

УДК 621.923.1

**Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як,
П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ PDC-ДОЛІТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ

В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірне спрацювання різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.

В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірне спрацювання різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.

Ключові слова: долота PDC, різці м різцем., схема розміщення різців, експлуатаційні показники, спіральні моделі.

**Т.А. Пригоровская, П.И. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Питудей, Л.Я. Ропьяк,
П.М. Присяжнюк, М.И. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЕСПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ PDC-ДОЛІТ ДЛЯ ПОВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗАТЕЛІВ

В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірний знос різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.

Ключові слова: долота PDC, різці, схема розміщення різців, експлуатаційні показники, спіральні моделі.

**T.O. Pryhorovska, P.I. Voytenko, V.V. Vryukalo, L.D. Pitulej, L.Ya. Ropyak, P.M. Prysyzhnyuk,
M.Y. Burda, D.L. Lutsak, L.D. Lutsak**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

PDC DRILL BIT PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THEIR PERFORMANCE INDICATORS INCREASING

The problem of placing the reeds on the blades of a bit of type PDC is considered in the article. It is established that under traditional schemes of placement the uniform operation of the teeth, which are installed on different radius of the blades of a bit, is not provided. With the purpose of rational placement of rock-cutting elements on the shovels, the expediency of using the Vaugel parabolic spiral was substantiated. It is established that such a placement of cutters provides the same stability to trigger during the destruction of rock. Increasing the cutting path with the distance to the periphery of the bit, respectively, the load is offset by a decrease in the width of the zone of destruction of the rock with each cutter.

Key words: PDC bit, cutters, chip placement diagram, performance indicators, spiral models.

Постановка проблеми. Проблеми оптимізації процесу конструювання, виготовлення та експлуатації породоруйнівного інструменту увійшли в Національну програму забезпечення України паливно-енергетичними ресурсами "Нова енергетична стратегія України до 2035 року. Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" [1], згідно з якою планується збільшення національного газу і нафто видобутку, зокрема нетрадиційного газу та видобутку на шельфі.

Породоруйнівний інструмент є головним елементом бурового обладнання, оскільки безпосередньо здійснює руйнування гірської породи. Дослідники приділяють значну увагу коливанням бурильної колони [2], удосконаленню конструкцій доліт [3], кріпленню зубців [4],

© Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як,
П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак

експериментальним дослідженням стійкості різців [5], дослідженню схем розміщення різців за спіральними моделями [6].

Показники відпрацювань бурових доліт, в першу чергу, залежать від якості бурового інструменту та його технічних характеристик, що підтверджується світовим досвідом, де роботи, спрямовані на вдосконалення конструкцій інструменту не припиняються.

Найбільш поширеними при бурінні свердловин є долота типу PDC та шарошкові долота. У шарошкових долотах складно забезпечити захист підшипникових опор від проникнення промивної рідини з абразивними частинками зруйнованої породи. Ненадійна герметизація опор призводить до передчасного спрацювання контактних поверхонь підшипників, заклинювання шарошок і необхідності заміни такого долота з ще роботоздатними породоруйнівними елементами. Тому все ширшого застосування набувають долота типу PDC різально-сколюючої дії з вставними твердосплавними (алмазними) елементами, які є спадкоємцями лопатевих і коронкових доліт з природними алмазами, і не мають підшипникових опор.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різальна частина PDC-доліт характеризується профілем, кількістю і розміщенням різців. Для доліт вказаного типу, рекомендовано три типи різальної частини: плоска (або малий конус, де величина кута між твірною і площиною вибою на більше 20 градусів), обернено-конусна (або подвійний конус) та еліптичний конус. 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 при бурінні свердловин. Зокрема, різальна частина з видовженою конусною поверхнею (еліптична), забезпечує вищу стабільність роботи конструкції, а плоска форма використовується, при необхідності зміни напряму буріння стовбура свердловини [3].

Для вивчення сучасних тенденцій в конструюванні доліт PDC-типу було проаналізовано патенти, а також інформацію, представлену на сайтах провідних фірм-виробників породоруйнівних інструментів. Аналіз конструкції доліт показав:

1. Розробці конструкцій доліт та їх балансуванню приділяється значна увага. Наприклад, у Пат. США 8631883B2 від 21.01.2014 пропонується проектувати долота таким чином, щоби напрям і магнітуда сили реакції вибою для кожної лопаті долота були приблизно однаковими. Також, з метою стабілізації роботи інструменту, його озброюють різцями (або групами різців), встановленими з додатними, від'ємними та нульовими кутами для того, щоб об'єм породи, що зрізається кожною групою цих різців був однаковий (Пат. США 5314033 від 24.05.1994, Пат. США 5649604 від 22.07.1997, Пат. США 6443249B2 від 3.09.2002). В Пат. США 5732784 від 31.05.1998 пропонується оснащувати долота двома основними сполученими лопатями за аналогією до свердла, решта лопатей при цьому є значно менших розмірів. В Пат. США 6298930B1 від 9.10.2001 з метою уникнення дисбалансу запропоновано контролювати глибину різання і об'єм зруйнованої одним різцем породи. Шляхом розміщення центра мас долота специфічним чином автори Пат. США 6308790B1 від 30.10.2001 пропонують контролювати відхилення долота від вертикальної осі, і тим самим задавати траєкторію його руху. Теж саме пропонується і авторами Пат. США 6464024B2 від 15.10.2002 та Пат. США 6659207B2 від 9.12.2003 для біцентричних доліт.

2. Нерівномірне зношування різців доліт залишається актуальною проблемою. Конструктивними рішеннями його зменшення є такі. В Пат. США 8544568B2 від 1.10.2013 з метою зменшення шляху різання кожного різця, вводяться додаткові лопаті доліт меншого розміру з розміщеними на них зубцями. Автори Пат. США 560702 від 4.03.1997 та Пат. США 8181723B2 від 22.5.2012 пропонують оснащувати лопатеві долота різцями різних діаметрів, (почергово меншого і більшого), розміщеними на одній лопаті. В Пат. США 7703559B2 від 27.04.2010 та Пат. США 8011456B2 від 6.09.2011 пропонується конструкція різців, які обертаються навколо своїх осей з метою забезпечення рівномірного спрацювання їх алмазно-твердосплавних пластин.

3. З метою контролю об'єму гірської породи, зруйнованої одним різцем пропонується наступне. В конструкції долота передбачається наявність елементів, які призначені для "ламання" частинок породи, за аналогією до стружколамачів токарних різців (Пат. США 6.328.117 від 11.12.2001). Рекомендується використовувати ці долота для буріння пластичних порід. Для збільшення поверхні, на якій розміщені різці, лопаті долота виконують криволінійної форми із певним радіусом кривини (Пат. США 5443565 від 22.09.2000); цим забезпечується більша

поверхня контактування, збільшується зусилля різання шару породи, що зрізається за один оберт долота. Також пропонується оснащувати долота різцями більших розмірів, що розміщені на калібруючій поверхні долота – Пат. США 6349780В1 від 26.02.2002. Контрольована глибина різання конкретного різця забезпечується шляхом певної величини його «виступу», запропоновано в патентах США: 6460631В1 від 8.10.2002, 6779613В2 від 24.8.2004, 6935441В2 від 30.08.2005 та 8448726В2 від 28.05.13. Автори патентів США: 70969878В2 від 29.08.06, 7594554В2 від 29.09.09 та 7896106В2 від 1.03.11 пропонують також оснащувати основні різці додатковим рядом так званих «підтримуючих» різців меншого діаметру.

4. З метою кращого калібрування стінок свердловини, калібруючу частинудолотавиконують більшої довжини, що забезпечує збільшення кількості ріжучих елементів для калібрування (Пат. США 6.006.845 від 28.12.1999, Пат. США 5467836 від 21.11.1998, Пат. США 6253863В1 від 3.07.2001).

Результати проведеного аналізу конструкцій доліт свідчать, що дослідники основну увагу приділяють формі профілю долота. Однак, питання розміщення різців на лопатях долота для забезпечення їх рівномірного спрацювання, та однакової навантаженості різців, залишаються недостатньо вивченим, тобто не обґрунтовано за якими математичними залежностями їх доцільно розмішувати на лопатях долота.

Постановка завдань. При проектуванні PDC-доліт однією із проблем є розроблення конструкторських рішень, які б дозволили забезпечити рівномірне зношування всіх ріжучих елементів долота. Результати проведеного обстеження бурових доліт свідчать про їх нерівномірне спрацювання. На рис. 1 представлено фото зношеного долота, яке застосовували при бурінні свердловин в аргілітах і кам'яній солі (родовища Новоукраїнське, Чутове та Розпашна). Із фото видно, що найбільш зношеними є різці, що розміщені якнайдалі від осі долота. Тому проблема вибору схеми закономірності розміщення зубців на лопатях долота є актуальною.

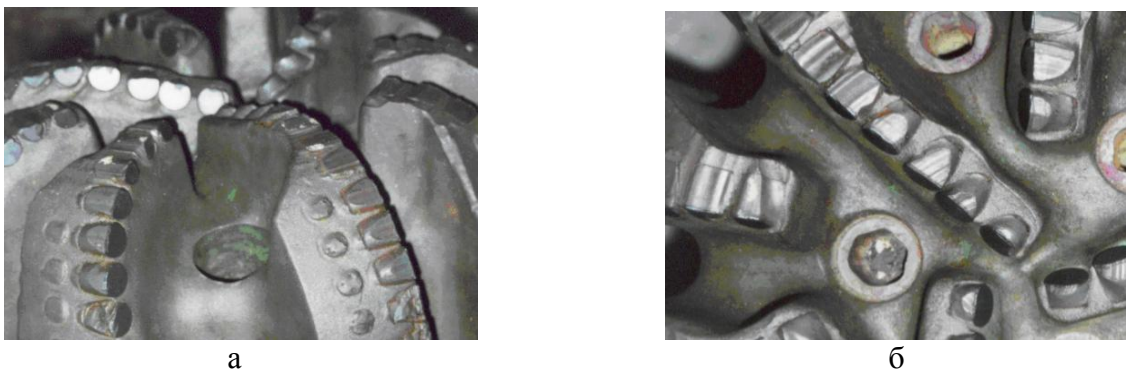


Рис. 1. Характер зношування різців долота 11 5/8 DS 66Н виробництва Reed-Hycalog: а – вигляд збоку; б – вигляд зверху

Мета роботи – удосконалення теоретичних підходів до конструкторсько-технологічного забезпечення виготовлення PDC-долота для підвищення експлуатаційних показників, а саме обґрунтування схеми розміщення різців на лопатях долота із умови забезпечення їх рівномірного спрацювання.

Викладення основного матеріалу. Традиційно для розміщення різців на лопатях долота використовують, переважно, послідовну схему їх розміщення (рис. 2) [3].

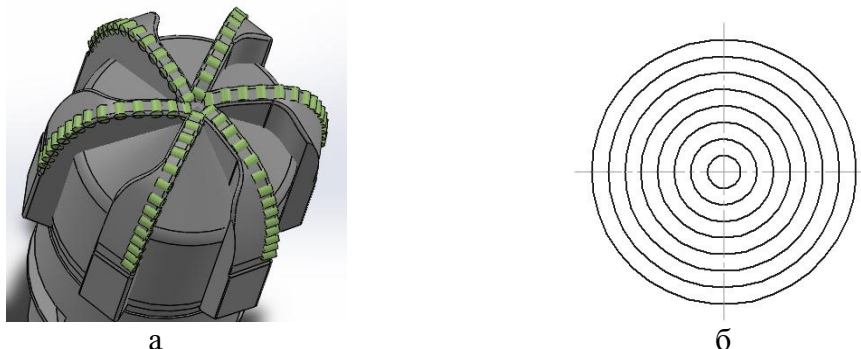


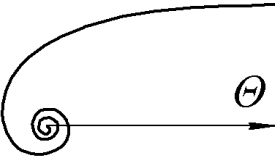
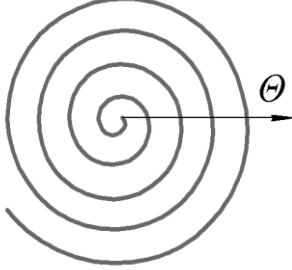
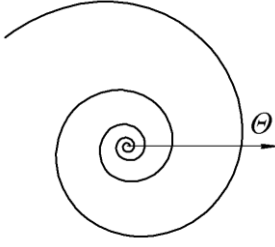
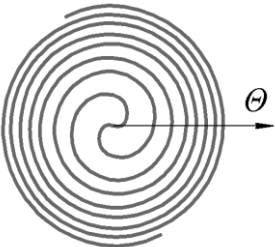
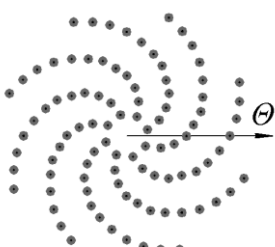
Рис. 2. Шестилопатеве долото із традиційною схемою розміщення різців (а) та уявні сліди переміщення різців при обертанні долота в свердловині (б)

Для забезпечення рівномірного спрацювання різців, доцільно розміщувати їх за криволінійними залежностями, при яких забезпечувалася різна величина віддалі між різцями, які встановлені на одній лопаті. Оскільки різальні вставні елементи найбільше спрацьовуються із віддаленням їх від осі обертання долота, то їх необхідно розташовувати таким чином, щоб крок між різцями зменшувався до периферії і не накладались їхні сліди для повного перекриття зон руйнування породи.

В таблиці 1 представлено рівняння і вид різних видів кривих, які використали для моделювання схеми розміщення різців на долоті.

Таблиця 1

Рівняння і види кривих у полярній системі координат, які використали для моделювання схеми розміщення різців

<p>1. Гіперболічна спіраль $r(\theta) = \frac{a}{\theta}$</p> 	<p>2. Архімедова спіраль $r(\theta) = a + b\theta$</p> 	<p>3. Логарифмічна спіраль $r(\theta) = ae^{b\theta}$</p> 
<p>4. Спіраль Ферма $r(\theta) = \pm a\sqrt{\theta}$</p> 	<p>5. Спіраль Вогеля $r = c \cdot \sqrt{n}$, $\theta = 137,5n$</p> 	<p>Позначення у формулах: θ – полярний кут, r – радіус-вектор, a, b, c – параметри, n – індекс простої квітки.</p>

Вивчивши і дослідивши особливості ряду математичних залежностей для спіралей (гіперболічна, Архімедова спіраль, логарифмічна спіраль, спіраль Ферма і спіраль Вогеля) встановили, що при проектуванні нових конструкцій бурових доліт типу РДС найдоцільніше використовувати логарифмічну спіраль, спіраль Вогеля або спіраль Ферма, оскільки таке розміщення різців забезпечує різну величину віддалі між різцями, які встановлені на одній лопаті. Крім цього спрощується програмування верстатів з числовим програмним керуванням для обробки отворів, які служать для встановлення різців на лопатях долота.

При використанні зазначених вище спіралей необхідно визначити коефіцієнти моделей, тобто коефіцієнти, що показують наскільки має бути зменшена віддаль між різцями, які встановлені на одній лопаті долота. Для визначення цього коефіцієнта моделювали рух долота у процесі поглиблення свердловини як черв'ячне зачеплення (рис. 3). При цьому одиничний різець буде переміщуватися по гвинтовій лінії під дією осьового навантаження та крутного моменту. В цьому випадку спостерігався наступний перерозподіл сил, що діють на різець: навантаження P_z , нормальна реакція поверхні $F_{нов}$, сила тертя $F_{тр} = f \cdot F_{нов}$, сила реакції породи R буде відхилена на кут тертя φ від сили $F_{нов}$.

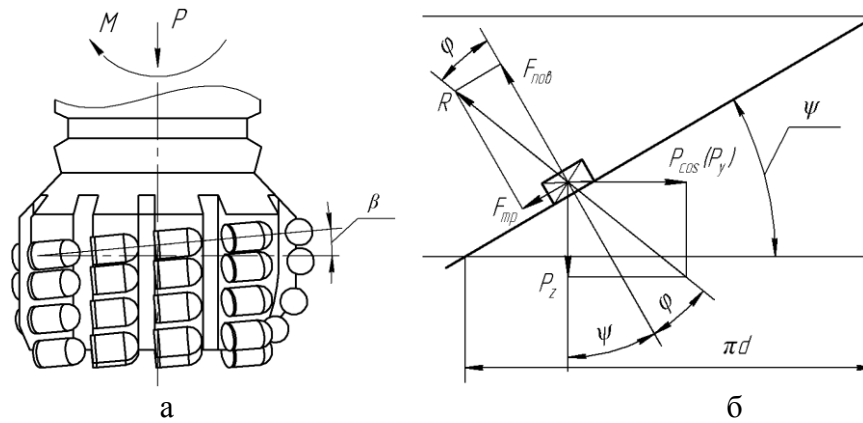


Рис. 3—Загальний вигляд долота (а) та схема визначенням кута β із умови самогальмування долота (б)

$P \cdot \cos(P_y) = P \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \beta)$, де кут β – кут підйому гвинтової лінії, тобто утворений розгорткою гвинтової лінії по середньому діаметру розташування різців на поверхні долота та площиною, перпендикулярною до осі цього долота.

Таким чином, кут $\psi = \beta$ визначається із умови самогальмування долота і буде становити $\beta > \operatorname{arctg}(f / P_y)$, де f – коефіцієнт тертя між гірською породою та ріжучою частиною різця.

Для визначення величини зменшення віддалі між різцями, які розміщені на одній лопаті, використали наступне співвідношення для спіралі Ферма:

$$\alpha = \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{R_i}{R_{i+1}}, \text{ де } R_i \text{ та } R_{i+1} - \text{радіуси встановлення } i\text{-го та } i+1 \text{ різців відповідно.}$$

Залежності, представлені в таблиці 1, доцільно використовувати при розробці системи автоматизованого проектування бурових доліт типу PDC з гвинтоподібними лопатями. Подібні конструкції доліт виготовляються ТЗОВ "Інтербур", м. Івано-Франківськ.

Розміщення твердосплавних різців на лопатях долота згідно запропонованої схеми забезпечує руйнування породи різанням та різанням-сколюванням по всій поверхні вибою, що запобігає утворенню міжзубцевих виступів у гірській породі.

Для ріжучої частини різців застосовують різноманітні матеріали. Сьогодні освоєно промисловий випуск АТП (УкрНІІМ), пластин Стратапакс, PDC (Дженерал Електрик) і пластин із синтетичних алмазів типу АВС, АСПК, Такмена та інших, не тільки у вигляді штабиків діаметром 4 мм і висотою 4 мм, але і пластин круглої циліндричної форми 13,5 мм з товщиною алмазного шару 0,8-2,0 мм і висотою 4-4,5 мм. Ефективність роботи різців з синтетичними полікристалічними алмазами підвищується не тільки за рахунок алмазного матеріалу з найкращим ударним і абразивним опором, але також і за рахунок кріплення алмазного шару до твердосплавних поверхні. Ребриста поверхня забезпечує механічне зачеплення між алмазної пластиною і карбідвольфрамовою підкладкою і являє собою велику площу поверхні для дифузії кобальту. Удосконалення конструкції АТП в частині ударної жорсткості внесли свій внесок в підвищення абразивного опору за рахунок зниження ледь виявленого мікросколювання алмазних пластин.

Для забезпечення ріжучої здатності бурових доліт також здійснюють локальне наплавлення робочих поверхонь, наприклад, з використанням карбідних матеріалів або безкарбідних матеріалів, які утворюються із суміші, що забезпечує протікання реакцій самопоширюючогося високотемпературного синтезу надтвердих тугоплавких сполук титану (TiB_2 та TiC), які формуються при електродуговому напавленні у вигляді дисперсних включень, які рівномірно розподіляються у сталевій матриці. Вміст надтвердих сполук становить близько 50% за об'ємом, що дозволяє забезпечити ефективну протидію зношуванню за умов динамічних навантажень [7].

Запропонована схема розміщення різців на долоті забезпечує однакове силове навантаження цих різців, і відповідно, сприяє рівномірному спрацюванню цих різців в процесі руйнування породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем долота та зниженням його навантаження.

Висновки. Показники відпрацювань бурових доліт, в першу чергу, залежать від якості їх виготовлення та технічних характеристик.

Розроблено математичну модель для оптимізації схеми розміщення породоруйнівних різців з метою повного перекриття ними зони руйнування гірської породи, забезпечивши їх рівномірне навантаження та уникнення накладання траєкторій руху різців долота.

При автоматизованому проектуванні різальної частини доліт типу PDC з метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях доцільно використовувати логарифмічну спіраль або спіраль Вогеля. Для доліт з криволінійними лопатями доцільно використовувати модель Вогеля.

Список використаних джерел

1. Энергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605 р. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>.
2. Левчук К. Г. Вплив механічних властивостей матеріалу на динаміку прихоплених бурильних труб [Текст] / К. Г. Левчук, В. М. Мойсишин, І. В. Цідило // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2016. – Т. 38. – № 12. – С. 1655-1668.
3. Кунцяк Я.В. Удосконалення конструкцій породоруйнівного інструменту, оснащених полікристалічними алмазними різцями / Я.В. Кунцяк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2012. – №1 (42). – С. 57-67.
4. Шуляр І. О. Розрахунки з'єднань із натягом у шарошках, оснащених композиційними зубцями зі сталевим хвостовиком / І. О. Шуляр, І. П. Шацький, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2013. – № 1. – С. 126-133.
5. Пригоровська Т.О. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate / [Т.О.Пригоровська, С.С.Чаплінський] // *Науковий вісник НГУ: геотехнічна і гірнична механіка, машинобудування*. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2014. – № 5. С. –184-189.
6. Войтенко П.І. Використання математичних моделей спіралей з логарифмічним кроком для раціонального розміщення вставних твердосплавних зубків на лопатях бурових доліт типу PDC / П.І. Войтенко, В.В. Врюкало // *Матеріали 22 Міжнародної конференції «Известия академической науки»*, 2017р, 22 - 30 марта 2017 г. Режим доступу: http://www.rusnauka.com/22_APSN_2017/Tecnic/3_197811.doc.htm.
7. Кустов В.В. Дослідження зносостійкості наплавлених зубків шарошкових доліт методом планування експерименту / В.В. Кустов, П.М.Присяжнюк, О.М. Богаченко // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. –2017. – № 2 (80).– С. 35-39.

Рецензент:

В.Г. Панчук, докт.техн.наук.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018