

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ШЕВЧУК ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 539.3

**МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ КРУЖЛЯННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН НА
ОСНОВІ ФРИКЦІЙНИХ ТА НЕГОЛОНОМНИХ МОДЕЛЕЙ**

05.23.17 – будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного транспортного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гуляєв Валерій Іванович,
Національний транспортний університет,
завідувач кафедри вищої математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Перельмутер Анатолій Вікторович,
Науково-виробниче об'єднання SCAD SOFT,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук

Фернаті Павло Вікторович,
Інститут механіки НАН України,
старший науковий співробітник
відділу механіки повзучості

Захист відбудеться ”____” _____ 2016 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. Суворова, 1, зал засідань (ауд. 333).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного транспортного університету (01103, Україна, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42).

Автореферат розісланий ”____” _____ 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Дослідження коливальних і хвильових явищ у пружних протяжних стержневих конструкціях при дії різного роду силових, інерційних і кінематичних збурень складає одну з класичних проблем будівельної механіки. Вона знаходить широке застосування при освоєнні техніки і технологій буріння нафтових і газових свердловин. У зв'язку з великими глибинами сучасних свердловин і складними діями на колони в процесі буріння комбінацій поздовжніх сил тяжіння, крутних моментів, гіроскопічних сил інерції обертального руху колони, сил інерції від внутрішніх потоків промивної рідини, а також через неконсервативний характер взаємодії низу бурильної колони з оброблюваною породою, режими проходки свердловин можуть супроводжуватися аварійними ситуаціями, пов'язаними в тому числі із самозбудженням коливань кружляння долота. Ці коливання викликані складними фрикційними та контактними силами тиску поверхні долота на руйнівну породу. Вони мають складну нерегулярну форму, яка пов'язана з перекошуванням долота по поверхні дна свердловини і можуть призвести до критичних станів системи або викликати порушення умов експлуатації елементів бурильної колони і стати причиною її руйнування. Результатами натурних спостережень встановлено, що до 40 % загальної протяжності всіх каналів нафтових і газових свердловин буряться в умовах перебігу коливань кружляння. Дотепер відсутні методи фізичного і комп'ютерного моделювання вказаних ефектів і виявлення критичних динамічних станів цих систем. Така ситуація пов'язана з високою складністю досліджуваних явищ, яка спричинена великою довжиною бурильної колони, складною механічною схемою розглянутої системи, а також умовами контактної або кінематичної (неголономної) взаємодії її долота з поверхнею дна свердловини.

Невід'ємною основною частиною задачі прогнозування критичних станів бурильної колони при її коливанні кружляння є побудова математичної моделі, яка описує її динамічну поведінку в процесі функціонування і може бути використана для прогнозування її позаштатних ситуацій.

У зв'язку з високими показниками аварійності бурильного виробництва, великими економічними втратами і високим рівнем забруднення оточуючого середовища, що спостерігається в останній час, досить важливими стають питання теоретичного моделювання можливих критичних динамічних станів, які супроводжують процеси проходки глибоких свердловин. Тому можна вважати, що питання математичного моделювання явищ самозбудження коливань кружляння глибоких бурильних колон і встановлення загальних закономірностей їхнього перебігу складають актуальну проблему будівельної механіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри вищої математики Національного транспортного університету, а також у рамках держбюджетних тем № 11 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і шельфових зонах морських акваторій» (2012 – 2014 рр., номер державної реєстрації 0112U000137) і № 38

«Комп'ютерне прогнозування і запобігання аварійним режимам буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин на етапах їх проектування і проходки» (2015 – 2017 рр., номер державної реєстрації 0115U002270).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в постановці задач про фрикційне і кінематичне (неголономне) самозбудження коливань кружляння пружних бурильних колон, що обертаються, в критичних і закритичних станах і встановленні найбільш загальних закономірностей їхнього перебігу.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні задачі:

- розробити динамічні моделі згинальних коливань пружних бурильних колон, що обертаються, з урахуванням фрикційних взаємодій доліт різної геометричної форми з дном свердловини;
- розробити динамічні моделі згинальних коливань пружних бурильних колон, що обертаються, з урахуванням кінематичних (неголономних) взаємодій доліт різної геометричної форми з дном свердловини;
- на базі методів числового інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними розробити методику комп'ютерного дослідження переходів системи від режимів стаціонарних обертань до режимів автоколивань кружляння і побудувати та дослідити форми і стійкість цих коливань;
- вивчити вплив характерних параметрів системи (фрикційних або неголономних режимів взаємодії долота з породою, геометричних і жорсткісних параметрів колони, ефектів її попереднього напруження силами тяжіння і крутними моментами, кутової швидкості обертання, геометричних форм доліт і дна свердловини, що можуть бути обмежені сферичними або еліпсоїдальними поверхнями тощо) на особливості процесів прямого й оберненого кружляння системи.

Об'єктом дослідження є явище самозбудження коливань кружляння пружних бурильних колон, що обертаються, в результаті фрикційної або неголономної взаємодії їхніх доліт із поверхнями дна свердловин.

Предметом дослідження є математичні моделі динаміки згинальних коливань пружних бурильних колон.

Методи дослідження. Для побудови математичних моделей динамічної поведінки колон глибокого буріння при фрикційному або неголономному самозбудженні коливань кружляння використанні рівняння коливань пружних стержневих систем, що обертаються, та нелінійні співвідношення теорії обертального руху твердого тіла. Інтегрування побудованих нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними здійснюється методом скінченних різниць по просторовій координаті з використанням неявної схеми інтегрування за часом.

Достовірність результатів визначається строгістю та коректністю постановок вихідних задач динаміки пружних стержневих систем; вибором методу скінченних різниць для інтегрування рівнянь згинання бурильних колон і використанням неявної схеми інтегрування за часом, що має обчислювальну стійкість; практичною перевіркою збіжності результатів обчислення при різних значеннях числових параметрів задач; відповідністю встановлених

закономірностей загальним властивостям коливань кружляння, відображеним у науковій літературі іншими авторами за результатами експериментальних досліджень, а також якісною узгодженістю результатів розрахунків, які отримані на основі фрикційних та неголономних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Із застосуванням основних положень теорії пружних стержневих систем, а також методів будівельної механіки, нелінійних співвідношень теорії обертального руху твердого тіла та теорії криволінійних поверхонь поставлені нові задачі механіки коливань кружляння пружних бурильних колон при фрикційній або неголономній взаємодії їхніх доліт із поверхнями дна свердловин. Запропоновані нові математичні моделі коливань кружляння, які описуються нелінійними диференціальними рівняннями з частинними похідними.

2. Запропонована нова методика числового інтегрування побудованих нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними.

3. Вперше виконане комп'ютерне моделювання процесів коливань кружляння пружних бурильних колон з використанням розроблених фрикційних і неголономних моделей.

4. За допомогою комп'ютерних обчислень вперше вдалося підтвердити відомі з результатів практичного випробування ефекти прямого й оберненого кружляння долота, які протікають за стійкими та нестійкими траєкторіями, що являють собою збіжні та розбіжні спіралі, а також граничні цикли, багатопелюсткові квітки та багатопроменеві зірки. Вперше теоретично показано, що частота коливань кружляння може перевищувати кутову швидкість обертання бурильної колони.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертації можуть бути використані у вигляді комп'ютерного математичного забезпечення під час проектування і буріння глибоких свердловин. За допомогою розробленого підходу можна підібрати оптимальні режими буріння залежно від характерних параметрів систем.

Отримані в дисертації результати наукових досліджень використовуються ТОВ «ГЕНПРОФБУД» при проектуванні та розрахунках відповідальних конструкцій зі стержневими трубчастими елементами, що піддаються впливу інтенсивних поздовжніх сил і крутних моментів. Вони будуть застосовуватися ТОВ «ГЕНПРОФБУД» також для розробки проектів глибокого буріння.

Результати дисертаційної роботи також можуть бути використані на інших підприємствах нафтової, газової та вугільної промисловостей України при проектуванні технологій прокладання досить глибоких свердловин.

Розроблені в дисертаційній роботі методи комп'ютерного моделювання динамічних процесів у пружних протяжних стержневих конструкціях при дії різного роду силових, інерційних і кінематичних збурень запроваджені в навчальний процес на кафедрі опору матеріалів та машинознавства Національного транспортного університету при викладанні курсу з будівельної механіки транспортних споруд.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень були отримані автором самостійно. Дисертанту належать аналітичні викладки, числова

реалізація на ПК задач механіки й аналіз отриманих результатів. У роботах [1 – 4, 10, 14 – 16] В.І. Гуляєв брав участь у постановці задач та обговоренні отриманих результатів. У роботах [5, 14] співавтором С.М. Худолієм надана допомога у розробці та налаштуванні обчислювального комплексу для проведення комп'ютерного моделювання досліджених процесів. У роботах [4, 6 – 10, 16, 19 – 21] співавтор В.В. Гайдайчук [4, 6 – 7] і О.І. Борщ [5, 9, 10, 16, 19 – 21] брали участь в обговоренні одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що включені в дисертацію, були представлені на наступних міжнародних наукових конференціях і симпозиумах: XV Jubileuszowe Międzynarodowe Sympozjum “Geotechnika - Geotechnics 2012” (Poland, Gliwice – Ustron, 23 – 26 października, 2012); 4th International Conference “Nonlinear Dynamics” (Ukraine, Sevastopol, June, 19-22, 2013); ENOC 2014 8th European Nonlinear Dynamics Conference (Austria, Vienna, July 6-11, 2014); 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові (Україна, Львів, 28-29 травня 2015 р); Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів (Україна, Рівне, 19-22 лютого 2015 р); Математические методы в технике и технологиях – ММТТ – 25 (Украина, Харьков, 2 – 4 октября 2012 г.).

Результати дисертаційної роботи доповідались також на 73-ій науково – практичній конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (Україна, Київ, 3–6 квітня 2012 р.) та на 68 – 72 наукових конференціях Національного транспортного університету (Україна, Київ, 2012 – 2016 рр.).

Публікації. Основний зміст роботи викладено у 23 публікаціях: з них 3 статті [1 – 3] опубліковано в закордонних журналах, 10 робіт [4 – 13] – у фахових виданнях, 1 [15] – у працях міжнародної наукової конференції, 4 [14, 16 – 18] – у тезах міжнародної конференції та 5 [19 – 23] – у збірниках тез наукових конференцій Національного транспортного університету.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел, який містить 181 найменувань. Вона містить 119 сторінок друкованого тексту, 2 таблиці, 122 рисунки. Повний обсяг дисертації становить 203 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. У ньому обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів дисертації. Наведені відомості про апробацію та публікації результатів дослідження.

У першому розділі виконано аналіз технічних і теоретичних аспектів проблеми динаміки коливань кружляння колон глибокого буріння. Дано огляд представлених у науковій літературі результатів досліджень. Показано, що в процесі буріння долото вертикальної бурильної колони піддається динамічному впливу навантажень складної конфігурації, які збурюють її коливання у формі

осьового биття, поперечного биття, крутильних коливань долота і колони, а також коливань кружляння її низу (whirling motion) (рис.1).

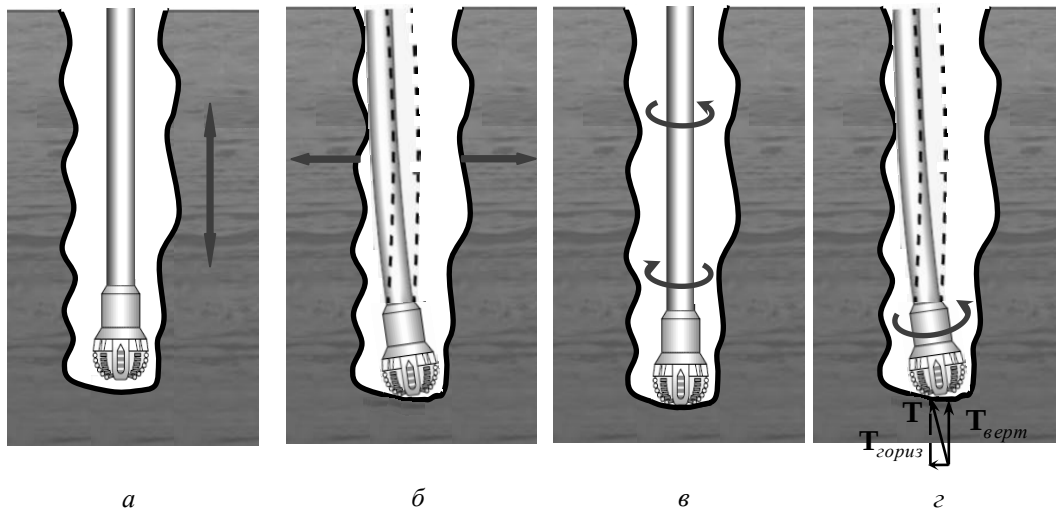


Рисунок 1 – Форми коливань низу бурильної колони: а – осьове биття долота; б – поперечне биття колони; в – крутильні автоколивання долота і колони; г – кружляння низу колони (whirling motion)

Встановлено, що всі ці коливання мають складну структуру, і їхня природа вивчена недостатньо. При цьому найбільш складну форму мають коливання кружляння, при яких долото перекочується і ковзає за складними траєкторіями по низу свердловини. Відзначено, що виділяють два види таких коливань: пряме кружляння, при якому центр долота при його русі навколо осі свердловини рухається в напрямку, який співпадає з напрямом осі бурильної колони, й обернене кружляння, при якому центр долота рухається навколо осі колони в напрямку, протилежному її обертанню.

Наведено аналіз праць дослідників, які внесли істотний вклад у розвиток цих проблем і суміжних з ними напрямків. Поздовжні та крутильні коливання бурильної колони вивчали І. Ю. Агеева, Ф. К. Алиев, В. В. Андрущенко, І. М. Ахметов, Ю. М. Басарыгин, О.І. Борщ, Б. Я. Веремейкин, О.В. Глушакова, В.І. Гуляев, І.М. Гураль, Д. Дэринг, З.Г. Керимов, Н. А. Колесников, К.А. Кулиев, Б. Ливсей, Б.М. Малярчук, М. А. Мислюк, В. М. Мойсишин, В.Н. Радченко, В.Н. Савельев, М.А. Садыхов, Г. М. Саркисов, А.Е. Сароян, Ю.С. Степанов, Р. И. Стефурак, В.С. Тихонов, Г.М. Улитин, Б. Фостер, М. Фрост, Е.В. Харченко, Ф.Л. Шевченко, В. Г. Юртаев, Р.С. Яремійчук, F. Abbassian, V.A. Dunayevsky, H. Ahmadian, S. Nazari, H. Jalali, N. Mihajlović, A.A. Van Veggel, N. Van de Wouw, H. Nijmeijer, H. Ashley, G. Haviland, E.R. Barakat, S.Z. Miska, N.E. Takach, T.B. Benjamin, A.A. Besaisow, M.L. Payne, A.G. Balanov, N.B. Janson, P.V.E. McClintock, A.P. Christoforou, A.S. Yigit, C.M. Liao, N. Vlajic, H. Karki, B. Balachandran, A. Thor Viggo, K. Age, R.W. Tucker, C. Wang, M.A. Vaz, M.H. Patel та інші.

Встановлено, що зазвичай теоретичне моделювання коливань кружляння здійснюється із застосуванням спрощених математичних моделей, в яких вважається, що контакт долота з породою може здійснюватися тільки на бічній поверхні стінки свердловини. Зазначено, що такі моделі мають суттєві недоліки,

оскільки найбільші сили контактної взаємодії долота з поверхнею свердловини мають місце на поверхні дна, а сили притиснення долота до стінки свердловини, як правило, малі. Крім того, такі моделі можуть описувати тільки явища оберненого кружляння долота, які проходить зі швидкістю, меншою від кутової швидкості обертання БК, в той час як експериментальними дослідженнями встановлено, що при згинальних коливаннях бурильної колони можуть мати місце і прямі кружляння, а частота коливань кружляння може більше ніж у 30 разів перевищувати кутову швидкість БК.

Вивченням коливань кружляння на основі спрощеної дискової моделі займалися J.D. Jansen, C.M. Liao, N. Vlajic, H. Karki, B. Balachandran, R.I. Leine, D.H. Van Campen, F. Abdul Majeed, M. Karkoub, K. Vijayan, T.M. Warren, J.F. Brett, C.J. Langeveld, G. Mensa-Wilmot, W.L. Alexander, S.L. Chen, S. Ch. Johnson, H. Ahmadian, A.S. Yigit, A.P. Christoforou, Z. Wen, S.S. Janwadkar, Y. Kovalyshen, N. Vlajic, X. Wu, N. Mihajlović, R.W. Tucker, C. Wang, K.J. Vandiver та інші.

Зроблено висновок про актуальність задачі комп'ютерного моделювання прямих та обернених коливань кружляння бурильної колони із застосуванням фрикційних моделей, коли долото може ковзати по дну свердловини, і неголономних моделей, коли долото перекочується по дну свердловини без проковзування.

У розділі 2 розроблена вдосконалена математична модель пружних коливань бурильної колони, що обертається, при коченні сферичного долота по сферичній і еліпсоїдальній поверхні дна свердловини. Враховані два механізми контактної взаємодії долота і породи, при яких долото може здійснювати кочення по поверхні дна з проковзуванням (фрикційна модель) або виконувати рух у формі кочення з вертінням без проковзування (неголономна модель). Виведені розв'язувальні рівняння пружних згинальних коливань низу бурильної колони при граничних умовах кочення долота по запропонованих схемах.

Для моделювання коливань кружляння системи бурильна колона-долото уявімо колону як довгий трубчастий пружний стрижень, напружений поздовжньою силою T і крутним моментом M_z , що обертається зі сталою кутовою швидкістю ω навколо своєї поздовжньої осі. Дослідимо коливання стрижня в системі координат $Oxyz$, що обертається, відносно осі Oz , направлені вздовж поздовжньої осі недеформованого стрижня (рис. 2). Для розрахунку виділяються дві нижні секції БК (рис. 3) з заданими граничними умовами на кінцях A і C та умовою обпирання в точці B .

Динаміка пружних згинальних коливань бурильної колони описується рівняннями:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(M_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega^2 u -$$

$$- 2(\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega \frac{\partial v}{\partial t} + V^2 \rho_p F_p \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2V \rho_p F_p \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} + (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(M_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega^2 v +$$

$$+ 2(\rho_c F_c + \rho_p F_p) \omega \frac{\partial u}{\partial t} + V^2 \rho_p F_p \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + 2V \rho_p F_p \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} + (\rho_c F_c + \rho_p F_p) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

де $u(z,t)$, $v(z,t)$ – пружні переміщення елемента труби БК у напрямках осей Ox , Oy , відповідно;

EI – жорсткість труби БК при згині;

ρ_c, ρ_p – густини матеріалу труби і промивної рідини, відповідно;

F_c, F_p – площі поперечних перерізів стінки труби і її внутрішнього каналу, відповідно;

t – час.

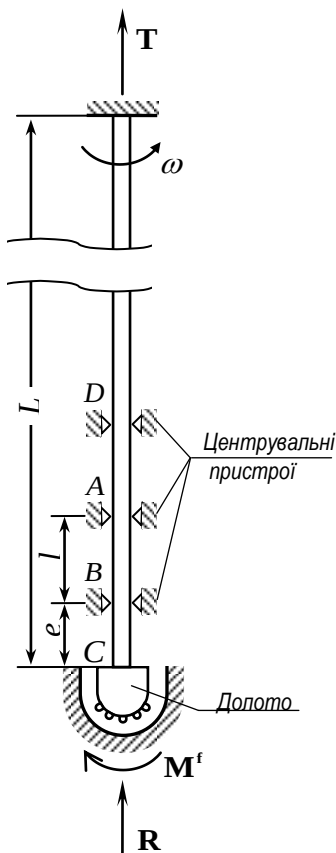
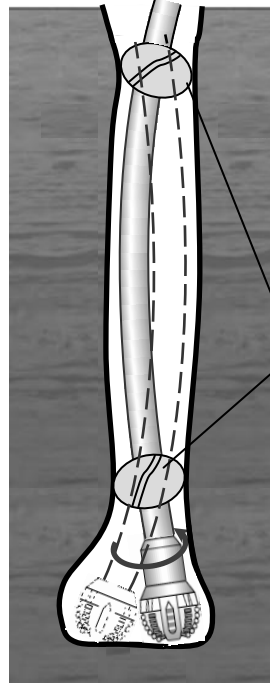
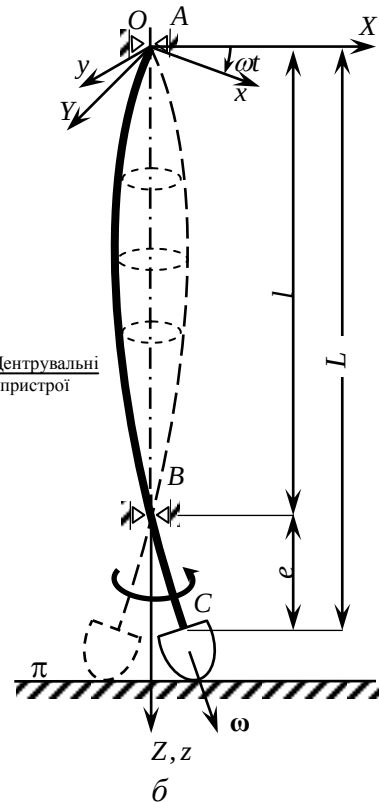


Рисунок 2 – Конструктивна схема бурильної колони в глибокій свердловині



а



б

Рисунок 3 – Структурна (а) і розрахункова (б) схеми коливань кружляння низу бурильної колони

Граничні умови на нижньому кінці колони $z = l + e$ формуються за умови, що збудження коливань кружляння лише розпочинається і долото може рухатися в зазорі між ним і стінкою свердловини не доходячи до неї. При цьому характер кочення долота і красві рівняння в точці C визначаються геометрією поверхонь як самого долота (рис. 4), так і дна свердловини (рис. 5). У загальному випадку вони можуть мати форми різних поверхонь обертання, які приблизно можна апроксимувати сферами або еліпсоїдами. Розглянемо простий випадок,

коли поверхня долота є сферою з радіусом a , а поверхня свердловини – еліпсоїдальною і в окремих випадках сферичною.

Для опису пружного повороту долота вводиться жорстко зв'язана з ним система координат $Cx_1y_1z_1$, осі Cx_1 , Cy_1 , якої при пружній деформації БК повертаються на кути $-v'|_C$ і $u'|_C$, а також права рухома система координат $Gx_2y_2z_2$, початок G якої збігається з точкою дотику поверхонь, вісь Gz_2 є продовженням відрізка CG , а вісь Gy_2 перпендикулярна площині, яка містить вісь OZ і відрізок CG , й орієнтована у напрямі обертання.



Рисунок 4 – Форми доліт

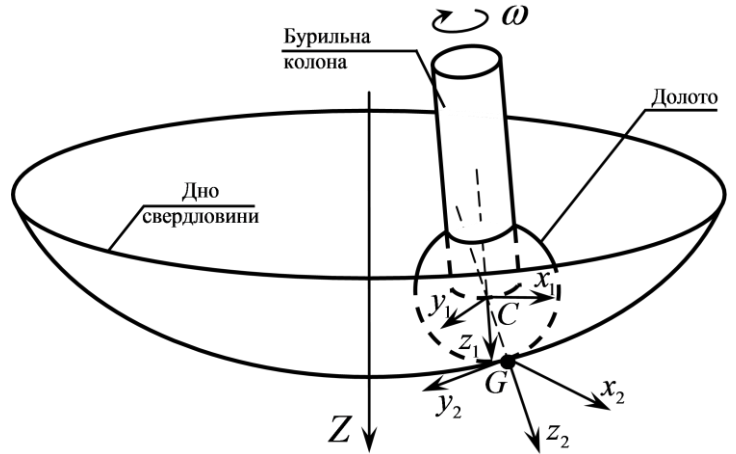


Рисунок 5 – Перекочування сферичного долота по дну свердловини

Умова кочення долота із проковзуванням дозволяє сформулювати в точці C дві групи крайових рівнянь. Перша з них визначає динамічну рівновагу всіх сил і моментів відносно точки G . У векторній формі рівняння рівноваги перерізуювальної сили $\mathbf{Q}$, осьової сили $\mathbf{T}$, сили контактної взаємодії $\mathbf{F}^{кон}$ і сили тертя $\mathbf{F}^{тер}$ має вигляд:

$$\mathbf{Q} + \mathbf{T} + \mathbf{F}^{кон} + \mathbf{F}^{тер} = 0. \quad (2)$$

Після відповідних перетворень це рівняння зводиться до двох скалярних рівнянь:

$$EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \frac{\mu |\mathbf{T}|}{\sqrt{(v_{G,x}^{abc})^2 + (v_{G,y}^{abc})^2}} \left(-\dot{u}' - \omega v' + \frac{c \omega v}{\sqrt{b^2(b-a)^2 + (u^2 + v^2)(c^2 - b^2)}} \right) = 0, \quad (3)$$

$$EI \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} - \frac{\mu |\mathbf{T}|}{\sqrt{(v_{G,x}^{abc})^2 + (v_{G,y}^{abc})^2}} \left(-\dot{v}' + \omega u' - \frac{c \omega u}{\sqrt{b^2(b-a)^2 + (u^2 + v^2)(c^2 - b^2)}} \right) = 0.$$

Друга група рівнянь формулюється на основі теореми про зміну моменту кількостей руху долота відносно точки G :

$$\frac{d\tilde{\mathbf{K}}_G^{(2)}}{dt} + \mathbf{\Omega}_{(2)}^{(2)} \times \mathbf{K}_G^{(2)} = \mathbf{M}_G^{(2)}, \quad (4)$$

де $\mathbf{K}_G^{(2)}$ – момент кількостей руху долота відносно точки G , представлений у системі $Gx_2y_2z_2$;

$\mathbf{M}_G^{(2)}$ – момент сил пружності, які діють на долото, також записаний у цій же системі;

$\mathbf{\Omega}_{(2)}^{(2)}$ – кутова швидкість системи $Gx_2y_2z_2$.

Після деяких спрощень рівняння (4) зводиться до вигляду:

$$\begin{aligned} [u'' + au'''(\cos\alpha + u'\sin\alpha)]\sin\beta + [v'' + av'''(\cos\alpha + v'\sin\alpha)]\cos\beta &= 0, \\ [-u'' - au'''(\cos\alpha + u'\sin\alpha)]\cos\beta + [v'' + av'''(\cos\alpha + v'\sin\alpha)]\sin\beta &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо здійснюється перекочування долота по поверхні свердловини без проковзування, то точка контакту G долота є її миттєвим центром швидкостей. Тоді рівняння (3) втрачає силу, і замість нього використовується умова рівності нулю швидкості точки G долота в формі кінематичних в'язей:

$$\begin{aligned} \dot{u} - \omega v - a \cos\alpha \left(-\dot{u}' - \omega v' + \frac{c\omega v}{\sqrt{b^2(b-a)^2 + (u^2 + v^2)(c^2 - b^2)}} \right) &= 0, \\ \dot{v} + \omega u - a \cos\alpha \left(-\dot{v}' + \omega u' - \frac{c\omega u}{\sqrt{b^2(b-a)^2 + (u^2 + v^2)(c^2 - b^2)}} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки в це рівняння входять не інтегрованим чином похідні за часом, то дана в'язь є неголономною. Тому в цьому випадку виявляється неголономною і математична модель руху долота. Рівняння (1) – (6) доповнюються початковими та граничними умовами в точках A і B . Розв'язання сформульованої задачі здійснюється числовими методами. Для цього похідні по z замінюються скінченними різницями, а інтегрування за часом t здійснюється із застосуванням неявної скінченно-різницевої схеми, яка завжди стійка. Збіжність обчислень перевіряється шляхом порівняння числових результатів при різних кроках дискретизації.

Комп'ютерне моделювання пружних коливань бурильної колони проводилося при різних значеннях кутової швидкості обертання ω , згинальній жорсткості EI , а також геометричних параметрах долота (радіуси долота a) і параметрах сферичного або еліпсоїдального дна свердловини. Методами комп'ютерного моделювання встановлено, що залежно від значень вибраних параметрів можуть здійснюватися прямі й обернені режими обертання системи, а також випадки, коли долото здійснює вертіння, залишаючись у контакті відносно деякої нерухомої точки дна.

Побудовані форми коливань кружляння долота в нерухомій і рухомій системах координат. Показано, що траєкторії руху долота можуть мати вигляд

спіралей, що розширюються (нестійкий рух) або звужуються (стійкий рух), а також граничних циклів, при яких точка контакту рухається по колу певного скінченного радіуса. У деяких випадках траєкторії руху долота набувають вигляду багатопелюсткових квіток, які характеризуються великими значеннями прискорень руху і тому становлять небезпеку для системи.

На рис.6 представлені траєкторії руху сферичного долота по еліпсоїдальній поверхні дна свердловини при $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$, $a = 0,12 \text{ м}$, $b = 0,22 \text{ м}$, $c = 0,18 \text{ м}$, $l = 8 \text{ м}$, $e = 1 \text{ м}$. Як видно, для всіх значень коефіцієнтів тертя, починаючи з деякого початкового збудження, долото в кінцевому результаті рухається по спіральній кривій, прагнучи до стану, в якому бурильна колона стає прямолінійною, а долото займає положення в центральній точці на осі обертання. Тому такий режим є стійким і найбільш сприятливим для здійснення процесу буріння. Деякі винятки мають режими руху при малих значеннях коефіцієнта тертя ($\mu = 0,2$ і $\mu = 0,5$, позиції а і б на рис.6). У цьому випадку фрикційний контакт між долотом і дном свердловини є слабким, і сил тертя виявляється недостатньо для швидкого зменшення сил пружності в бурильній колоні. Проте через деякий час перехідний режим коливань долота заспокоюється, і воно також по спіралі починає наближатися до осі обертання. Вважалось, що при граничних значеннях коефіцієнта тертя ($\mu \geq 10$) проковзування між контактуючими тілами відсутнє і між ними реалізується неголономна модель контакту. Траєкторія руху при такому припущенні наведена на рис. 6, е. Вона майже співпадає з траєкторіями руху, побудованими для фрикційних моделей при $\mu = 10$ і $\mu = 30$ (рис.6, г, д).

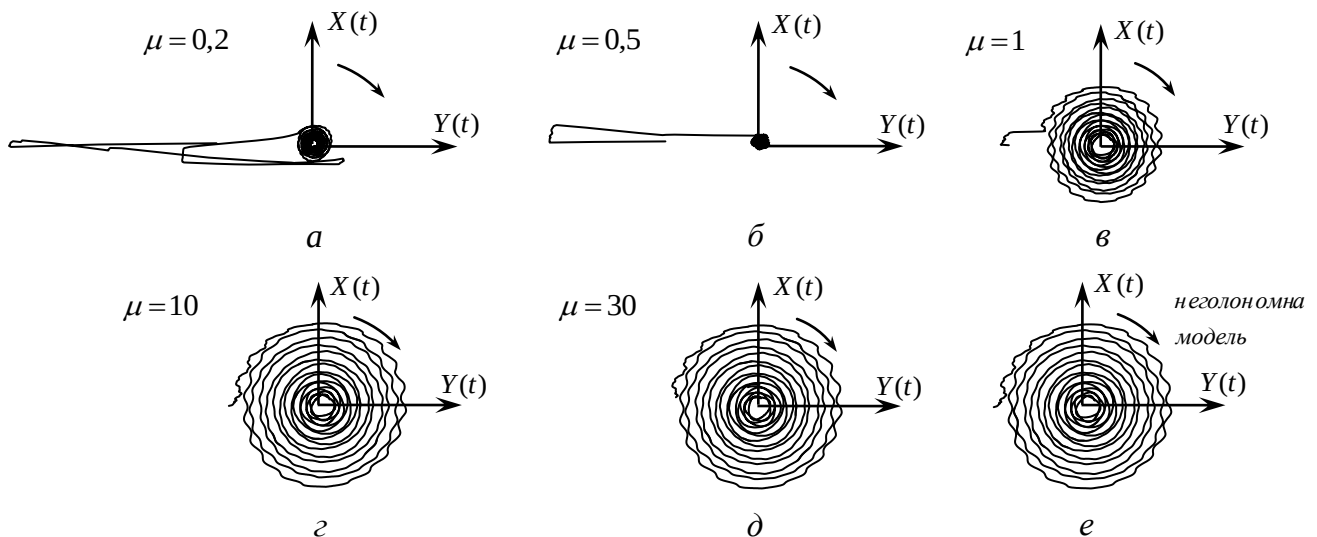


Рисунок 6 – Траєкторії руху сферичного долота по еліпсоїдальній поверхні дна свердловини ($T = -1 \cdot 10^5 \text{ Н}$, $M_z = -1 \cdot 10^4 \text{ Н·м}$, $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$): а – д – фрикційні моделі, е – неголономна модель

У результаті цих рухів долота бурильна колона деформується і починає здійснювати пружні згинальні коливання. На рис.7 показана форма коливань $u(z)$ двох нижніх секцій колони. Видно, що найбільші переміщення і згинальні моменти мають місце в середині більшого нижнього прольоту. На рис.8

показаний графік зміни сили тертя $F_Y^{тер}$ у площині YOZ залежно від часу t , яка являє собою перерізувальну силу на кінці колони і є джерелом збурення її коливань. Як видно, згідно з рис.6, амплітуда цих коливань зменшується з часом.

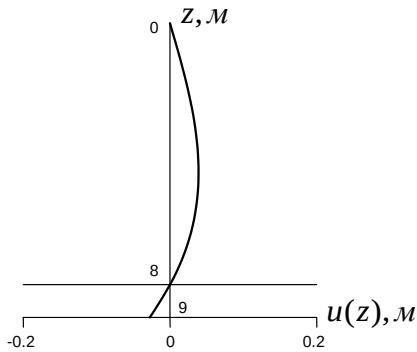


Рисунок 7 – Форма згинальних коливань бурильної колони

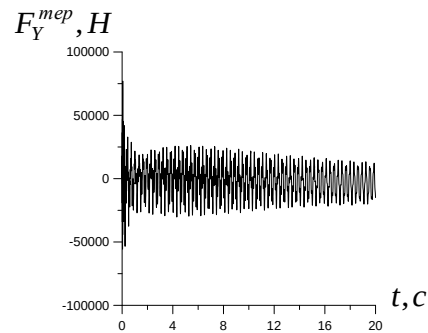


Рисунок 8 – Графік зміни сили тертя $F_Y^{тер}(t)$

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання дозволяє зробити висновок, що для розглянутої системи пружної бурильної колони з долотом, яке перекочується дном свердловини, сили тертя відіграють принципово іншу роль, порівняно з випадками простих дисипативних систем. У звичайних системах із рухомими елементами конструкцій, що труться, здійснюється дисипація кінетичної енергії в результаті її перетворення в теплову енергію і подальшого відводу її із системи. Проте в системі бурильна колона-долото, що обертаються, сили тертя між долотом і поверхнею дна свердловини відіграють зовсім іншу роль, оскільки ці сили примушують долото навпаки здійснювати вимушений рух по дну свердловини, віддалятися від осі обертання і переходити в режим усталених або неусталених, які блукають відносно осі обертання, коливань. У таких випадках ці сили можуть сприяти підводу додаткової енергії від джерела обертання БК до долота і збудженню руху. Вказані режими можна розцінювати як режими кінематичного самозбудження коливань системи за рахунок дії, викликані силами тертя.

У **третьому розділі** поставлена задача про кочення з проковзуванням продовгуватих і сплюснутих доліт по плоскій горизонтальній поверхні дна свердловини. З урахуванням кінематичних і динамічних умов кочення еліпсоїда обертання побудовані крайові рівняння для співвідношень (1) у формі рівнянь рівноваги сил:

$$EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \mu |T| \frac{\dot{u} - \omega v + \dot{u}' r_z - \omega r_y}{\sqrt{(v_x^{a\delta c})^2 + (v_y^{a\delta c})^2}} = 0, \quad (7)$$

$$EI \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} - \mu |T| \frac{\dot{v} + \omega u + \dot{v}' r_z + \omega r_x}{\sqrt{(v_x^{a\delta c})^2 + (v_y^{a\delta c})^2}} = 0,$$

і рівнянь рівноваги моментів:

$$EI \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + EI \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} r_z + Tr_y = 0,$$

(8)

$$-EI \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} r_z - Tr_x = 0,$$

що діють на тверде еліпсоїдне тіло обертання (рис. 9).

Тут величини r_x , r_y визначаються через півосі a і b еліпсоїда.

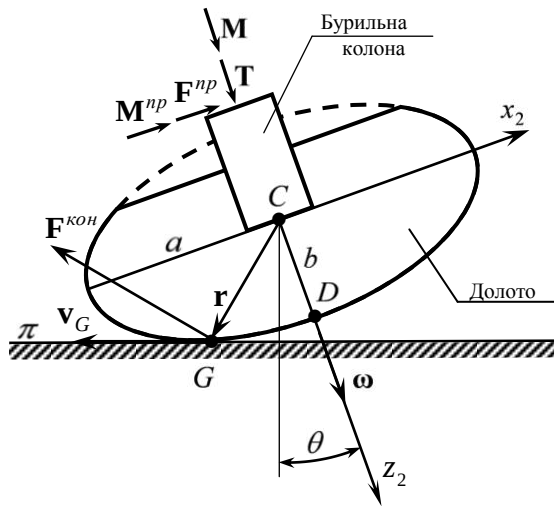


Рисунок 9 – Схема сил, які діють на відокремлене еліпсоїдне долото в площині нахилу

Для розв'язання побудованої системи рівнянь розроблена обчислювальна система, яка враховує різні значення коефіцієнтів тертя, а також геометричні та жорсткісні параметри системи. В результаті проведеного комп'ютерного моделювання показано, що збільшення сил фрикційної взаємодії та діючих на долото осьових стискуючих сил зумовлює більш упорядковані та складні форми траєкторій руху долота, а збільшення жорсткісних характеристик системи дозволяє стримувати

фрикційні збурення і стабілізувати рух системи. При цьому коливання кружляння бурильної колони з еліпсоїдними долотами сплюснутої форми реалізуються за більш складними і непередбачуваними траєкторіями.

У **четвертому розділі** розроблена математична модель самозбудження коливань кружляння бурильних колон при неголономному коченні еліпсоїдних доліт. Вона прийнятна для випадків, коли сили фрикційного зчеплення між поверхнями долота і свердловини виявляються великими, а згинальна жорсткість бурильної колони порівняно мала. Тоді при складанні математичної моделі руху долота необхідно рівняння фрикційної взаємодії (7) замінити рівняннями кінематичного (неголономного) контакту долота з дном свердловини. Ці рівняння записуються у формі:

$$\dot{u} - \omega v + \dot{u}' \sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} + \omega \frac{(b^2 - a^2) \sin \theta_x \cos \theta_x}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta_x + b^2 \cos^2 \theta_x}} = 0,$$

(9)

$$\dot{v} + \omega u + \dot{v}' \sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} + \omega \frac{(b^2 - a^2) \sin \theta_y \cos \theta_y}{\sqrt{a^2 \sin^2 \theta_y + b^2 \cos^2 \theta_y}} = 0.$$

При цьому рівняння (8) динамічної рівноваги моментів відносно точки контакту зберігають свій вигляд.

За допомогою представленої моделі досліджені випадки неголономного кочення доліт у формі продовговатих і сплюснутих еліпсоїдів обертання. Показано, що для них реалізуються рухи за досить складними формами з траєкторіями у вигляді багатопелюсткових квіток (рис.10, а, б), зірок з великим числом променів (рис.10, в), а також спіральних траєкторій (рис. 11, а – в) і траєкторій із граничними циклами (рис. 11, г).

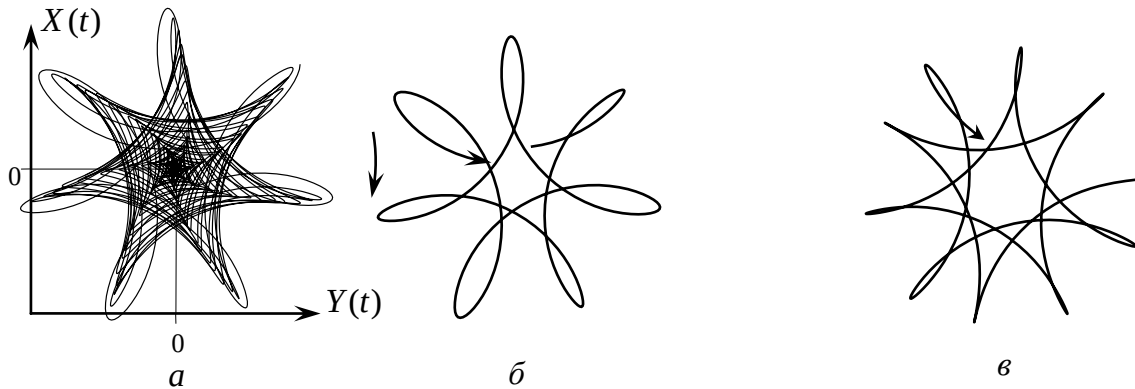


Рисунок 10 – Траєкторії руху сплюснутого долота в нерухомій системі $OXYZ$ ($T = -1 \cdot 10^5$ Н, $\omega = 10$ с $^{-1}$): а – б – $M_z = -1 \cdot 10^5$ Н·м, в – $M_z = -1 \cdot 10^4$ Н·м

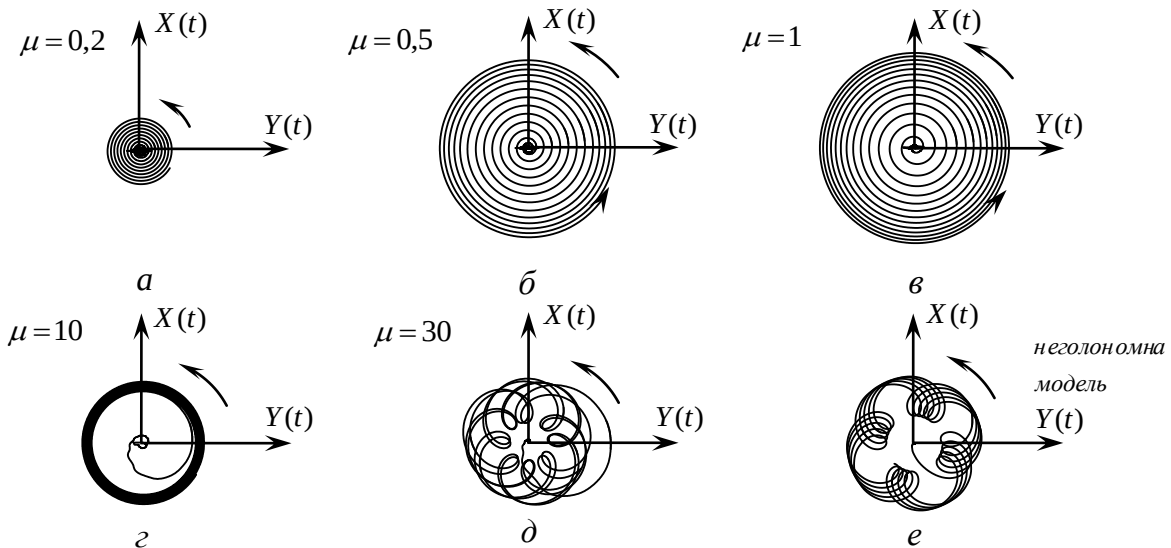


Рисунок 11 – Траєкторії руху сплюснутого долота в нерухомій системі $OXYZ$ ($T = -1 \cdot 10^4$ Н, $M_z = -1 \cdot 10^4$ Н·м, $\omega = 5$ с $^{-1}$): а – д – фрикційні моделі, е – неголономна модель

При переході до умов неголономного кочення траєкторії граничного циклу можуть далі трансформуватися в квіткоподібну фігуру (рис.11, г – д). Відзначимо, що такі види траєкторій спостерігаються на практиці на дні свердловини у вигляді криволінійних канавок при тимчасовому витяганні

бурильної колони із свердловини. Тому якісне співпадання теоретичних результатів з результатами, отриманими на практиці, можуть бути представлені як підтвердження їхньої достовірності.

Як показано в наших дослідженнях, режими коливання кружляння суттєво залежать від згинальної жорсткості бурильної колони. З її зменшенням БК стає гнучкою, а вісь долота набуває додаткову можливість відхилятися від вертикального положення і починати рух кружляння. Якщо врахувати, що згинальна жорсткість бурильної колони прямує до нуля при наближенні до критичного (за Ейлером) стану, то доцільність оцінки близькості напруженого деформованого стану до критичного стає очевидною. Однак задача аналізу стійкості бурильної колони являє собою складну взаємозв'язану багатопараметричну проблему, оскільки БК попередньо напружена крутним моментом і поздовжньою осьовою силою, крім того, вона обертається й одночасно здійснює поздовжні, поперечні та торсіонні вібрації, а всередині неї рухаються потоки промивної рідини. Оскільки ця проблема не має загального аналітичного розв'язку, то вона викликає інтерес проаналізувати деякі прості варіанти цих навантажень, які дозволяють оцінити жорсткість бурильної колони. Є дві комбінації попереднього напруження стержня, при дії якого критичні стани бурильної колони можуть бути визначені аналітично. Розглянутий випадок коли шарнірно опертий трубчастий стержень, що обертається, стиснутий осьовою силою T і всередині нього рухається промивна рідина зі швидкістю V . Тоді критичні значення параметрів T , V і ω виявляються зв'язаними аналітичною залежністю:

$$\frac{\pi^4}{l^2} EI + \pi^2 T_{кр} - l^2 \gamma_t \omega_{кр}^2 - \pi^2 \gamma_l V_{кр}^2 = 0. \quad (10)$$

Аналітичний розв'язок проблеми стійкості за Ейлером може бути отриманий також для випадку, коли шарнірно опертий стержень попередньо напружений крутним моментом M_z і осьовою силою T :

$$T_{кр} = -\frac{\pi^2 EI}{l^2} + \frac{M_{z,кр}^2}{4EI}. \quad (11)$$

У зв'язку з цим рівняння (10) може бути використане для наближеної оцінки близькості нижніх сегментів бурильної колони до їхніх критичних станів, коли значення крутного моменту мале, а рівняння (11) застосовується, якщо обертання БК і потік рідини можуть бути проігноровані. Наші розрахунки підтвердили, що в околі критичних станів бурильної колони ефекти неголономного кружляння долота спостерігаються більш очевидно і ці коливання стають менш стійкими.

Результати комп'ютерного моделювання підтвердили також експериментальні дані про те, що кутова швидкість коливання кружляння долота може в декілька разів перевищувати кутову швидкість бурильної колони. Оскільки такі ефекти не можуть бути встановлені на основі моделей, відомих у науковій літературі, можна зробити висновок, що представлені в дисертаційній роботі математичні моделі є більш достовірними.

На користь нашої моделі свідчать також порівняння результатів розрахунків, отриманих за допомогою фрикційної та неголономної моделей. Показано, що результати розв'язання, одержані на базі неголономної моделі, являють собою граничні стани режимів рухів фрикційних систем, реалізованих при великих значеннях коефіцієнтів тертя.

У додатку наведені довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена постановці та розв'язанню нової актуальної наукової задачі про пружні згинальні нелінійні коливання конструкцій бурильних колон, що обертаються, у порожнинах глибоких свердловин у режимах позаштатних самозбуджених коливань кружляння їхніх доліт по поверхні дна свердловини. Отримані наступні наукові результати:

1. На базі огляду вітчизняних і зарубіжних публікацій зроблений висновок, що зазвичай теоретичне моделювання згинальних пружних коливань конструкцій бурильних колон, викликаних коливаннями кружляння їх доліт, здійснюється із застосуванням спрощених математичних моделей, які не відображають найбільш характерні властивості таких процесів, що спостерігаються на практиці та включають прямі й обернені кружляння, а також стійкі та нестійкі рухи за складними траєкторіями, швидкості яких можуть перевищувати швидкість обертання колони.

2. Зроблений висновок про актуальність задачі комп'ютерного моделювання пружних коливань кружляння бурильних колон при прямому й оберненому кружлянню їхніх доліт із застосуванням фрикційних моделей, коли долото різної геометричної форми може ковзати по поверхні дна свердловини, і неголономних моделей, коли долото перекочується по цій поверхні без проковзування.

3. Вперше на основі методів будівельної механіки і теорії динамічних систем розроблені вдосконалені математичні моделі пружних коливань бурильних колон, що обертаються, при коченні сферичних та еліпсоїдних (сплюснутих або продовговуватих) доліт по криволінійних поверхнях дна свердловин. З урахуванням фрикційного та неголономного механізмів кочення долота виведенні розв'язувальні рівняння пружних згинальних коливань низу бурильної колони.

4. Розроблена методика числового інтегрування побудованих диференціальних рівнянь з частинними похідними при сформульованих крайових умовах і заданих параметрах початкового стану системи. Вона заснована на застосуванні методу скінченних різниць на ділянці, вибраній для розрахунку сегмента бурильної колони, і неявної схеми числового інтегрування за часом. Розроблена і налагоджена обчислювальна система для комп'ютерного моделювання процесів пружних згинальних коливань бурильних колон при розглянутих режимах кружляння доліт різної геометрії.

5. За допомогою розробленої системи виконаний комп'ютерний аналіз пружних коливань бурильної колони і долота при різних значеннях геометричних

і механічних параметрів. Побудовані форми коливань кружляння долота в нерухомій і рухомій системах координат. Показано, що розрахункові траєкторії руху долота можуть мати вигляд спіралей, що розширюються (нестійкий рух) або звужуються (стійкий рух), а також багатодольчастих фігур і багатопроменевих зірок, які зареєстровані в експериментах. Вони характеризуються великими значеннями прискорень руху і тому становлять небезпеку для системи.

6. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання дозволяє зробити висновок, що для розглянутої системи пружної бурильної колони з долотом сили тертя відіграють принципово іншу роль порівняно з випадками простих дисипативних систем. У звичайних системах з рухомими елементами конструкцій, що труться, здійснюється дисипація кінетичної енергії і гасіння вимушених коливань. Проте в системі бурильна колона–долото, що обертаються, сили тертя між долотом і поверхнею дна свердловини, навпаки, примушують долото здійснювати складний рух по дну свердловини і переходити в режим усталених або неусталених коливань, які блукають відносно осі обертання. У таких випадках ці сили можуть сприяти підводу додаткової енергії від джерела обертання БК до долота і збуджувати коливання. Такі режими можна розцінювати як режими фрикційного або кінематичного самозбудження коливань системи за рахунок дій, викликаних силами зчеплення між долотом, що обертається, і поверхнею породи.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Shevchuk L.V. Drill string bit whirl simulation with the use of frictional and nonholonomic models / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk // Journal of Vibration and Acoustics. – 2015. – V.138, No.1. – P.011021-011021-9. **(США)**.
2. Shevchuk L.V. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep bore-hole / V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk // Journal of Multi-body Dynamics. – 2013. – V.227. – P.234-244. **(Великобританія)**.
3. Shevchuk L.V. Whirl interaction of a drill bit with the bore-hole bottom / Nabil W. Musa, V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk, Aldabas Hasan // Modern Mechanical Engineering. – 2015. – V.5. – P.41-60. **(Гонконг)**.

Статті у фахових виданнях

4. Шевчук Л.В. Комп'ютерне моделювання коливань кружляння доліт бурильних колон в глибоких свердловинах/ В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Л.В. Шевчук // Нафтогазова галузь України. – 2013. – № 6. – С.14 – 16.
5. Шевчук Л.В. Самозбудження коливань кружляння долота бурильної колони в глибокій свердловині / С.М. Худолій, О.І. Борщ, Л.В. Шевчук // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкції. – 2012. – №.19. – С. 308 – 314.

6. Шевчук Л.В. Комп'ютерне моделювання стійкості коливань кружляння колон глибокого буріння / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Л.В. Шевчук // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015. – №94. – С. 139 – 154.
7. Шевчук Л.В. Неголономна динаміка коливань кружляння колон глибокого буріння / В.В. Гайдайчук, Л.В. Шевчук // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2014. – №92. – С. 92 – 102.
8. Шевчук Л.В. Моделювання коливань кружляння колон глибокого буріння / В.В. Гайдайчук, Л.В. Шевчук // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2012. Вип.9 – С. 18-27.
9. Шевчук Л.В. Неголономне кочення еліпсоїдного тіла по шорсткій площині/ О.І. Борщ, Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – №. 26. Частина 2. – С. 400 – 405.
10. Шевчук Л.В. Неголономна динаміка долота бурильної колони в глибокій свердловині / В.І. Гуляєв, О.І. Борщ, Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. – 2011. – №. 24. Частина 2. – С. 297 – 301.
11. Шевчук Л.В. Аналіз коливань кружляння бурильних колон на основі фрикційної моделі / Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. — 2015. — Вип. 31. — С. 561 – 567.
12. Шевчук Л.В. Аналіз коливань кружляння бурильних колон на основі фрикційної моделі / Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. — 2016. — Вип. 32. — С. 526 – 533.
13. Шевчук Л.В. Коливання кружляння доліт бурильних колон / Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. — 2013. — Вип. 28. — С. 545 – 551.

Опубліковані праці апробаційного характеру

14. Critical states of self-exciting non-linear vibrations of deep drill strings / Gulyaev V.I., Glushakova O.V., Shevchuk L.V., Glazunov S.N. // ENOC 2014 8th European Nonlinear Dynamics Conference. Vienna, Austria, July 6-11, 2014. – P. 116.
15. Enhancement of efficiency of deep drilling in shale rocks through computer prognostication of emergency situation / [V. Gulyayev, P. Lugovyy, L. Shevchuk et al.] // XV Jubileuszowe Międzynarodowe Sympozjum, Geotechnika - Geotechnics 2012, Poland, Gliwice - Ustron, 2012. – P. 261 – 270.
16. Shevchuk L.V. Nonholonomic whirling vibrations of drill string bits in deep boreholes / V.I. Gulyayev, O.I. Borshch, L.V. Shevchuk // 4th International Conference “Nonlinear Dynamics”, Sevastopol, June, 19-22, 2013. Proceedings. – P. 248 – 253.
17. Шевчук Л.В. Динаміка кочення доліт бурильної колони / Л.В. Шевчук // 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, – Львів, 2015. – С.29.
18. Шевчук Л.В. Критичні стани коливань кружляння бурильних колон в глибоких свердловинах / Л.В. Шевчук // Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів». 19-22 лютого 2015р. – Рівне:РВВ РДГУ, 2015. – С. 179.

19.Шевчук Л.В. Методи неголономної геометрії в задачах моделювання коливань кружляння колон глибокого буріння / О.І. Борщ, Л.В. Шевчук, А.І. Вітюгов // LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2012. – С. 417.

20.Шевчук Л.В. Неголономна модель коливань кружляння бурильних колон / О.І. Борщ, Л.В. Шевчук // LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2013. – С. 450.

21.Шевчук Л.В. Борщ О.І. Неголономна динаміка кельтських каменів і коливання кружляння бурильних колон / О.І. Борщ, Л.В. Шевчук, Ю.А. Учаєв // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2014. – С. 422.

22.Шевчук Л.В. Шевчук Л.В. Фрикційна модель коливань кружляння бурильних колон / Л.В. Шевчук // LXXI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2015. – С. 462.

23.Шевчук Л.В. Дослідження коливань кружляння еліпсоїдних доліт на основі неголономної моделі / Л.В. Шевчук // LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. –К.: НТУ, 2016. – С. 436.

АНОТАЦІЇ

Шевчук Л.В. Моделювання коливань кружляння бурильних колон на основі фрикційних та неголономних моделей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.14 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена постановці та розв'язанню нової актуальної наукової задачі про пружні згинальні нелінійні коливання конструкцій бурильних колон, що обертаються, у порожнинах глибоких свердловин у режимах позаштатних самозбуджених коливань кружляння їхніх доліт по поверхні дна свердловини. Вперше на основі методів будівельної механіки і теорії динамічних систем розроблені математичні моделі пружних коливань бурильних колон, що обертаються, при коченні сферичних та еліпсоїдних (сплюснутих або продовговуватих) доліт по криволінійних поверхнях дна свердловин. З урахуванням фрикційного і неголономного механізмів кочення долота виведенні розв'язувальні рівняння пружних згинальних коливань низу бурильної колони.

Розроблена методика числового інтегрування побудованих диференціальних рівнянь з частинними похідними, виконаний комп'ютерний аналіз пружних коливань бурильної колони і долота при різних значеннях геометричних і механічних параметрів. Побудовані форми коливань кружляння

долота в нерухомій і рухомій системах координат. Показано, що розрахункові траєкторії руху долота можуть мати вигляд спіралей, що розширюються (нестійкий рух) або звужуються (стійкий рух), а також багатодольчастих фігур і багатопроменевих зірок, які спостерігаються на практиці. Вони характеризуються великими значеннями прискорень руху і тому являють небезпеку для системи. Такі режими можна розцінювати як режими фрикційного або кінематичного самозбудження коливань системи за рахунок дій, викликаних силами зчеплення між долотом і поверхнею породи.

Ключові слова: бурильна колона, долото, коливання кружляння, неголономна взаємодія, пружні коливання, фрикційна взаємодія.

Шевчук Л.В. Моделирование колебаний кружения буровых колонн на основе фрикционных и неголономных моделей. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет, Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена постановке и решению новых научных задач о теоретическом моделировании изгибных упругих колебаний колонн глубокого бурения, возбуждаемых в результате фрикционного и кинематического (неголономного) взаимодействия вращающегося долота с криволинейной поверхностью дна скважины. На базе обзора отечественных и зарубежных публикаций сделан вывод о том, что обычно теоретическое моделирование упругих колебаний конструкций буровых колонн, вызванных колебаниями кружения их долот, осуществляется с применением упрощенных математических моделей, которые не отображают наиболее характерные свойства таких процессов, наблюдаемых на практике и включающих прямые и обратные кружения, а также устойчивые и неустойчивые движения по сложным траекториям, скорости которых могут превышать скорость вращения колонны.

Сделан вывод об актуальности задачи компьютерного моделирования упругих колебаний буровых колонн при прямом и обратном кружении их долот с применением фрикционных моделей, когда долото различной геометрической формы может скользить по поверхности дна скважины, и неголономных моделей, когда долото перекачивается по этой поверхности без проскальзывания.

Впервые на основе методов строительной механики и теории динамических систем разработаны математические модели упругих колебаний вращающихся буровых колонн при качении сферических и эллипсоидальных (сплюснутых или продолговатых) долот по криволинейным поверхностям дна скважин. С учетом фрикционных и неголономных механизмов качения долота выведены разрешающиеся уравнения упругих изгибных колебаний низа буровой колонны. Предложена методика численного интегрирования построенных дифференциальных уравнений с частными производными. Разработана и отлажена вычислительная система для компьютерного моделирования процессов упругих изгибных колебаний буровых колонн при рассмотренных режимах кружения долот различной геометрии.

С помощью созданной системы выполнен компьютерный анализ упругих колебаний бурильной колонны и долота при различных значениях геометрических и механических параметров. Построены формы колебаний кружения долота в неподвижной и вращающейся системах координат. Показано, что расчетные траектории движения долота могут иметь вид расширяющихся (неустойчивое движение) или сужающихся (устойчивое движение) спиралей, а также иметь вид многодольчатых фигур и многолучевых звезд, наблюдаемых на практике. Они характеризуются большими значениями ускорений движения и поэтому представляют опасность для системы.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что в системе бурильная колонна-долото силы трения между долотом и поверхностью дна скважины вынуждают долото осуществлять сложное движение по дну скважины и переводят его в режим установившихся или неустойчивых, блуждающих по отношению к оси вращения, колебаний. Такие режимы можно расценивать как режимы фрикционного или кинематического самовозбуждения колебаний системы за счет воздействий, вызванных силами сцепления между вращающимся долотом и поверхностью породы.

Ключевые слова: бурильная колонна, долото, кружение, неголономное взаимодействие, упругие колебания, фрикционное взаимодействие.

Shevchuk L.V. Simulation of drill string whirling on the basis of friction and nonholonomic models. – Manuscript.

The thesis for the candidate of technical science degree in specialty 05.23.17 – Mechanics of Structures. – National Transport University, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted to statement and solving the new urgent problem on elastic bending non-linear vibrations of rotating drill string structures in cavities of deep bore-holes in the regimes of selfexcited whirling of their bits on the bore-hole bottom surface. For the first time, the mathematic models of rotating elastic drill string vibrations induced by rolling of their spherical or ellipsoidal (oblong or oblate) bits on the bore-hole bottom. The constitutive differential equations of the drill string bending are deduced with allowance made for frictional and nonholonomic mechanisms of the bit rolling.

The techniques for the integrating of the constructed partial differential equations are elaborated. With their use, the computer analysis of elastic vibrations of the drill strings and the bits is performed for different values of their geometric and mechanic parameters. The whirling modes of the bit whirling in fixed and rotating coordinate systems are constructed. It is demonstrated that the calculated trajectories of the bit motion can have shapes of expanding (unstable motion) or contracting (stable motion) spirals, as well as multilobed figures and multibeam stars, which are observed in drilling practice. They are characterized by large values of accelerations and so represent danger for the system. These regimes can be represented as the regimes of frictional or kinematic selfgeneration of the system vibrations via dynamic actions caused by cohesion forces between the rotating bit and the rock surface.

Key words: drill string, bit, whirling, nonholonomic interaction, elastic vibrations, friction interaction.