

АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ КРУЖЛЯННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН НА ОСНОВІ ФРИКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

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

ANALYSIS OF DRILL STRING BIT WHIRLING ON THE BASIS OF FRICTION MODEL

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

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ КРУЖЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ НА ОСНОВЕ ФРИКЦИОННОЙ МОДЕЛИ

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

Постановка проблеми.

В даний час близько 90% всієї енергії, яку споживає людство, зв'язане з добуванням вуглеводневих палив, із яких нафта і газ складають головну компоненту. З огляду на те, що легкодоступні поклади вуглеводневих палив практично виснажені в результаті їх інтенсивного видобутку, а запаси корисних копалин, які залишилися, сконцентровані на великих глибинах і в шельфових зонах на значній віддалі від суші, все більше поширення отримують нафтогазові технології, основані на проходці глибоких і криволінійних свердловин.

Сьогодні нафтові і газові компанії витрачають близько 20 мільярдів доларів на рік на бурові роботи. Значна частина цих коштів, близько 15%, йде на виробничі збитки, які пов'язані з виникненням надзвичайних ситуацій [1]. Як правило, вони з'являються в результаті деяких квазістатичних і динамічних явищ, що мають істотний вплив на весь процес буріння. Серед них суттєвий вплив мають фрикційні прихвати бурильних колон, критичні згинальні випинання і вібрації, які можуть включати осьові, крутильні і згинальні коливальні рухи [2-5].

Осьові (поздовжні) коливання БК приводять до багаторазових виходів її долота з контакту з дном свердловини, які чергуються ударними контактними взаємодіями. Крутильні коливання виникають в результаті самозбудження при зривній фрикційній взаємодії долота зі стінкою свердловини [3,6,7]. Проте найбільш складним механізмом володіють згинальні коливання низу бурильної колони. У випадках, коли на долото діють нормальні і дотичні сили контактної і фрикційної взаємодії долота зі стінкою свердловини, геометричний центр долота починає рухатися навколо осевої лінії свердловини, випереджаючи або відстаючи від обертального руху самої колони. В механіці такі коливання отримали назву прецесійних коливань. Як зазначено в англійській науковій літературі [3,8], описаний рух центра долота має іншу природу. Він вивчався на вельми спрощених фізичних і математичних моделях і отримав назву "whirling" – кружляння. Коливання кружляння відбувається за рахунок згинальних коливань бурильної колони і викликаного ними кочення долота по дну свердловини.

Мета роботи полягає в дослідженні крутильних коливань кружляння на основі фрикційної взаємодії еліпсоїдного долота зі стінкою свердловини.

Виклад основного матеріалу.

На основі фрикційної моделі вважатимемо, що кочення долота по поверхні дна свердловини буде здійснюватися без проковзування і воно зв'язане з пружно згинальною бурильною колоною і не є вільним. Тому рух долота суттєво залежить від пружної піддатливості колони, яка визначається не тільки величиною згинальної жорсткості EI (тут E – модуль пружності матеріалу труби колони, I – момент інерції площі її поперечного перерізу), але й близькістю її напруженого стану до критичного. У загальному випадку настання цього стану залежить від величини змінної осевої сили T , крутного моменту M_z , кутової швидкості ω обертання бурильної колони і швидкості V внутрішнього потоку промивної рідини [3]. Сила T визначається розподіленими силами тяжкості, які діють на елементи бурильної колони, і вертикальної сили R контактної взаємодії долота з дном свердловини. Тому в своїй верхній частині бурильна колона розтягнута, а в нижній – стиснена. Завдяки цьому, БК може втратити стійкість в зоні нижнього краю. Для підвищення її згинальної жорсткості в зоні стискання до неї приєднують з певним кроком центрвальні пристрої (рис.1), які відіграють роль додаткових опор і ділять її нижню частину на ряд секцій. Зазвичай найбільш деформованими виявляються нижні секції, тому для динамічного аналізу коливань кружляння долота умовно виділимо систему, яка складається із долота і двох нижніх секцій БК (рис.1).

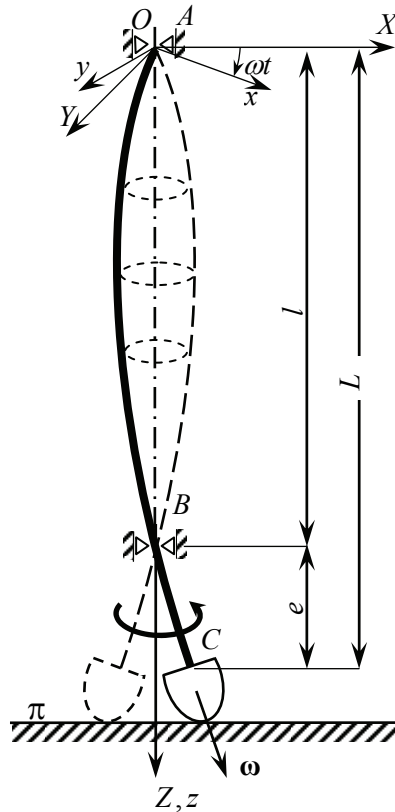


Рисунок 1 – Розрахункова схема кружляння бурильного долота

Динаміка БК розглядається в нерухомій системі координат $OXYZ$ і в системі координат, що обертається $Oxyz$. Осі OZ і Oz цих систем співпадають.

Як показано в роботі [3], для типових значень параметрів, які визначають динаміку внутрішнього потоку промивної рідини, її вплив на згинання БК являється досить малим [2,3]. Тому цим гідродинамічним ефектом можна знехтувати і рівняння поперечних коливань труби БК представити в системі координат $Oxyz$ в формі співвідношень теорії балок, що обертаються [2-5]

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} - T \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - M_z \frac{\partial^3 v}{\partial z^3} - \gamma_t \omega^2 u - 2\gamma_t \omega \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma_t \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

(1)

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - T \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + M_z \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \gamma_t \omega^2 v + 2\gamma_t \omega \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_t \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0.$$

Тут $u(z)$, $v(z)$ – функції пружних бічних переміщень БК в напрямках осей xOz і yOz , відповідно; γ_t – лінійна щільність труби БК з внутрішніми масами броду; t – час.

Питання формулювання граничних умов на нижньому кінці БК мають необхідність врахування умов контактної взаємодії долота з породою на дні свердловини. Вважатимемо, що абсолютно тверде долото має форму еліпсоїда обертання з півосями a і b (рис.2). В точці G воно знаходиться в контакті з плоским горизонтальним дном свердловини і ковзає по площині π зі швидкістю v_G . Бурильна колона обертається з постійною кутовою швидкістю ω , приводячи при цьому долото в рух. Додаткові пружні і крутильні коливання БК не враховуємо, діючи на долото осьова сила T і крутний момент M при коливаннях залишаються незмінними.

Умовно відділимо долото від бурильної колони і розглянемо динамічну рівновагу діючих на нього сил і моментів. Умова рівності нулю головного вектора всіх сил, які прикладені до долота, в загальному випадку має вигляд

$$\mathbf{F}^{el} + \mathbf{T} + \mathbf{F}^{cont} + \mathbf{F}^{in} = 0.$$

(2)

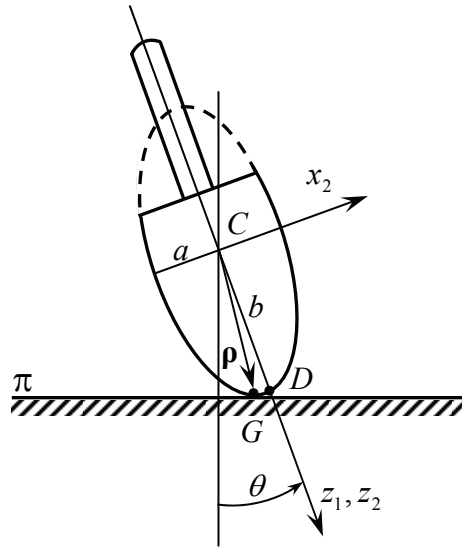


Рисунок 2 – Положення точки G дотику еліпсоїда і площини π

Тут \mathbf{F}^{el} – головний вектор пружних сил в точці C приєднання бурильної колони до долота; \mathbf{F}^{in} – головний вектор сил інерції; \mathbf{F}^{cont} – вектор контактних сил, прикладених до долота в точці G . Цей вектор можна представити у вигляді

$$\mathbf{F}^{cont} = \mathbf{F}^{fr} + \mathbf{F}^{norm}, \quad (3)$$

де \mathbf{F}^{fr} – сила тертя, \mathbf{F}^{norm} – нормальна компонента контактної сили.

Вектор сил тертя \mathbf{F}^{fr} обчислюється на основі закону Амонтона-Кулона, який для рухомого тіла в нерухомій системі координат $OXYZ$ формулюється у вигляді залежності

$$\mathbf{F}^{fr} = -\mu |\mathbf{T}| \cdot \mathbf{v}_G^{abs}. \quad (4)$$

Тут μ – коефіцієнт сухого тертя, \mathbf{v}_G^{abs} – абсолютна швидкість точки G долота.

В результаті проектування рівнянь (4) на вертикальну вісь Oz отримаємо

$$\mathbf{F}^{norm} = -\mathbf{T}.$$

Розглядаючи рівновагу всіх сил, прикладених до долота в горизонтальній площині, отримаємо перші дві граничних умови для системи (1) в точці C :

$$EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} - \mu |\mathbf{T}| \frac{\dot{u} - \omega v + \dot{u}' r_z - \omega r_y}{\sqrt{(v_x^{abs})^2 + (v_y^{abs})^2}} = 0, \quad (5)$$

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

Друга група граничних рівнянь на цьому краю формулюється виходячи із умови рівності нулю головного моменту всіх сил, які прикладені до долота. Форма цих рівнянь залежить від вибору центра розглянутих сил. Найбільш зручно розглядати рівновагу всіх моментів відносно точки G контакту долота з породою, так як в цьому випадку виключаються з розгляду моменти нормальних та фрикційних складових контактної сили. Врахуємо також, що момент інерції тіла долота порівняно малий. Тоді момент сил інерції долота також буде малим і в рівнянні рівноваги моментів відносно точки G збережеться тільки момент $\mathbf{M}_G(\mathbf{Q}^{el})$ вектора \mathbf{Q}^{el} пружних перерізувальних сил.

В векторному вигляді це рівняння формулюється так

$$\mathbf{M}_G(\mathbf{F}^{el}) + \mathbf{M}_G^{el} = 0 \quad (6)$$

Проектуючи вираз (6) на осі Ox , Oy системі координат, яка обертається, отримаємо

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

$$-EI \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} r_z - Tr_x = 0$$
(7)

Таким чином співвідношення (1), (5), (7) представляють повну систему розв'язувальних і крайових рівнянь для поставленої задачі. Її розв'язання здійснюється шляхом заміни похідних по z їх скінченно-різницевиими аналогами. По незалежній змінній t використовується неявна скінченно-різницева схема інтегрування. Вибір кроків інтегрування Δz , Δt здійснюється із умови збіжності обчислювального процесу.

Результати досліджень.

При дослідженні коливач кружляння долота за допомогою фрикційної моделі важливу роль відіграє вибір значення коефіцієнта тертя μ . Відомо, що його величина залежить від трибологічних властивостей матеріалів тіл, які труться і якості обробки матеріалу.

Необхідно підкреслити, що коефіцієнт тертя між поверхнями долота і породи може бути великим, оскільки алмазні різці, які є на поверхні долота, суттєво збільшують зчеплення між контактуючими тілами. Тому моделювання коливач кружляння за допомогою фрикційної моделі проводилося при різних значеннях $\mu = 0,2; 0,5; 1; 5; 20$ і 30 .

В ході дослідження використовувалося долото еліпсоїдної форми з півосями $a = 0,3$ м, $b = 0,1$ м. На рис. 3 показані траєкторії руху точки контакту G по дну свердловини в нерухомій системі координат. Позиції а, б, в – відповідають значенням $\mu = 0,2; 0,5; 1$, відповідно. Точка G рухається по спіральній кривій, що розширюється. Такий режим буріння є нестійким. Позиції г, д – відповідають значенням $\mu = 5$ і 20 , тут точка G здійснює рух по колу. Таке обертання долота є стійким. Цікавий випадок представляє позиція е, яка відповідає значенню $\mu = 30$. Точка G рухається по кривій, що схожа за формою на «багатопелюсткову квітку». Такий рух є також стійким, але небезпечним так як в цьому випадку відбувається викришування алмазних різців.

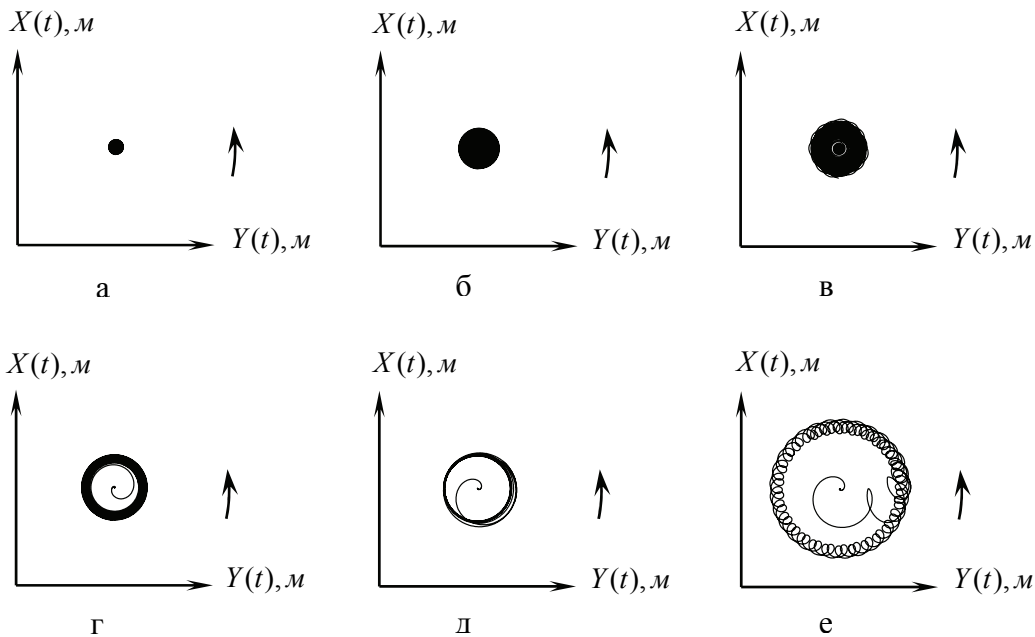


Рисунок 3 – Траєкторія руху точки контакту долота з дном свердловини в нерухомій системі координат
 ($T = -1 \cdot 10^4$ Н, $M_z = -1 \cdot 10^4$ Н·м $\omega = 15$ рад/с, $t = 20$ с)

Висновки.

На основі фрикційної моделі виконаний аналіз коливань кружляння еліпсоїдного долота бурильної колони, яка попередньо напружена поздовжньою силою і обертається під дією прикладеного моменту сил різання.

Виконано комп'ютерне моделювання явищ кінематичного і динамічного збудження коливань кружляння на простих схемах з простими геометричними тілами. Вони дозволили встановити найбільш важливі фактори, що впливають на характер протікання цих процесів.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aldred W. Managing drilling risk / W. Aldred, D. Plumb, I. Bradford, J. Cook, V. Gholkar, L. Cousins, R. Minton, J. Fuller, S. Goraya, D. Tucker. – Oilfield Review. 1999 – V. 11, No.2. – P. 2 – 19.
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. Warren T.M. Development of a whirl – resistant bit / T.M. Warren, J.F. Brett, L.A. Sinor. – SPE Drilling Engineering. 1990 – V. 5, No.4. – P. 267 – 275.
5. Stroud D. Real-time whirl detector improves rss reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith. – Hart Exploration & Production Magazine. 2011 – V. 84, No.8. – P.42 – 43.
6. Gulyayev V.I. Theoretical modelling of post-buckling contact interaction of a drill string with inclined bore-hole surface / V.I. Gulyayev, E.I. Andrusenko, N.V. Shlyun. – Structural Engineering and Mechanics. 2014 – V. 49, No.4. – P. 427 – 448.
7. 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, No.1. – P. 139 – 152.
8. 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.

REFERENCES

1. Aldred W. Managing drilling risk / W. Aldred, D. Plumb, I. Bradford, J. Cook, V. Gholkar, L. Cousins, R. Minton, J. Fuller, S. Goraya, D. Tucker. – Oilfield Review. 1999 – V. 11, No.2. – P. 2 – 19.
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. Warren T.M. Development of a whirl – resistant bit / T.M. Warren, J.F. Brett, L.A. Sinor. – SPE Drilling Engineering. 1990 – V. 5, No.4. – P. 267 – 275.
5. Stroud D. Real-time whirl detector improves rss reliability, drilling efficiency / D. Stroud, J. Pagett, D. Minett-Smith. – Hart Exploration & Production Magazine. 2011 – V. 84, No.8. – P.42 – 43.
6. Gulyayev V.I. Theoretical modelling of post-buckling contact interaction of a drill string with inclined bore-hole surface / V.I. Gulyayev, E.I. Andrusenko, N.V. Shlyun. – Structural Engineering and Mechanics. 2014 – V. 49, No.4. – P. 427 – 448.
7. 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, No.1. – P. 139 – 152.
8. 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.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Аналіз коливань кружляння бурильних колон на основі фрикційної моделі / Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

В статті на основі фрикційної моделі розглядається задача про коливання кружляння долота бурильної колони, яка попередньо напружена поздовжньою силою і обертається під дією прикладених до долота моменту сил різання. Коливання кружляння відбувається за рахунок згинальних коливань бурильної колони і кочення долота по дну свердловини.

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

Мета роботи полягає в дослідженні крутильних коливань кружляння на основі фрикційної взаємодії еліпсоїдного долота зі стінкою свердловини.

Методи дослідження – алгоритми чисельного інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь.

Найбільш складним механізмом володіють згинальні коливання низу бурильної колони, які викликані дією на долото змінних з часом нормальних і дотичних сил контактної і фрикційної взаємодії долота зі стінкою свердловини.

Проведено дослідження коливань кружляння бурильних колон при умові складної комбінації сил інерції їх обертального руху з урахуванням умов фрикційного кочення долота по поверхні свердловини.

Виконано комп'ютерне моделювання механізму фрикційного збудження коливань кружляння на простих кінематичних схемах з простими геометричними тілами. Вони дозволили встановити найбільш важливі фактори, що впливають на характер протікання цих коливань.

Результати аналізу можуть бути враховані при проектуванні конструкцій доліт і режимів буріння.

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

ABSTRACT

Shevchuk L.V. Analysis of drill string bit whirling on the basis of friction model. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

In the paper, the problem on whirling vibrations of drill string bit is considered on the basis of friction model. The drill string is preloaded by axial force and rotates under action of the torque applied at its top end. The whirling vibrations are agitated by bending vibrations of the drill string and rolling of the bit on the bore-hole bottom.

The research object is the drill string bit in the process of its rolling on the well bottom surface.

The work aim consists in investigation of torsional vibrations on the basis of frictional model of the ellipsoidal bit interaction with the bore-hole bottom and wall.

The research methods include the algorithms of numerical integration of non-linear differential equations.

It is shown that the most complex mechanism of the bottom hole assembly is associated with the action of the variable normal and tangent contact forces on the bit body and its interaction with the well wall.

Analysis of the drill string whirl vibration is performed under condition of action of complex combination of inertia forces of account effects of frictional rolling of the bit on the bore-hole bottom.

Computer simulation of kinematic excitation of whirling vibration is performed with the use of frictional schemes with the bodies of simple shapes. The analysis results permitted to establish the most important factors, influencing on the character of the vibration proceeding.

These results can be taken into account in design of the bit structures and the drilling regimes.

KEYWORDS: DRILL STRING, DRILLING, BIT, WHIRLING.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л.В. Анализ колебаний кружения бурильной колонны на основе фрикционной модели / Л.В. Шевчук // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

В статье на основе фрикционной модели рассматривается задача о колебаниях кружения долота бурильной колонны, которая предварительно преднапряжена продольной силой и вращается под действием приложенных к долоту момента сил резания. Колебание кружения происходит за счет изгибных колебаний колонны и качения долота по дну скважины.

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

Цель работы заключается в исследовании крутильных колебаний кружение на основе фрикционного взаимодействия эллипсоидного долота со стенкой скважины.

Методы исследования - алгоритмы численного интегрирования нелинейных уравнений.

Наиболее сложным механизмом обладают изгибные колебания низа бурильной колонны, вызванные действием на долото переменных со временем нормальных и касательных сил контактного и фрикционного взаимодействий долота со стенкой скважины.

Проведено исследование колебаний кружения бурильных колонн при условии сложной комбинации сил инерции их вращательного движения с учетом условий фрикционного качения долота по поверхности скважины.

Выполнено компьютерное моделирование механизма фрикционного возбуждения колебаний кружения на простых кинематических схемах с простыми геометрическими телами. Они позволили установить наиболее важные факторы, влияющие на характер протекания этих колебаний.

Результаты анализа могут быть учтены при проектировании конструкций долот и режимов бурения.

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.