

КОЛИВАННЯ КРУЖЛЯННЯ ДОЛІТ БУРИЛЬНИХ КОЛОН

Шевчук Л.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна

WHIRLING OF DRILL STRING BITS

Shevchuk L.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine

КОЛЕБАНИЯ КРУЖЕНИЯ ДОЛОТ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН

Шевчук Л.В., Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми.

На сучасному етапі розвитку економіка України потребує збільшення обсягів видобутку вуглеводневої сировини. Однак у зв'язку з вичерпанням легкодоступних родовищ нафти і газу проблеми їх добування ускладнюються з необхідністю і умовами проходки більш глибоких свердловин. Як показує практика, методи теоретичного моделювання механічних явищ, що супроводжують процес буріння таких свердловин, розроблені вкрай слабо, тому аварійність при їх проходці залишається високою.

Одна з основних труднощів – можливість появи нештатних ситуацій, які викликані критичними станами квазістатичної рівноваги і коливань бурильної колони (БК) [1,2]. До них відносяться фрикційні прихвати бурильних колон, а також їх критичні згинальні випинання і вібрації, які можуть включати осьові, крутильні і згинальні коливальні рухи [3].

Проте найбільш складним механізмом володіють згинальні коливання низу БК, які викликані дією на долото змінних з часом нормальних і дотичних сил контактної і фрикційної взаємодії долота зі стінкою свердловини. В цьому випадку геометричний центр долота починає рухатися навколо осевої лінії свердловини, випереджаючи або відстаючи від обертального руху самої колони. У механіці вони отримали назву прецесійних коливань. У роботах [2,4] відмічається, що описаний вище рух центра долота має іншу природу і для його визначення використовують термін “whirling” – кружляння. Воно вивчалось на вельми спрощених фізичних і математичних моделях з одною або двома ступенями вільності при різних законах фрикційної взаємодії долота зі стінкою та дном свердловини. Ці моделі досить далекі від реальної системи і слабо відображають реальні динамічні процеси.

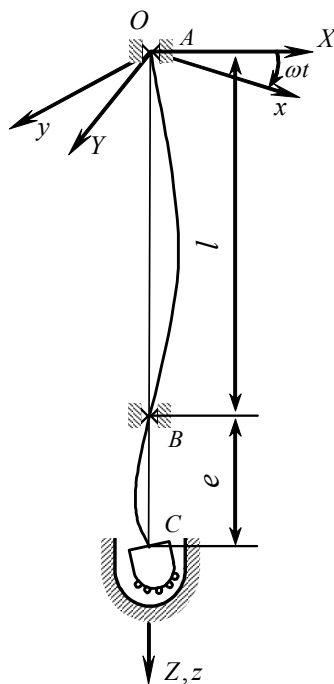


Рисунок 1 – Розрахункова схема бурильної колони

Метою роботи є дослідження крутильних коливань кружляння доліт бурильних колон, що виникають при контактній взаємодії долота зі стінкою свердловини, з використанням методів неголономної механіки [5,6].

Виклад основного матеріалу.

Колівання кружляння долота, яке обертається з кутовою швидкістю ω , супроводжується залученням до вібраційного процесу і нижніх ділянок колони, які розташовані між центраторами і відіграють роль додаткових опор (рис. 1). Число таких опор не перевищує п'яти, а відстань між ними становить від 9 до 18 м. Оскільки найбільш інтенсивні згинальні коливання БК спостерігаються в прольоті, що безпосередньо примикає до долота, тому при аналізі механізму збудження коливань кружляння долота будемо нехтувати впливом верхньої частини БК і виділимо її фрагменти AB і BC довжинами l і e (рис. 1). Долото умовно представимо у вигляді деякого твердого тіла, яке має форму еліпсоїда.

Динаміку цієї ділянки моделюватимемо на основі теорії стисло-закручених стержнів, що обертаються. Виділена ділянка бурильної колони попередньо

напружена крутним моментом $M_z = -M^{fr}$ та поздовжньою стискувальною силою $T = -R$. Введемо нерухому систему координат $OXYZ$ і систему координат $Oxyz$, що обертається разом з БК, із загальним початком O на опорі A .

Врахуємо, що на трубу БК крім внутрішніх сил пружності діють також сили інерції, від обертання.

$$f_u = (\rho F + \rho_e F_e)\omega^2 u + 2(\rho F + \rho_e F_e)\omega \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$f_v = (\rho F + \rho_e F_e)\omega^2 v - 2(\rho F + \rho_e F_e)\omega \frac{\partial u}{\partial t}$$
(1)

Тоді рівняння динамічного пружного згинання БК при наявності відмічених факторів можна представити у виді [1,3,7,8]

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - T \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - M_z \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} - (\rho F + \rho_1 F_1)\omega^2 u - 2(\rho F + \rho_1 F_1)\omega \frac{\partial v}{\partial t} + (\rho F + \rho_1 F_1) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - T \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + M_z \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - (\rho F + \rho_1 F_1)\omega^2 v + 2(\rho F + \rho_1 F_1)\omega \frac{\partial u}{\partial t} + (\rho F + \rho_1 F_1) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$
(2)

де $u(z,t)$, $v(z,t)$ – пружні переміщення елемента труби БК в напрямках осей Ox , Oy відповідно; EI – жорсткість труби БК при згині; ρ , ρ_1 – густина матеріалу труби і промивної рідини, відповідно; F , F_1 – площі поперечних перерізів стінки труби і її внутрішнього каналу, відповідно; t – час.

Для опису пружного повороту долота введемо також систему координат $O_1x_1y_1z_1$, що обертається, осі Ox_1 , Oy_1 якої паралельні осям Ox , Oy , відповідно, а початок O_1 лежить на осі Oz і у вихідному положенні співпадає з центром мас C долота. Зв'яжемо з долотом систему $Cx_2y_2z_2$, осі Cx_2 , Cy_2 якої у вихідному положенні паралельні осям Cx_1 , Cy_1 , а при пружній деформації колони повертаються на кути $-v'|_C$ і $u'|_C$ разом з долотом.

Долото, що має форму еліпсоїда обертання, перекочується по поверхні свердловини, яка є площиною (рис.2).

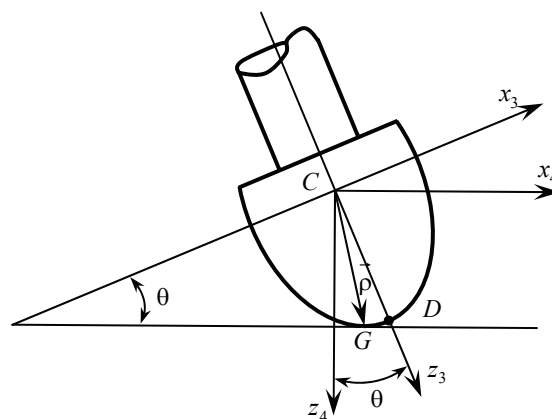


Рисунок 2 – Схема контактної взаємодії еліпсоїдального долота з дном свердловини

При виведенні кінематичних співвідношень руху долота будемо вважати, що кути пружних поворотів системи $Cx_2y_2z_2$ відносно $Ox_1y_1z_1$ малі. Тоді можна ввести вектор повного кута повороту

$$\vec{\theta} = -v' \vec{i}_1 + u' \vec{j}_1.$$
(3)

Зв'яжемо з долотом систему осей $Cx_3y_3z_3$, вісь Cz_3 якої є продовженням пружної осі колони, вісь Cy_3 колінеарна вектору $\vec{\theta}$, а вісь Cx_3 доповнює цю систему до правої трійки векторів (рис. 2). Ці осі співпадають з головними центральними осями інерції еліпсоїда. Для визначення точки контакту G долота з дном свердловини запишемо рівняння еліпса, отриманого перерізом поверхні долота площиною x_3Cz_3

$$x_3^2/a^2 + z_3^2/b^2 = 1. \quad (4)$$

Введемо осі Cx_4 і Cz_4 в площині x_3Cz_3 (рис.2). Перехід від системи x_3Cz_3 до системи x_4Cz_4 здійснюється за допомогою формул

$$x_4 = x_3 \cos \theta + z_3 \sin \theta, \quad z_4 = -x_3 \sin \theta + z_3 \cos \theta. \quad (5)$$

Умови кочення без проковзування еліпсоїдального тіла по шорсткій поверхні мають вигляд:

$$\dot{u} - \omega v + \dot{u}'\rho_{z_1} - \omega\rho_{y_1} = 0, \quad \dot{v} + \omega u + \dot{v}'\rho_{z_1} + \omega\rho_{x_1} = 0. \quad (6)$$

Дані умови зв'язують швидкості руху центра долота і його обертання з переміщеннями u, v , тому є кінематичними неголономними [5] крайовими умовами для бурильної колони. До них додаються умови динаміки долота, які дозволяють розглядати задачу динаміки як систему повністю визначеною. Для побудови цих рівнянь скористаємося теоремою про зміну моменту кількостей руху долота відносно точки G

$$\frac{d\vec{K}_G}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{K}_G = \vec{M}_G, \quad (7)$$

де \vec{K}_G – момент кількостей руху долота відносно точки G , \vec{M}_G – момент сил пружності, які діють на долото, також записаній в цій же системі.

На базі співвідношень (3)-(7) поставлена триточкова крайова задача динаміки нижнього прольоту бурильної колони з долотом. Вона доповнюється також початковими умовами, які задають початкове збудження системи. Чисельне розв'язання поставленої задачі здійснюється методом скінченних різниць із використанням неявної схеми по часу t .

Схеми обертання еліпсоїдального долота на площині.

Оскільки долота у формі витягнутих і сплюснутих еліпсоїдів широко зустрічаються в конструкціях колон глибокого буріння, питання дослідження впливу їх геометрії на форми протікання коливань кружляння становлять практичний інтерес.

Щоб виявити основні причини, що впливають на форми руху долота по дну свердловини, розглянемо прості схеми кінематичного кочення по площині еліпсоїдного тіла обертання, приєднаного до пружного стрижня, що обертається з кутовою швидкістю ω . Для наочності виділимо стани, в яких площина CDG нахилу долота збігається з площиною XOZ (рис. 3). Тоді, якщо еліпсоїд витягнутий і кути $u'(C)$, $v'(C)$ нахилу його осі до вертикалі OZ додатні, то в даний момент часу швидкості

переміщення точки G $\left(\vec{v}_G\right)$ дотику долота з площиною π і вершини D $\left(\vec{v}_D\right)$ еліпсоїда паралельні осі

OY і долото рухається навколо колони у напрямі її обертання (рис.3а). Проте ситуація змінюється, якщо переміщення $u(C)$, $v(C)$ додатні, але кути $u'(C)$, $v'(C)$ від'ємні (рис.3б). В цьому випадку

швидкості \vec{v}_D , \vec{v}_G змінили свої напрями на протилежні і долото перекочується навколо колони в напрямі, протилежному до її обертання.

Ще складнішою є кінематика руху сплюсненого долота, якщо його вершина D і точка дотику G знаходяться по різні сторони від осі колони. В цьому випадку, залежно від знаку кутів $u'(C)$, $v'(C)$ вершина D може рухатися у напрямі обертання, тоді як точка дотику G – в зворотному (рис.3в) або, навпаки, точка D може переміщатися у напрямі обертання, а точка G в протилежному напрямі (рис.3г).

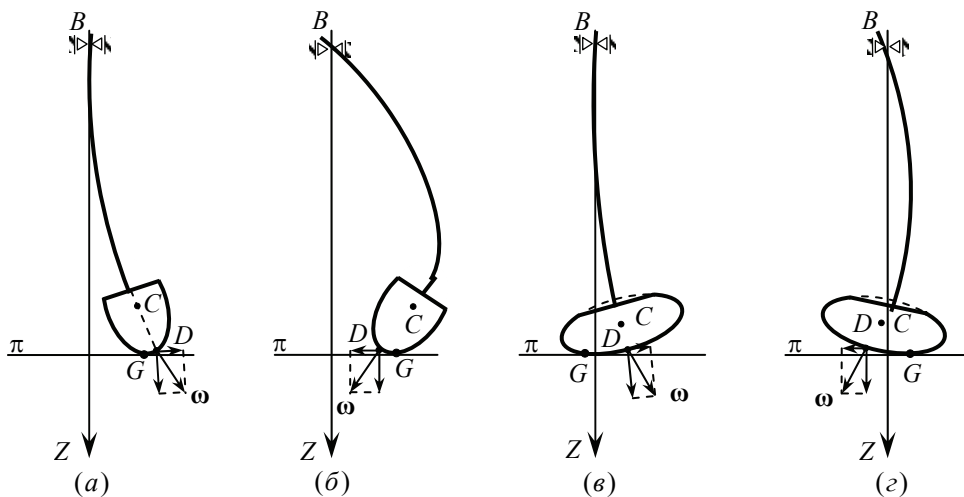


Рисунок 3 – Кінематична схема обертання еліпсоїдного долота

Результати досліджень.

По розробленій методиці були проведені дослідження коливань еліпсоїдального долота при різних значеннях геометричних параметрів. На рис. 4 показані траєкторії руху точки контакту G по дну свердловини в нерухомій системі координат.

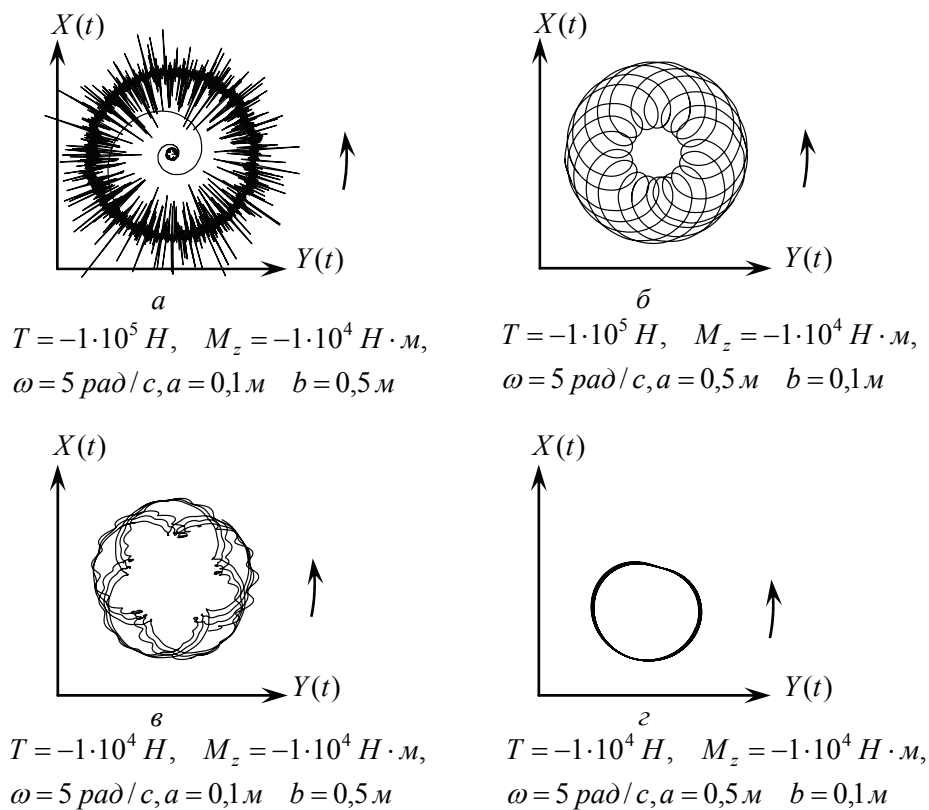


Рисунок 4 – Траєкторії руху точки контакту долота з дном свердловини

Форми переміщення еліпсоїдального долота значною мірою залежать від значень поздовжньої сили T , крутного моменту M_z , та самої форми долота. На рис 4а,б показано, що при однаковій поздовжній силі, крутному моментові і кутовій швидкості, але при різних формах доліт траєкторії руху неоднакові. Якщо долото має витягнуту форму то його траєкторією є більш ривкообразна крива,

а при сплюсненому долоті траєкторією є гладка петлеобразна крива. Аналогічно, на рисунку 4в траєкторією є крива вже з меншими ривками, а на рисунку 4г – плавна лінія, яка має форму майже кола. Із рис. 4 видно, що поздовжня сила також має вплив, чим менша сила, тим гладшою є траєкторія руху точки контакту.

В процесі бурінні свердловини стійкість бурильної колони значною мірою залежить від навантажень прикладених до нижньої її частини. При взаємодії долота з дном свердловини нижня частина БК стискається, а верхня знаходиться в розтягнутому стані. Під дією поздовжньої осьової сили і крутного моменту вона може втратити стійкість. На рис. 5 показані форми згинання бурильної колони при однаковій кутовій швидкості $\omega = 5 \text{ рад/с}$ обертання колони, крутному моменту $M_z = -1 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, але різній поздовжній силі і різній формі долота, випадок (а) для витягнутого, (б) – сплюсненого.

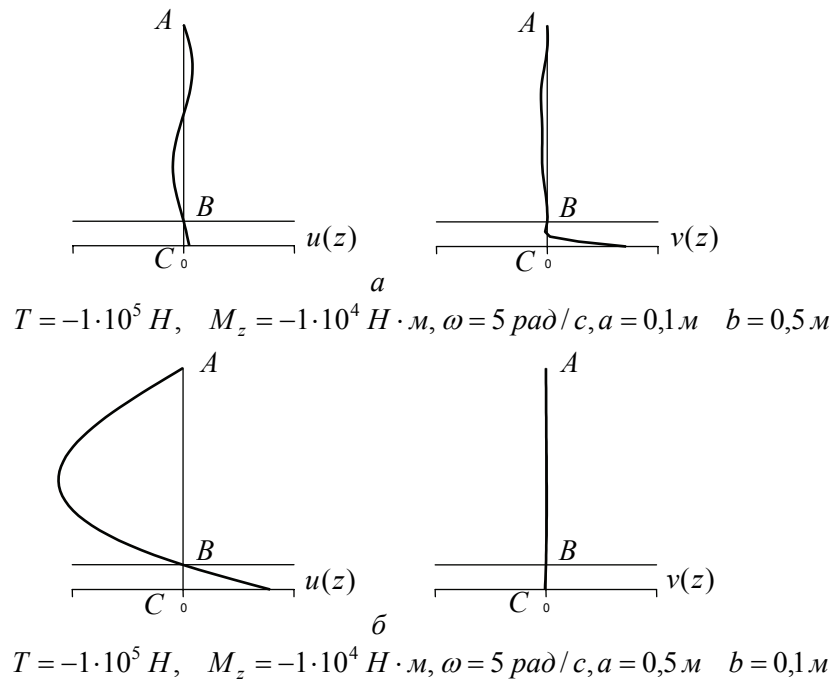


Рисунок 5 – Форми згинання бурильної колони в її нижній частині

Висновки.

Поставлена задача про коливання кружляння долота в бурильній колоні є багатопараметричною. Обговорюються кінематичні і динамічні ефекти, які впливають на контактну взаємодію долота з дном свердловини. Виконано аналіз дослідження коливань кружляння долота еліпсоїдальної форми та власних коливань колон глибокого буріння. Встановлено, що в залежності від форми долота характер коливань є різним. Отримані результати можуть бути враховані при проектуванні конструкцій доліт і режимів буріння.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Borshch E.I. Helical traveling waves in elastic rods / E.I. Borshch, E.V. Vashchilina, V.I. Gulyayev – Mechanics of Solids. 2009. – V.44, No.2 – P. 288 – 293.
2. Gulyayev V I. 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, No.3. – P.234-244.
3. 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.

4. Jansen J.D. Wirl and chaotic motion of stabilized drill collars / J.D. Jansen. – SPE Drilling Engineering. 1992. – V. 7, No. 2. – P. 107 – 114.
5. Neimark Ju.I. and Fufaev, N. A. Dynamics of Nonholonomic Systems / Ju.I. Neimark, N.A. Fufaev, 1972, 519p. (Translation of mathematical monographs, 33, Amer. Math. Soc., Providence, RI).
6. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии / П.К. Рашевский. – М.: Наука, 1967. – 664 с.
7. Gulyayev V.I. Dynamics of spiral tubes containing internal moving masses of boiling liquid / V.I. Gulyayev, E.Yu. Tolbatov. – Journal of Sound and Vibration. 2004. – V. 274. – P. 233–248.
8. Gulyayev V.I. Forced and self-excited vibrations of pipes containing mobile boiling fluid clots / V.I. Gulyayev, E.Yu. Tolbatov. – Journal of Sound and Vibration. 2002. – V. 257. – P. 425–437.

REFERENCES

1. Borshch E.I., E.V. Vashchilina E.V. and Gulyayev V.I. Helical traveling waves in elastic rods. Mechanics of Solids. 2009. V. 44, No. 2. P. 288 – 293.
2. Gulyayev V.I., Shevchuk L.V. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep borehole. Journal of Multi-body Dynamics. 2013. V. 227, No. 3. P. 234–244.
3. 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.
4. Jansen J.D. Wirl and chaotic motion of stabilized drill collars / Jansen J.D. – SPE Drilling Engineering. 1992. V. 7, No. 2. P. 107 – 114.
5. Neimark, Ju.I. and Fufaev, N. A. Dynamics of Nonholonomic Systems, 1972. 519p. (Translation of mathematical monographs, 33, Amer. Math. Soc., Providence, RI).
6. Rashevsky P.K. Differential Geometry. Moskva: Nauka, 1967. – 664p. (Rus)
7. Gulyayev V.I., Tolbatov E. Yu. Dynamics of spiral tubes containing internal moving masses of boiling liquid. Journal of Sound and Vibration. 2004. V. 274. P. 233–248.
8. Gulyayev V.I., Tolbatov E. Yu. Forced and self-excited vibrations of pipes containing mobile boiling fluid clots. Journal of Sound and Vibration. 2002. V. 257. P. 425–437.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Коливання кружляння доліт бурильних колон / Л. В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2013. – Вип. 28.

В статті розглядається задача про крутильні коливання кружляння долота бурильної колони, яка попередньо напружена поздовжньою силою і обертається під дією прикладених до долота моменту сил різання.

Об'єктом дослідження є долото бурильної колони в процесі його кочення по поверхні свердловини.

Мета роботи полягає в дослідженні коливань кружляння доліт бурильних колон, що виникають при контактній взаємодії долота зі стінкою свердловини.

Методи дослідження – алгоритми чисельного інтегрування нелінійних рівнянь.

Серед основних питань, пов'язаних з добуванням розвіданих ресурсів нафти та газу є проблеми виникнення нештатних ситуацій, викликаних критичними станами квазістатичної рівноваги і коливань конструкції низу бурильної колони. Одне з них полягає у збуренні коливань кружляння. В роботі побудована математична модель коливань кружляння.

Результати аналізу можуть бути упроваджені в практиці теоретичного і експериментального дослідження динаміки колон глибокого буріння в нафтових і газових свердловинах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БУРИЛЬНА КОЛОНА, БУРІННЯ, ДОЛОТО, КОЛИВАННЯ КРУЖЛЯННЯ.

ABSTRACT

Shevchuk L.V. Whirling of drill string bits. Visnyk National Transport University. – Kyiv. National Transport University. 2013. – Vol. 28.

In the paper, the problem of torsional autovibrations of drill string bit preloaded by longitudinal force is considered. The drill string is rotating under the action of the cutting force moment applied to the bit.

The analysis object is connected with the drill string bit in the process of its rolling on the bore-hole surface.

The analysis target consists in investigation of the drill string bit whirling which appear under conditions of the bit contact interaction with the bore-hole wall.

The analysis methods are the algorithms of numerical integration of non-linear equations.

Amidst the basic problems connected with extraction of found oil and gas resources, the questions of extraordinary situations appearing due to critical states of quasi-static equilibrium and vibrations of the bottom hole assembly play the important role. The phenomenon of the whirling vibration excitation is one of them. In the report, the mathematic model of the whirling vibrations is constructed, the vibration analysis is performed.

The results can be inculcated into the practice of theoretical and experimental analysis of deep drill string dynamics.

KEYWORDS: DRILL STRING, DRILLING, BIT, WHIRLING.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л.В. Колебания кружения долот бурильных колонн / Л.В. Шевчук // Вестник Национального транспортного университета. – К. : НТУ, 2013. – Вып. 28.

В статье рассмотрена задача о крутильных колебаниях кружения долота бурильной колонны, которая предварительно напряжена продольной силой и вращающаяся под действием приложенных к долоту момента сил резания.

Объектом исследования является долото бурильной колонны в процессе его качения по поверхности скважины.

Цель работы заключается в исследовании колебаний кружения долот бурильных колонн, которые возникают при контактном взаимодействии долота со стенкой и дном скважины.

Методы исследования – алгоритмы численного интегрирования нелинейных уравнений.

Среди основных вопросов, связанных с добычей разведанных ресурсов нефти и газа существуют проблемы возникновения нештатных ситуаций, вызванных критическими состояниями квазистатического равновесия и колебаний конструкции низа бурильной колонны. Одно из них заключается в возмущении колебаний кружения. В работе построена математическая модель колебаний кружения, выполнены их исследования.

Результаты анализа могут быть внедрены в практику теоретического и экспериментального исследования динамики колонн глубокого бурения в нефтяных и газовых скважинах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БУРИЛЬНАЯ КОЛОННА, БУРЕНИЕ, ДОЛОТО, КОЛЕБАНИЯ КРУЖЕНИЯ.

АВТОР:

Шевчук Людмила Володимирівна, аспірант, Національний транспортний університет, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

AUTHOR:

Shevchuk Lyudmila Volodymyrivna, post-graduate students, National Transport University, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, tel. +380667153633, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 511.

АВТОР:

Шевчук Людмила Владимировна, аспирант, Национальный транспортный университет, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

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

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

REVIEWERS:

Gaidaichuk V.V., Dr. Sc., Professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

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