

© В.І. Гуляєв

д-р техн. наук  
Національний транспортний  
університет

В.В. Гайдайчук

д-р техн. наук  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури

Л.В. Шевчук

Національний транспортний  
університет

## Комп'ютерне моделювання коливань кружляння доліт бурильних колон у глибоких свердловинах

УДК 539.413+622.243

У статті розглянуто задачу комп'ютерного моделювання коливань кружляння долота бурильної колони, що обертається, в умовах його фрикційної взаємодії з поверхнею вибою свердловини, проаналізовано механізм можливого чистого кочення без ковзання та обертання долота. Встановлено, що кінематичне збудження такого режиму руху долота є однією з основних причин втрати стійкості його руху. В результаті чисельного моделювання коливань кружляння встановлено три види руху долота, що пов'язані з його чистим обертанням, а також його коченням у прямому і зворотному напрямках.

**Ключові слова:** бурильна колонна, кружляння, свердловина, долото, траєкторія руху, моделювання.

В статье рассмотрена задача компьютерного моделирования колебаний кружения долота вращающейся бурильной колонны в условиях его фрикционного взаимодействия с поверхностью забоя скважины, анализируется механизм возможной реализации режима чистого качения долота без скольжения и вращения. Установлено, что кинематическое возбуждение такого режима движения является одной из основных причин его динамической потери устойчивости. В результате численного моделирования колебаний кружения установлено три вида движения долота, связанные с его чистым вращением, а также его качением в прямом и обратном направлениях.

**Ключевые слова:** бурильная колонна, кружение, скважина, долото, траектория движения, моделирование.

The paper studies the problem of whirl vibrations of a rotating drill string bit under conditions of its friction interaction with the bore-hole bottom surface at the wandering contact point. The mechanism of the bit spinning and rolling without sliding on the rigid surface has been analyzed. To study the whirl vibrations the methods of theoretical mechanics are used. The kinematic inducement of the rotating bit motion without sliding is shown to be the main cause of its stability loss. The detailed study of the bit whirling revealed three types of its motion associated with direct and inverse rolling as well as pure spinning.

**Key words:** drill string, swirling, well, bit, movement trajectory, simulation.

У зв'язку з вичерпанням легкодоступних вуглеводневих ресурсів останнім часом значні об'єми нафти і газу видобувають із більш глибоких підземних резервуарів. Однак у цих випадках видобування нафти і газу пов'язане з технологічними труднощами буріння глибоких свердловин, зокрема можливою появою нештатних ситуацій, викликаних критичними станами квазістатичної рівноваги і коливаннями бурильної колони (БК) [1, 2]. До них відносять фрикційні прихоплення бурильних колон, а також їх критичні згинальні випинання і вібрації, які можуть включати осьові, крутильні і згинальні коливальні рухи [3–5].

Проте найбільш складний механізм мають згинальні коливання низу БК, викликані дією на долото змінних із часом нормальних і дотичних сил контактної та фрикційної взаємодії долота зі стінкою свердловини. У цьому випадку геометричний центр долота починає рухатися навколо осьової лінії свердловини, випереджаючи або відстаючи від обертального руху самої колони. У механіці вони отримали назву прецесійних коливань. У роботах [6, 7] зазначено, що описаний вище рух центра долота має іншу природу і для його визначення використовують термін «whirling», в перекладі на українську мову – кружляння. Його вивчали на спрощених фізичних і математичних

моделях із одним або двома ступенями вільності за різних законів фрикційної взаємодії долота зі стінкою та вибоєм свердловини. Ці моделі дуже далекі від реальної системи і слабо відображають реальні динамічні процеси.

Як показують експерименти та спостереження, за деяких режимів коливань кружляння долота починає перекочуватися по криволінійній поверхні вибою свердловини, а його центр рухається за досить складними траєкторіями, які нагадують багатопелюсткову квітку, з утворенням на поверхні стінки свердловини системи жолобів, недопустимих за технічними умовами буріння. При цьому можлива реалізація двох типів руху долота. У одному з них кочення долота відбувається з проковзуванням, і між його поверхнею та вибоєм свердловини виникає сила тертя, направлена вздовж дотичної до траєкторії руху точки контакту. Під час другого типу руху долото, що обертається, перекочується без проковзування по поверхні вибою свердловини, задовольняючи умови кінематичних в'язей. Вивчити автоколивання такої системи можна лише за методами теоретичної механіки та механіки пружних стрижнів.

Стаття присвячена проблемі комп'ютерного прогнозування і моделювання явища коливань кружляння другого типу.

**Методика комп'ютерного моделювання**

Оскільки поверхня долота (рис. 1) і вибій свердловини можуть мати різні геометричні форми, то в процесі буріння під дією різних збурень можливі переходи руху долота від чистого обертання (штатний процес буріння) до його додаткового кочення відходу від вертикалі точки дотику долота з вибоєм свердловини і викривлення осі бурильної колони. Для дослідження цих явищ необхідно поставити задачу про пружні поперечні коливання бурильної колони, в якій кінематичні в'язі є граничними умовами для рівнянь її руху.

Коливання кружляння долота, яке обертається із кутовою швидкістю  $\omega$ , зазвичай супроводжується залученням до вібраційного процесу також і нижніх ділянок колони, які розташовані між центрувальними пристроями і відіграють роль додаткових опор. Тому під час аналізу механізму збудження коливань кружляння долота впливом верхньої частини БК будемо нехтувати і позначимо її фрагменти  $AB$  і  $BC$  довжинами  $l$  і  $e$ . (рис. 2).

Виділена трубчаста ділянка БК попередньо напружена прикладеним до долота крутним моментом  $M_z$  і поздовжньою стискувальною силою  $T$ , рівною реакції обпирання долота на вибій свердловини. Динаміку цієї ділянки моделюватимемо на основі теорії стисло-закручених стрижнів, що обертаються. Для цього введемо нерухому систему координат  $OXYZ$  і систему координат  $Oxyz$ , що обертається разом із БК, із загальним початком  $O$  на опорі  $A$ .

Для кількісного аналізу кінематично збуджуваних коливань кружляння необхідно скласти рівняння динаміки всієї виділеної для розгляду двопрогонної балки  $ABC$ , що обертається, попередньо напруженої крутним моментом  $M_z = -M^{fr}$  і поздовжньою стискувальною силою  $T = -R$ . Ці рівняння наведено в [1, 2].

Введемо також систему координат  $O_1x_1y_1z_1$  для опису пружного повороту

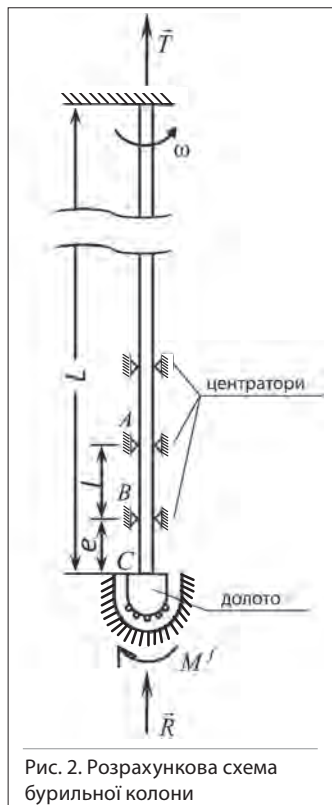


Рис. 2. Розрахункова схема бурильної колони



Рис. 1. Геометричні форми бурильних доліт

ту долота, 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 збігається 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 у разі пружної деформації колони повертаються на кути  $-v'|_C$  і  $u'|_C$  разом із долотом.

Приймемо, що долото має форму еліпсоїда обертання і перекочується по поверхні свердловини, яка є площиною (рис. 3).

Виводячи кінематичні співвідношення 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:

$$\vec{\theta} = \theta_x \vec{i}_1 + \theta_y \vec{j}_1 = -v' \vec{i}_1 + u' \vec{j}_1. \quad (1)$$

Зв'яжемо з долотом систему осей  $Cx_3y_3z_3$ , вісь  $Cz_3$  якої є продовженням пружної осі колони, вісь  $Cy_3$  колінеарна до вектора  $\vec{\theta}$ , а вісь  $Cx_3$  доповнює цю систему до правої трійки векторів (див. рис. 3). Ці осі збігаються з головними центральними осями інерції еліпсоїда. Для визначення точки контакту  $G$  долота з вибоєм свердловини запишемо рівняння еліпса, отриманого шляхом перерізу поверхні долота площиною  $x_3Cz_3$ :

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

У цій же площині введемо осі  $Cx_4$  і  $Cz_4$  (див. рис. 3). Перехід від системи  $x_3Cx_3$  до системи  $x_4Cx_4$  здійснюємо за допомогою формул:

$$x_4 = x_3 \cos \theta + z_3 \sin \theta, \quad z_4 = -x_3 \sin \theta + z_3 \cos \theta. \quad (3)$$

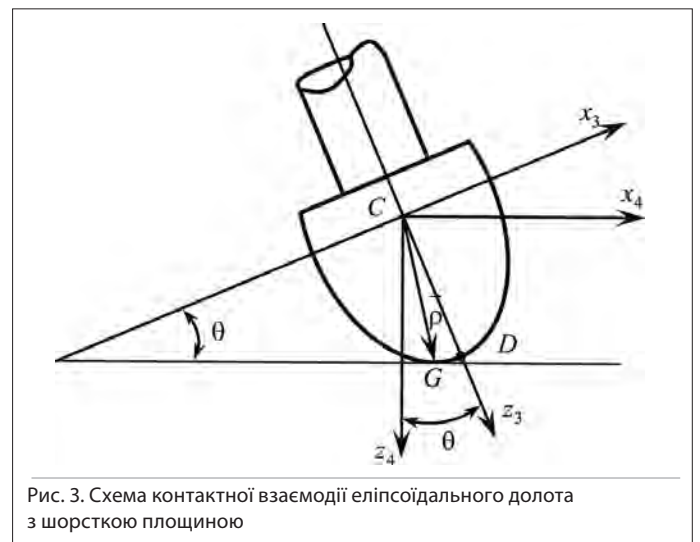


Рис. 3. Схема контактної взаємодії еліпсоїдального долота з шорсткою площиною

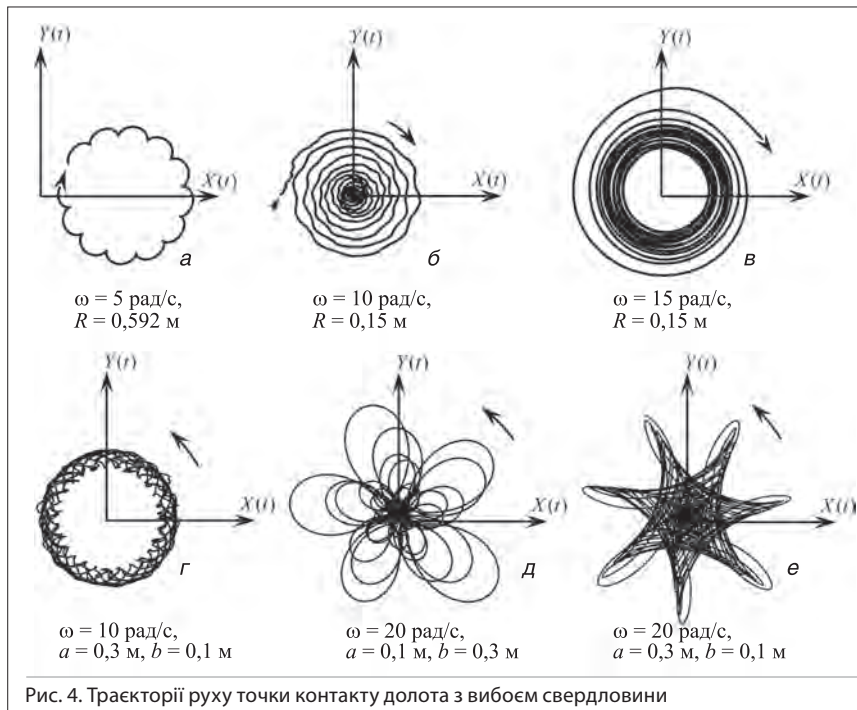


Рис. 4. Траєкторії руху точки контакту долота з вибоєм свердловини

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

$$\dot{u} - \omega v + \dot{u}' \rho_{z_1} - \omega \rho_{y_1} = 0, \quad \dot{v} + \omega u + \dot{v}' \rho_{z_1} + \omega \rho_{x_1} = 0. \quad (4)$$

Вони зв'язують швидкості руху центра долота і його обертання з переміщеннями  $u$ ,  $v$ , тому являють собою кінематичні крайові умови для стрижня бурильної колони. До них додаються умови динаміки долота, які дають змогу розглядати задачу динаміки як повністю визначену систему. Для побудови цих рівнянь скористаємося теоремою про зміну моменту кількостей руху долота відносно точки  $G$ :

$$\frac{d \vec{K}_G}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{K}_G = \vec{M}_G, \quad (5)$$

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

На базі співвідношень (1)–(5) поставлена трьохточкова крайова задача динаміки нижнього прольоту бурильної колони з долотом. Вона доповнюється також початковими умовами, які задають початкове збудження системи. Чисельне розв'язання поставленої задачі здійснюють методом скінченних різниць із використанням неявної схеми по часу  $t$ .

#### Стійкі і нестійкі рухи долота по вибою свердловини

За розробленою методикою проведено дослідження коливань сферичного та еліпсоїдального доліт за різних значень їх геометричних параметрів і кутових швидкостей  $\omega$ . На рис. 4 показано траєкторії руху точки контакту  $G$  по вибою свердловини в нерухомій системі координат. Позиції  $a$ – $f$  на рис. 4 відповідають випадкам сферичного долота радіуса  $a = 0,12$  м. Можна побачити, що за значення радіуса поверхні вибою свердловини  $R = 0,592$  м

(див. рис. 4,  $a$ ) точка  $G$  рухається по замкнутій звивистій траєкторії. При  $R = 0,15$  м,  $\omega = 10$  рад/с точка  $G$  рухається по спіральній кривій, що звужується. Такий режим є стійким і найбільш сприятливим, оскільки долото намагається зайняти штатне (на осі колони) положення після того, як воно виведене із робочого стану. При  $R = 0,15$  м,  $\omega = 10$  рад/с точка  $G$  рухається по спіральній кривій, що розширюється. Такий режим буріння є нестійким.

Для долота еліпсоїдальної форми траєкторії руху контактної точки  $G$  ускладнюються. На рис. 4,  $d$ – $e$  показано відібрані петлеподібні криві, що розширюються, нестійких режимів, які реалізуються для витягнутих ( $a < b$ ) і сплюснутих ( $a > b$ ) еліпсоїдів.

#### Висновок

Насамкінець зазначимо, що розглянута задача самозбудження коливань кружляння є багатопараметричною, оскільки ці режими залежать від форми долота, геометрії поверхні вибою свердловини і кутових швидкостей обертання колони. Однак, як показали наші

розрахунки, стійкість режиму значною мірою визначається згинальною нестійкістю нижнього прольоту колони між двома її центраторами. Оскільки ця жорсткість зі зменшенням площі поперечного перерізу колони та збільшенням крутного моменту й осевої стискувальної сили падає, потрібно так підібрати значення цих величин, щоб унеможливити автоколивання системи.

#### Список літератури

1. **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. – V. 67. – P. 140–148.
2. **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.
3. **Мислюк М.А.** Буріння свердловин. Т. 3. Вертикальне та скероване буріння / М.А. Мислюк, І.Й. Рибчич, Р.С. Яремійчук. – К: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 294 с.
4. **Гуляєв В.І.** Теоретичний аналіз впливу профілю криволінійної свердловини на силу опору руху в ній бурильної колони / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Л.В. Гловач // Нафт. і газова пром-сть. – 2010. – № 3. – С. 20–23.
5. **Гуляєв В.І.** Сучасні методи теоретичного моделювання стану бурильної колони у похило-скерованих свердловинах / В.І. Гуляєв, В.В. Гайдайчук, Л.В. Гловач // Нафт. і газова пром-сть. – 2009. – № 1. – С. 26–30.
6. **Jansen J.D.** Whirl and chaotic motion of stabilized drill collars / J.D. Jansen // SPE Drilling and Engineering. – 1992. – V. 7, No. 2. – P. 107–114.
7. **Leine R.I.** Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics / R.I. Leine, D.H. Van Campen, and W.J.G. Keultjes // Journal of Vibration and Acoustics. – 2002. – V. 124. – P. 209–220.