

Є. Крижанівський

Член-кор. НАН України,
професор, д-р техн. наук

Р. Яким

Доцент, канд. техн. наук

Л. Шмандровський

Аспірант

Ю. Петрина

Професор, д-р техн. наук

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ

УДК 622.24.051.004.6

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ОПОР ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ

Алгоритми, що використовуються для розробки нових конструкцій опор шарошкових доліт з опорою роликів — кулька — ролик (РКР) можна сформулювати так: радіальні навантаження повинні сприйматися тільки радіальними підшипниками, кульковий — замковий підшипник повинен сприймати в період припрацювання долота тільки осеві навантаження. Основна функція кулькового (замкового) підшипника — сприйняття зворотного осевого навантаження, що відтискає шарошку від стінки свердловини, та обмеження осевого переміщення шарошки по цапфі лапи.

опора, бурове долото, стійкість, вантажність, кульковий підшипник

Стійкість опори шарошкового долота у більшості випадків визначає її конструкція, що забезпечує ефективні кінематичні параметри [1]. Досконалість конструкції, висока зносостійкість і тріщиностійкість, контактна витривалість тощо дають можливість очікувати високі показники напрацювання долота. Тому вдосконалення конструкції опор шарошkových бурових доліт є актуальним.

Сучасні бурові шарошкові долота мають велику різноманітність конструкцій опор. Проте найпоширенішою схемою конструктивного виконання є опора роликів — кулька — ролик, у якій кульковий підшипник виконує функцію замкового. Для розвантаження кулькового замкового підшипника в осьовому напрямі виконують підшипник ковзання по спряжених поверхнях упорного торця лапи й упорного торця шарошки. Як правило, упорний торець лапи наплавляють, а упорний торець шарошки піддають цементациї.

Головною проблемою проектування долота є надзвичайно обмежений об'єм, в якому потрібно розмістити всі

механізми. Правила конструювання опор шарошkových доліт з опорою роликів — кулька — ролик (РКР) можна сформулювати так: радіальні навантаження повинні сприйматися тільки радіальними підшипниками, кульковий — замковий підшипник повинен сприймати в період припрацювання долота тільки осеві навантаження. Основна функція кулькового (замкового) підшипника — сприйняття зворотного осевого навантаження, що відтискає шарошку від стінки свердловини, та обмеження осевого переміщення шарошки по цапфі лапи.

Якісний аналіз розподілу навантаження між підшипниками опори шарошки дав змогу авторам [2] встановити, що навантаження між підшипниками розподіляється нерівномірно. В основному навантаження сприймається тільки двома підшипниками — кульковим і великим роликовим, або кульковим і малим роликовим підшипниками. При довільному варіанті навантажування найбільше навантаження сприймає кульковий замковий підшипник.

Аналіз відпрацювання опор шарошkových бурових доліт, що використовуються для розбурювання особливо

міцних порід, виявив низьку стійкість замкового кулькового підшипника. Зафіксовано: розколювання тіл кочення, деформацію на біговій доріжці лапи з утворенням другої бігової доріжки, люфти і зміщення в осьовому напрямі шарошки, руйнування бурта замкового кулькового підшипника.

Традиційно цю проблему вирішують введенням упорних підшипників ковзання «п'ята — підп'ятник» і «упорний торець лапи — упорний торець шарошки», однак в шарошкових бурових долотах, призначених для високооборотного буріння, згадані підшипники ковзання швидко виходять з ладу. За таких умов актуальним є вдосконалення конструкції підшипників кочення, опори яких формують основну вантажність опори шарошкового долота.

Відомо, якщо габаритні розміри конструкції дають можливість, то удосконалення і реконструкція опор здійснюється застосуванням підшипників з більшою вантажністю, при цьому контролюють значення $d_m n$ [3], де d_m — діаметр тіла кочення, n — кількість тіл кочення. Однак в опорі шарошкового долота параметри підшипників кочення строго регламентовані відповідно до рівномірності розподілу навантаження.

Встановлено [4], що збільшення конструктивних розмірів замкового підшипника призводить до інтенсивного зниження величини деформації контактних поверхонь. Разом з цим, відомо [5], що на довговічність кулькового радіально-упорного підшипника в опорі впливають не тільки розміри його бігових доріжок і кульок, що визначають радіальний зазор в ньому, але й розміри бігових доріжок та тіл кочення радіальних роликових підшипників, що визначає ексцентриситет. Все це обумовлює блочне конструювання взаємозв'язаних різномірних підшипників, які призначені працювати у складних умовах.

Гіпотезою дослідження є твердження, що збільшення вантажності замкового підшипника кочення дає змогу істотно підвищити стійкість опор шарошкових бурових доліт.

Для перевірки висунутої гіпотези було поставлено завдання спроекувати конструкцію опори, в якій забезпечується підвищення вантажності замкового кулькового підшипника кочення.

З цією метою відповідно до методики, описаної в [6], з використанням програмного продукту Mathcad було проведено розрахунки для опори долота 244,5 ОК-ПГВ-Р261У з встановлення: нормальних напружень і деформацій у контактних поверхнях кочення; дотичних напружень у контактних поверхнях кочення; глибини залягання максимальних контактних напружень у матеріалах цапфи лапи і шарошки; радіальне й осьове зміщення шарошки відносно цапфи при нульових зазорах. Встановлено, що для такої конструкції найоптимальнішим є підвищення вантажності замкового підшипника на 21%. При цьому прогнозувалося, що деформації в проектному варіанті однаково зростуть на цапфі і шарошці в 1,2 раза за рахунок вищого навантаження на кульку (в 1,28 раза) порівняно з базовою конструкцією.

Деформації в базовій конструкції більше проявляються на цапфі. Так, на бігових доріжках відпрацьованих опор є характерне утворення другої кулькової бігової доріжки,

яка зміщена по осі в навантаженій зоні. Також встановлено, що в обох конструкціях максимальні напруження виникають у цементованому шарі цапфи і шарошки. При цьому в проектному варіанті глибина, на якій виникають максимальні напруження, є більшою на 0,07 мм та на 0,11 мм в цементованому шарі цапфи і шарошки відповідно. Тобто, у проектному варіанті розвиток контактної руйнування буде менше залежати від параметрів поверхневого шару бігових доріжок. Також прогнозується збільшення максимального зміщення шарошки у проектному варіанті як в радіальному, так і в осьовому напрямках шарошки відносно цапфи в 1,1 раза.

Для експериментальної перевірки гіпотези та спроектованої конструкції були проведені стендові випробування секцій доліт з опорою серійної конструкції і експериментальною.

Випробування комплектів секцій доліт проводили на металевому вибої сталі 20 при осьовому навантаженні 50 — 55 кН і частоті обертання 78 об/хв. При відпрацьованні секцій 50 год навантаження на секції було збільшено до 55 — 57 кН, при якому комплекти відпрацьовали ще 20 год. Кожних 5 год комплекти розбирали і оцінювали знос. Відпрацьовання комплектів було припинено у зв'язку з катастрофічним руйнуванням бігової доріжки великого роликового підшипника на цапфі лапи серійної конструкції. Також тут були значніші руйнування кулькової бігової доріжки та малого роликового підшипника порівняно з експериментальною конструкцією (див. рис. 1.).

У результаті проведених стендових випробувань було встановлено динаміку: зменшення діаметрів бігових доріжок замкового підшипника на лапах (рис. 2); зменшення діаметра кульок замкового підшипника опор секцій долота (рис. 3); лінійного зносу наплавленого торця лап (рис. 4); зростання лінійного зносу цементованого шару упорного торця шарошки (рис. 5); зростання осьового люфту в опорах секцій доліт (рис. 6).

Отже, на відміну від серійної конструкції, де осьове навантаження сприймають підшипники ковзання «п'ята — підп'ятник» і «упорний торець лапи — упорний торець шарошки», в експериментальній опорі відбувається інтенсивніший знос і пластична деформація замкових кулькових бігових доріжок лапи (рис. 2). Проте протягом



Рис.1. Порівняння експериментальної (ліворуч) та серійної (праворуч) лап секцій доліт 244,5ОК-ПГВ, що відпрацьовали в стендових умовах 65 год

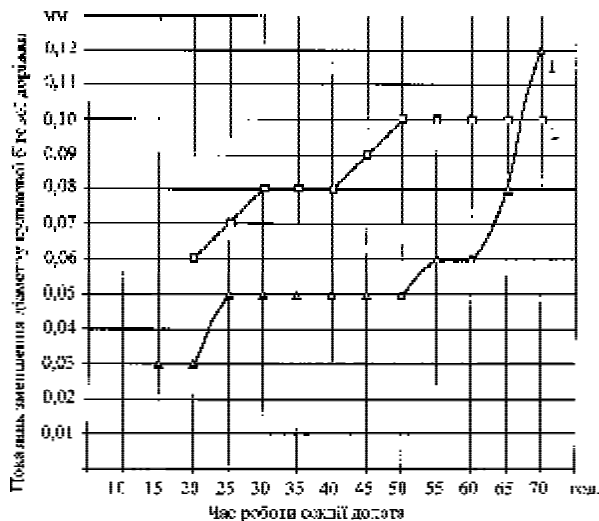


Рис. 2. Динаміка зменшення діаметрів кулькових бігових доріжок замкового підшипника на лапах секції доліт у процесі відпрацювання в стендових умовах: 1 — серійна конструкція опори; 2 — експериментальна конструкція опори

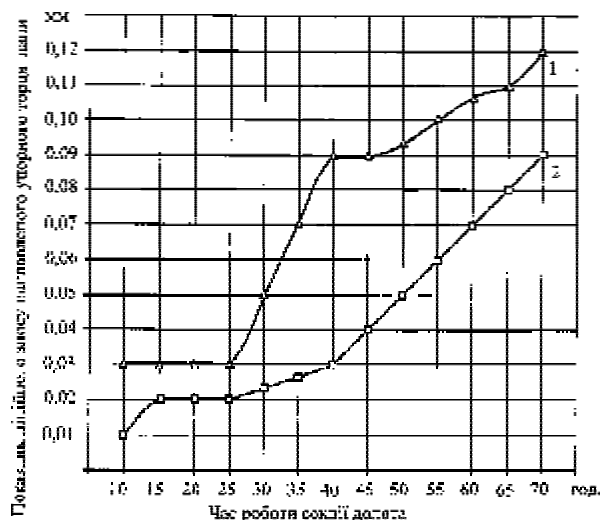


Рис. 4. Динаміка лінійного зносу наплавленого упорного торця лап секції доліт у процесі відрацювання в стендових умовах: 1 — серійна конструкція опори; 2 — експериментальна конструкція опори

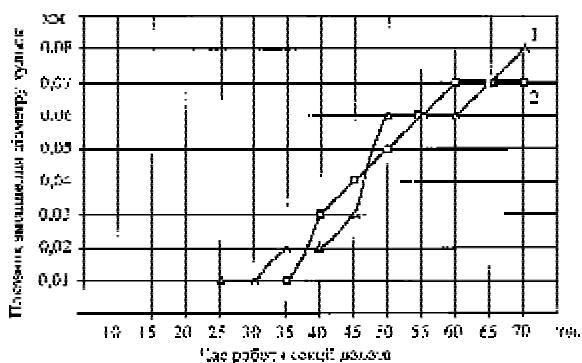


Рис. 3. Динаміка зменшення діаметра кульків замкового підшипника опор секції доліт у процесі відпрацювання в стендових умовах: 1 — серійна конструкція опори; 2 — експериментальна конструкція опори

останніх 10 годин, коли навантаження на секції було збільшено, зафіксовано зростання зносу і пластичної деформації кулькових бігових доріжок у серійних опорах. У результаті руйнування замкового підшипника було більшим порівняно з експериментальною опорою.

Аналіз зносу і пластичної деформації кульків у досліджених опорах виявив більшу плавність цих явищ в експериментальній конструкції (див. рис. 3). Це можна пояснити тим, що на працездатність кулькового замкового підшипника в серійній конструкції помітно впливають умови роботи підшипників ковзання «п'ята — підп'ятник» і «упорний торець лапи — упорний торець шарошки». Раніше було встановлено [7], що п'ята і підп'ятник працюють неефективно. Відбувається просідання, інтенсивний знос, розколювання. У нашому випадку спостерігали утворення тріщин на підп'ятнику через 10 годин роботи в стендових умовах. Аналогічно встановленому в [7] відбувається втрата працездатності деталей пари «п'ята — підп'ятник».

Аналіз динаміки зносу підшипника «упорний торець лапи — упорний торець шарошки» виявив вищу стійкість

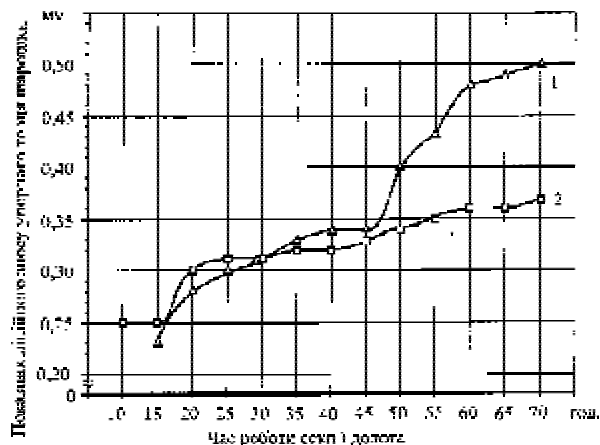


Рис. 5. Динаміка лінійного зносу цементного упорного торця лап секції доліт у процесі відпрацювання в стендових умовах: 1 — серійна конструкція опори; 2 — експериментальна конструкція опори

і плавність зростання зносу опори експериментальної конструкції порівняно з серійною (див. рис. 4, рис. 5). Це можна пояснити тим, що, на відміну від серійної конструкції, в експериментальній забезпечується краще базування і орієнтація підшипників ковзання. Тут вони працювали по всій робочій площині. У серійних опорах зафіксовано перекіс і нерівномірний знос (по площині, перпендикулярній до осі опори) підшипника ковзання «п'ята — підп'ятник» і замкового кулькового підшипника кочення.

Результати аналізу проведених експериментів показали вищу стійкість експериментальної конструкції опори до утворення люфтів (див. рис. 6) та перекошування. Наприклад, при відпрацюванні 30 год на кульковій біговій доріжці базової конструкції помічено зміщення бігової доріжки (інтенсивний знос і пластична деформація сформували навий профіль бігової доріжки), на експериментальній — дзеркальна поверхня. Не зважаючи на те, що в базовій конструкції основне осьове навантаження

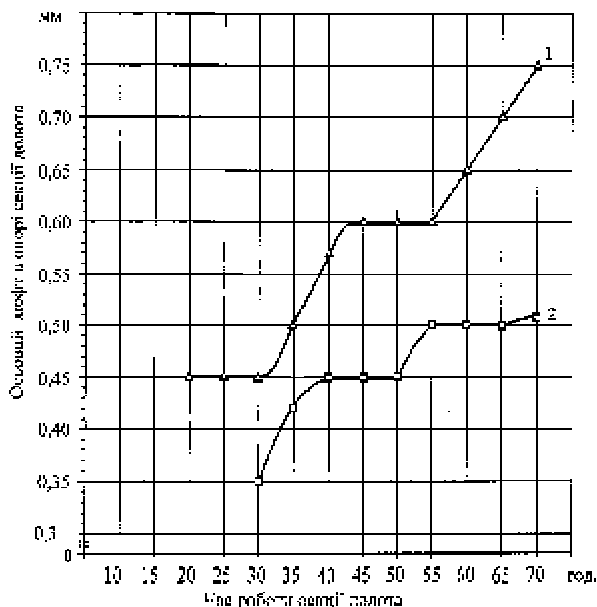


Рис. 6. Динаміка зростання осьового люфту в опорах секцій доліт у процесі відробки в стендових умовах: 1 – серійна конструкція опори; 2 – експериментальна конструкція опори

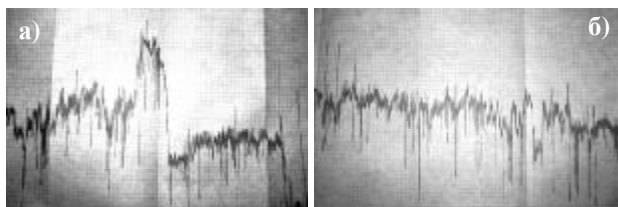


Рис. 7. Картограми крутного моменту для доліт 244,50К-ПГВ серійного (а) та експериментального (б), що працювали в стендових умовах по металевому вибою 37 год 20 хв

сприйняв підшипник ковзання «п'ята — підп'ятник», тут зафіксовано більше значення люфту в 1,3 рази порівняно з експериментальною опорою.

Були також проведені стендові випробовування шарошкового долота з експериментальними опорами. Випробовування долота проводилось на металевому вибої зі сталі 20 при осьовому навантаженні 220 — 250 кН та частоті обертання долота 60 — 75 об/хв, що дає можливість у потрібних межах імітувати реальні умови роботи долота. Встановлено, що на всіх шарошках з'явилися люфти 0,5 мм після 15 годин роботи. Після 20 годин люфт становив 1,0 мм на всіх шарошках. Після 37 годин 20 хвилин роботи долота зафіксовано зниження плавності обертання шарошок долота. На рис. 7 наведено порівняння картограм крутних моментів для серійних (рис 7,а) та експериментальних доліт (рис 7,б).

Спостереження за відпрацюванням доліт на стенді показали кращі експлуатаційні показники експериментальних доліт порівняно з серійними. На момент припинення роботи експериментальні долота були працездатними аналогічно до випробовувань секцій. Аналіз зношених поверхонь підшипників опор дає підстави твердити про більшу ефективність роботи експериментальної конструкції за рахунок відмови від підшипника ковзання

«п'ята — підп'ятник», та базуванню долота в осьовому напрямі замковим кульковим підшипником. За рахунок цього шарошка мала кращу стійкість і підшипник ковзання «упорний торець лапи — упорний торець шарошки» працював по всій поверхні і зазнав значно менших руйнувань порівняно з серійною опорою. Тобто, результати стендових випробувань секцій досліджених доліт підтвердилися.

З метою встановлення стійкості опор з підвищеною вантажністю замкового кулькового підшипника кочення було виготовлено експериментальну партію з 14 доліт та підготовлено таку саму партію серійних доліт. Долота відпрацювали в реальних умовах при осьовому тиску на долото 8,11 МПа, частоті обертання 80 — 100 об/хв, тиску повітряно-водяної суміші 0,41 МПа. Здійснювали буріння порід 16 категорії міцності за шкалою М. М. Протодьяконова. Для отриманих значень проходки на долото встановлено середні значення для серійних (178 п/м) і експериментальних доліт (302,786 п/м).

Оцінка отриманих результатів здійснювалась у відповідності до рекомендацій [8, 9].

Перевірка мінімальних і максимальних значень кожної вибірки на аномальність показала, що всі результати спостереження вкладаються в межі статистичного розсіювання. Відтак, середнє квадратичне відхилення вибірки для серійних доліт становить $S_1 = 132,715$, а для експериментальних — $S_2 = 138,393$

Істинне значення проходки, як випадкової величини, відповідно до вибраної довірчої ймовірності $P = 0,95$ для серійних H_1 і експериментальних H_2 доліт, відповідно, шукали в межах:

$$\bar{x}_1 - t_\alpha \frac{S_1}{\sqrt{n}} \leq H_1 \leq \bar{x}_1 + t_\alpha \frac{S_1}{\sqrt{n}};$$

$$\bar{x}_2 - t_\alpha \frac{S_2}{\sqrt{n}} \leq H_2 \leq \bar{x}_2 + t_\alpha \frac{S_2}{\sqrt{n}},$$

де \bar{x}_1, \bar{x}_2 — середні значення вибірок проходок серійних і експериментальних доліт відповідно; S_1, S_2 — середні квадратичні відхилення вибірок проходок серійних і експериментальних доліт відповідно; t_α — коефіцієнт, який враховує неточність оцінки S і відповідає квантилю розподілу Стьюдента; n — кількість проходок.

У нашому випадку відповідно до довірчої ймовірності $P = 0,95$ та кількості ступенів вільності $f = n - 1$, згідно з таблицею V у [10], коефіцієнт Стьюдента для випадкової величини проходки долота $t_\alpha = 1,772$. Після відповідних математичних дій отримали:

$$161,202 \leq H_1 \leq 194,798;$$

$$285,269 \leq H_2 \leq 320,303.$$

Відносна похибка отриманих середніх значень проходок серійних і експериментальних доліт становить:

$$\epsilon_1 = \frac{t_\alpha S_1}{\bar{x}_1 \sqrt{n}} \cdot 100\% = 9,437\%;$$

$$\epsilon_2 = \frac{t_\alpha S_2}{\bar{x}_2 \sqrt{n}} \cdot 100\% = 5,785\%.$$

Видно, що відносна похибка середніх значень проходки експериментальних доліт є приблизно в 1,6 разів меншою порівняно з серійними долотами.

Порівняння вибірок також здійснювали за допомогою критерію Фішера, який використовують для порівняння дисперсій вибірок:

$$F = \frac{S_{max}}{S_{min}} = \frac{S_2}{S_1} = 1,043.$$

Оскільки ступінь вільності в обох випадках рівний 13, і табличне значення критерію Фішера, згідно з табл. VI [10], для вибраної довірчої ймовірності отримали $F_T = 2,6$. Оскільки $F < F_T$, то відмінність між дисперсіями є статистично незначною.

Для порівняння розподілів значень проходок знаходили середнє квадратичне відхилення для обох вибірок:

$$S_{1,2}^2 = \frac{(n-1)S_1^2 + (n-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2},$$

де $n_1 = n_2 = n$, та перевіряли, чи справджується умова відмінності між середнім значенням проходок доліт

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \geq t_{\alpha} S_{1,2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}},$$

де $t_{\alpha} = 1,706$ — критерій, вибраний відповідно до кількості ступнів вільності $f_1 + f_2 = 26$ для вибраної довірчої ймовірності з табл. V [10]. Отримали $124,786 > 87,418$. Оскільки умова виконується, то відмінність між середнім значенням проходки серійних та експериментальних доліт є істотною.

Отримані результати дають можливість констатувати, що експериментальні долота показали вищі значення проходки у середньому в 1,7 разів порівняно з серійними. Крім цього, відносна похибка проходки в експериментальних долотах є в 1,6 разів меншою, що свідчить про більш стабільне відпрацювання експериментальних доліт.

Отже, встановлено, що підвищення вантажності замкового кулькового підшипника кочення забезпечує підвищення стійкості опор шарошкових доліт, що, в свою чергу, підвищує продуктивність буріння. Підвищення вантажності замкового кулькового підшипника на 21 % дає можливість відмовитися від малоефективного підшипника ковзання «п'ята — підп'ятник». Експлуатаційні відпрацювання доліт з експериментальними опорами показали збільшення проходки в середньому в 1,7 разів порівняно з серійними та вищу стабільність відпрацювання. Дослідження дають підстави рекомендувати до впровадження розроблену конструкцію опори долота.

Надалі є перспективним дослідження впливу режимів хіміко-термічного оброблення на експлуатаційні показники елементів опор бурових доліт.

Література

1. Яким Р.С. Оцінка працездатності тіл кочення опор тришарошкових бурових доліт за кінематичними

параметрами / Р. С. Яким // Нафтогазова енергетика. — 2007. — № 4 (5). — С. 94—97.

2. Виноградов В. Н. Исследование нагруженности подшипников опоры шарошечного долота поляризационно-оптическим методом / В. Н. Виноградов, А. Ф. Брагин, Пяльченков В. А., Боднарчук В. А. / Повышение эффективности технологических процессов газонефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности путем обеспечения долговечности оборудования и инструмента / Под ред. В.Н.Виноградова // Труды Московского института нефти и газа им. И. М. Губкина. — Вып. 202. — 1987. — С. 3—9.

3. Чуб Е. Ф. Реконструкция и эксплуатация опор с подшипниками качения: Справочник / Чуб Е. Ф. — М.: Машиностроение, 1981. — 365 с.

4. Яким Р. С. Вплив експлуатаційних параметрів навантаження в замковому підшипнику тришарошкового бурового долота на його довговічність / Р. С. Яким // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. — 2007. — №1 (15). — С. 67—72.

5. Мокшин А. С. Шарошечные долота. / Мокшин А. С., Владиславлев Ю. Е., Комм Э. Л. — М.: Недра, 1971. — 216 с.

6. Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание: справочник / Перель Л. Я. — М.: Машиностроение, 1983. — 543 с.

7. Петрина Ю. Д. Вплив конструкторсько-технологічних параметрів на працездатність опор тришарошkových гірничорудних бурових доліт / Ю. Д. Петрина, Р. С. Яким, Т. Б. Пасинович // Нафтогазова енергетика. — 2008. — №1 (6). — С. 72—77.

8. Эйгелес Р. М. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин / Р. М. Эйгелес, Р. В. Стрекалова. — М.: Недра, 1977. — 200 с.,

9. Игнатов В. И. Организация и проведение эксперимента в бурении / Игнатов В.И. — М.: Недра, 1978. — 94 с.

10. Смирнов Н. В. Курс вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. — М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1969. — 511 с.

Отримана 12.05.09

Ye. Kryzhanivsky, R. Yakym, L. Shmandrovsky, Yu. Petryna
The increase of three-cone rock bits bearing stability
 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
 Ivano-Frankivsk

At is fixed that the increase of rolling contact ball bearing carrying capacity allows to refuse the using of the plain bearing „abutment and trust button” ft least by 21 per cent. Stand tests of the experimental sections and rock bits in contrast to serial bearings showed the higher bearing stability to the clearance formation and the work smoothness. The better running of the plain bearing „arm flange thrust and thrust backface of cone” was also provided in the experimental bearing. Operation durability of the experimental lot of rock bits with ball bearing increased carrying capacity in contrast to serial ones demonstrated the drilling increase on the average by 1,7 times and the higher stability of the durability.