблену бібліотеку OffshoreDrill в мові моделювання Modelica, яка є каталогом імітаційних моделей окремих структурних елементів плавучої бурової. Використання даної бібліотеки дає змогу створювати експрес-методом імітаційні моделі довільної бурової установки чи її частини і проводити дослідження усталених та перехідних процесів їх роботи, дозволяє оцінювати динамічні характеристики бурових механічних систем, вибирати більш ефективні параметри віброзахисних пристроїв та інших елементів компонування, змінювати режими роботи долота для забезпечення зменшення собівартості бурових робіт.

Окрім цього подано опис розробленої конструкції бурового регулятора, принципову схему якого зображено на рис. 6. Даний регулятор дозволяє накопичувати і перерозподіляти енергію, яка підводиться до породоруйнівного інструменту у вигляді поздовжніх і крутильних коливань, володіє значно ширшими можливостями регулювання роботи та меншими втратами енергії, що обумовлено використанням хвильових пружин та планетарного роликівинтового механізму з короткими двоступінчастими роликами.

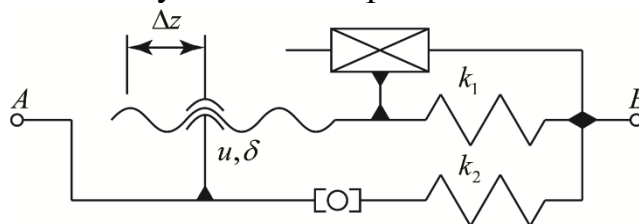


Рисунок 6 – Розрахункова схема бурового регулятора

Запропоновано математичну модель роботи бурового регулятора та розглянуто окремі питання проектного розрахунку його планетарного роликівинтового вузла виходячи з умов роботоздатності механізму і конструктивних обмежень.

В розділі наведено подальші шляхи використання отриманих результатів дисертаційної роботи, запропоновано порядок розрахунку зведеної статичної осьової сили на долоті для обчислення прогнозованої механічної швидкості буріння свердловин на морі за існуючими моделями, описано «Інструкцію з використання бібліотеки моделювання "OffshoreDrill" для створення імітаційних моделей роботи бурової системи при поглибленні свердловин на морі», передану для впровадження в ДАТ «Чорноморнафтогаз».

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій на підставі результатів узагальнених теоретичних досліджень роботи бурильного інструменту при поглибленні свердловин на морі з плавучих засобів створено нові імітаційні моделі для дослідження динамічних процесів, що відбуваються в буровій системі. Отримано такі основні результати:

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що основними методами досліджень динаміки роботи бурової системи при поглибленні свердловин в умовах глибокого моря є математичне та імітаційне моделювання через високу вартість і суттєві обмеження для проведення лабораторних і натурних експериментів. Питання оцінки впливу динаміки роботи водовіддільної колони та компенсатора вертикальних переміщень на коливання бурильної колони є маловивченими.

2. Отримана уточнену аналітичну модель поздовжньо-поперечних коливань водовіддільної колони, що враховує: взаємний вплив поздовжніх і поперечних коливань; непостійність зусилля натягу верхнього кінця водовіддільної колони; гідродинамічні зусилля внаслідок омивання колони морською водою; сили ваги; інерційні сили, спричинені переміщенням водовіддільної колони; інерційні і фрикційні сили, що виникають внаслідок протікання промивальної рідини деформованою частиною колони. Запропонована аналітична модель поздовжньо-поперечних коливань водовіддільної колони дозволяє визначати характер її деформацій та величину сил і моментів, що виникають в поперечних перерізах за різних значень хвилювання моря і хитавиці плавучої бурової установки.

Отримано математичну модель поздовжніх коливань бурильної колони, що враховує в першому наближенні вплив поперечних зміщень водовіддільної колони на динаміку бурильної колони і роботу породоруйнівного інструменту.

Розроблено нову узагальнену імітаційну модель для дослідження динаміки бурової системи при поглибленні вертикальної свердловини в умовах глибокого моря, яка включає хитавицю бурового судна, натяжну систему водовіддільної колони, що складається з восьми одинарних натяжних пристроїв, багатосекційну водовіддільну колону, компенсатор вертикальних коливань бурильної колони підкронблочного типу з пасивним і гібридним режимами

роботи, багатосекційну бурильну колону, віброзахисний та породоруйнівний інструменти. Отримана модель дає змогу досліджувати динаміку роботи за одночасної дії на систему нерегулярного хвилювання моря, морських течій та збурень, викликаних взаємодією долота з вибоєм.

3. Отримані результати імітаційного моделювання показали, що:

- обчислені максимальні і середньоквадратичні значення поперечних переміщень і згинаючих моментів, що виникають у водовіддільній дають на 20-35% більші значення в критичних перерізах у порівнянні із класичною моделлю поперечних коливань водовіддільної колони за типових умов роботи бурової установки, зі збільшенням висоти хвилювання моря і швидкості морських течій розходження результатів двох моделей зменшується;

- ефективність роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони з пасивним режимом роботи нелінійно залежить від величини вертикальної хитавиці. Динамічна складова зусилля на гаку сягає $\pm 1,8\%$ від статичної за умови мертвого ходу КВПБК при хвилювання моря $H_{1/3} = 1,2$ і $2,0$ м до $\pm 4,3\%$ при $H_{1/3} = 6,0$ м. Величина мертвого ходу компенсатора може змінюватись на 10-15% при зміні швидкості обертання долота, що обумовлено додатковим внеском «грунтових» коливань долота в подолання статичних сил тертя в ущільненнях гідроциліндрів;

- ефективність роботи компенсатора вертикальних переміщень з гібридним режимом роботи є в 10-20 раз кращою у порівнянні з пасивним режимом. Величина переміщення крюка талевого блоку при гібридному режимі роботи не перевищує $0,01$ м при всіх значеннях величини вертикальної хитавиці, а величина динамічної складової не перевищує 60 кН.

4. За результатами досліджень роботи бурильного інструменту при бурінні свердловин на морі встановлено, що:

- ефективність роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони з пасивним режимом роботи нелінійно залежить від величини вертикальної хитавиці плавучої бурової установки;

- величина мертвого ходу компенсатора для досліджуваного компонування бурильної колони змінюється в діапазоні від $0,06$ до $0,08$ м при зміні швидкості обертання долота від 50 до 200 хв⁻¹, що обумовлено додатковим внеском коливань, генерованих породоруйнівним інструментом, у подолання статичних сил тертя в ущільненнях гідроциліндрів;

- динамічна складова зусилля натягу верхнього кінця бурильної колони при зростанні висоти хвилювання моря від $H_{1/3} = 1,2$ м до $H_{1/3} = 6,0$ м змінюється в діапазоні від $3,6\%$ до $8,6\%$ статичного зусилля натягу;

- коефіцієнт динамічності роботи долота при нерегулярному хвилюванні моря (від $H_{1/3} = 3,0$ м до $H_{1/3} = 6,0$ м) і пасивному режимі роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони є на 12-35% більшим у порівнянні із роботою аналогічної системи при абсолютно спокійному морі ($H_{1/3} = 0,0$ м);

- урахування впливу деформації водовіддільної колони на роботу бурильної колони при нерегулярному хвилюванні моря (від $H_{1/3} = 3,0$ м до $H_{1/3} = 6,0$ м) і гібридному режимі роботи компенсатора вертикальних переміщень

бурильної колони призводить до зростання на 5-12% коефіцієнта динамічності роботи породоруйнівного інструменту.

5. Запропоновано конструкцію бурового регулятора, що накопичує і перерозподіляє енергію поздовжніх і крутильних коливань, що підводиться до долота з боку бурильної колони.

6. Створено бібліотеку імітаційних моделей окремих структурних елементів плавучої бурової установки OffshoreDrill в мові Modelica і розроблено інструкцію з її використання для створення експрес методом імітаційних моделей роботи довільних бурових систем.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Мойсишин, В. М. Створення віброзахисного пристрою для регулювання динаміки колони сталевих бурильних труб і долота / В. М. Мойсишин, О. О. Слабий. *Металофізика і новітні технології*. – 2018. – Т.40, №4. С. 541–550. DOI: 10.15407/mfint.40.04.0541 (Фахове видання, включене до міжнародної наукометричної бази Scopus).

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Слабий, О. О. Дослідження роботи компенсатора вертикальних переміщень бурильної колони із активною підсистемою замкнутого циклу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. №4(57). С.27–35.

6. Слабий, О. О. Дослідження динаміки роботи бурильної колони при бурінні свердловини із плавучої установки. *Нафтогазова енергетика*. 2015. №2(24). С.7–15.

7. Слабий, О. О. Дослідження впливу жорсткості наддолотного амортизатора на динаміку роботи долота при поглибленні свердловини з плавучих засобів за нерегулярного хвилювання моря. *Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число*. 2016. №1(33). С.236–247.

8. Слабий, О. О. Дослідження напружено-деформованого стану водовіддільної колони при нерегулярному хвилюванні моря. *Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число*. 2017. №1(37). С.206–216.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Слабий, О. О. Розробка бібліотеки на мові Modelica для дослідження блочних механізмів бурових систем. *Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії - 2012»*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. С.246–250.

10. Слабий, О. О. Побудова математичної моделі механізмів з'єднання водовіддільної колони з плавучою буровою установкою. *11-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові. Тези доповідей*. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2013. С.85–86.

11. Слабий, О. О. Дослідження поздовжніх коливань бурильної колони при поглибленні вертикальної свердловини із бурового судна в умовах глибокого моря. *Матеріали 4-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика - 2015»*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. С.59–62.

12. Слабий, О. О. Изучение влияния качки бурового судна на осевое усилие на долоте при углублении вертикальных скважин в условиях глубокого моря. *Молодёжный форум: технические и математические науки: Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2015. С.483.

13. Никифорчин, Ю. М., Слабий О. О. Розробка імітаційної моделі поздовжніх коливань водовіддільної колони. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» ПМ – 2016*. Івано-Франківськ, 2016. С.145–148.

14. Мойсишин, В. М., Слабий, О. О. Побудова математичної моделі поперечних коливань водовіддільної колони. *Друга всеукраїнська наукова конференція «Прикладні задачі математики»*. Тези доповідей. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. С.60–63.

Список матеріалів, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Слабий, О.О. Дослідження динаміки бурової системи під час буріння свердловин на морі (огляд). *Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка*. Число. 2013. №1(21). С.256–320.

16. Мойсишин, В. М., Слабий, О. О. Інструкція з використання бібліотеки моделювання «OffshoreDrill» для створення імітаційних моделей роботи бурової системи при поглибленні свердловин на морі. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 73 с.

17. Слабий, О. О., Мойсишин, В. М., Векерик, В. І. Регулятор буровий 10/17/2016. – 4 с. – Патент на корисну модель №114949.

АНОТАЦІЯ

Слабий О.О. Динаміка бурильного інструменту при поглибленні свердловин на морі з плавучих засобів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дана дисертаційна робота присвячена вивченню особливостей динаміки роботи бурової системи, що проводить поглиблення свердловини в умовах глибокого моря за нерегулярного хвилювання моря і дії морських течій.

В роботі розглянуто побудову імітаційної моделі в мові моделювання Modelica системи, що включає нерегулярне хвилювання моря і морські течії, бурове судно, натягну систему водовіддільної колони, водовіддільну колону, компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони, бурильну колону, наддолотний амортизатор, породоруйнівний інструмент та породу на вибої. Для цього було здійснено декомпозицію досліджуваної системи, розроблено її структурну схему, підібрано математичні моделі її структурних елементів, розроблено уточнену модель поздовжньо-поперечних коливань водовіддільної колони і математичну модель поздовжніх коливань бурильної колони, що дає змогу в першому наближенні враховувати вплив деформації водовіддільної колони на поздовжні коливання бурильної колони.

Розроблено нову конструкцію бурового регулятора, що дозволяє накопичувати і перерозподіляти енергію, яка підводиться до породоруйнівного інструменту в вигляді поздовжніх і крутильних коливань. Пристрій характеризується ширшою можливістю налаштування і зменшеними втратами енергії завдяки застосування планетарного роликотвинтового вузла і хвилових пружин.

Ключові слова: плавуча бурова установка, вібрації, водовіддільна колона, бурильна колона, компенсатор вертикальних переміщень бурильної колони, віброзахисний інструмент.

АННОТАЦИЯ

Слабий О. О. Динамика бурильного инструмента при углубленные скважин на море с плавучих средств - Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.10 – Бурение скважин. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2018.

Данная диссертационная работа посвящена изучению особенностей динамики работы буровой системы осуществляющей бурение скважины в условиях глубокого моря при нерегулярном волнении моря и действии морских течений.

На основе анализа полученных результатов имитационного моделирования работы рассматриваемой системы при различных входных параметрах проанализированы особенности динамики ее работы. Установлено,

что динамическая составляющая силы натяжения верхнего конца водоотделяющей колонны может составлять до 8% от статической и имеет выраженный нелинейный характер. Учет изменения усилия натяжения на поперечные колебания водоотделяющей колонны привел к получению на 20-30% больших значений амплитуд поперечных колебаний и изгибающих моментов в критических сечениях водоотделяющей колонны при 2-6 бальном волнении моря по сравнению с классической моделью поперечных колебаний. Однако с увеличением высоты волнения моря и скорости морских течений расхождение между значениями амплитуд, полученных по этим двум моделям уменьшается. Величина динамической составляющей усилия натяжения на крюке компенсатора вертикальных перемещений бурильной колонны может составлять до 9% от статического при пассивном режиме и не превышает 2% при гибридном режиме работы. Влияние волнения моря на работу долота при пассивном режиме работы компенсатора вертикальных перемещений бурильной колонны и наличии наддолотного амортизатора в компоновке бурильной колонны выражается в увеличении коэффициента динамичности работы долота на 0,12 - 0,35 единицы по сравнению с работой аналогичной системы при абсолютно спокойном море.

Разработана новая конструкция бурового регулятора, который позволяет накапливать и перераспределять энергию, подводимую к породоразрушающему инструменту в виде продольных и крутильных колебаний. Устройство характеризуется широкой возможностью настройки и уменьшенными потерями энергии благодаря применению планетарного роликвинтового узла и волновых пружин.

Ключевые слова: плавучая буровая установка, вибрации, водоотделяющая колонна, бурильная колонна, компенсатор вертикальных перемещений бурильной колонны, виброзащитный инструмент.

ABSTRACT

Slabyi O.O. Dynamics of a drill tool with deep wells on the sea from floating means - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis of the Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) scientific degree by speciality 05.15.10 – Drilling of wells – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas of the Ministry of education and science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2018.

This thesis is devoted to the study of the peculiarities of the dynamics of the drilling system operating well drilling in the deep sea conditions in the case of irregular sea thrill and the effects of sea currents.

The paper considers the construction of the simulation model in the simulation model of the system, which includes irregular sea and sea excitement, a boat, a tension system of the separating column, a separating column, a compensator for vertical displacements of a drill column, a drill string, a perpendicular shock absorber, a rock cutting tool and a rock on a hole . To do this, the decomposition of the investigated system was made, its structural scheme was developed, the mathematical models of its structural elements were selected, the refined model of longitudinal-transverse

oscillations of the separation column and the mathematical model of longitudinal oscillations of the drill column were developed, which makes it possible, in the first approximation, to take into account the influence of deformation of the separating column on the longitudinal fluctuations of the drill column.

A new structure of a drill regulator designed to accumulate and redistribute the energy supplied to the drill bit in the form of longitudinal and torsional oscillations, characterized by a wider range of adjustment and reduced energy losses due to the use of a planetary roller screw hub and wave springs, has been developed.

Key words: floating drilling unit, vibration, riser, drill string, drill string heave compensator, shock absorber tool.