

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТУ, ОСНАЩЕНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИМИ АЛМАЗНИМИ РІЗЦЯМИ

Я.В. Кунцяк

ПраТ «Науково-дослідне та конструктивне бюро бурового інструменту»,
03142, м. Київ, пр. Паладіна, 44, тел.(044) 4242089, e-mail: 5361013@bk.ru

У процесі буріння нафтових і газових свердловин долота різального типу, оснащені полікристалічними алмазами різцями (ПАР), є більш ефективними в порівнянні з алмазними та тришарошковими, однак вони володіють підвищеною енергоємністю, що обмежує їх використання при бурінні гідравлічними вибійними двигунами.

На основі аналітичного та експериментального методів досліджень на модельних і повнорозмірних конструкціях у стендових і промислових умовах розроблено конструкції породоруйнівних інструментів різальної дії з пониженою енергоємністю буріння. Методами математичного моделювання проведено дослідження різних конструкцій різальної частини бурових доліт та визначено величини енергетичних параметрів роботи полікристалічних алмазних різців, розроблено технологічні засоби та методику експериментальних випробовувань. Розроблено математичну модель, що базується на взаємодії оснащення долота різальної дії з гірською породою під дією осьового навантаження і крутного моменту, де сила опору проникнення, що діє на елемент оснащення при різних глибинах проникнення в гірську породу, виражається степеневою залежністю. На відміну від існуючих математичних моделей, які ґрунтуються на принципах забезпечення рівностійкого зношування різальної кромки лопати по всій її геометричній довжині, розрахунки прогностичних енергетичних показників процесу буріння проводились для породоруйнівного інструменту загалом.

На основі аналізу результатів прогностичних розрахунків встановлено, що долота з плоским дном різальної частини мають найвищі значення механічної швидкості буріння і найменші величини крутного моменту і питомої об'ємної роботи руйнування. Однак, породоруйнівний інструмент з таким профілем різальної частини має пониженою зносостійкість внаслідок обмеженої площі для розміщення достатньої кількості оснащення, яке формує вибій свердловини. З метою перевірки теоретичних даних проведено експериментальні дослідження параметрів роботи доліт різальної дії з різними формами лопатей на гірських породах різної твердості. Отримано залежності енергетичних і динамічних параметрів буріння долотами з дослідними варіантами різальної частини від осьового навантаження й частоти обертання долота.

Результати порівняння енергетичних характеристик роботи доліт різального типу свідчать, що при бурінні порід малої і середньої твердості вибійними двигунами доцільно використовувати породоруйнівні інструменти конструкції, що поєднують кругло-ступінчасту і плоску форми різальної частини.

Ключові слова: долото, зносостійкість, кромка, лопать, руйнування, свердловина, порода.

В процессе бурения нефтяных и газовых скважин долота режущего типа, оснащенные поликристаллическими алмазными резцами (ПАР), более эффективны по сравнению с алмазными и трёхшарошечными, однако обладают повышенной энергоёмкостью, что ограничивает их использование при бурении гидравлическими забойными двигателями.

По результатам аналитического и экспериментального методов исследований на модельных и полно размерных конструкциях в стендовых и промышленных условиях разработаны конструкции породоразрушающих инструментов режущего воздействия с пониженной энергоёмкостью бурения. Методами математического моделирования проведены исследования различных конструкций режущих элементов буровых долот и определены значения энергетических параметров работы поликристаллических алмазных резцов, разработаны технические средства и методика экспериментальных исследований. Разработана математическая модель на основании взаимодействия оснастки долота режущего типа с горной породой под воздействием осевой нагрузки и крутящего момента, а сила сопротивления на элемент оснастки, при различных глубинах проникновения в горную породу, определяется степенной зависимостью. В отличие от существующих математических моделей, базирующихся на принципах обеспечения равномерного износа режущей кромки лопасти по всей ее геометрической длине, расчеты прогностических энергетических параметров процесса бурения проводились для всего породоразрушающего инструмента.

По результатам прогностических расчетов определено, что долота с плоским профилем режущей части обладают наибольшей механической скоростью бурения и наименьшими значениями величины крутящего момента и удельной объемной работы разрушения. С другой стороны, породоразрушающий инструмент с таким профилем режущей части обладает пониженной износостойкостью вследствие ограничения площади для размещения достаточного количества оснастки, которая формирует забой скважины. С целью подтверждения теоретических результатов проведены экспериментальные исследования параметров работы долот режущего типа с различными формами лопастей на горных породах разной твердости. Установлены зависимости энергетических и динамических параметров бурения долотами с предложенными конструкциями режущей части от осевой нагрузки и частоты вращения долота. Сравнение энергетических характеристик работы долот режущего типа показало, что бурение забойными двигателями пород низкой и средней твердости целесообразно проводить породоразрушающими инструментами, конструкции которых включают одновременно круглоступенчатую и плоскую формы режущей части.

Ключевые слова: долото, износостойкость, кромка, лопасть, разрушение, скважина, порода.

The cutting bits, equipped with polycrystalline diamond cutters (PDC), are more effective in comparison with diamond and three-roller-cone bits for oil and gas well drilling, however they consume more power and it limits their use.

New structures of rock destruction tools of cutting type were designed for lower power consumption during drilling by analytical-experimental research methods on model and full-size structures under stand/industrial conditions. Various designs of cutting parts of drilling bits were studied by mathematical modeling methods; as a result of them the energy parameters of polycrystalline diamond cutters operation were defined, technological means and experimental testing methods were worked out. The mathematical model, based on consideration of interaction of cutting bit with rocks under axial load and torque (as concerns penetration resistance force, applied on cutting structure element, connected with depth of its penetration into rock), is expressed by power dependence. In contrast to existing mathematical models, based on the principles of ensuring stable position of cutting blade tip in space, the calculations of projected energy performance of drilling process were carried out for rock destruction tool in whole.

It was found out on the ground of analysis of predictive calculations results, that bits with cutting flat-bottomed parts have the highest values of mechanical drilling speed, the smallest values of torque and specific volume of destruction. However, rock destruction tool with such a shape of cutting part has lower wear resistance due to limited area for placing a sufficient number of cutting structures, forming the borehole bottom. In order to test theoretical data, experimental study of operating parameters of cutting bits of various wing forms were carried out on rocks of different hardness. The thesis includes dependencies of energy and dynamic parameters of drilling with bits, equipped with researched types of cutting parts, on axial load and bit speed.

Comparison of power characteristics of cutting bits shows, that it is reasonable to use rock destruction tools of design, which combines round-staged and flat forms of cutting part, during drilling with bottomhole motors on rocks of low and medium hardness.

Keywords: drill bit, cutting part, wear resistance, cutting edge, wings, destruction, well rock, rolling cutter bits.

З вітчизняної і зарубіжної практики відомо, що найбільш ефективним для буріння нафтових і газових свердловин є долота різального типу, які оснащені полікристалічними алмазними різцями (ПАР). Вони забезпечують вищу механічну швидкість і проходку на долото у порівнянні з алмазними та тришаршковими. Однак, підвищена енергоємність доліт з ПАР, що зумовлена необхідністю створення високого крутного моменту при їх відпрацюванні, обмежує їх використання при бурінні з вибійними двигунами похило-скерованих і горизонтальних свердловин (ПСС і ГС). При бурінні горизонтальних свердловин (в тому числі з відбором керну), долотами з ПАР спеціалістами ПрАТ «НДІ КББ» спостерігалися перебої у роботі вибійних двигунів, чого не відбувалося при використанні шаршкових бурових доліт і бурильних головок. Виходячи з цього, удосконалення конструкцій бурових доліт з ПАР із пониженою енергоємністю руйнування гірської породи є актуальною проблемою, вирішення якої дозволить підвищити ефективність буріння ПСС і ГС.

Ефективність роботи доліт з ПАР можна суттєво підвищити, якщо розробляти їх із врахуванням літології гірських порід. Водночас, для удосконалення конструкції породоруйнівного інструменту з ПАР необхідно враховувати параметри режиму буріння і гідравлічні характеристики бурових установок.

Для розробки конструкцій породоруйнівних інструментів різальної дії з пониженою енергоємністю буріння та удосконалення технологічних режимів їх застосування авторами [1, 2] прийнято комплексний метод досліджень: аналітичний та експериментальний метод досліджень на модельних і повнорозмірних конструкціях в стендових та промислових умовах.

З метою визначення величин енергетичних параметрів роботи бурових доліт з ПАР і кількісного їх співвідношення було проведено дослідження різних конструкцій різальної части-

ни методами математичного моделювання, а також розроблено технічні засоби й методика для проведення експериментальних випробувань.

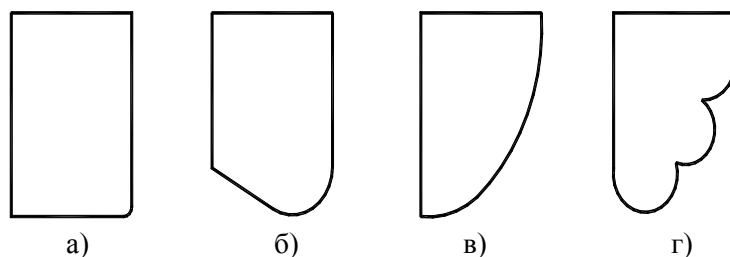
Дослідники виділяють в конструкціях даних породоруйнівних інструментів три поверхні, які в процесі буріння взаємодіють з гірською породою: різальна, активна та пасивна калібруюча частина [3, 4].

Різальна частина характеризується профілем, кількістю і розміщенням різців. Для доліт з ПАР, дослідниками рекомендується три базові типи профілів різальної частини: плоский (або малий конус, де величина кута між твірною і площиною вибою є не більше 20 градусів), обернено-конусний (або подвійний конус), та еліптичний конус (рис. 1, а, б, в).

Форма профілю даних породоруйнівних інструментів відіграє важливу роль для таких характеристик конструкції, як стабільність, механічна швидкість буріння та здатність до спрямування. Його вибір залежить від проектних умов застосування долота. Зокрема, різальна частина з видовженою конусною поверхнею (еліптична), забезпечує вищу стабільність конструкції, а плоска форма використовується, коли необхідно оперативно змінювати напрям буріння [3]. Також покращенню придатності інструменту до оперативного коригування траєкторії буріння ПСС і ГС сприяє виконання долота в осьовому перерізі у вигляді зворотного клина з вершиною, розташованою на осі.

Як альтернативний варіант для буріння з вибійними двигунами ПСС і ГС запропоновано [5; 6] круглоступінчастий профіль робочої частини долота (рис. 1, г).

На рис. 2 зображено конструкцію породоруйнівного інструменту із запропонованим круглоступінчастим профілем різальної частини. Долото містить корпус 1 з промивальним каналом 2 і лопаті 3, на яких виконані сполучені між собою ступінчасті сегменти 4. Точка сполучення 5 сусідніх сегментів розташована



a – плоский; б – обернено - конусний; в – еліптичний; г – круглоступінчастий

Рисунок 1 – Варіанти профілів різальної частини долота

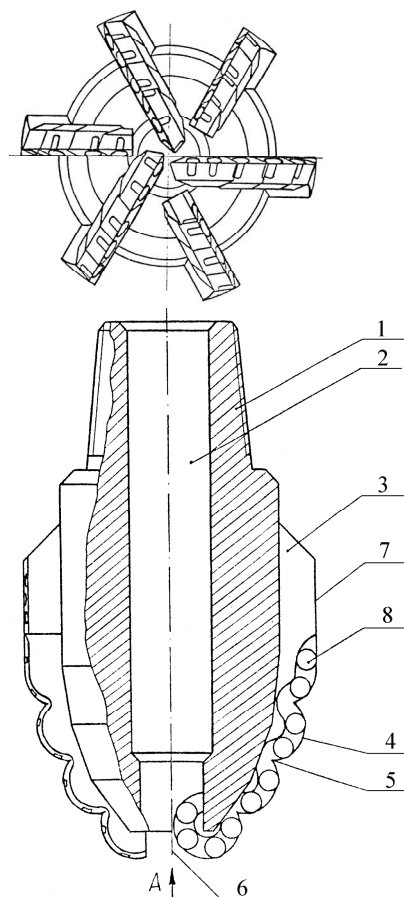


Рисунок 2 – Конструкція бурового долота з полікристалічними алмазними різцями

щодо осі обертання долота на відстані, меншій величини найбільших радіусів. Остання ступінь 4 кожної лопаті переходить в калібрувальну поверхню 7. Різальна частина лопатей армована циліндричними породоруйнівними елементами 8.

Під впливом осьового навантаження і крутного моменту, що передається на долото, різці 8 на ступенях 4 руйнують породу. Завдяки виконанню різальної частини долота у вигляді сполучених сегментів, у їх найбільших за площею поперечних перерізах забезпечується дискретний контакт калібрувальних ділянок зі стінками свердловини. У результаті зменшується крутний момент в процесі руйнування гірської породи, що понижує енергоємність роботи долота й уможливорює здійснювати буріння при збільшеному осьовому навантаженні. І навпаки, при

однаковому значенні осьового навантаження величина крутного моменту менша, за рахунок цього підвищується механічна швидкість буріння та розширюються можливості раціонального вибору вибійного двигуна й ефективного використання долота з ПАР у різних гірничо-геологічних умовах, у тому числі при бурінні скерованих свердловин.

Крім того, розташування точки сполучення п'яти сусідніх сегментів 4 щодо осі 6 обертання долота на відстані, меншій величини найбільших їх радіусів, забезпечує перекриття в проекції на площину вибою периферійних різців нижче розташованої ступені оснащенням ступені, яка вище розташована вище, що підвищує зносостійкість конструкції.

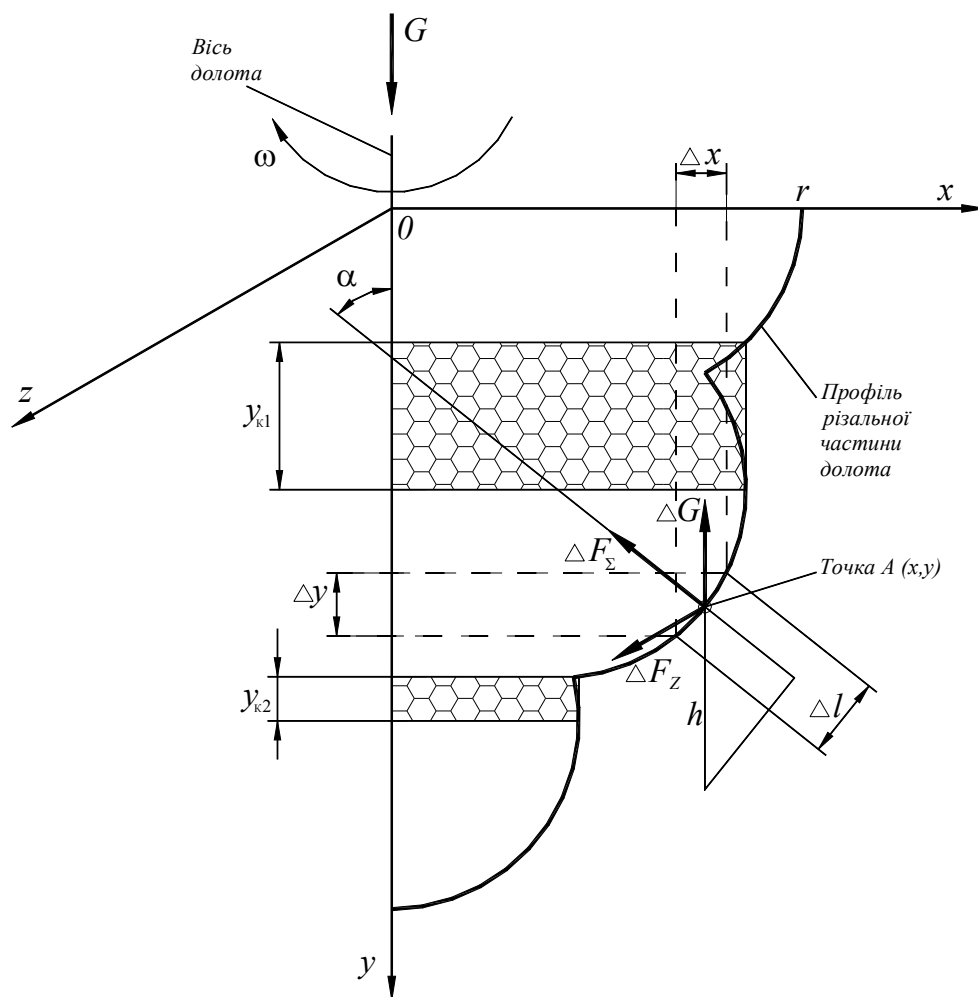
Отже, перевагами запропонованого кругло-ступінчастого профілю робочої частини долота є:

1) дискретний контакт різальної поверхні з гірською породою, що забезпечує вивільнення окремих ділянок вибою від стискаючих навантажень, і, як наслідок, зменшення затрат енергії на їх руйнування;

2) перекриття в проекції на площину вибою периферійних різців нижче розташованої ступені, оснащенням ступені, розташованої вище, що підвищує зносостійкість конструкції.

Для проведення досліджень авторами [6, 7] було розроблено чотири варіанти конструкції різальної частини бурового долота діаметром 146 мм і досліджено параметри їх роботи методами математичного моделювання. Розміщення різців на лопатях долота, їх розміри та форма різальної кромки повністю моделюють ПАР в породоруйнівних інструментах діаметром 214,3 мм. Для кожного з дослідних профілів долота розраховували прогнозні енергетичні показники процесу буріння, такі як: крутний момент, механічну швидкість і питому об'ємну роботу руйнування.

З цією метою попередньо здійснено математичний опис процесу буріння породоруйнівними інструментами різальної дії, який ґрунтувався на експериментальних дослідженнях долота з плоским профілем робочої частини, як найбільш поширеного в базових конструкціях [6, 7]. Для даного долота експериментально визначені величини емпіричних коефіцієнтів, що використовувались в обчисленнях, і проведено розрахунки прогнозних параметрів буріння залежно від форми профілю різальної частини.



Δl — довжина малої ділянки робочої крайки різця; α — кут між нормаллю до Δl і віссю обертання долота; ΔF_z — складова сили різання по осі z ; ΔF_R — сила реакції з боку гірської породи; ΔF_C — складова сили різання по нормалі до Δl ; $\Delta F_\Sigma = \Delta F_C + \Delta F_R$ — сумарна складова сил, що діють на Δl по нормалі

Рисунок 3 – Розрахункова схема до побудови математичної моделі

В основу математичної моделі покладено взаємодію оснащення долота різальної дії з гірською породою під дією осьового навантаження і крутного моменту. При цьому сила опору, що діє на елемент оснащення, від глибини його проникнення в гірську породу виражається степеневу залежністю. Також передбачається, що сила різання пропорційна силі опору проникнення і є степеневу функцією швидкості різання.

На відміну від існуючих математичних моделей, які ґрунтуються на принципах забезпечення рівнотійкого розташування різальної кромки лопаті в просторі, або експериментальних дослідженнях зносу одиничних різців, розрахунки прогнозних енергетичних показників процесу буріння згідно запропонованих співвідношень проводились для породоруйнівного інструменту загалом на основі результатів стандартних випробувань бурового долота. Такий підхід дає змогу наблизити результати теоретичних досліджень до реальних умов роботи породоруйнівних інструментів.

Схема для побудови математичної моделі опису процесу буріння породоруйнівними інструментами різальної дії зображена на рис. 3.

Виходячи з наведеного вище, сила реакції з боку гірської породи ΔF_R , яка прикладена до Δl в точці $A(x, y)$, запишеться так:

$$\Delta F_R = k_R \left[\frac{h \cos \alpha}{\psi(x)} \right]^a \psi(x) \Delta l. \quad (1)$$

де: $\psi(x)$ — функція, що визначає кількість різців на одиницю довжини різальної кромки і характеризує розміщення різальних елементів на робочій частині долота;

h — переміщення Δl за оберт долота.

З урахуванням того, що $\Delta l \approx \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$,

а $\cos \alpha \approx \frac{\Delta x}{\Delta l}$, переходячи до границі при $\Delta l \rightarrow 0$, маємо:

$$dF_R = k_R h^a \psi(x)^{1-a} [1 + f'^2(x)]^{(1-a)/2}. \quad (2)$$

Аналогічно:

$$\Delta F_C = k_{C_1} \Delta F_R v^b, \quad (3)$$

диференціюючи отримаємо:

$$dF_C = k_{C_1} dF_R v^b. \quad (4)$$

Оскільки

$$dG = dF_\Sigma \cos \alpha, \quad (5)$$

де G — осьове навантаження на долото, з урахуванням рівнянь (1-5) маємо:

$$G = k_R \left(\frac{2\pi v_M}{\omega} \right)^a \left\{ \int \psi(x)^{1-a} [1 + f'^2(x)]^{\frac{(1-a)}{2}} dx + k_{C_1} \omega^b \int \psi(x)^{1-a} [1 + f'^2(x)]^{\frac{(1-a)}{2}} x^b dx \right\}, \quad (6)$$

де: ω — кутова швидкість обертання долота; $f(x)$ — функція, що описує профіль різальної частини інструменту;

v_M — механічна швидкість буріння.

Позначимо вирази:

$$\int \psi(x)^{1-a} [1 + f'^2(x)]^{(1-a)/2} dx = I_1, \quad (7)$$

$$\int \psi(x)^{1-a} [1 + f'^2(x)]^{(1-a)/2} x^b dx = I_2. \quad (8)$$

З рівняння (6) визначаємо прогнозне значення v_M :

$$v_M = \frac{\omega}{2\pi} \left(\frac{G}{k_R (I_1 + k_{C_1} \omega^b I_2)} \right)^{\frac{1}{a}}. \quad (9)$$

Складова сили різання по осі z для малої ділянки різальної кромки різця

$$dF_Z = k_{C_2} dF_R v^b. \quad (10)$$

Крутний момент, що діє на ділянці Δl ,

$$\Delta M = \Delta F_Z x. \quad (11)$$

Переходячи до границі, з урахуванням викладеного вище визначаємо прогнозне значення крутного моменту на долоті

$$M = \frac{k_{C_2} \omega^b G \int x^{b+1} \left[\psi(x) \sqrt{1 + f'^2(x)} \right]^{1-a} dx}{I_1 + k_{C_1} \omega^b I_2}. \quad (12)$$

Величину питомої об'ємної роботи руйнування визначаємо за співвідношенням:

$$A_V = \frac{Gh + 2\pi M}{\pi r^2 h}. \quad (13)$$

де r — радіус долота;

З урахуванням (1), (9), (12) і (13) прогнозне значення питомої об'ємної роботи руйнування запишеться:

$$A_V = \frac{4\pi k_{C_2} \omega^b G \int x^{b+1} \left[\psi(x) \sqrt{1 + f'^2(x)} \right]^{1-b} dx}{(I_1 + k_{C_1} \omega^b I_2)^{1-\frac{1}{a}} \left(\frac{G}{k_R} \right)^{\frac{1}{a}} r^2}. \quad (14)$$

Значення коефіцієнтів пропорційності k_R , k_{C_1} , k_{C_2} та показників степеня a і b визначаємо експериментально за відомими величинами v_M , G , M .

Отримані значення констант використано для розрахунку енергетичних параметрів буріння доліт з дослідними варіантами різальної частини при: осьовому навантаженні $G = 25$ кН; і кутовій швидкості обертання $\omega = 2$ с⁻¹.

Вказані числові значення параметрів режиму буріння моделюють реальні величини при використанні породоруйнівних інструментів з ПАР.

При розрахунках енергетичних параметрів буріння для долота з кругло-ступінчастим профілем різальної частини прийнято, що вивільнені від стискаючих навантажень окремі ділянки лопатей y_{k1} , y_{k2} , (рис. 3) не беруть участі у руйнуванні вибою. Отже, їх величину не враховували в обчисленнях.

На рисунку 4 представлено діаграму, що відображає порівняння прогнозних параметрів буріння долотами з дослідними профілями різальної частини.

Результати прогнозних розрахунків свідчать про наступне:

1. Найбільше значення механічної швидкості буріння має долото з плоским профілем лопатей, а найменше — з еліптичним. Величина v_M для першого варіанту профілю на 12 % більша, ніж для другого.

2. Найбільші значення крутного моменту і енергоємності буріння має долото з еліптичним профілем лопатей, найменші — з плоским. Величини M і A_V для еліптичного профілю різальної частини відповідно в 1,3 і 1,5 рази більші, ніж для плоского.

3. Найближчі значення прогнозних параметрів буріння до плоского профілю мають долота:

– з обернено-конусним профілем — на 13 % вищі і 5 % нижчі величини, відповідно питомої об'ємної роботи руйнування та механічної швидкості буріння;

– з кругло-ступінчастим профілем — на 5% вищу величину крутного моменту.

З прогнозних розрахунків можна зробити висновок про переваги щодо енергетичних параметрів буріння долота з плоским профілем різальної частини. З усіх дослідних варіантів при найвищому значенні механічної швидкості воно має найнижчі величини крутного моменту і питомої об'ємної роботи руйнування.

Однак породоруйнівний інструмент з таким профілем різальної частини, як відомо, має пониженою зносостійкістю внаслідок обмеженої площі для розміщення достатньої кількості оснащення, яке формує вибій свердловини.

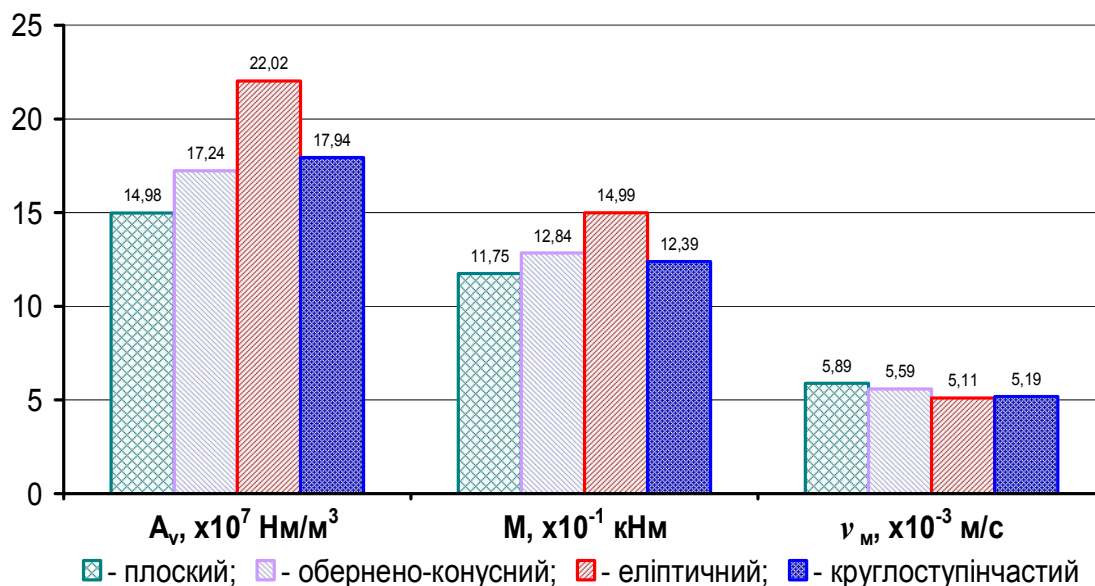


Рисунок 4 – Прогнозні значення параметрів роботи доліт з дослідними профілями різальної частини, розраховані методами математичного моделювання (при $G = 25 \text{ кН}$, $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$)

Звідси постає необхідність розробки доліт, оснащених ПАР, робоча частина яких враховувала б умови буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин, з використанням вибійних двигунів й одночасно володіла високою зносостійкістю. Оскільки за результатами теоретичних досліджень методами математичного моделювання не можна зробити однозначний висновок, який профіль найбільш близький за енергетичними характеристиками буріння до плоского, а також з метою перевірки теоретичних висновків проведено експериментальні дослідження параметрів роботи доліт різальної дії з різними формами лопатей, на гірських породах різної твердості.

Згідно методики проведення експериментальних стендових досліджень визначення показників роботи доліт з дослідними профілями різальної частини (плоским, обернено-конусним, еліптичним і круглоступінчастим) проводили в два етапи: на першому як вибій, використовували мармур «коелга», на другому – цементні блоки [7].

У результаті проведених експериментальних досліджень, отримані залежності енергетичних і динамічних параметрів буріння долотами з дослідними варіантами різальної частини від осьового навантаження й частоти обертання долота.

Аналізуючи результати експериментів, проведених на мармурі, встановлено, що величини крутного моменту для всіх варіантів доліт зі збільшенням осьового навантаження зростають. Найбільші значення M , мають долота з еліптичним профілем, найменші – із плоским. Найближчі показники M до породоруйнівного інструменту плоскої форми має долото з круглоступінчастим профілем різальної частини.

Значення механічної швидкості буріння v_m , для дослідних варіантів лопатей зі збільшенням осьового навантаження зростають. Найнижчі

показники v_m має долото з еліптичним профілем різальної частини.

Енергоємність буріння дослідними долотами зі збільшенням осьового навантаження зменшується. Найбільші значення питомої об'ємної роботи руйнування A_v , мають долота з еліптичним профілем, найменші – із плоским. Найближчі показники A_v до породоруйнівного інструменту плоскої форми, має долото з круглоступінчастим профілем різальної частини.

Динамічність роботи для всіх профілів лопатей зі збільшенням осьового навантаження підвищується. Найвищі значення K_{DM} отримані для доліт обернено-конусного і плоского профілів різальної частини, а найнижчі – еліптичного та круглоступінчастого. Найбільшу інтенсивність зростання значення коефіцієнта динамічності за складовою крутного моменту мають долота плоскої і обернено-конусної форм лопатей. Долота з круглоступінчастим й еліптичним профілями різальної частини мають найменші діапазони зміни величин K_{DM} .

Для визначення впливу кількості оснащення в породоруйнівних інструментах на показники їх роботи одержано залежності від питомого навантаження на різальний елемент, з яких випливає, що при однаковому значенні крутного моменту найбільше навантаження на різець виникає в долоті з плоским, а найменше – з еліптичним профілями робочої частини. Найближчі значення G/a до породоруйнівного інструменту еліптичної форми має долото з круглоступінчастим профілем лопатей.

Для оцінки впливу кількості обертів породоруйнівного інструменту на його енергетичні і динамічні параметри буріння були проведені експериментальні випробування при однаковому навантаженні і різних кутів швидкостях обертання. Величину осьової сили утримували на позначці 15 кН , витрату промивальної рідини – $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$, що регламентувалось методи-

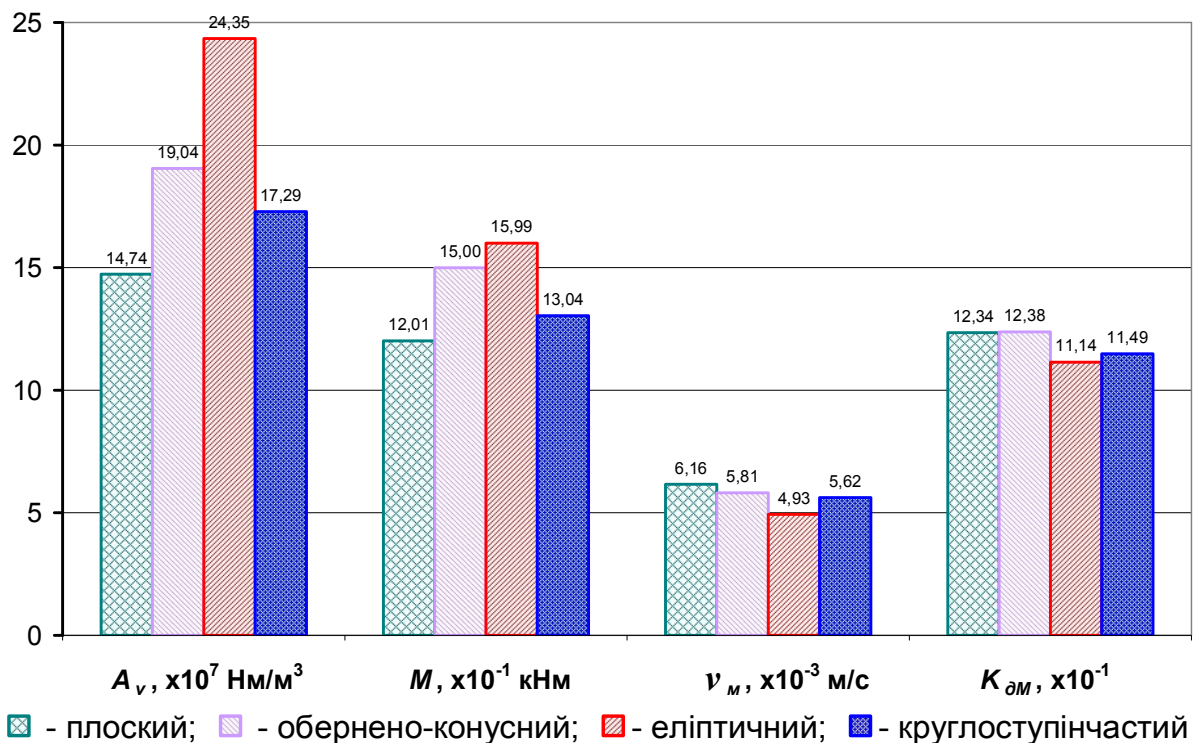


Рисунок 5 – Порівняння величин параметрів буріння дослідними варіантами доліт за результатами стендових експериментальних досліджень на мармурі при $G = 25 \text{ кН}$ і $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$

кою досліджень і технічними характеристиками стендової установки. Експерименти проводили при чотирьох значеннях кутової швидкості обертання породоруйнівних інструментів: 1, 2, 3 і 4 с^{-1} . Інші параметри режиму буріння та вихідні дані залишали незмінними.

Для підвищення достовірності порівняння та уникнення похибок внаслідок розбіжностей вимірних величин осевого навантаження від заданого, оцінка показників роботи доліт проводилась у відносних величинах. Для визначення їх числових значень використовували дані, які отримані на найближчих до 15 кН навантаженнях.

За результатами проведених експериментів одержані залежності параметрів буріння дослідними долотами від кутової швидкості обертання, з яких випливає:

1) величини питомого крутного моменту для дослідних варіантів лопатей зі збільшенням кутової швидкості обертання долота з 1 с^{-1} до 4 с^{-1} зменшуються в $1,35 \dots 1,43$ рази. Найвищі значення M_p отримані для бурового інструменту з еліптичною формою робочої частини, а найнижчі – з плоскою. Для доліт обернено-конусного і круглоступінчастого профілів лопатей різниця між показниками M_p не перевищує 6% ;

2) значення механічної швидкості буріння на величину осевого навантаження для дослідних доліт зі збільшенням кутової швидкості обертання з 1 с^{-1} до 4 с^{-1} зростають в $1,56 \dots 1,75$ рази. Найвищі показники v_m/G мають породоруйнівні інструменти круглоступінчастого, а найнижчі – еліптичного профілів різальної частини;

3) енергоємність буріння дослідними долотами зі збільшенням кутової швидкості обертання з 1 с^{-1} до 4 с^{-1} зростає в $1,75 \dots 1,97$ рази. Найвищі значення A_v мають породоруйнівні інструменти еліптичного, а найнижчі – плоско-лопатевої;

Крім того, інтенсивності змін основних показників роботи для різних дослідних варіантів доліт при збільшенні кількості обертів приблизно однакова, або їх відмінність знаходиться в межах похибки експериментальних вимірювань.

На основі отриманих результатів експериментів на мармурі здійснено розрахунок основних параметрів роботи для доліт діаметром 146 мм з різними профілями різальної частини за таких параметрів буріння:

- осевому навантаженні $G = 25 \text{ кН}$;
- кутовій швидкості обертання $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$;
- витраті промивальної рідини $V_c = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$.

Вказані величини моделюють реальні значення при бурінні породоруйнівними інструментами з ПАР діаметром $214,3 \text{ мм}$.

На рис. 5 зображено діаграми, які відображають порівняння величин параметрів буріння дослідними варіантами доліт при вказаному режимі роботи.

Результати розрахунків, які наведені на діаграмах, свідчать про наступне:

1) величина питомої об'ємної роботи руйнування для долота з плоским профілем різальної частини в $1,65$ рази менша, ніж для долота з еліптичним профілем. Найближче значення A_v до плоского має породоруйнівний інструмент круглоступінчастого профілю;

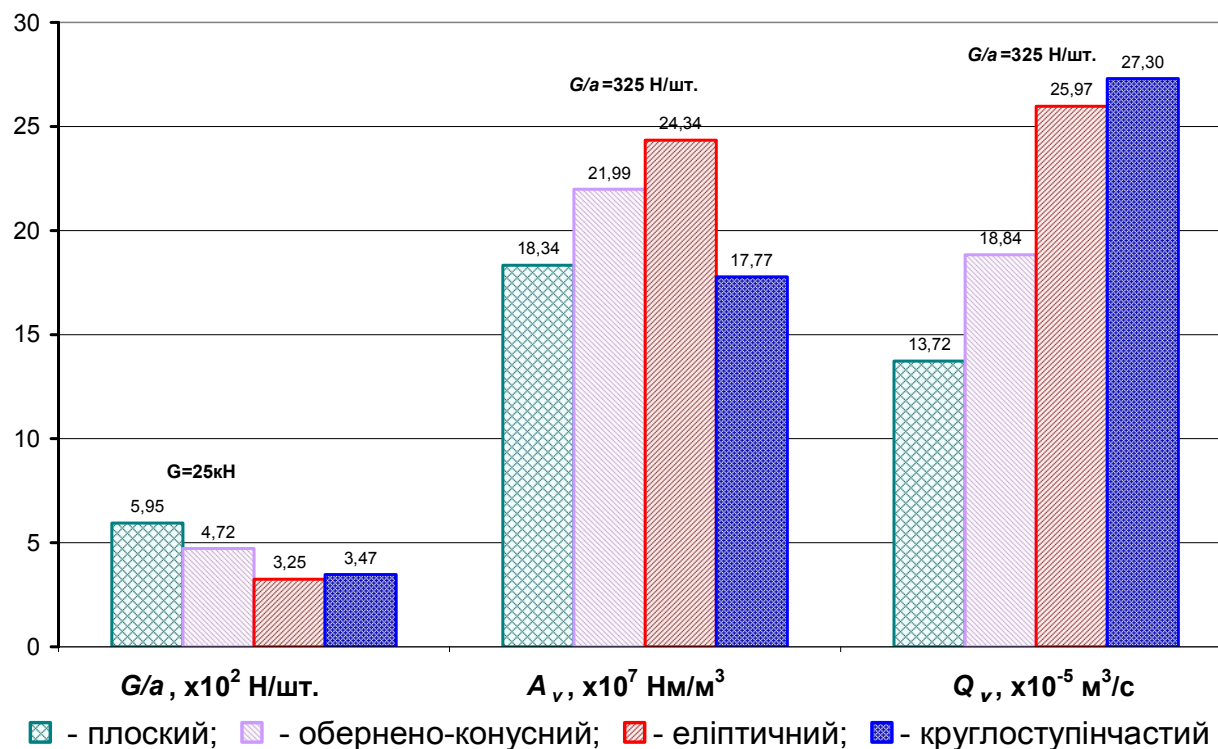


Рисунок 6 – Порівняння показників, які характеризують умови роботи породоруйнівних елементів на кожному з дослідних варіантів профілю різальної частини долота за результатами стендових експериментальних досліджень на мармурі при $G = 25 \text{ кН}$ і $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$

2) найбільшу величину крутного моменту отримано для еліптичної форми лопатей, що в 1,33 рази відрізняється від плоскої. Найближче значення M до плоского має породоруйнівний інструмент круглоступінчастого профілю: відрізняється на 9%;

3) найвищу механічну швидкість буріння має долото з плоским, а найнижчу з еліптичним профілями різальної частини. Показник v_m для першого варіанту в 1,25 рази вищий, ніж для другого. Різниця величин v_m для доліт плоского профілю відносно обернено-конусного й круглоступінчастого становить відповідно 6 та 10%;

4) найвищі значення коефіцієнта динамічності за складовою крутного моменту мають долота обернено-конусної та плоскої, найнижчі – еліптичної форм лопатей. Показник $K_{\text{дм}}$ для круглоступінчастого профілю різальної частини долота близький до величини еліптичної форми – різниця становить 3%.

З метою порівняння умов роботи різців при вказаних вище параметрах режиму буріння розраховано величини питомого навантаження G/a , питомої об'ємної роботи руйнування A_v та об'єму відділеної від вибою породи Q_v для кожного з дослідних варіантів доліт (рис. 6).

Результати теоретичних досліджень, які наведені на діаграмах, свідчать:

1) найбільше навантаження зазнає різець в долоті з плоским, а найменше з еліптичними профілями лопатей. Значення G/a першого варіанту в 1,83 рази більші, ніж другого;

2) при мінімальному навантаженні на різець, яке виникає в долоті еліптичного профі-

лю, найменший показник питомої об'ємної роботи руйнування отримано для породоруйнівного елемента в круглоступінчастій, а найбільший – в еліптичній формах робочої частини (відношення між ними становить – 1,37);

3) при мінімальному навантаженні на різець, яке виникає в долоті еліптичного профілю, найбільший об'єм гірської породи відокремлюється від вибою за круглоступінчастої форми лопатей, що майже в 2 рази перевищує показник плоского профілю.

На підставі отриманих результатів експериментальних досліджень при бурінні мармуру можна зробити висновок, що породоруйнівний інструмент з плоским профілем різальної частини переважає інші конструкції за енергетичними показниками роботи при всіх кутових швидкостях обертання. Однак оснащення в такому долоті працює в більш складних умовах ніж у випадку інших дослідних конструкцій. Про це свідчать одержані залежності та діаграми показників буріння від питомого навантаження на породоруйнівний елемент. Для забезпечення ефективної роботи долота з плоским профілем необхідно задавати більші осьові навантаження, що веде до збільшення питомого навантаження на різець і передчасного його спрацювання.

Наприклад, щоб досягти однакового показника за об'ємом гірської породи, яку вибурено окремим породоруйнівним елементом плоского і круглоступінчастого профілів різальної частини, на перше долото необхідно створити навантаження в 1,7 разів більше, ніж на друге.

Крім того, різці на плоскій поверхні зазнають більших динамічних навантажень, про що свідчать залежності коефіцієнта динамічності за складовою крутного моменту.

У більш вигідному положенні відносно долота з плоским профілем різальної частини (згідно результатів досліджень) знаходиться породоруйнівний інструмент з круглоступінчастою формою лопатей (другий за оптимальністю енергетичних параметрів). Розташування і кількість різців, які встановлені на ній, близькі до таких, як на еліптичному профілі (найбільш оснащеному). Для порівняння, оснащення породоруйнівними елементами різальної частини долота з круглоступінчастим профілем є меншою, ніж еліптичного на 7%, ніж плоского — на 45%. Крім того, круглоступінчастою конструкцією забезпечується дублювання периферійних ділянок оснащення різцями ступені лопаті, розміщеної вище. При цьому різальний елемент, який розташований на лопаті круглоступінчастої форми, має найнижче значення питомої об'ємної роботи руйнування гірської породи.

З викладеного випливає, що при бурінні з використанням гвинтових вибійних двигунів порід середньої твердості доцільно застосовувати в породоруйнівних інструментах, оснащених ПАР, круглоступінчасту форму лопатей, яка найбільш раціонально поєднує переваги плоскої (найменш енергоємної) і еліптичної (найбільш зносостійкої) форм.

На наступному етапі досліджень для визначення характеристик роботи породоруйнівних інструментів з різним профілем різальної частини, у процесі буріння порід малої твердості були проведені експерименти з використанням як вибою цементних блоків.

Параметри режимів буріння, вихідні дані та умови проведення вказаних випробувань різних варіантів доліт утримувались незмінними і становили:

- осьове навантаження – 15 кН;
- кутова швидкість обертання – 2 с^{-1} ;
- витрата промивальної рідини – $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$;
- кількість лопатей – 12 шт.;
- число довань – не менше 3;
- проміжок часу, в який проводили запис параметрів роботи, – 40 с.

У результаті експериментальних досліджень отримано величини енергетичних і динамічних параметрів буріння цементних блоків долотами з дослідними варіантами різальної частини.

На рис. 7 та 8 наведено діаграми, що відображають характеристики роботи породоруйнівних інструментів з різним профілем лопатей при бурінні вибоїв різної твердості. Звідси можна зробити висновки:

1) величини питомої об'ємної роботи при бурінні цементних блоків перевищують аналогічні дані на мармурі: для плоского й обернено-конусного профілів відповідно, на 8% і 12%; круглоступінчастого та еліптичного – в 1,19 і 1,31 рази. Різниця між показниками M_p на вибоях різної твердості для обернено-конусної

та круглоступінчастої конструкції не перевищує 4% (рис. 7);

2) механічна швидкість буріння дослідними долотами цементних блоків в 4,73...5,41 рази вища, ніж мармуру. Найбільший приріст v_m/G отримано для еліптичного, а найменший для обернено-конусного профілів різальної частини.

Найвищі значення v_m/G при бурінні вибоїв різної твердості має долото круглоступінчастої конструкції, а найнижчі – еліптичної (на мармурі) і обернено-конусної (на цементних блоках) (рис. 8);

3) значення питомої об'ємної роботи руйнування для всіх варіантів експериментальних доліт при бурінні мармуру в 3,82...4,64 рази переважають такі ж показники на цементних блоках.

Найвищі показники A_v при бурінні цементних блоків має еліптична, а найнижчі – плоска форми лопатей (їх відношення складає 1,72). Послідовності ранжування профілів лопатей за величиною енергоємності буріння для порід різної твердості повністю співпадають. Різниця величин A_v для круглоступінчастої й обернено-конусної конструкцій на цементних блоках не перевищує 2%.

При бурінні цементних блоків найбільше значення коефіцієнта динамічності за складовою крутного моменту має долото з плоским, а найменше – з еліптичним профілями різальної частини (їх відношення становить – 1,28).

Величини коефіцієнтів динамічності за складовою крутного моменту для всіх варіантів профілів при бурінні цементних блоків є вищими за аналогічні дані на мармурі від 2% для круглоступінчастої, до 1,24 рази для плоскої форми лопатей (рис. 9).

Порівняння енергетичних характеристик роботи доліт, які отримані при бурінні цементних блоків, свідчить, що найкращі показники має породоруйнівний інструмент з плоским профілем різальної частини, найгірші – з оберненоконусним профілем. При цьому породоруйнівний інструмент з круглоступінчастою формою лопатей має в 1,25 рази вищий показник v_m/G , ніж оберненоконусна конструкція.

За вищих в 1,25 рази значень M_p долото круглоступінчастого профілю характеризується більшими значеннями питомої об'ємної роботи руйнування (на 13%) і механічної швидкості буріння, на величину осьового навантаження (на 9%), ніж породоруйнівний інструмент плоского профілю.

Отже, в породах низької і середньої твердості доцільно використовувати долота з круглоступінчастим профілем. При бурінні вибійними гвинтовими двигунами ефективними є конструкції породоруйнівних інструментів, що поєднують круглоступінчасту і плоску форми різальної частини.

З врахуванням вказаних результатів досліджень спеціалістами ПрАТ «НДКБ бурового інструменту» спільно за ІНМ АН України розроблено і виготовлено близько десяти конструкцій бурових доліт і бурильних головок різаль-

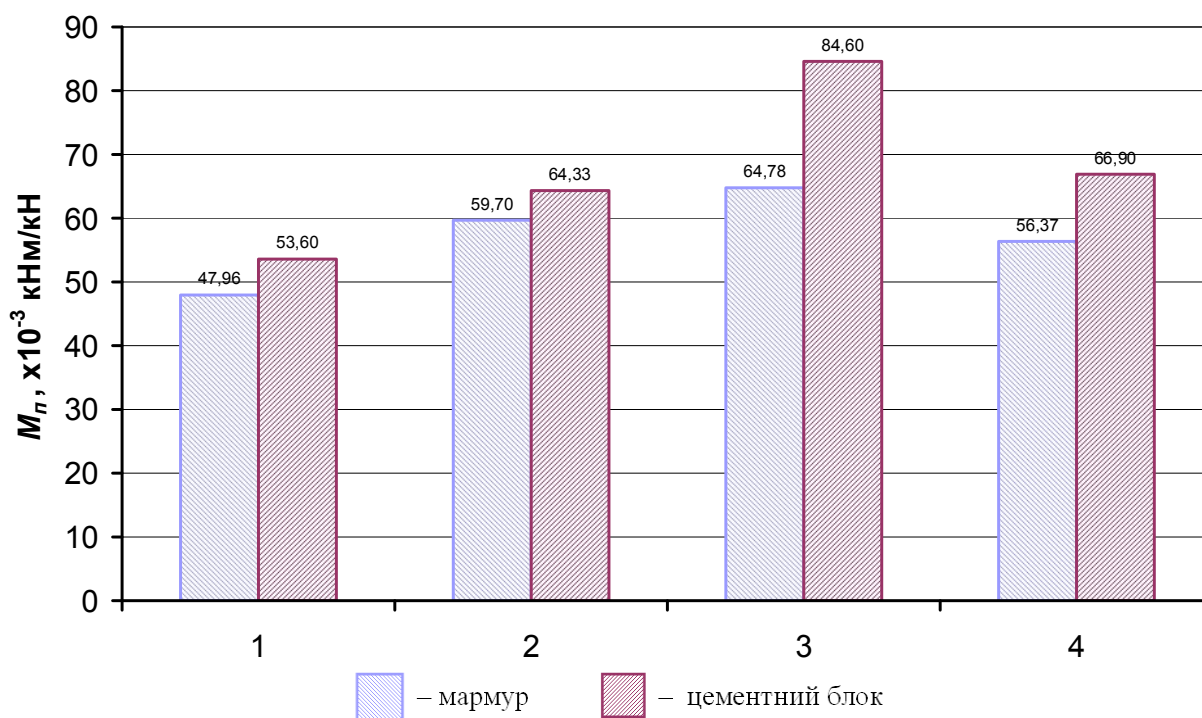


Рисунок 7 – Величини питомого крутного моменту для дослідних варіантів доліт при бурінні порід різної твердості: $m = 12$; $G = 15 \text{ кН}$; $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$

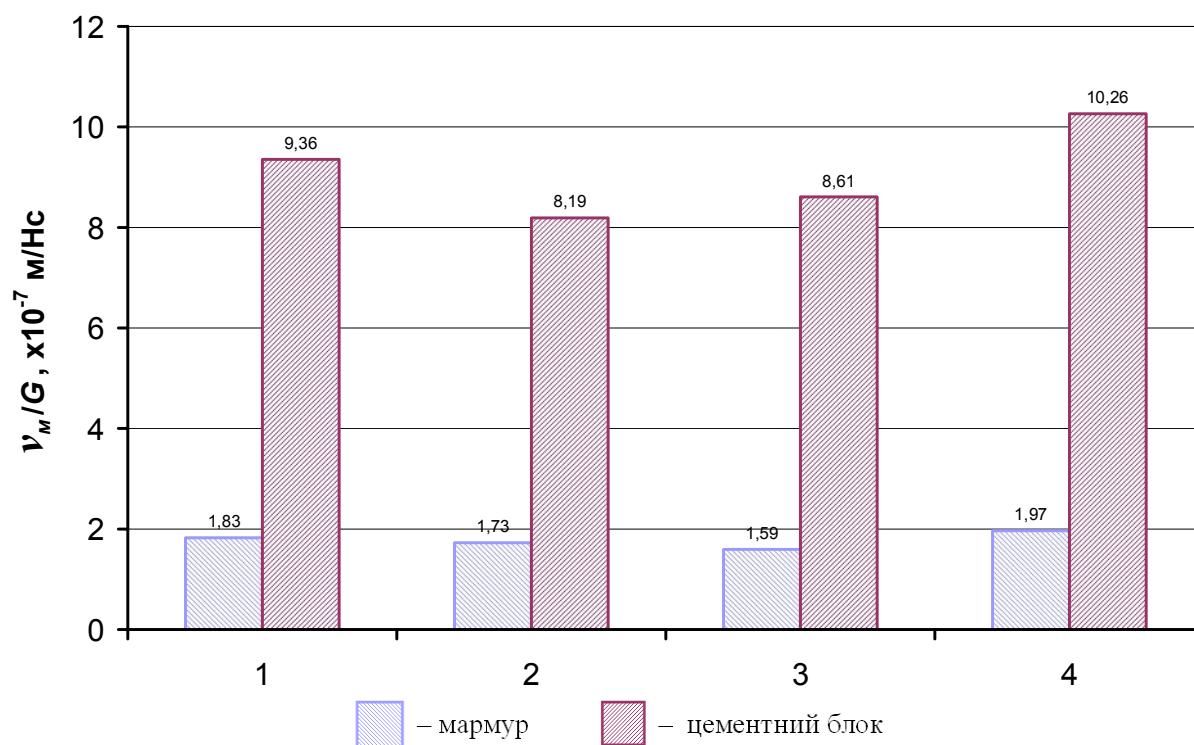


Рисунок 8 – Величини механічної швидкості буріння на величину осьового навантаження для дослідних варіантів доліт при бурінні порід різної твердості: $m = 12$; $G = 15 \text{ кН}$; $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$

ної дії, які успішно випробувані і використовуються при бурінні похило-скерованих і горизонтальних свердловин з використанням гвинтових вибійних двигунів на багатьох нафтогазових родовищах України та Російської Федерації.

В процесі промислових випробувань дослідних взірців доліт і бурильних головок в таких свердловинах було відмічено стабільність роботи вибійних двигунів, тобто без їх зупинок і перепадів значень тиску, що позитивно вплинуло на технічні показники буріння та відбору ядра.

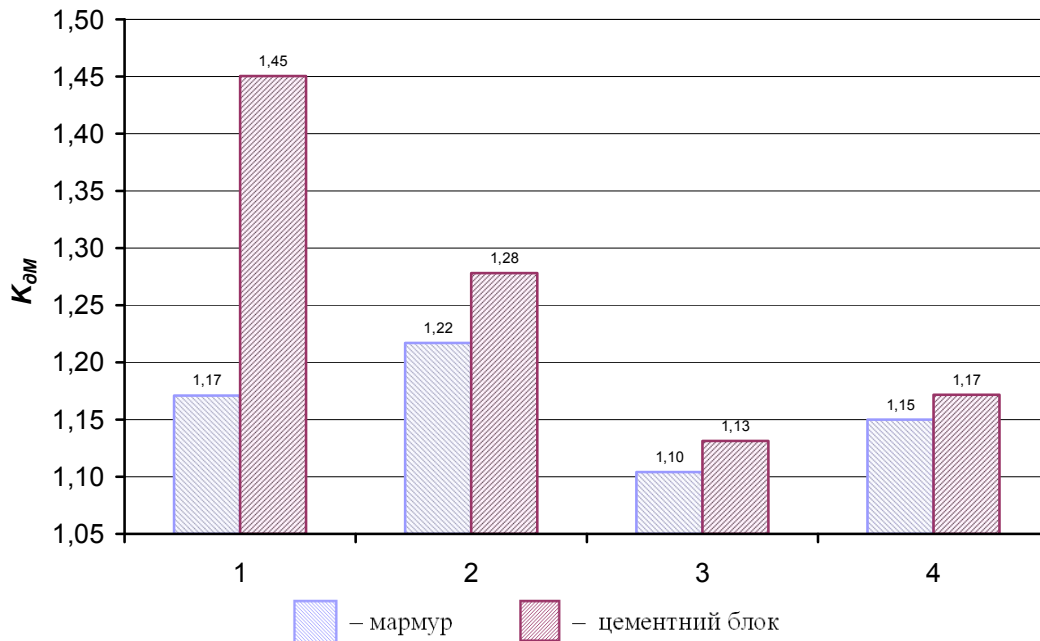


Рисунок 9 – Величини коефіцієнта динамічності за складовою крутного моменту для дослідних варіантів доліт при бурінні порід різної твердості: $m = 12$; $G = 15 \text{ кН}$; $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$

Висновки

1. Аналізуючи результати аналітичних і промислових досліджень, встановлено, що для підвищення ефективності будівництва похило-скерованих та горизонтальних нафтових і газових свердловин з використанням вибійних двигунів необхідне створення породоруйнівних інструментів різальної дії пониженої енергоємності буріння.

2. На основі теоретичних і експериментальних досліджень бурових доліт різальної дії встановлені залежності енергетичних параметрів їх роботи від профілю та кількості лопатей, розроблено раціональні конструкції робочої частини породоруйнівних інструментів для заданих умов буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин.

3. Розроблено математичну модель і експериментально визначено емпіричні коефіцієнти для розрахунків прогнозних енергетичних параметрів роботи породоруйнівних інструментів різальної дії з різними формами робочої частини.

4. Промислові випробування підтвердили високу ефективність запропонованих конструкцій породоруйнівних інструментів та стабільність роботи вибійних двигунів при бурінні ПС і ГСС.

Література

1 Кунцяк Я.В. Математична модель для розрахунку раціональної форми різальної частини долота / Я.В. Кунцяк, Д.М. Мартинюк // Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 3. – С. 12-16.

2 Мартинюк Д.М. Зниження енергоємності доліт різальної дії // Сборник научных трудов

«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2004. – С. 38-39.

3 How the Bit Profile and Gages Affect the Well Trajectory / Menand S., Sellami H., Simon C., Besson A., Da Silva N. // Paper SPE 74459 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, Texas. – 26-28 February, 2002.

4 PDC bit technology improvements increase efficiency, bit life Menand S., Gerbaud L., Dourfaye A. // Drilling contractor. – March/April 2005. – P. 52-54.

5 Патент № 42571 Россия, МПК, У21В 10/52. «Буровое долото» / Мартинюк Д.М., Кунцяк Я.В., Дубленич Ю.В. (Украина); Патентообладатель ЗАО «НИИКБ бурового инструмента» - 2004/23828 заявл. 05.08.2004; опубл. 10.12.2004 Бюл. № 34.

6 Комлягина Н.Н., Исследование работы режущих долот методами математического моделирования / Н.Н. Комлягина, Т.Г. Агошавили, Я.В. Кунцяк [и др.] // Нефтяная и газовая промышленность. – 1993. – №1-2. – С. 43-47.

7 Кунцяк Я.В. Влияние формы профиля режущих долот на энергетические и динамические параметры их работы / Я.В. Кунцяк, Т.Г. Агошавили, Я.С. Гаврилов [и др.] // Нефтяная и газовая промышленность. – 1993. – № 1-2. – С. 29-34.

Стаття надійшла до редакційної колегії
02.02.12

Рекомендована до друку професором
Коцкуlichem Я.С.