

УДК 539.3
UDC 539.3

СТАЦІОНАРНІ І НЕСТАЦІОНАРНІ РЕЛАКСАЦІЙНІ АВТОКОЛИВАННЯ У ХВИЛЕВОДНИХ СИСТЕМАХ

Глушакова О.В., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

STATIONARY AND NON-STATIONARY RELAXATIONAL AUTOVIBRATIONS IN WAVEGUIDING SYSTEMS

Glushakova O.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

СТАЦИОНАРНЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ В ВОЛНОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Глушакова О.В., кандидат физико-математических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина.

Постановка проблеми.

Бурова установка для буріння нафтових і газових свердловин в загальному вигляді включає в себе: бурову споруду (бурову вишку); спуско-підіймальне обладнання (лебідка); силове обладнання для приводу лебідки, ротора і бурових насосів; обладнання для обертання бурильної колони (обертальний стіл); промивну рідину, яка циркулює в порожнині свердловини, і долото (рис. 1).

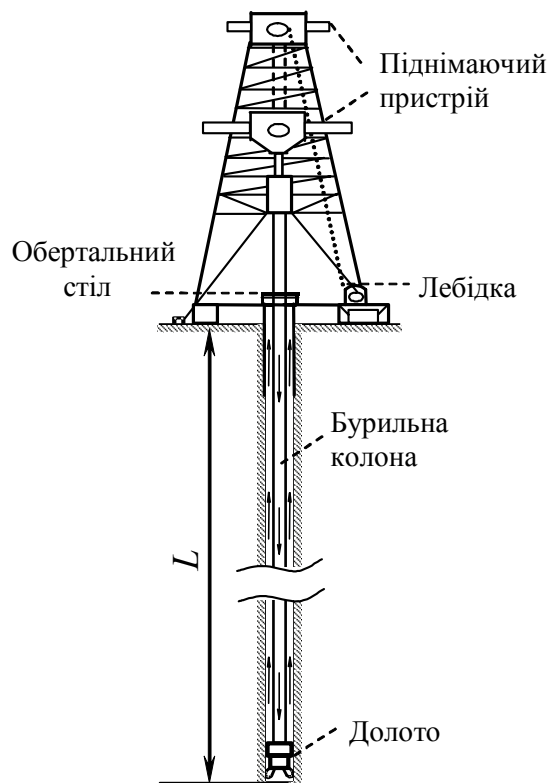


Рисунок 1 – Конструктивна схема бурильної установки

Одним з динамічних явищ, що сприяє виникненню позаштатної ситуації в процесі буріння, є самозбудження крутильних коливань обертової бурильної колони (БК).

Ці коливання мають складну нерегулярну форму, обумовлену хвильовим характером розповсюдження крутильних імпульсів у колоні, й описуються сингулярно збуреними диференціальними рівняннями, що мають релаксаційні (нерегулярні) розв'язки, які піддаються біфуркаційній перебудові в критичних станах (біфуркації Хопфа). До теперішнього часу відсутні методи фізичного і математичного моделювання вказаних ефектів і виявлення критичних динамічних станів цих систем. Така ситуація пов'язана з високою складністю досліджуваних явищ, яка спричинена великою довжиною бурильних колон і умовами контактної взаємодії їх доліт із дном свердловини, а також умов в'язкого тертя в навколишньому рідкому середовищі.

Разом з цим виявлення методами математичного моделювання параметрів процесу глибокого буріння, за яких реалізуються біфуркаційні переходи, і аналіз закритичної поведінки систем, що розглядаються, також ускладнені, оскільки диференціальні рівняння, що описують їх, відносяться до класу сингулярно збурених. Тому можна вважати, що питання математичного моделювання явищ самозбудження коливань крутіння глибоких бурильних колон і встановлення загальних закономірностей їх перебігу складають актуальну проблему механіки.

Аналіз досліджень і публікацій.

Питання самозбудження коливань динамічних систем шляхом переходу через біфуркації народження циклу вивчали А.А. Андронов, Е. Hopf, Ж. Н. Poincaré, Y. Zoua, К. Shumacher, В.Д. Hassard, Р. Diamond та інші. Особливості динамічної поведінки колон глибокого буріння досліджували С.В. Белокобыльський, Aarrestad Thor Viggo, J.Ford Brett, А. Besaisow Amjad, R.W. Tucker, J.D.Jansen, А.Р.Christoforou, N. Challamel, А.В. Iyoho, R. Dawson, Y.H. Wang, Y.Q. Lin та інші.

Мета даної роботи полягає в постановці задач про самозбудження крутильних коливань колон глибокого буріння в критичних і закритичних станах і встановленні найбільш загальних закономірностей їх перебігу з урахуванням ефектів в'язкого тертя в рідкому середовищі, що заповнює порожнину свердловини.

Основна частина.

Під час проходки нафтових і газових свердловин найбільше розповсюдження отримав роторний спосіб буріння. В процесі буріння свердловини можуть виникати складні статичні [6,11,12,13] і динамічні [1,2,6,9,10] явища, які ускладнюють технологічний режим. Одним з динамічних явищ, що сприяє виникненню позаштатної ситуації в процесі буріння, є самозбудження крутильних коливань обертової бурильної колони (БК). Оскільки БК являє собою торсіонний маятник, в нижній частині якого за рахунок дисипативної взаємодії між долотом і породою, яка руйнується, відбувається відтік енергії від приводного механізму в навколишнє середовище, при порушенні умов цього відтоку колона може переходити від режиму стаціонарного рівноважного стану обертання в режим крутильних автоколивань. В даній роботі ставиться задача про комп'ютерне моделювання самозбуджуваних крутильних коливань.

В бурових установках причиною самозбудження торсіонних коливань є біфуркаційне порушення балансу моментів сил пружності в колоні і нелінійних сил тертя між долотом і стінкою свердловини [2,9,15].

В задачах динаміки БК параметром, що визначає їх стаціонарні і автоколивальні режими, є кутова швидкість ω обертання колони. Застосовно до явищ, які супроводжують обертання БК, дослідження можливості генерування їх автоколивань дозволяє відповісти на три важливих питання: при яких значеннях параметрів системи і її функціонування можливе генерування крутильних автоколивань; який тип режиму самозбудження коливань (м'який чи жорсткий) має місце; які заходи можуть усунути можливі режими крутильних автоколивань.

Для БК у порівняно неглибоких свердловинах відповіді на ці питання можуть бути отримані за допомогою спрощеної математичної моделі осцилятора з одним ступенем свободи, яка побудована на основі торсіонного маятника, що обертається, до маховика – долота якого прикладені нелінійні сили тертя його фрикційної взаємодії з породою, яка руйнується [9].

Однак якщо довжина БК не мала, застосування моделі торсіонного осциляційного маятника для аналізу її динаміки не є виправданим, оскільки коливання її елементів перестають бути синфазними і їх моделювання повинно проводитись на основі хвильової теорії. Про необхідність застосування такої теорії вказується в роботах [2,14,15].

В реальних умовах, в загальному випадку, ускладненню форм рухів маховика в значній мірі може сприяти ефект залипання його коливань, властивих системам з сухим тертям. Він полягає в короточасних зупинках руху маховика в проміжки часу, в які сума всіх моментів активних сил і моментів сил інерції виявляється меншою за деякий пороговий момент сил тертя, який потрібно подолати, щоб маховик почав повертатись.

В ці проміжки привідна установка на верхньому кінці БК продовжує обертатись з кутовою швидкістю ω , БК закручується і в ній накопичується потенціальна енергія пружних деформацій. Після досягнення пружним моментом в БК значення, рівного пороговому значенню моменту сил тертя, нижній маховик (долото) починає обертатись, БК розкручується, і її потенціальна енергія починає перетворюватись в кінетичну енергію обертання колони і маховика. Це обертання продовжується до тих пір, поки сума пружного моменту в БК і моменту сил інерції долота знову не стане меншою за порогове значення сил тертя, в результаті чого маховик знову зупиняється і так далі.

При аналізі автоколивань долота суттєвий вплив на форми його рухів можуть здійснити сили в'язкої силової взаємодії між трубою бурильної колони та промивною рідиною. Відомо, що ця рідина, як і багато інших глинистих розчинів та паст, відносяться до реологічних середовищ з неньютонівськими властивостями [3,4,5,7,8]. Тому особливості їх властивостей повинні бути враховані при постановці задачі щодо автоколивань бурильних колон.

Розглянемо випадок стаціонарного обертання верхнього кінця БК з постійною кутовою швидкістю ω . Введемо інерційну систему координат OXYZ з початком в центрі мас долота, вісь OZ якої співпадає з осью лінійною БК. Відносно неї зі швидкістю ω обертається система Oх1у1z1. Пов'яжемо з долотом систему координат Oхуz, яка обертається разом з ним, вісь Oz якої співпадає з віссю OZ. Тоді кут повороту долота відносно системи OXYZ складе $\omega t + \phi$, де ωt – кут повороту верхнього кінця БК і системи координат Oх1у1z1, t – час, $\phi(z, t)$ – кут пружного закручування БК, а $\phi(0, t)$ – кут пружного закручування долота.

Динаміку крутильних коливань БК необхідно вивчати на основі рівняння

$$\rho I_z \partial^2 \phi / \partial t^2 + f(\partial \phi / \partial t) - G I_z \partial^2 \phi / \partial z^2 = 0. \quad (1)$$

Тут ρ - щільність матеріалу БК; I_z - момент інерції площі поперечного перерізу; G - модуль пружності матеріалу при зсуві; f - функція, що характеризує момент сил в'язкого тертя між промивною рідиною та зовнішньою стінкою труби БК.

Як вказано в роботі [14], глинисті та цементні розчини, що застосовуються на нафто- та газопромислах для промивки свердловин, мають властивості неньютонівських рідин. Тому функція f необхідно обчислювати через значення дотичні напруження у течії Куетта між двома циліндричними поверхнями. При цьому в'язкість промивної рідини з частинками роздрібненої породи, як і для будь-якої дисперсної системи, залежить від таких основних факторів:

- концентрації дисперсної фази;
- в'язкості рідкої фази;
- розміру і конфігурації частинок;
- агрегації частинок;
- розчинених в рідкому середовищі макромолекулярних речовин;
- вмісту емульгаторів і поверхнево-активних речовин.

У реології розрізняють так звані ньютонівські рідини, які характеризуються тим, що при незмінній температурі їх в'язкість залишається постійною незалежно від швидкості зсуву, при якій проводиться вимірювання в'язкості [15]. Для них дотична напруження τ визначається через динамічний коефіцієнт в'язкості μ та швидкість зсуву $\dot{\epsilon} = \partial u / \partial y$ по формулі

$$\tau = \mu \cdot \dot{\epsilon} = \mu \partial u / \partial y \quad (2)$$

При ньютонівській течії рідких середовищ швидкість зсуву завжди прямо пропорційна дотичній напрузі зсуву.

У природі величезна кількість рідин не підкоряється закону течії рідини Ньютона, тому що їх в'язкість залежить від швидкості зсуву (полімерні розчини, суспензії, емульсії, мастила). Ці види рідин відносяться до класу неньютонівських, для яких зв'язок між градієнтом швидкості зсуву та дотичною напругою описується нелінійними складними залежностями.

Унаслідок взаємодії частинок неньютонівські рідини мають складну будову та тією чи іншою мірою структуровані залежно від характеру взаємодії складових компонентів.

Розрізняють декілька видів неньютонівських рідин. В прикладних дослідженнях широкого розповсюдження набули моделі пластичної рідини (рідина або тверде тіло Бінгама). У таких видах рідин потрібно докласти деяке початкове зусилля для того, щоб почалася їх течія, після чого

залежність у координатах напруга зсуву – швидкість зсуву стає прямолінійною. В'язкість таких рідин при низьких швидкостях зсуву дуже велика, а при зростанні цього параметра швидко зменшується і характеризується двома константами, а саме: пластичною в'язкістю і граничною напругою зсуву. Прикладом таких систем є пластичне тверде тіло, наприклад, мастило, яке характеризується текучістю тільки при нарузі зсуву, що перевищує граничну межу текучості τ_0 .

Задовольняючись найпростішим випадком плоского зсувного прямолінійного руху вздовж осі Ox зі швидкістю зсуву $\dot{\varepsilon} = du/dy$, приведемо реологічне рівняння такої в'язкопластичної рідини в формі:

$$\tau = \tau_0 + \mu' \dot{\varepsilon} \quad \text{при } \tau > \tau_0 \quad (3)$$

де τ_0 - граничне напруження зсуву, μ' - динамічний коефіцієнт структурної в'язкості (точка над літерою – похідна за часом). При $\tau < \tau_0$ текучість відсутня, тобто середовище поводить себе як тверде тіло.

Суттєво нелінійними властивостями володіють псевдопластичні рідини, у яких в'язкість змінюється відповідно до швидкості зсуву і будь-яка зміна в'язкості характеризує так звану в'язкість, що здається тільки для даної швидкості зсуву. В'язкість псевдопластичної рідини здається високою при низьких швидкостях зсуву і зменшується при збільшенні швидкості зсуву. Такими властивостями характеризуються каучуки і пластичні матеріали, що містять анізотропні несиметричні компоненти, взаємодія між якими ослаблюється при зростанні швидкості зсуву.

Псевдопластичні рідини позбавлені граничного напруження текучості, але їх приведена в'язкість визначається коефіцієнтом, що залежить від швидкості зсуву. Такі «нелінійні» рідини (суспензії асиметричних часток, розчини високополімерів) підпорядковуються реологічним рівнянням типу (Оствальд, Рейнер)

$$\tau = k \dot{\varepsilon}^n, \quad (4)$$

де k і $n < 1$ майже постійні в широких інтервалах напружень та швидкостей деформацій, а приведений коефіцієнт в'язкості $\tau / \dot{\varepsilon} = k \dot{\varepsilon}^{n-1}$ зменшується зі зростанням $\dot{\varepsilon}$.

Відсутність граничного напруження наближує псевдопластичні рідини до так званих «ділатантних» рідин, у яких, на відміну від псевдопластичних, приведена в'язкість зі збільшенням напруження збільшується ($n > 1$). Така закономірність характерна для суспензій твердих частинок при їх високих концентраціях, а також крохмальних клейстерів, які не можна віднести до концентрованих суспензій твердих частинок.

Вибір законів для дотичних напружень у вигляді відношень (3),(4) при $n < 1$ та $n > 1$ суттєво ускладнює рівняння крутильних коливань (1). Однак якщо врахувати, що коливання долота та БК відбуваються в околі стану їх простого обертання з кутовою швидкістю ω , де обертальних рух рідини наближається до руху Куета між двома обертовими циліндрами, то рівняння (1) можна спростити. Для цього достатньо лінеаризувати це рівняння в околі розглянутого стану обертання з розглянутою швидкістю ω , і врахувати відношення (2) для ньютонівської рідини, однак коефіцієнт в'язкості μ в формулі (2) обчислювати при вибраній величині ω . При такій постановці задачі рівняння (1) стає лінійним:

$$\rho I_z \partial^2 \varphi / \partial t^2 + \mu \partial \varphi / \partial t - G I_z \partial^2 \varphi / \partial z^2 = 0, \quad (5)$$

однак коефіцієнт μ в рівнянні обирається в залежності від швидкості ω .

Для того щоб вивести граничні умови для рівняння (5) на краях $z=0$ та $z=L$, необхідно розглянути динаміку долота в точці $z=0$, і врахувати, що при $z=L$ колона не защемлена, тобто $\varphi(L)=0$. Він визначається шляхом обчислення гідродинамічного моменту $m^{мер}$ розподілених сил тертя при обертанні внутрішнього циліндру в порожнині зовнішнього циліндру, заповненого рідиною.

Якщо умовно відокремити долото від БК і розглянути його динамічну рівновагу, то рівняння пружних торсійних коливань маятника можна представити в формі принципу Д'Аламбера

$$M^{in} + M^{mer} + M^{np} = 0. \quad (6)$$

Тут $M^{in} = M^{in}(\ddot{\phi})$ – момент сил інерції, що діють на долото; $M^{mer} = M^{mer}(\omega + \dot{\phi})$ – момент сил тертя між долотом і породою, яка руйнується; $M^{np} = M^{np}(\phi)$ – момент сил пружності, що діють на долото при закручуванні БК. Точками над ϕ позначено диференціювання по часу t .

Величина M^{in} підраховується за формулою:

$$M^{in} = -J \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad (7)$$

де J - момент інерції долота. Момент M^{np} визначається рівністю

$$M_{np} = GI_z \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad (8)$$

де G - модуль пружності матеріалу БК при зсуві, I_z - момент інерції площі перерізу БК відносно осі Oz .

Задача про визначення моменту M^{mer} є більш складною. В залежності від трибологічних властивостей матеріалів тіл, що стискаються, і умов їх фрикційної взаємодії вибирають різні моделі зв'язку між M^{mer} і швидкістю $\omega + \dot{\phi}$ їх відносного руху. Їх формулювання виконуються окремо.

Виконав заміни (7), (8), рівняння (6) перепишемо в формі

$$J \cdot \partial^2 \phi / \partial t^2 - M^{mer}(\omega + \partial \phi / \partial t) + GI_z \cdot \partial \phi / \partial z = 0 \quad (9)$$

Це диференціальне рівняння з частинними похідними має другий порядок і просту структуру.

Його розв'язок при заданому ω залежить від функції $M^{mer}(\omega + \dot{\phi})$. Він може бути побудований чисельно для конкретних початкових умов відносно $\phi(0)$.

На основі описаної методики розроблено комплекс програм, що дозволяє моделювати явища самозбудження коливань в широких діапазонах характерних параметрів.

Його розв'язок при заданому ω залежить від функції $M^{mer}(\omega + \dot{\phi})$. Він може бути побудований чисельно для конкретних початкових умов відносно $\phi(0)$.

На основі описаної методики розроблено комплекс програм, що дозволяє моделювати явища самозбудження коливань в широких діапазонах характерних параметрів.

Результати розрахунків.

По розробленій методиці виконано комп'ютерне моделювання автоколивань БК довжиною $L = 8000 \text{ м}$ при значенні коефіцієнта тертя $\mu = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{с}$. Функція M^{mer} задавалася за методикою, викладеною в роботах [14,15]. Розрахунки виконані за допомогою неявної кінцево-різницевої схеми інтегрування по часу. Крок інтегрування взято рівним $\Delta t = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

В результаті досліджень встановлено, що урахування дисипативних властивостей рідкого середовища, в якому обертається колона, призводить до звуження інтервалу значень ω при яких генеруються автоколивання.

Так, для розглянутого випадку виявилось, що біфуркація народження циклу реалізується при $\omega_n = 0,72 \text{ рад/с}$, а біфуркація втрати циклу – при $\omega_g = 3,55 \text{ рад/с}$. На рис. 2 приведена діаграма самозбудження торсійних коливань долота. Ці коливання мають релаксаційний характер, оскільки містять зони з майже ломаними обрисами функції $\phi(t)$. На рис. 3 показані форми кута крутіння колони $\phi(z)$. Аналіз цих діаграм дозволяє зробити висновок, що при встановленні автоколивань форма $\phi(z)$ спрощується і набуває вигляду прямої лінії.

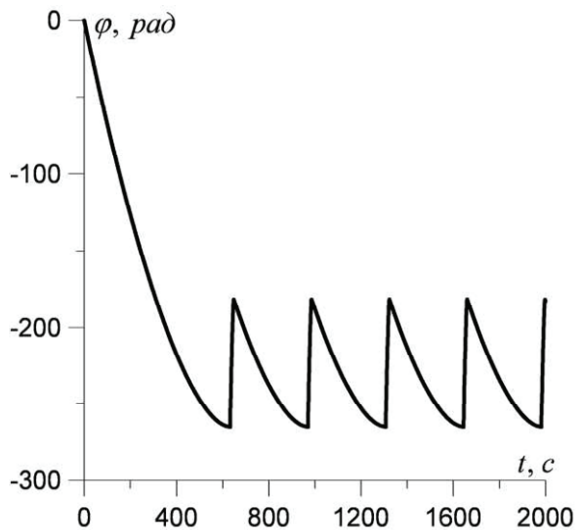


Рисунок 2 – Діаграма самозбудження торсіонних коливань долота ($L = 8000$ м, $\mu = 0,5$ Н·с, $\omega = 0,72$ рад/с)

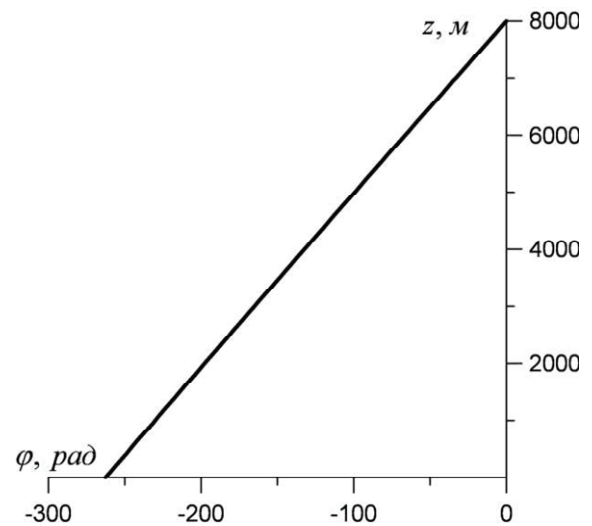


Рисунок 3 – Функції кута закручування $\varphi(z)$ бурильної колони.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0112U000137 «Математичне моделювання процесів безаварійного буріння в сланцевих породах і в шельфових зонах морських акваторій»

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Борщ Е.И. Спиральные бегущие волны в упругих стержнях / Е.И. Борщ, Е.В. Ващилина, В.И. Гуляев // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела- 2009. - №2. С. 143-149.
2. Гуляев В.И. Квантованные аттракторы в волновых моделях торсионных колебаний колонн глубокого бурения / В.И. Гуляев, О.В. Глушакова, С.Н. Худолий. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела.-2010. - №2. С. 134-147.
3. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика: теория и практика./ Н.Ф. Дмитриченко – Львів, Львівська політехніка, 2000. – 224 с.
4. Костецкий Б.И. Механико-химические процессы при граничном трении. / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский – М.: Наука, 1972. – 173 с.
5. Мирзаджанадзе А.Х. Гидравлика глинистых и цементных растворов. / А.Х. Мирзаджанадзе, А.А. Мирзоян, Г.М. Гевинян, М.К. Сейдрза – М.: Недра, 1966. – 386с.
6. Мислюк М.А. Буріння свердловин. / М.А. Мислюк, І.Й. Рибчич, Р.С. Яремійчук — К.: «Інтерпрес ЛТД», 2004. — Т. 3. — 294 с.
7. Рабинович М.К. Введение в теорию колебаний и волн / М.К. Рабинович, Д.И. Трубецков– М.: Наука, 1984.-432с.
8. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. / У.Л. Уилкинсон – М.: Мир, 1964. – 318с.
9. Ford Brett J. The genesis of torsional drillstring vibrations / J. Ford Brett // SPE Drilling Engineering. – 1992, v.7, September. – P. 168-174.
10. Gulyayev V.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells / V.I. Gulyayev, O.I. Borshch // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V.78, - P. 759-764.
11. Gulyayev V.I. The buckling of elongated rotating drill strings / V.I. Gulyayev, V.V. Gaidaichuk, I.L. Solovjov, I.V. Gorbunovich // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – 67. – P.140-148.
12. Gulyayev V.I. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections / V.I. Gulyayev, S.N. Hudoly, L.V. Glovach // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – V.48. – P.110–118.
13. Gulyayev V.I. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes / V.I. Gulyayev, S.V. Khudoliy, E.N. Andrusenko // Interaction and Multiscale Mechanics. – 2011. – V.4. – No.1. – P.1-16.

14. Gulyayev V. Large-scale and small-scale self-excited torsional vibrations of homogeneous and sectional drill strings / V. Gulyayev, O. Glushakova. // *Interaction and Multiscale Mechanics*. — 2011. — V. 4, №4. — P. 139 – 152.

15. Gulyayev V.I. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and Coulombic friction moment models. / V.I. Gulyayev, S.N. Hudoliy, O.V. Glushakova. // *Journal of Multi-body Dynamics*. — 2011. — V.225, - P. 139 – 152.

REFERENCES

1. Borshch E.I., E.V. Vashchilina E.V. and Gulyayev V.I. Spiral running waves in elastic rods. *Mechanics of Solids*. 2009. V.2, No.2. P. 143 – 149. (Rus)

2. Gulyayev V.I., Glushakova O.V., Hudoliy S.N. Quantized attractors in wave models of torsion vibrations of deep drill strings. *Известия Российской академии наук. Mechanics of Solids*. 2010. V.2, No.2. P. 134 – 147. (Rus).

3. Dmitrichenko N.F. *Elasto-hydro-dynamics: theory and practice*. Lviv, Lvivska politehnica. 2000. 224 p. (Rus)

4. Kosteckiy B.I., Natanson M.E., Bershadsliy L.I. *Mechanic-chemical processes in limit friction*. Moskva: Nauka. 1972. 173 p. (Rus)

5. Mirzajanadze A.H., Mirzoyan A.A., Gevinyan G.M., Seydrza M.K. *Hydraulics of clayey and cement solutions*. Moskva: Nedra. 1966. 386p. (Rus)

6. Myslyuk M.A., Rybych I.I., Yaremiychuk R.S. *Drilling of bore-holes*. Kyiv: "Interpress LTD". 2004. V. 3. 294 p. (Ukr)

7. Rabinovich M.K., Trubeckov D.I. *Introduction of non-linear vibrational systems with energy source*. Moskva: Nauka. 1984. 432 p. (Rus)

8. Uilkinson U.L. *Non-newtonian liquids*. Moskva: Mir. 1964. 318p. (Rus)

9. Ford Brett J. The genesis of torsional drillstring vibrations. *SPE Drilling Engineering*. 1992. v.7, September. P. 168-174.

10. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2011. V.78. P. 759-764.

11. Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. V. 67. P.140-148.

12. Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. V.48. P.110–118.

13. Gulyayev V.I., Khudoliy S.V., Andrusenko E.N. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes. *Interaction and Multiscale Mechanics*. 2011. V.4, No.1. P. 1-16.

14. Gulyayev V., Glushakova O., Large-scale and small-scale self-excited torsional vibrations of homogeneous and sectional drill strings. *Interaction and Multiscale Mechanics*. 2011. V. 4, №4. P. 139 – 152.

15. Gulyayev V.I., Hudoliy S.N., Glushakova O.V. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and Coulombic friction moment. *Journal of Multi-body Dynamics*. 2010. V.225. P. 139 – 152.

РЕФЕРАТ

Глушакова О.В. Стационарні і нестационарні релаксаційні автоколивання у хвилеводних системах. / О. В. Глушакова // *Вісник Національного транспортного університету*. — К. : НТУ, 2013. — Вип. 28.

Поставлена задача про самозбудження крутильних коливань бурильної колони в циліндричній порожнині вертикальної свердловини, що заповнена рідким в'язким середовищем. Розглянуто моделі механічної взаємодії колони з в'язкою рідиною. Обговорюються питання чисельної реалізації розв'язання сформульованих рівнянь.

Об'єктом дослідження є осциляційна модель бурильної колони в формі торсіонного маятника, що побудована з урахуванням сил тертя в'язкої рідини.

Метою статті є розробка постановки задач про самозбудження крутильних коливань колон глибокого буріння в критичних і закритичних станах і встановлення найбільш загальних закономірностей їх перебігу з урахуванням ефектів в'язкого тертя в рідкому середовищі, що заповнює порожнину свердловини.

Метод дослідження оснований на застосуванні теорії пружних стержнів та нелінійних рівнянь теорії тертя. Інтегрування побудованих звичайних диференціальних рівнянь здійснюється за допомогою неявної схеми чисельного інтегрування.

Розроблена модель крутильних автоколивань однорідної бурильної колони в формі осциляційного маятника. Сформульовано розв'язувальне нелінійне диференціальне рівняння з частинними похідними, що дозволяє описувати коливання долота бурильної колони з урахуванням сил в'язкого тертя. Запропоновано алгоритм чисельного інтегрування цього рівняння як по просторовій, так і часовій координатам. Встановлено, що форми автоколивань реалізуються по сценаріям релаксаційних автоколивань. Зазначено, що урахування дисипативних властивостей рідкого середовища, в якому обертається колона, призводить до звуження інтервалу значень ω при яких генеруються автоколивання.

Результати роботи можуть бути впроваджені в практику проектування технологій буріння глибоких свердловин.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкту дослідження – пошук безаварійних режимів буріння.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РОТОРНЕ БУРІННЯ, СВЕРДЛОВИНА, РЕЛАКСАЦІЙНІ АВТОКОЛИВАННЯ.

ABSTRACT

Glushakova O.V. Stationary and non-stationary relaxation autovibration in waveguiding systems. Visnyk National Transport University. – Kyiv. National Transport University. 2013. – Vol. 28.

The problem about self-excitation of torsion vibration of a drill string in a vertical cylindrical cavity of a bore-hole with liquid medium is stated. The models of mechanical interaction of the drill string with viscous liquid are considered. The questions of numerical realization of the formulated equations are discussed.

Object of study is oscillation model of a drill string in the form of torsion pendulum constructed with allowance made for viscous friction.

Target – to state the problem on self-excitation of torsion vibration of deep drill columns at critical situations.

Method of analysis is based on the use of dynamic equation of the theory of elastic rods and friction theory. The constructed equation is integrated with the use of the implicit scheme of numeric integration.

The oscillation model of torsional autovibration of homogeneous drill string in the form of oscillation pendulum is elaborated, the constitutive nonlinear differential equation with partial derivatives is formulated which permits one to describe vibrations of the drill string bit with allowance made for viscous friction. The numeric algorithm for integration of this equation by spatial and time variables is elaborated.

The results of the article can be inculcated into the practice of design of bore-well drilling technology. A forecast assumption about the study object is search of safe regimes of drilling.

KEYWORDS: ROTOR DRILLING, BORE-HOLE, RELAXATION AUTOVIBRATION.

РЕФЕРАТ

Глушакова О.В. Стационарные и нестационарные релаксационные автоколебания в волноводных системах. / О. В. Глушакова // Вестник Национального транспортного университета. — К. : НТУ, 2013. — Вып. 28.

Поставлена задача про самовозбуждение крутильных автоколебаний бурильной колонны в цилиндрической полости вертикальной скважины, которая заполнена жидкой вязкой средой. Рассмотрены модели механического взаимодействия колонны с вязкой жидкостью. Обсуждаются вопросы численной реализации решения сформулированных уравнений.

Объектом исследования является осцилляционная модель бурильной колонны в форме торсионного маятника, построенная с учетом сил трения вязкой жидкости.

Цель статьи – разработка постановки задач про самовозбуждения крутильных колебаний колонн глубокого бурения в критических и закритических состояниях и установление наиболее общих закономерностей их протекания с учетом эффектов вязкого трения в жидкой среде, заполняющей полость скважины.

Метод исследования основан на применении теории упругих стержней и нелинейных уравнений теории трения. Интегрирование построенных обыкновенных дифференциальных уравнений производится с помощью неявной схемы численного интегрирования.

Разработана модель крутильных автоколебаний однородной бурильной колонны в форме осцилляционного маятника. Сформулировано разрешающее нелинейное дифференциальное уравнение с частными производными, позволяющее описывать колебания долота бурильной колонны с учетом сил вязкого трения. Предложен алгоритм численного интегрирования этого уравнения как по пространственной, так и временной координатам. Установлено, что формы автоколебаний реализуются по сценариям релаксационных автоколебаний. Отмечено, что учет диссипативных свойств жидкой среды, в которой вращается колонна, приводит к сужению интервала значений ω , при которых генерируются автоколебания.

Результаты работы могут быть внедрены в практику проектирования технологий бурения глубоких скважин.

Прогнозные предположения относительно развития объекта исследования – поиск безаварийных режимов бурения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РОТОРНОЕ БУРЕНИЕ, СКВАЖИНА, РЕЛАКСАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ.

АВТОР:

Глушакова Ольга Володимирівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, e-mail: olvgl@mail.ru, тел. +380637906486, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

AUTHOR:

Glushakova Olga Vladimirovna, Ph.D., associate professor department of high mathematics, National Transport University, e-mail: olvgl@mail.ru, tel. +380637906486, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 511.

АВТОР:

Глушакова Ольга Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Национальный транспортный университет, e-mail: olvgl@mail.ru, тел. +380637906486, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Рассказов О.О., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Rasskazov O.O., Dr. Sc., Professor, National Transport University, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Gaidachuk V.V., Dr. Sc., Professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.