

## КІНЕМАТИКА ШАРОШКОВОГО БУРОВОГО ДОЛОТА З ПРЯМИМ ГРАНЕНИМ ЗУБОМ

**Б. С. Березницький, М. С. Воробйов**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел./факс (0342) 72-71-47; e-mail: mechmach@iung.edu.ua*

*Запропонована удосконалена методика ударно-кінематичного аналізу взаємодії шарошки долота і породи в процесі буріння нафтогазових свердловин. Попередні дослідження взаємодії шарошкових доліт з породою базувались на далеких від реальності припущеннях: поняття миттєвої осі обертання, постійного контакту шарошки з породою, відсутності ковзання, а також деформування і занурення зубця в породу. Принцип ж дії шарошок полягає в поступовому руйнуванні поверхні вибою внаслідок різжуче-дроблячого сколювання породи зубцем шарошки. Розглядається аксіальна шарошка, для визначення закону руху зубця якої застосований оригінальний метод проекції площин з урахуванням: ковзання шарошок долота по поверхні вибою; фаз занурення зубця шарошки в породу; реальній зміні відстані осі обертання шарошки до поверхні вибою по мірі заглиблення зуба в породу; обґрунтування умов уникнення потрапляння зуба шарошки у попередньо отриману лунку в процесі дроблення вибою. Окрім моменту інерції колони бурильних труб, додатково враховані моменти інерції шарошок за умови косого удару зубця в породу. Методика дозволяє обчислити об'єм зруйнованої породи на вибої як з урахуванням, так і без урахуванням сколювання породи та деформації зуба. Отримані залежності дозволяють підібрати передавальні відношення від бурильної колони до вінців шарошки з умови уникнення потрапляння зубця шарошки у попередньо отриману лунку в процесі руйнування породи на вибої. Це дозволяє підвищити ефективність буріння шарошковими долотами.*

**Ключові слова:** *зуб, шарошка, долото, вибій, свердловина, гірська порода, косий удар.*

**Вступ.** Підвищення техніко-економічних показників буріння нафтогазових свердловин залежить як від використання нового обладнання, так і чіткого уявлення процесів руйнування породи на вибої свердловини. Сучасні розрахункові методики аналізу кінематики роботи шарошкових доліт при бурінні базуються на далеких від реальності припущеннях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій та висвітлення невідієваних проблем.** Кінематичний аналіз взаємодії шарошкових доліт з породою здійснюється на базі помилкового використання поняття миттєвої осі обертання, одна з точок якої визначається з недостатньо обґрунтованої умови рівності моментів сил тертя по різні сторони від неї [1–3]. Відомо, що це поняття можна використовувати лише тоді, коли виконуються наступні три умови: 1) відносна швидкість точок контакту поверхонь двох тіл дорівнює нулю; 2) поверхні цих тіл постійно торкаються у точках контакту; 3) кожне з тіл, які контактують, є абсолютно твердим. Іншими словами, пари контактних тіл не повинні ковзати одне по одному, а тим більше деформуватися чи занурюватися одне в одне. Принцип же дії шарошок полягає в поступовому руйнуванню поверхні вибою внаслідок ковзання по ній та ріжуче-дробляче сколюючому витісненні її матеріалу зубцем, який при цьому сам стискується та згинається. Відстань від осі обертання шарошки до незруйнованої поверхні вибою змінюється, а тому передавальне відношення кінематичної пари «шарошка – долото» також змінюється по мірі заглиблення зуба у породу.

Нехтується також поступовість занурення елементів зуба у породу: спочатку тригранною його торцевою частиною, а потім чотиригранною. Це не дозволяє точно оцінити вплив тертя внутрішнього ковзання частинок продуктів руйнування породи одна по одній, а також їх терті по заглибленій поверхні зуба. Крім цього не враховуються спотворення ряду параметрів руху у площині вибою, спричиненого нахиланням осі обертання шарошки до поверхні площини. Внаслідок цього точка перетину бокової поверхні зуба з колом вершин рухається по просторовій кривій, яка в межах торцевого кута є стороною трикутника, одна зі сторін якого належить сфері радіуса незаглибленої частини шарошки, а друга – сфері радіуса, рівного довжині твірної конуса.

**Метою статті** є створення удосконаленої методики ударно-кінематичного аналізу взаємодії шарошки долота з вибоєм свердловини з урахуванням перелічених вище методик.

**Висвітлення основного матеріалу.** Тришарошкове долото є п'ятиланковим просторовим механізмом, у якому вісь обертання шарошки  $OO_{ш}$  (рис. 1) може перетинати вісь обертання долота у точці  $O$ , або проходити мимо. У першому випадку долото можна назвати аксіальним.

Розглянемо у самоочищувальному його варіанті лише ведучу одноконусну шарошку, яка формує стінки вертикальної свердловини. Аналізу піддано процес взаємодії одного зуба з породою в межах його кутового кроку, вважаючи, що зубці виконані по твірній конуса.

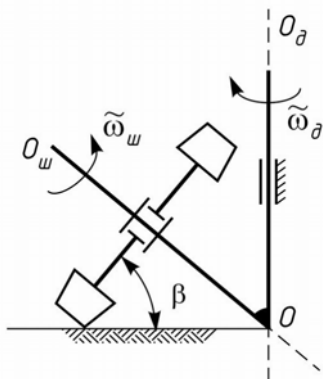
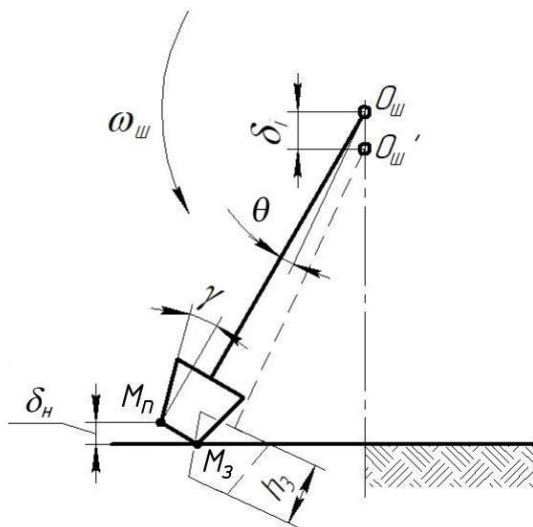


Рис. 1. Розрахункова схема аксіальної шарошки

На початку взаємодії зуб шарошки у торцевій площині торкається заднім ребром породи у точці  $M$  (рис. 2), яка розташована під кутом

$\theta = \arctg\left(\frac{0,5a}{r_0 + h_3}\right)$  до осі симетрії зуба у торцевій площині вінця шарошки.



$a$  – притуплення зуба;  $h_3$  – висота зубця;  $r_0$  – середній радіус

Рис. 2. Схема занурення зубця в породу

Вважаємо, що під дією осевого зусилля у породу занурюється один зуб протягом обертання шарошки навколо осі  $OO_{ш}$  на кут  $r_3 - 2\theta$  у торці вінця шарошки. Тут  $r_3$  є кутовим кроком. При цьому на незруйнованій поверхні вибою спочатку буде знаходитися точка  $M_3$  задньої грані, а наприкінці точка  $M_n$  – передньої грані. Точка  $M_n$  по вертикалі розташована на відстані  $\delta_n = a \sin 0,5\tau_3$  від точки  $M_3$ , якщо не враховувати деформацію руйнуючого зуба. При подальшому обертанні

в межах  $0 \leq \varphi_{и} \leq 2\theta$  він буде заглиблюватися в породу на величину  $\delta_{и} \cos \beta$  тригранною призматичною частиною за законом

$$\delta_{и\Delta} = (r_0 + h_3) \left[ \cos(0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^*) - \cos(0,5\tau_3^*) \right] \left[ \operatorname{tg}(0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^*) + \operatorname{tg}(0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^* - \gamma^*) \right]. \quad (1)$$

Кут  $\varphi_{и}^*$  є спотвореним і рівним  $\varphi_{и}^* = \operatorname{arccctg}(\cos \varphi_{и} \cos \beta)$ , а кут  $\tau_3^* = \operatorname{arccctg}(\cos \tau_3 \cos \beta)$ . Потім зуб буде руйнувати породу чотиригранною частиною в межах зміни кута  $2\theta \leq \varphi_{и} \leq 0,5\tau_3$  за законом

$$\delta_{и0} = a \left[ \frac{\cos \gamma^*}{\cos(\gamma^* + 0,5\tau_3^* - 2\theta)} - \sin(0,5\tau_3^* - 2\theta^*) \right] +$$

$$+ (r_0 + h_3) \left[ \cos(0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^*) - \cos(0,5\tau_3^*) \right] \times$$

$$\left[ \operatorname{tg}(\gamma^* + 0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^*) + \operatorname{tg}(0,5\tau_3^* - \varphi_{и}^*) \right]$$

де  $\gamma$  – кут нахилу грані зуба.

Наприкінці цієї фази зуб заглибиться на величину  $\delta_0$ , а не заглибленою залишиться його частина величиною  $h_3 - \frac{\delta_0}{\sin \beta}$ .

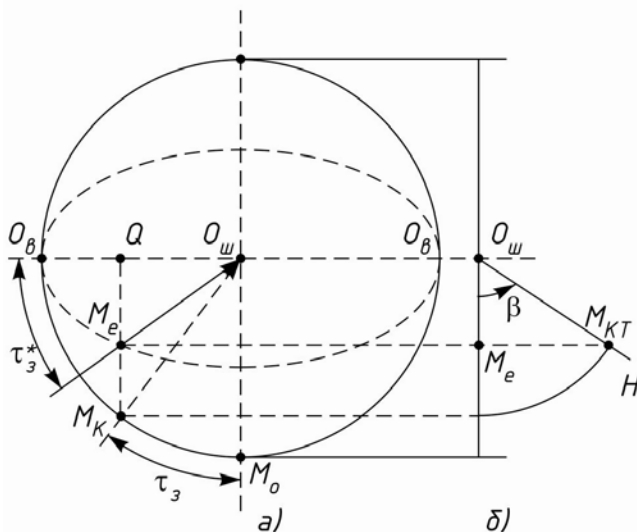
Надалі при винурюванні цей зуб буде взаємодіяти з породу спочатку чотиригранною частиною у діапазоні кута повороту шарошки  $0,5\tau_3 \leq \varphi_{и} \leq \tau_3 - 2\theta$ , а потім тригранною при повороті шарошки у діапазоні  $\tau_3 - 2\theta \leq \varphi_{и} \leq \tau_3 - \theta$ . Наприкінці права грань зуба, яку характеризує точка  $M'_n$ , опиниться на поверхні вибою. Кут  $\varphi_{и}$  визначається через кут повороту долота за формулою

$$\varphi_{и} \approx \varphi_g \frac{l_k}{r_0 + h_3 - \frac{\delta_0}{\sin \beta}}. \quad (3)$$

Для того, щоб встановити зв'язок реального кута повороту  $\tau_3$  в торцевій площині шарошки зі спотвореним кутом повороту  $\tau_3^*$  у площині вибою  $H$ , розглянемо дві проекції: фронтальну та бокову (рис. 3) [4]. Розмір великої осі еліпса дорівнює радіусу кола торця шарошки, рівному  $l_0 + h_3$ . Повернемо шарошку на кут  $\tau_3$ , тоді точка  $M$  перейде з положення  $M_0$  у положення  $M_{кт}$  у площині торця, а її проекція опиниться у точці  $M_e$  еліпса площини вибою. Продовжимо лінію  $M_{кт}M_e$  до перетину з лінією  $O_6O_6$  у точці  $Q$ . Тоді отримаємо систему рівнянь:

$$QM_{кт} \operatorname{tg}(90^\circ - \tau_3) = QM_e \operatorname{tg}(90^\circ - \tau_3^*) = QO_{и}$$

$$\frac{QM_e}{Q_{мк}} = \cos \beta. \quad (4)$$



а – фронтальна проекція; б – бокова проекція  
Рис. 3. Схема спотворення руху точки зуба шарошки

З неї отримаємо

$$\frac{QM_K}{QM_e} = \frac{tg(90^\circ - \tau_3)}{tg(90^\circ - \tau_3^*)} = \frac{1}{\cos \beta} \quad \text{або} \quad \tau_3^* = \text{arcctg}(ctg \tau_3 \cos \beta). \quad (5)$$

Тобто спотворений кут обертання на площині вибою визначається через дійсний кут обертання у торцевій площині шарошки тригонометричною залежністю (5) з урахуванням впливу кута між віссю обертання долота і віссю обертання шарошки.

Величина  $\frac{\delta_0}{\sin \beta}$  залежить від ступеня перекриття (знаходження зубців усіх вінців на одній лінії чи на різних).

Швидкість точки  $M$  дорівнює

$$\bar{v}_M = \frac{d\left(r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta}\right)}{dt} + (\bar{\omega}_M + \bar{\omega}_g) \left(r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta}\right) = -\frac{d\delta_i}{\partial \varphi_u} \frac{\bar{\omega}_u}{\sin \beta} + \bar{\omega}_u \left(r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta}\right). \quad (6)$$

Для визначення траєкторії руху точки  $M$ , наприклад  $M_3$ , проведемо вертикальну площину  $\Pi$  через лінію торкання  $O_o M_{ту}$  незаглибленою частиною зуба шарошки радіуса  $r_0 + h_3 - \frac{\delta_\Delta}{\sin \beta}$  горизонтальної площини  $I$ . Площина  $\Pi$  обернена на кут  $\varphi_g = \varphi_0$  відносно опущеного при цьому долота (рис. 4). У правій перенесеної паралельно системі координат  $x_0 y_0 z_0$ .

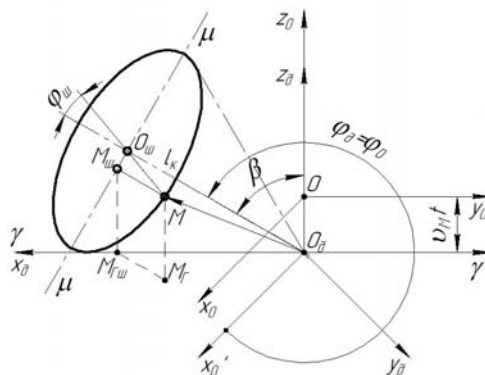


Рис. 4. Розрахункова схема положень шарошки

Спроекуємо точку  $M$  основи незаглибленої частини зуба у біжучому положенні на вісь торця шарошки

$$\mu - \mu : \theta_{uu} M_{uu} = r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta} \cos \omega_{uu} t. \quad (7)$$

Тоді координата  $Z_M$  у нерухомій системі координат дорівнюватиме

$$Z_M = (r_0 + h_3) \sin \beta - M_{uu} \theta_{uu} \sin \beta = (r_0 - \theta_{uu} M_{uu}) \sin \beta. \quad (8)$$

Кут  $\varphi_g = \omega_g t$  зв'язаний із координатами точки  $M$  у площині  $I$  залежністю

$$\operatorname{tg} \omega_g t = \frac{Y_M}{X_M}. \quad (9)$$

Тоді отримуємо таку систему рівнянь

$$\begin{cases} Z_M - (r_0 + h_3)(1 - \cos \omega_{uu} t) \sin \beta = 0, \\ Y_M - X_M \operatorname{tg} \omega_g t = 0, \\ X_M^2 + Y_M^2 + Z_M^2 = r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta} \cos \omega_{uu} t. \end{cases} \quad (10)$$

Додаючи до неї рівняння зв'язку  $\omega_{uu}$  з  $\omega_g$  у вигляді

$$\omega_{uu} \left( r_0 + h_3 - \frac{\delta_i}{\sin \beta} \cos \omega_{uu} t \right) = \omega_g l_k. \quad (11)$$

Чисельно можемо на ЕОМ проаналізувати закон руху точки  $M$ , підставляючи  $\delta_i$  з виразів (1) і (2). Швидкість руху по вертикалі однакова як для долота так і для шарошки, що вимагає додаткових обґрунтувань залежно від характеру процесу руйнування вибою.

Об'єм зруйнованої породи одним зубом без урахування сколу та пружності зуба буде

$$V_{\Sigma} = V_{\Delta} + V_{\diamond} = \frac{4b\pi N}{l_k} \left[ \int_0^{2\theta} \delta_{i\Delta} (r_0 + h_3 - \delta_{i\Delta}) d\varphi_g + \int_{2\theta}^{0,5\tau_3} \delta_{i\Delta} (r_0 + h_3 - \delta_{i\Delta}) d\varphi_g \right]. \quad (14)$$

Для урахування пружності зуба підставимо замість  $\delta_{i\Delta}$  вираз

$$\delta_{i\Delta}^c = \left( \frac{r_0 + h_3}{\sin \beta} \right) [\cos(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu}) - \cos(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu})] \times$$

$$\times [tg(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu}) + tg(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu} - \gamma)]$$

а замість  $\delta_{i\phi}$  вираз

$$\delta_{i\phi}^c = a \left[ \frac{\cos \gamma}{\cos(\gamma + 0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - 2\theta)} - \sin(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - 2\theta) \right] +$$

$$+ \frac{(r_0 + h_3)}{\sin \beta} [\cos(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu}) - \cos(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu})] \times$$

$$\times [tg(\gamma + 0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu}) + tg(0,5\tau_3 + \Delta\varphi_{iu} - \varphi_{iu})]$$

Якщо врахувати сколювання, тоді об'єм збільшиться на

$$\Delta V = 2\tau_3 (\delta_0 + 0,5a - r_0 + L_3)^2 (r_0 + L_3) \sin \varphi_c \cos^2 \beta .$$

Кут, який враховує пружність зуба визначається з рівняння

$$\Delta\varphi_{iu} = 15000l_3^2 \left( \frac{T}{l_k \cos \beta} + \frac{I_{iu} \varepsilon_{iu} \sin(0,5\tau_3 - \varphi_2 + \rho) \cos \beta}{\sqrt{(r_0 + l_3)^2 + 0,25a^2 \sin \rho}} \right) \times$$

$$\times \sin(0,5\tau_3 - \varphi_2 - \varphi_{iu}),$$

де  $\rho$  – кут тертя в опорі шарошки;  $\varepsilon_{iu}$  – її прискорення;  $I_{iu}$  – її момент інерції.

### Висновки

Елементом наукової новизни запропонованої методики кінематичного аналізу взаємодії шарошки з вибоєм свердловини є:

1) врахування специфічних фаз занурення зубця три та чотиригранною частинами з урахуванням косоного удару зубця по стайнках лунки породи;

2) дотримання при визначенні відповідного передавального відношення теоретичного положення за умови кочення рухомого аксоїда по нерухомому;

3) обґрунтування умови уникнення потрапляння зуба шарошки у попередньо отриману лунку в процесі ураження площі вибою.

### Література

1. Воробйов М.С. Деякі проблеми аналізу та синтезу елементів бурових верстатів у процесі буріння шарошковими долотами / М.С. Воробйов, М.В. Лисканич // Тези II міжнародної науково-технічної конференції «Машини, обладнання і матеріали для надрощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018» - Івано-Франківськ. – 2018. – С. 108-110.
2. Палий П.А. Буровые долота / А.П. Палий, К.Е. Корнеев. – М.: Недра, 1971. – 446 с.
3. Павловський М.А. Теоретична механіка. – Київ.: Техніка, 2002. – 160 с.

4. Бережницький Б.С. Спотворення кута повороту шарошки долота / Б.С. Бережницький, М.С. Воробйов // Тези II міжнародної науково-технічної конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018» – Івано-Франківськ. – 2018. – С. 106-107.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 13.12.2018 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Мойсишиним В.М.**, д.т.н., професором **Куцяком Я.В.** (м. Київ)*

## KINEMATICS OF A ROLLER CONE BIT WITH A DIRECT FACET TOOTH

**B. Berezhnytskyi, M. Vorobyov**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15;  
e-mail: mechmach@nung.edu.ua*

*The advanced technique of shock-kinematic analysis of the bit roller cone interaction with rock in the process of oil and gas wells drilling is proposed. Preliminary investigations of the interaction of the roller cone bits with rock were based on assumptions far from reality: the concept of the instantaneous axis of rotation of the roller cone constant contact with rock, the absence of slipping, as well as the tooth reforming and sinking into rock. The principle of the roller cones action is the gradual destruction of the surface of the bottomhole due to the cutting-crushing chipping of rock with a bit tooth.*

*The axial roller cone is considered, and the original method of planes projection is used to determine the regulation of tooth motion, taking into account: bit roller cones slipping along the surface of the bottomhole; phases of roller cone tooth sinking into rock; real change in the distance of the axis of rotation of the roller cone to the surface of the bottomhole due to tooth penetration into the rock; the substantiation of the conditions for avoiding the roller cone tooth entering to the previously obtained hole in the process of bottomhole crushing. Besides the moment of the drill string inertia, the moments of roller cones inertia are additionally taken into account under the condition of the oblique impact of the tooth on the rock.*

*The technique allows to calculate the volume of the disintegrated rock on the bottomhole, both taking into account and without taking into account rock chipping and tooth forming. The obtained dependencies allow us to select transmitted ratios from the drill string to the crowns of the roller cones under the condition of avoiding the roller cone tooth to the previously obtained hole during rock destruction on the bottomhole. It allows increasing the efficiency of drilling by roller cones.*

**Key words:** *tooth, roller cone, bit, bottomhole, well, rock, oblique impact.*