

Это объясняется тем, что с повышением твердости металломатричного композита повышается его способность противостоять абразивному изнашиванию под действием частиц шлама разрушенной горной породы.

Результаты сравнительного анализа данных по энергоемкости разрушения (рис. 3) показывают, что экспериментальным коронкам, в составе металломатричного композита которых содержание ДНА составляет 1–2% об., присуща наименьшая удельная объемная работа разрушения.

При равенстве для всех коронок (в границах единичного опыта) объема разрушаемой горной породы и сопоставлении с показателями их износостойкости это свидетельствует о более эффективном использовании ими энергии, подводимой к забою скважины.

#### **Выводы**

С увеличением содержания ДНА в составе металломатричного композита буровых коронок до оптимального в рассматриваемом случае 2% об. – интенсивность изнашивания и удельная работа разрушения породы в среднем снижаются соответственно в 1,44 и 1,2 раза в сравнении с коронками без ДНА в составе металломатричного композита.

*Розглянуто вплив наноалмазів як об'ємно-модифікуючих добавок у невеликій кількості на твердість та зносостійкість композиційних матеріалів матриць бурових імпрегнованих коронок.*

**Ключові слова:** наноалмази, композит, бурова коронка, зносостійкість.

*The effect of nanodiamonds as a volume-modifying additives in small quantities on the hardness and wear resistance of composite materials matrix impregnated drill bits.*

**Key words:** nanodiamonds, a composite, drill bit, resistance to abrasion.

#### **Литература**

1. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / П. В. Зыбинский, Р. К. Богданов, А. П. Загора, А.М. Исонкин . – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
2. Долматов В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: Получение, свойства, применение. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. –344 с.
3. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В. Н. Бакуля, –К., Наук. думка, 1978. – 232 с.
4. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И. С. Афанасьев, Г. А. Блинов, П. П. Пономарев и др. – СПб.: Недра, 2000. – 712 с.

*Поступила 09.06.11*

УДК 622.243.054

**І. І. Чудик**, канд. техн. наук; **Т. Г. Лавинюкова**, **Я. С. Гриджук**, **В. М. Гнатківський**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБЕРТАННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ У ВИКРИВЛЕНІЙ СВЕРДЛОВИНІ В СЕРЕДОВИЩІ БУРОВОГО РОЗЧИНУ**

*В даній статті запропоновано методи розрахунку моменту опору обертання бурильної колони у буровому розчині і викривленій частині стовбура свердловини. В розрахунках враховано можливі види обертання бурильної колони навколо осі свердловини. Вперше отримано залежність для визначення моменту обертання бурильної колони у викривленому стовбурі свердловини з врахуванням її згину, опору зовнішнього середовища з боку тертя об стінки свердловини і буровий розчин, а також роботу долота і осьових сил. Проведено низку розрахунків за результатами яких побудовано графічні залежності.*

**Ключові слова:** бурильна колона, свердловина, момент опору.

Буріння свердловини – це складний технологічний і енерговитратний процес, при якому передавання енергії до долота для руйнування гірської породи забезпечується різними механічними

системами і потоком бурового розчину (БР). Основною енергопередавальною ланкою при цьому є бурильна колона (БК). При роторному способі буріння її енергопровідність обумовлюється техніко-технологічними чинниками [1-3], а саме: діаметрами долота і труб, довжиною і конструкцією БК, параметрами режиму буріння і БР, викривленням свердловини.

Під час буріння скерованих свердловин енергоефективність використання БК має свою складну специфіку. В особливих умовах, пов'язаних із згином, стиском, розтягом і крученням БК, яка перебуває у взаємодії з гірською породою стінок свердловини, вона повинна забезпечити передачу енергії до долота. В таких умовах роботи, як відмічено в роботах [1-4, 5-8], характерними є значні втрати енергії на тертя і деформацію БК. Дана проблема вже досліджувалася науковцями [1-5, 7, 8 і ін.], про те актуальним залишається питання вивчення енерговитрат на деформацію і тертя БК до стінок викривленого стовбура свердловини заповненого БР.

Під час обертання БК в БР між ними виникає тертя і відповідний момент опору, [1-3]. При обертанні БК навколо власної осі (з врахуванням БЗ), концентрично розташованої в стовбурі свердловини, він визначається:

$$M_{BP1} = \pi \eta D_{CB}^2 L_{BK} \left( \frac{\left[ \omega - \frac{\tau_0}{\eta} \ln \frac{D_{3AM}}{D_{CB}} \right]}{\left( D_{CB}^2 - D_{3AM}^2 \right) D_{3AM}^{-2}} + \frac{\left[ \omega - \frac{\tau_0}{\eta} \ln \frac{d_{BK}}{D_{CB}} \right]}{\left( D_{CB}^2 - d_{BK}^2 \right) d_{BK}^{-2}} \right). \quad (1)$$

де  $\tau_0$ , і  $\eta$  – початкове напруження зсуву між шарами БР, та його пластична в'язкість;

$D_{CB}$  і  $D_{3AM}$  – діаметр свердловини і бурильного замка БК;

$\omega$  – кутова швидкість обертання БК;

$L_{BK}$  і  $d_{BK}$  – довжина і діаметр БК.

Під час обертання БК в свердловині навколо її осі відбувається обтікання ним колони труб, при певному значенні питомого навантаження, яке згідно [1] визначається:

$$P_i(v) = (1/4) \rho_{BP} d_{BK} \left[ 2C_1 V_i^2(v) + C_2 \pi d_{BT} a_i(v) \right], \quad (2)$$

де  $\rho_{BP}$  – густина БР;

$C_1$  і  $C_2$  – відповідно коефіцієнти швидкісного та інерційного опору БР,  $C_1 = 1.86 \div 3.47$ ;  $C_2 = 0.66 \div 2$ ,

[1];

$V_i(v)$ ,  $a_i(v)$  – швидкість та доцентрове прискорення обтікання БР труб БК:

$$V_i(v) = \omega r_i^*(v), \quad (3)$$

$$a_i(v) = \omega^2 r_i^*(v), \quad (4)$$

де  $r_i^*(v)$  – функція зміни радіуса обертання поверхні БК навколо осі свердловини (рис. 1):

$$r_i^*(v) = \sqrt{2d_{BK} [1 + \cos(v_i)] (d_{BK}/2 - D_{CB}/2) + (D_{CB}/2)^2}, \quad (5)$$

де  $\mathcal{S}_i$  – кути  $O_1O_2A_i$ .

Момент опору БР при обертанні БК навколо осі свердловини визначається:

$$M_{BP2}(x) = L_{BK} \int_0^\pi P_i(v) r_i^*(v) dv. \quad (6)$$

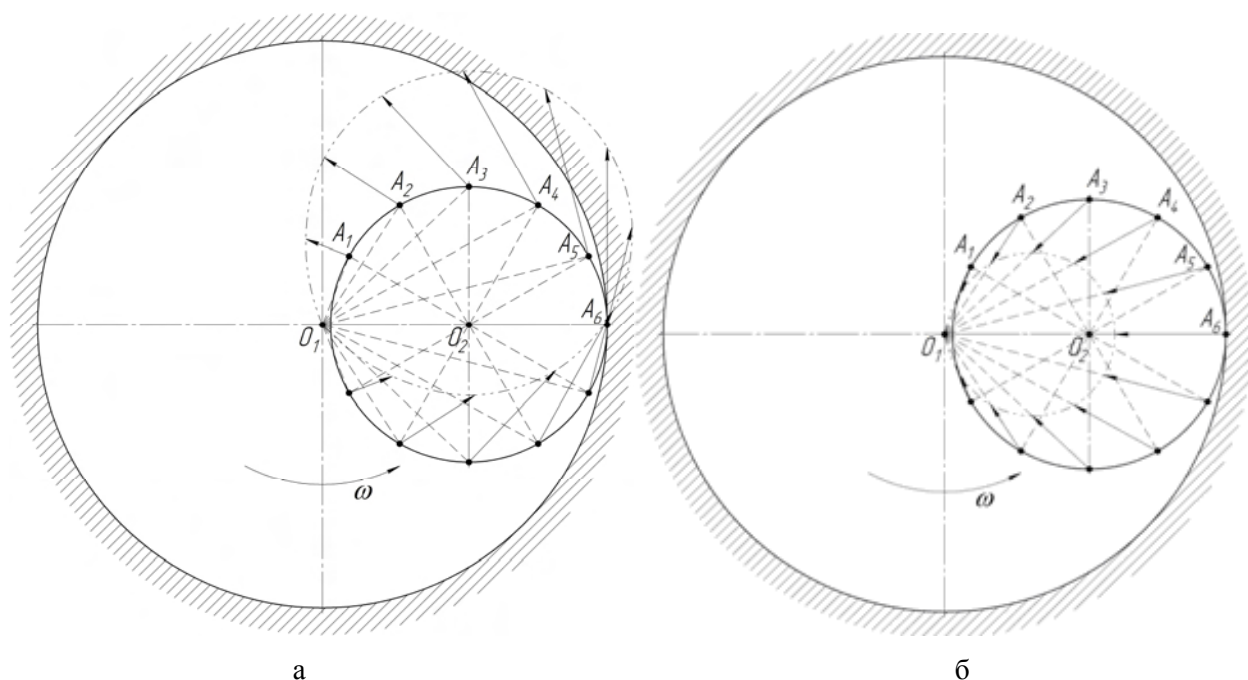


Рис. 1. Плани швидкостей та доцентрових прискорень при обертанні БК навколо осі свердловини в середовищі БР

Шляхом розрахунку за наведеними залежностями для окремих вибірових даних було отримано гістограму, зображену на рис. 2. Вона підтверджує те, що обертання БК навколо осі свердловини характеризується значно більшими моментами опору ніж обертання навколо власної осі колони бурильних труб.

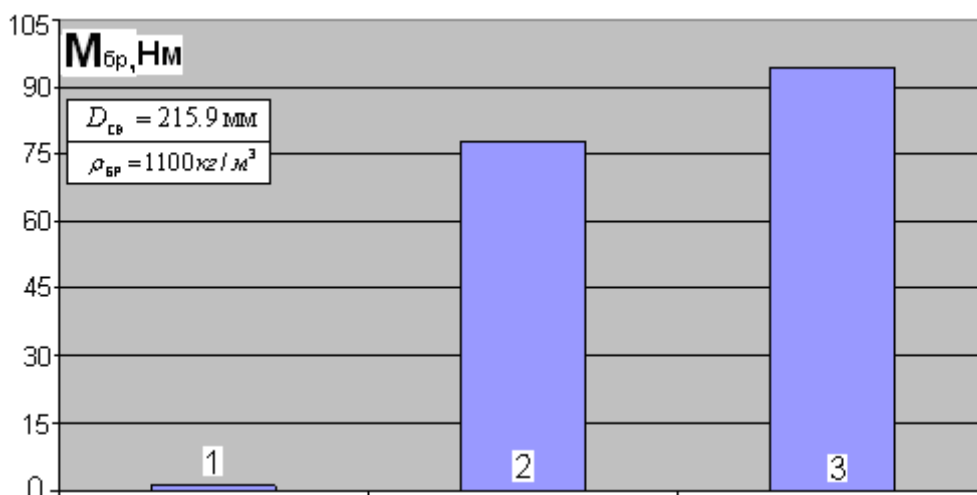


Рис. 2. Діаграма зміни моменту опору при обертанні БК в БР для різних її діаметрів ( $L_{БК} = 0$ ): 1 -  $M_{БР1}$  для БТ 114; 2 -  $M_{БР2}$  для БТ 114; 3 -  $M_{БР2}$  для БТ 127

У відповідності до отриманих даних на рис. 2 слід відмітити, що обертання БК в свердловині, заповненій БР, навколо її осі характеризується в десятки разів більшими моментовтратами ніж при концентричному обертанні труб. А це суттєво обмежує обертання БК навколо осі свердловини через великий опір БР і доводить його ще одну функцію – центрування колони бурильних труб в стовбурі гірничої виробки.

Крутний момент при обертанні БК стає причиною її втрати стійкості і деформації, потенціальна енергія якої визначається за залежністю:

$$U = \int_V U_0 dV, \quad (7)$$

де  $U_0$  - внутрішня енергія деформації БК;

$V$  - об'єм БК, який піддається деформації.

При дослідженні особливостей обертання БК у викривленому стовбурі свердловини розглядається відрізок довжиною  $dz$ , який володіє початковою кривизною радіусом  $R_{БК}$ , і піддається дії сил  $Q_i$  та моментів  $M_i$ , у відповідності до розрахункової схеми, зображеної на рис. 3. По відношенню до виділеного елементарного відрізка визначено роботу зовнішніх силових факторів, яка переходить в потенціальну енергію деформації БК.

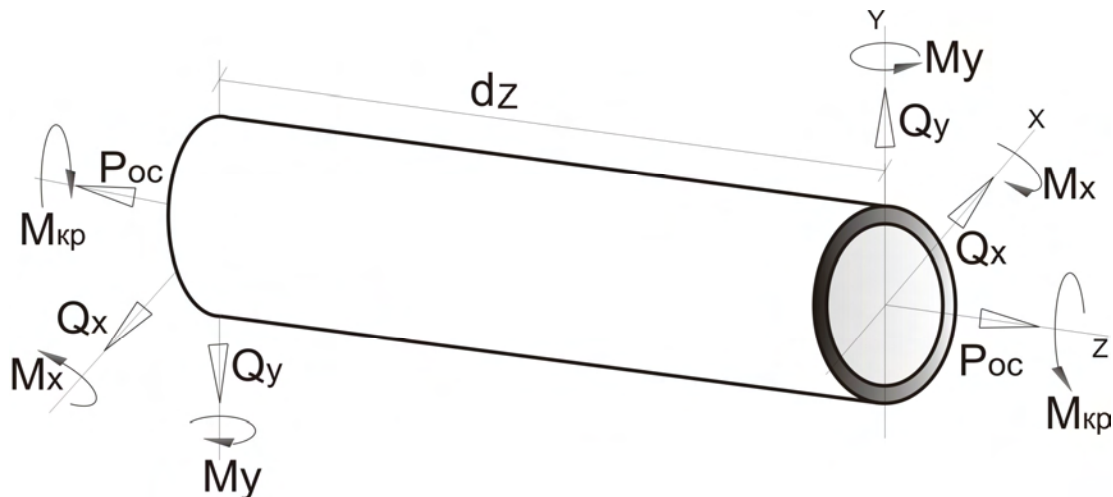


Рис. 3. Схема дії сил і моментів на елементарну частинку БК

Потенціальна енергія деформації БК як сума незалежних робіт моментів (крутного –  $M_{кр}$ , згинного –  $M_x$  і  $M_y$ ) та сил (осьової –  $P_{oc}$ , радіальних –  $Q_x$  і  $Q_y$ ) у відповідності з [6] визначається:

$$dU = dU(M_{кр}) + dU(M_x) + dU(M_y) + dU(P_{oc}) + dU(Q_x) + dU(Q_y), \quad (8)$$

$$dU(M_{кр}) = (M_{кр}^2 / 2 G J_k) dz$$

$$dU(M_x) = (M_x^2 / 2 E J_x) dz$$

$$dU(M_y) = (M_y^2 / 2 E J_y) dz$$

$$dU(P_{oc}) = (P_{oc}^2 / 2 E S_{БК}) dz, \quad (9)$$

$$dU(Q_x) = (k_x Q_x^2 / 2 G S_{БК}) dz$$

$$dU(Q_y) = (k_y Q_y^2 / 2 G S_{БК}) dz$$

де  $E$  і  $G$  - модулі пружності матеріалу труб при згині і крученні;

$J_k, J_x, J_y$  - полярні моменти інерції БК по осях  $OZ, OX, OY$ ;

$k_x, k_y$  - безрозмірні коефіцієнти, рівні  $k_x = k_y = 2$  [6];

$S_{БК}$  - площа поперечного перерізу БК.

Без врахування залишкових деформацій БК внутрішня енергія  $U_0$  у відповідності до [6] визначається:

$$U_0 = U_{зг} + U_{кр} + U_{ос}, \quad (10)$$

де  $U_{зг}$ ,  $U_{кр}$ ,  $U_{ос}$  - потенціальна енергія деформації БК в умовах її згину, кручення і дії осьових сил стиску і розтягу.

Згідно з основними положеннями теорії пружності [1, 6] з врахуванням складових  $U_{зг}$ ,  $U_{кр}$ ,  $U_{ос}$  рівність (10) набуває вигляду:

$$U_0 = \left( M_{кр}^2 L_{БК} / 2GJ_{БК} \right) + \left( M_{зг}^2 L_{БК} / EI_{БК} \right) + \left( P_{ос}^2 L_{БК} / ES_{БК} \right), \quad (11)$$

де  $I_{БК}$  - момент інерції БК;

$M_{кр}$ ,  $M_{зг}$  - крутний і згинний моменти, які діють на БК у відповідному перерізі.

Для повного оберту БК на кут  $\Theta$  у викривленому стовбурі свердловини, необхідно виконати роботу  $A_{об}$ , величина якої визначається:

$$A_{об} = \left( M_{дол} + M_{\Sigma БК} + M_{верт} + \Delta M_{кр} \right) L_{БК} / 2GJ_{БК}, \quad (12)$$

де  $M_{дол}$  - момент опору при обертанні долота;

$M_{\Sigma БК}$  - момент опору при обертанні БК обумовлений тертям об стінки свердловини і БР;

$\Delta M_{кр}$  - додатковий момент опору при обертанні, який обумовлений деформацією БК;

$M_{верт}$  - момент опору при обертанні БК обумовлений тертям в опорі вертлюга;

$$M_{верт} = \left[ \left( \pi d^2 / 4 \right) P_H + L_{БК}^P q_{БК}^P \beta \right] r_o \mu_o, \quad (13)$$

де  $d$  - діаметр каналу ствола вертлюга;

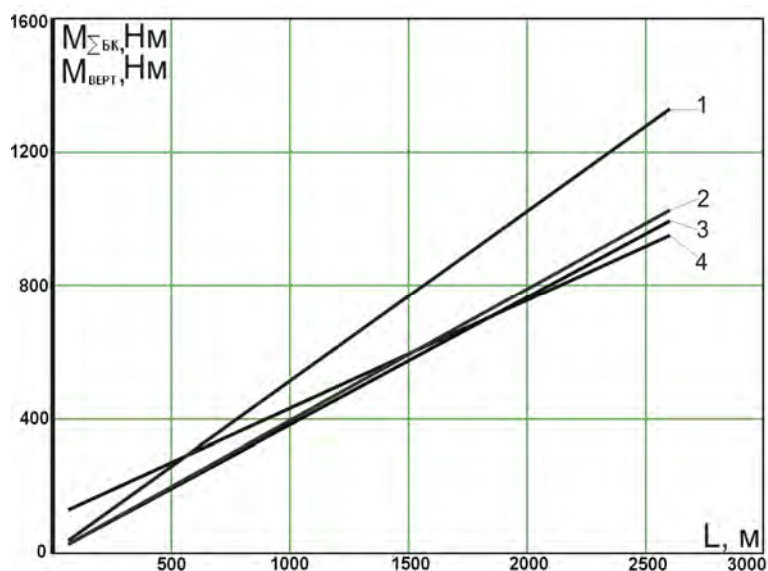
$P_H$  - тиск БР у прохідному каналі ствола вертлюга;

$L_{БК}^P$ ,  $q_{БК}^P$  - довжина і вага погонного метра БК в розтягнутій частині;

$\beta$  - коефіцієнт Архімеда;

$r_o$  - радіус тертя головної опори вертлюга;

$\mu_o$  - коефіцієнт тертя в головній опорі вертлюга;



1

Рис. 4. Залежність моменту опору обертання СВТ 114 від її довжини: –  $M_{\Sigma БК}$  обчислено методом [7]; 2 –  $M_{\Sigma БК}$  обчислено за методом [3]; 3 –  $M_{\Sigma БК}$  обчислено за методом [8]; 4 –  $M_{верт}$  обчислено для вертлюга РС-650

В результаті проведених досліджень було встановлено, що момент опору тертя при обертанні БК в опорі вертлюга сягає величини, співмірної опорі її холостого обертання у вертикальному стовбурі свердловини, які визначені за підходами [3, 7, 8] і зображені на рис. 4. Це доводить необхідність його врахування в подальшому при дослідженні умов роботи БК та енергоємності її обертання.

Виразивши згинний момент  $M_{зг}$  та довжину БК через радіус викривлення ствола свердловини при умові, що радіуси викривлення БК і свердловини рівні ( $R_{БК} = R_{СВ}$ ) для обертання колони труб з врахуванням її деформації та тертя на основі рівності залежностей (10) і (11) отримано:

$$\frac{(\Delta M_{кр} + [M_{ДОЛ} + M_{\Sigma БК} + M_{ВЕРТ}])^2 / 2GJ_{БК}}{(M_{кр}^2 / 2GJ_{БК}) + [(EI_{БК} / R_{БК}^2) + (P_{ОС}^2 / ES_{БК})]} = \quad (14)$$

Шляхом заміни  $M_{кр} = [M_{ДОЛ} + M_{\Sigma БК} + M_{ВЕРТ}]$  в результаті розв'язку рівняння (14) отримуємо залежність для визначення величини приросту крутного моменту обертання навантаженої осьовою силою БК у викривленому стовбурі свердловини:

$$\Delta M_{кр} = \left[ \begin{array}{l} - (M_{ДОЛ} + M_{\Sigma БК} + M_{ВЕРТ}) + \\ + \sqrt{(M_{ДОЛ} + M_{\Sigma БК} + M_{ВЕРТ})^2 + \\ + 2 GJ_{БК} ((EI_{БК} / R_{БК}^2) + (P_{ОС}^2 / ES_{БК}))} \end{array} \right]. \quad (15)$$

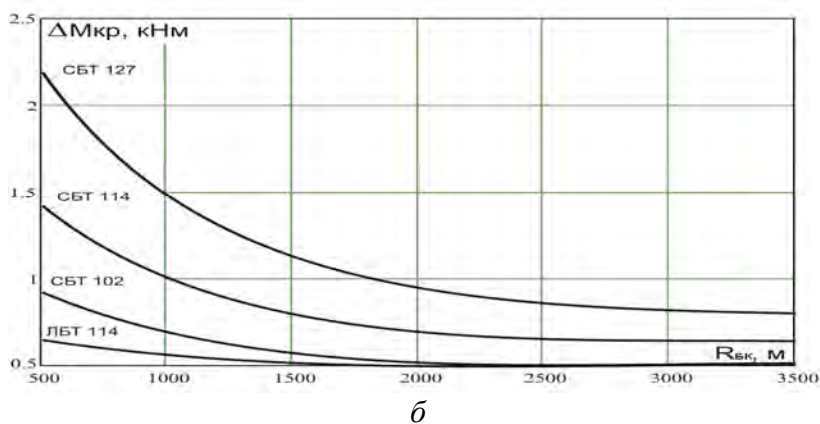
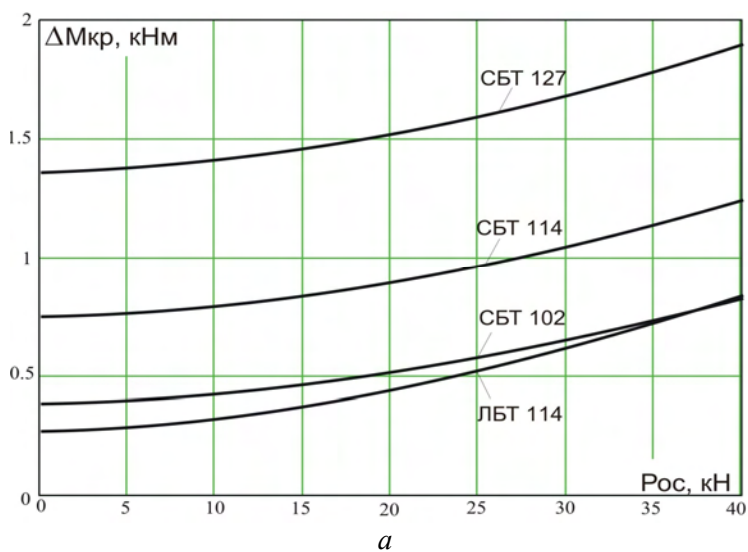


Рис. 5. Приріст крутного моменту при обертанні БК у викривленому стовбурі свердловини

Для БК укомплектованої ЛБТ 114  $\Delta M_{кр}$  в порівнянні із СБТ 127 є менше в 4.5 раз, для СБТ 114 – в 2.5 рази, для СБТ 102 – в 1.9 рази – рис. 5, а). Викривлення ствола свердловини з радіусом до (2500-2800) м обумовлює різке зростання  $\Delta M_{кр}$  на обертання БК в стволі свердловини: рис. 5, б) відповідно по типорозміру СБТ 127 в 3.5 раз, по СБТ 114 – 4.4, по СБТ 102 – в 1.9, по ЛБТ 114 – в 1.4 раз.

Узагальнюючи результати аналітичних досліджень впливає, що при проектуванні БК необхідно враховувати інтервали викривлення свердловини і її завантаження осьовим зусиллям (розтягу чи стиску), що у великій мірі впливає на втрату крутного моменту і підведення до долота необхідної енергії. У викривлених інтервалах буріння доцільно

встановлювати найбільш гнучку ланку трубної колони, укомплектовану СБТ або ЛБТ, що зменшить загальні втрати крутного моменту і енергії зокрема на долоті.

Запропоновані науково-методичні положення дозволяють визначати енергопровідність бурильної колони для умов її обертання у викривленому стовбурі свердловини, який заповнений БР. Приведені графічні залежності доводять важливість врахування викривлення стовбура свердловини і його наповненість БР та підкреслюють необхідність використання цих чинників в розрахунках БК, енерговитрат, режимів буріння, при проектуванні і виборі параметрів бурових розчинів в майбутньому.

*В данной статье предложены методы расчета момента сопротивления вращения бурильной колонны в буровом растворе и искривленной части ствола скважины. В расчетах учтены возможные виды вращения бурильной колонны вокруг оси скважины. Впервые получена зависимость для определения момента вращения бурильной колонны в искривленном стволе скважины с учетом ее изгиба, сопротивления внешней среды со стороны трения о стенки скважины и бурового раствора, а также работу долота и осевых сил. Проведен ряд расчетов по результатам которых построены графические зависимости.*

**Ключевые слова:** бурильная колонна, скважина, момент сопротивления.

*Methods of drill column antitorque moment calculation in drilling fluid and crooked part of the borehole were proposed in the article. Potential types of drill column rotation around hole axis were taken into consideration during the calculation.*

*Dependency for the determination of the drill column torque moment taking into account its bend, environment resistance on the side of wall friction and drilling fluid together with the work of bit and axial faces was obtained for the first time. A number of calculations which resulted in graphical dependency were carried out.*

**Keywords:** drill string, well, moment of resistance.

#### Література

1. Сароян А. Е. Теория и практика работы бурильной колонны. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
2. Александров М. М. Силы сопротивления при движении труб в скважине. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
3. Работа бурильной колонны в скважине / Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгужин, М. Х. Шаммасов и др. – М.: Недра, 1973. – 217 с.
4. Чудик І. І., Гриців В. В. Методика розрахунку енергії деформації та обертання бурильної колони у вертикальному стовбурі свердловини // Нафтогазова енергетика. – 2008.– № 2(7). – С. 60-64.
5. Глушич В. Г. Разработка технологии предупреждения пространственного изгиба бурильной колонны при бурении горизонтальных скважин (на примере месторождений газа Черного и Азовского морей) // Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 25.00.15. “Технология бурения и освоение скважин” – Москва, 2002. – 23 с.
6. Тимошенко С. П. Статические и динамические проблемы теории упругости. – К.: Наукова думка, 1975. – 563 с.
7. Калинин И. С. О затратах мощности на холостое вращение колонны бурильных труб [// Разведка и охрана недр. – 1970. – № 10 – С. 21–24.
8. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. – М.: Гостоптехиздат. – 1951. – 185 с.

*Надійшла 15.06.11*