

ОСНОВНИ АСПЕКТИ МЕХАНІКИ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ КОЛИВАНЬ КРУЖЛЯННЯ БУРИЛЬНИХ КОЛОН

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

BASIC MECHANICAL ASPECT OF PRESENT MODELS OF DRILL STRING WHIRLING

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

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ КРУЖЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

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

Постановка проблеми.

Незважаючи на наявність на території України покладів нафти, газу, вугілля та сланцевого газу, Україна належить до енергодефіцитних країн і тому вона зацікавлена в розвитку власних джерел енергії. Провідне місце в енергетичному балансі України посідає природний газ. Його частка становить 44 %, що приблизно вдвічі перевищує середні показники по країнах Європи (21 %) та по світі загалом (23 %).

У даний час в Україні видобувається близько 21 млрд. м³ газу при щорічній потребі 75 – 80 млрд. м³. Таким чином вона самостійно може себе забезпечити газом лише на чверть. Потреби нашої держави в нафті на сьогодні становлять 28 млн.т., тоді як власний видобуток покриває приблизно 15 – 18 % її споживань.

Умови видобутку вуглеводневих палив з родовищ, що на даний час вже введено в розробку, постійно ускладнюються через низку чинників. Переважна частина родовищ нафти мають початкові видобувні запаси менше 1 млн. т. і лише деякі з них мали початкові запаси понад 20 млн. т.

Для суттєвого і швидкого нарощування нафти і газу в Україні необхідно відкриття великих і значних за запасами (більше 30 млн. т.) родовищ. Це, в основному, великі глибини (глибше 6 км) та нові слабо освоєні території: глибоководний шельф Чорного моря, окраїнні зони ДДЗ (Дніпровсько-Донецької западини), перехідні зони від суші до моря. Більшість нафтових та газових родовищ, які перебувають в експлуатації, вичерпали свої запаси, що призводить до спаду обсягів видобутку, однак потенціал цих родовищ ще не повністю використаний. Тому для стабілізації видобутку нафти та газу потрібна модернізація наявних нафтовидобувних установок.

Однак практичне впровадження технології буріння глибоких свердловин вимагає відповідного математичного моделювання для проектування їх траєкторій і використання сучасної техніки та технології для їх проектування та проходки. При цьому найбільший інтерес представляють питання визначення зовнішніх і внутрішніх сил, а також крутних моментів, що діють на бурильну колону в свердловині у процесах її спуску, підйому й функціонування. Різні наукові і технічні аспекти конструкцій бурильної установки, технологічних режимів буріння в наземних умовах і в морських акваторіях, а також механічних явищ, які супроводжують процеси буріння, відображені в роботах [1–3].

Виклад основного матеріалу.

Моделювання сил опору й динамічних явищ, що супроводжують буріння свердловини, дозволяє вирішувати такі фундаментальні завдання як отримання стовбура необхідної форми й зниження поздовжніх і поперечних коливань колони, а також зменшення сил контактної й фрикційної взаємодії між колоною й стінкою свердловини.

При добуванні вуглеводневих палив буріння багатометрових свердловин створюється з використанням довгих глибоких конструкцій, що називаються бурильними колонами, які є частиною бурильної установки. Процес буріння – це результат руйнування гірських порід долотом, що обертається з певною швидкістю, яке знаходиться під деяким навантаженням при постійному очищенні свердловини від вибуреної породи буровим розчином. Бурильна установка складається із підйомного механізму, приводного пристрою і системи подачі промивної рідини (рис. 1). Приводний пристрій включає бурильну колону, конструкцію її нижньої частини і бурильне долото. За допомогою приводного пристрою бурильній колоні і долоту повідомляється обертальний рух і вони

навантажуються крутним моментом і осьовою силою. В нижній частині бурильної колони осьова сила є стискуючою, тому щоб уникнути втрату стійкості і випинання БК в неї включаються більш товстостінні трубчасті елементи.

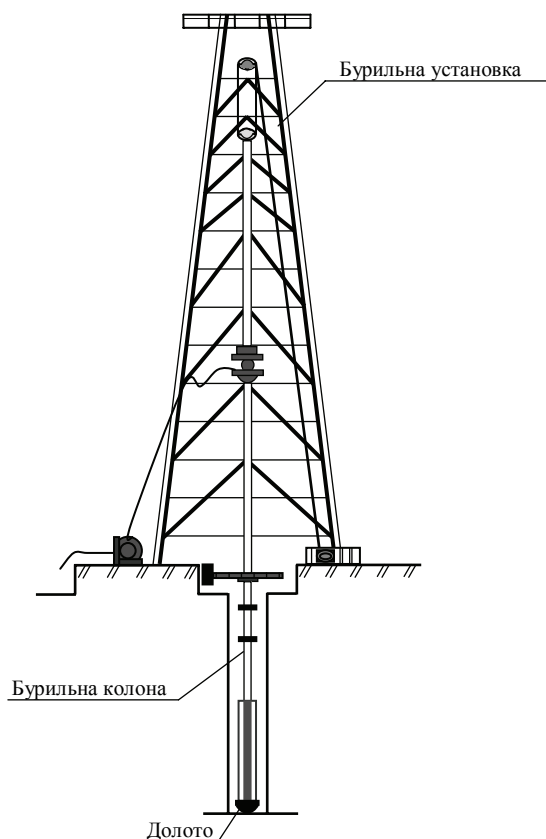


Рисунок 1 – Схема бурильної установки

Оскільки бурильна колона представляє собою дуже гнучку конструкцію, в процесі буріння вона знаходиться в режимі складного динамічного руху. Він включає поздовжні, крутильні і поперечні коливання, які як правило виявляються суттєво нелінійними із-за контактної взаємодії бурильної колони зі стінкою свердловини. Ці коливання є однією із основних причин передчасного руйнування елементів бурильної колони, знижують ефективність буріння, пошкоджують стінку свердловини, викликають труднощі в управлінні траєкторією свердловини.

Тому добування вуглеводневих палив пов'язане із значними технологічними труднощами проходки глибоких свердловин та високим показником аварійності бурильного виробництва. Причини виникнення аварій при буріння пов'язані з можливістю появи нештатних ситуацій, викликаних критичними станами квазістатичної рівноваги і коливань бурильних колон (БК).

Явища, які лежать в основі процесу пружних згинальних коливань нижньої частини бурильної колони, мають суттєві відмінності від ефектів, які виявлені в теорії пружних валів з роторами. Ці відмінності викликані наявністю постійної відривної і безвідривної контактної взаємодії долота з дном свердловини і її стінкою.

Осьові (поздовжні) коливання бурильної колони приводять до багаторазових виходів з контакту її долота з дном свердловини (відскокам), які чергуються з ударними контактними взаємодіями. Крутильні коливання виникають в результаті самозбудження при зривній фрикційній взаємодії долота зі стінкою свердловини. Зазвичай вони реалізуються в системах з тертям, які мають падаючу характеристику і в них можна виділити дві фази. В одній із них долото прихоплюється стінкою свердловини і знаходиться в нерухомому стані (в теорії автоколивань – в стані «залипання»), в іншій воно відривається від стінки свердловини і зі збільшеною кутовою швидкістю ковзає вздовж неї.

Детальне вивчення коливань кружляння почалося, мабуть, з робіт Jansen [4]. На основі математичної моделі «маса-пружина», в якій долото замінене жорстким диском, а пружна бурильна колона – пружиною, в цих роботах зроблена спроба пояснення коливань прямого і зворотного

кружляння. При цьому однак, пряме кружляння пояснюється як результат звичайного кругового руху в нерухомій системі координат долота, яке має дисбаланс маси. В цій постановці контакт диска з дном і стіною свердловини не враховується. Зворотнє кружляння моделюється як ефект кочення ободом диска по стінці свердловини.

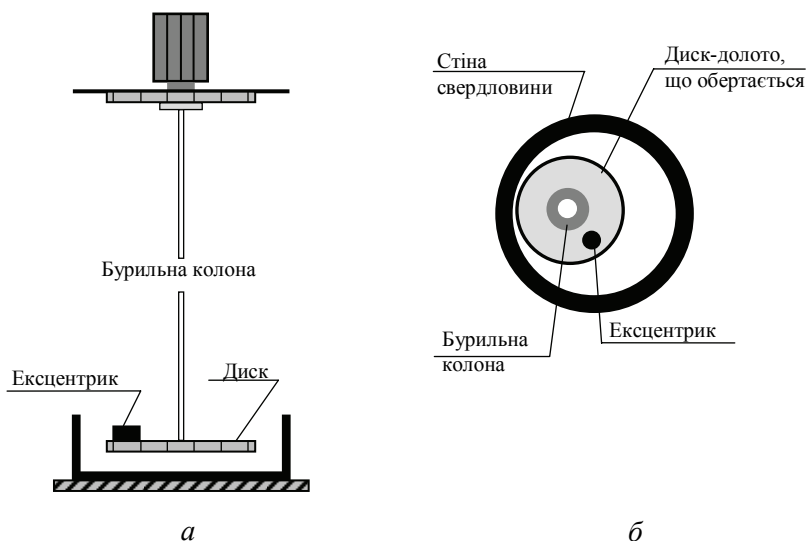


Рисунок 2 – Вид збоку (а) і зверху (б) моделі коливань кружляння [11]

Контакт диска з дном свердловини теж не враховується. Конструктивна схема такої моделі наведена, наприклад, в роботі Liao, Vlajic, Karki та Balachandran [5]. За допомогою цієї моделі робиться твердження про можливість її застосування для пояснення механізму самозбудження прямих і зворотних коливань кружляння (рис.2). З цими висновками навряд чи можна погодитися, оскільки запропонована модель є занадто спрощеною і не може виявити основні ефекти, які властиві системі.

Тим не менш, модель «диск-пружина» отримала широке поширення і використовувалася багатьма авторами. Так, Leine [6] та співавтори [4] використовували таку модель для опису ковзання (фрикційна модель) і кочення без ковзання (модель ролика) долота по стінці свердловини. З її допомогою вивчається стійкість цього процесу.

Аналогічна, але не настільки складна дискова модель обговорюється також в роботі Abdul Majeed та інші [7], однак в ній додатково врахована інерційна властивість приводного пристрою. В статті Vijayan та інші [8] також враховано вплив інерції приводного пристрою, яке розглядається як додатковий (другий) диск. За допомогою такої моделі досліджується зворотнє кружляння долота.

На основі результатів аналізу коливань кружляння, за допомогою дискової моделі Warren та інші [9], Langeveld [10], Mensa-Wilmot та Alexander [2], Brett та інші [1], Chen та інші [11], Johnson [12] запропонували нову конструкцію доліт, які зм'якшують ефект коливань кружляння. Наступне ускладнення дискової моделі коливань кружляння отримало за рахунок врахування пружної податливості труби бурильної колони в її нижній частині. Такі ускладнення представлені в роботах Ahmadian та інші [13], Jansen [4], Yigit та Christoforou [3], Wen [14]. В них враховується фрикційна і ударна взаємодія долота зі стінкою свердловини, виводяться рівняння коливань системи, які потім інтегруються числовими методами, обговорюються результати комп'ютерного моделювання. Серед публікацій даного напряму особливе місце займають статті Kovalyshen [15], в яких вперше відмічено, що форма коливань кружляння в значній мірі залежить від геометрії долота. Ним враховані дисбаланси маси долота і прийнято до уваги його форма, розроблена спрощена математична модель з скінченним числом ступенів вільності. З їх допомогою виконано моделювання прямих і зворотних коливань кружляння.

При роторному способі буріння різання породи здійснюється долотом, закріпленому на нижньому кінці бурильної колони, підвішеної в свердловині за верхній кінець. При цьому обертання долота здійснюється за рахунок обертання всієї бурильної колони в результаті дії на її верхній кінець приводного крутного моменту.

В робочому стані, коли колона упирається нижнім кінцем в дно свердловини, на неї діють стискувальна сила вертикальної реакції, крутний момент і відцентрові сили інерції обертального руху,

які сприяють зменшенню її згинальної жорсткості або навіть можуть привести до її біфуркаційного випинання. Як відмічено в роботах [3, 4, 6], в результаті таких деформацій порушується співвісність колони і долота, вісь долота повертається на деякий кут відносно осі свердловини і долото починає дотикатися її дна на деякому віддаленні від осі системи (рис.3).

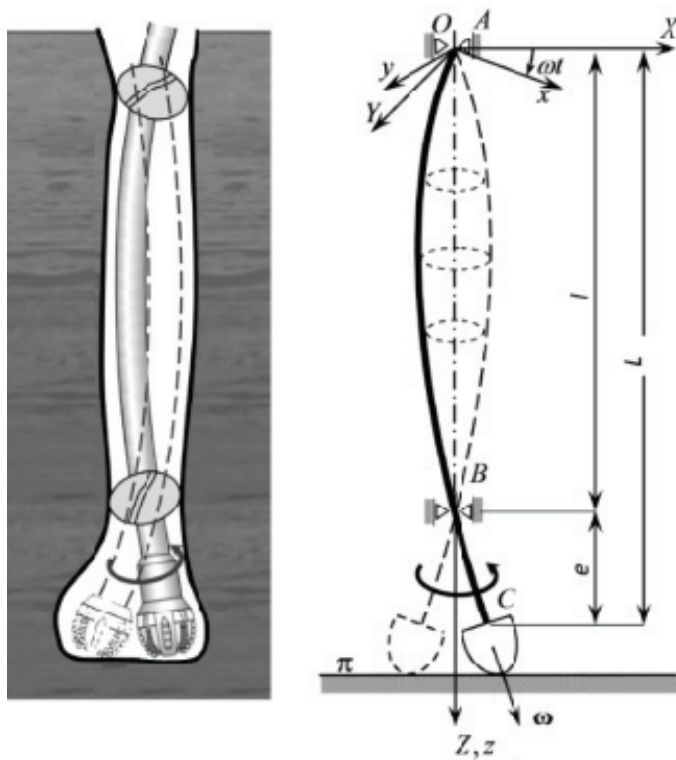


Рисунок 3 – Структурна (а) і розрахункова (б) схеми коливань кружляння бурильних доліт

Відмітимо ще раз, що в цьому випадку можливі два режими руху, які відрізняються характером взаємодії долота з дном свердловини і тому описуються різними математичними моделями. Так, якщо сила притиснення долота до дна невелика і зчеплення між ними порушено, то має місце звичайна фрикційна взаємодія, яка моделюється законом тертя Амонтона-Кулона.

Дослідження динаміки долота за допомогою такої моделі виконано в роботі [16]. Ситуація істотно змінюється із збільшенням осьової сили притиснення долота до дна свердловини і наближенням її до ейлерового критичного значення. Тоді згинальна жорсткість колони зменшується, вона випинається, а алмазні вкраплення, які є на поверхні долота, заглиблюються в скальну породу. При цьому долото втрачає здатність ковзати по дну свердловини і починає перекочуватися по його поверхні, відстаючи або випереджаючи обертання колони. В результаті точка контакту долота з опорною площиною може описувати досить складні траєкторії, які містять петлі і точки зламу, і змінювати напрям руху. Аналіз динаміки таких систем проводився переважно на натурних моделях або за допомогою спрощених математичних моделей. Оскільки в'язь, яка накладається на систему при таких умовах є кінематичною, для дослідження динаміки її руху доцільно застосовувати методи неголономної механіки.

На основі такої постановки задачі в статті [17, 18] досліджена динаміка вертіння і кочення без ковзання сферичного долота по сферичній поверхні дна свердловини. Відзначено, що коливання кружляння долота можуть супроводжуватися трьома видами стійких і нестійких рухів, які пов'язані з прямим і зворотним коченням долота і його чистим вертінням.

Висновки.

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 найменші сили контактної взаємодії долота з поверхнею свердловини мають місце на поверхні дна, а сили притиснення долота до стінки свердловини, як правило, малі.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Brett J.F. Bit whirl- a new theory of PDC bit failure / J.F. Brett, T.M. Warren, S.M. Behr // SPE Drilling Engineering. – 1990. – V.5, No.6 – P. 275–281.
2. Mensa-Wilmot G. New PDC bit design reduces vibrational problems / G. Mensa-Wilmot, W.L. Alexander // Oil Gas Journal. – 1995. – V.93, No.21 – P. 57 – 59.
3. Yigit A.S. Stick-slip and bit-bounce interaction in oil-well drillstrings / A.S. Yigit, A.P. Christoforou // Journal of Energy Resources Technology. – 2006. – V.128, No.4. – P.268-274.
4. Jansen J.D. Nonlinear dynamics of oilwell drillstrings / J.D. Jansen. – Delft University Press, 1993. – 221 pp.
5. Liao C.M. Parametric studies on drill-string motions / C.M. Liao, N. Vljajic, H. Karki, B. Balachandran // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – V.54, No. 1. – P. 260-268.
6. Leine R.I. Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics / R.I. Leine, D.H. Van Campen // Solid Mechanics and its Applications. – 2005. – V.122. – P. 287-296.
7. Abdul Majeed F. Drill bit whirl mitigation analysis: an under actuated system perspective / F. Abdul Majeed, M. Karkoub, H. Karki, Y.L. Abdel Magid // International Journal of Sustainable Energy Development. – 2012. – V.1, No.1/2/3/4. – P. 36 – 40.
8. Vijayan K. The influence of drillstring-borehole interaction on backward whirl / K. Vijayan, N. Vljajic, M.I. Friswell // ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 15 – 17 September, 2014. – P. 1275 – 1288.
9. 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.
10. Langeveld C.J. PDC bit dynamics / C.J. Langeveld // SPE/IADC Drilling Conference. – New Orleans – Louisiana, 1992. – P. 227–242.
11. Chen S.L. Field investigation of the effects of stick-slip, lateral, and whirl vibrations on roller-cone bit performance / S.L. Chen, K. Blackwood, E. Lamine // SPE Drilling & Completion. – 2002. – V.17. – P.15–20.
12. Johnson S.Ch. A new method of producing laterally stable PDC drill bits / S. Ch. Johnson // SPE Drilling & Completion. – 2008. – V.23. – P.314–324.
13. Ahmadian H. Drill string vibration modeling including coupling effects / H. Ahmadian, S. Nazari, H. Jalali // International Journal of Engineering Science. – 2007. – V.18, No.3-4. P. 59 – 66.
14. Wen Z. Flexible shaft whirl induced by dry friction and its stability / Z. Wen // Applied Mathematics and Mechanics. – 1982. – V.3, No.5. – P.731 – 738.
15. Kovalyshen Y. A simple model of bit whirl for deep drilling applications / Y. Kovalyshen // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – V.332, No.24. – P.6321-6334.
16. Musa Nabil W. Whirl interaction of a drill bit with with the bore-hole bottom / Nabil W. Musa, V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk, Hasan Aldabas // Modern Mechanical Engineering. – 2015. – V.5, No.3. – P.41-60.
17. 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. – P.234-244.
18. Gulyayev V.I. Drill string bit whirl simulation with the use of frictional and nonholonomic models // Journal of Vibration and Acoustics. – 2016. – V.138, No.1.

REFERENCES

1. Brett J.F. Bit whirl- a new theory of PDC bit failure / J.F. Brett, T.M. Warren, S.M. Behr // SPE Drilling Engineering. – 1990. – V.5, No.6 – P. 275–281.
2. Mensa-Wilmot G. New PDC bit design reduces vibrational problems / G. Mensa-Wilmot, W.L. Alexander // Oil Gas Journal. – 1995. – V.93, No.21 – P. 57 – 59.
3. Yigit A.S. Stick-slip and bit-bounce interaction in oil-well drillstrings / A.S. Yigit, A.P. Christoforou // Journal of Energy Resources Technology. – 2006. – V.128, No.4. – P.268-274.
4. Jansen J.D. Nonlinear dynamics of oilwell drillstrings / J.D. Jansen. – Delft University Press, 1993. – 221 pp.

5. Liao C.M. Parametric studies on drill-string motions / C.M. Liao, N. Vljajic, H. Karki, B. Balachandran // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2012. – V.54, No. 1. – P. 260-268.
6. Leine R.I. Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics / R.I. Leine, D.H. Van Campen // *Solid Mechanics and its Applications*. – 2005. – V.122. – P. 287-296.
7. Abdul Majeed F. Drill bit whirl mitigation analysis: an under actuated system perspective / F. Abdul Majeed, M. Karkoub, H. Karki, Y.L. Abdel Magid // *International Journal of Sustainable Energy Development*. – 2012. – V.1, No.1/2/3/4. – P. 36 – 40.
8. Vijayan K. The influence of drillstring-borehole interaction on backward whirl / K. Vijayan, N. Vljajic, M.I. Friswell // *ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 15 – 17 September, 2014*. – P. 1275 – 1288.
9. 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.
10. Langeveld C.J. PDC bit dynamics / C.J. Langeveld // *SPE/IADC Drilling Conference*. – New Orleans – Louisiana, 1992. – P. 227–242.
11. Chen S.L. Field investigation of the effects of stick-slip, lateral, and whirl vibrations on roller-cone bit performance / S.L. Chen, K. Blackwood, E. Lamine // *SPE Drilling & Completion*. – 2002. – V.17. – P.15–20.
12. Johnson S.Ch. A new method of producing laterally stable PDC drill bits / S. Ch. Johnson // *SPE Drilling & Completion*. – 2008. – V.23. – P.314–324.
13. Ahmadian H. Drill string vibration modeling including coupling effects / H. Ahmadian, S. Nazari, H. Jalali // *International Journal of Engineering Science*. – 2007. – V.18, No.3-4. P. 59 – 66.
14. Wen Z. Flexible shaft whirl induced by dry friction and its stability / Z. Wen // *Applied Mathematics and Mechanics*. – 1982. – V.3, No.5. – P.731 – 738.
15. Kovalyshen Y. A simple model of bit whirl for deep drilling applications / Y. Kovalyshen // *Journal of Sound and Vibration*. – 2013. – V.332, No.24. – P.6321-6334.
16. Musa Nabil W. Whirl interaction of a drill bit with with the bore-hole bottom / Nabil W. Musa, V.I. Gulyayev, L.V. Shevchuk, Hasan Aldabas // *Modern Mechanical Engineering*. – 2015. – V.5, No.3. – P.41-60.
17. 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. – P.234-244.
18. Gulyayev V.I. Drill string bit whirl simulation with the use of frictional and nonholonomic models // *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2016. – V.138, No.1.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Основні аспекти механіки існуючих моделей коливань кружляння бурильних колон / Л.В. Шевчук // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2016. – Вип. 1 (34).

В даній статті виконаний аналіз відомих в науковій літературі математичних моделей коливань кружляння, запропоновані нові моделі, які побудовані на обліку фрикційних і неголономних ефектів.

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

Мета роботи полягає в дослідженні відомих математичних моделей коливань кружляння і створення нової моделі, яка дасть можливість врахувати всі фактори, що діють на долото і колону.

В процесі буріння колона у вертикальній свердловині піддається динамічному впливу навантажень складної конфігурації, які збуджують її коливання у формі осьового биття, поперечного биття, крутильних коливань долота і колони, а також коливань кружляння її низу. Встановлено, що всі ці коливання мають складну структуру і їх природа вивчена недостатньо.

Виконано аналіз теоретичних і прикладних аспектів коливання кружляння бурильної колони у вертикальній свердловині.

Результати роботи можуть бути впроваджені в технології буріння глибоких свердловин.

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

ABSTRACT

Shevchuk L. V. Basic mechanical aspect of present models of drill string whirling. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2016. – Issue 1 (34).

In the paper, analysis of mechanical aspects of mathematic models of drill string bit whirling is performed, new models based on taking into account frictional and nonholonomic effects are proposed.

The research object is the drill string bit considered in the process of its rolling on the bore-hole bottom surface.

The research aim consists in analysis of the present mathematic models of the whirling vibrations and elaborate on of new models, permitting to take into account all factors acting on the bit and drill string.

In function, the drill string is exposed to action of complex loads exciting its axial, torsional, and elastic bending (whirling) vibrations. It is established that all these vibrations have complex structure and their nature is not thoroughly studied.

The analysis of theoretic and applied aspects of drill string bit whirling in side vertical bore-hole is performed.

The gained results can be used in technology of deep bore-hole drilling.

KEYWORDS: DRILL STRING, DRILLING, BIT, WHIRLING.

РЕФЕРАТ

Шевчук Л. В. Основные аспекты механики существующих моделей колебаний кружения бурильных колонн / Л.В. Шевчук // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2016. – Вып. 1 (34).

В данной статье выполнен анализ известных в научной литературе математических моделей колебаний кружения, предложены новые модели, построенные на учете фрикционных и неголономных эффектов.

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

Цель работы заключается в исследовании известных математических моделей колебаний кружения и создании новой модели, которая позволит учесть все факторы, действующие на долото и колонну.

В процессе бурения колонна в вертикальной скважине подвергается динамическому воздействию сложных нагрузок, которые возбуждают ее колебания в форме осевого биения, поперечного биения, крутильных колебаний долота и колонны, а также колебаний кружения ее низа. Установлено, что все эти колебания имеют сложную структуру и их природа изучена недостаточно.

Выполнен анализ теоретических и прикладных аспектов колебания кружения бурильной колонны в вертикальной скважине.

Результаты работы могут быть внедрены в технологии бурения глубоких скважин.

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

АВТОР:

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

AUTHOR:

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

АВТОР:

Шевчук Людмила Владимировна, ассистент, 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.

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Gaidaichuk V.V., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Loza I.A., Ph.D., Physics and Mathematics (Dr), professor, National Transport University, Head of Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.