

УДК 622.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА КРИТЕРІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВСТАВНОГО ПОРОДОРУЙНІВНОГО ОСНАЩЕННЯ ТРИШАРОШКОВИХ БУРОВИХ ДОЛІТ ДЛЯ БУРІННЯ ОСОБЛИВО МІЦНИХ ПОРІД

**Р. С. ЯКИМ, А. М. СЛІПЧУК\***

*Кафедра технологічної та професійної освіти, Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, м. Дрогобич, УКРАЇНА*

*Кафедра технології машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА*

*\*e-mail: andsl@ukr.net*

**АНОТАЦІЯ** У роботі запропоновано один із напрямів вирішення задачі - комплексного підвищення якості долота. Проаналізовано найбільш поширені пошкодження, які викликають передчасний вихід з ладу породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт при бурінні особливо міцних гірських порід. Основна ідея цієї роботи полягає в розробці східчасто-логічної моделі. Така модель створюється на основі причин, що призводять до відмови тришарошкових бурових доліт з шарошками, які оснащені твердосплавними породоруйнівними вставними зубками. Встановлено, що відмова породоруйнівного оснащення долота є причиною логічної послідовності ймовірних подій, а критерієм відмови є мінімальні перерізи в моделі відмов. В даній статті показано ступенево-логічний аналіз, який дає можливість встановити характер взаємозв'язків між базовими факторами, які враховуються при прийнятті рішень. Дослідження проводилися на основі математичного планування експериментів в умовах реального виробництва бурових доліт. Показаний один із прикладів застосування модулів, що описують одну з можливих причин виходу з ладу вставного породоруйнівного оснащення долота. Аналізом встановлено, що у всіх випадках в моделях відмов елементів долота, базовими подіями виступають три основні фактори: вихідні властивості матеріалу і параметри конструкції, які задаються на стадії проектування і конструювання, а також технологічні фактори, які формуються на стадіях проектування і реалізації технологічних процесів виготовлення. Ступенево-логічний аналіз виходу з ладу тришарошкових доліт дозволяє показати взаємозв'язок між підконтрольними факторами і відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Запропонована схема визначення параметрів елементів технологічної системи, на якій можна встановити якісні показники вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт. Вибір оптимального варіанту параметрів здійснюється відповідно до критерію максимальної ефективності. Таким чином, застосування ступенево-логічних моделей дає можливість не тільки виявляти причини відмов породоруйнівного оснащення бурових доліт, а й приймати коректні і обґрунтовані рішення щодо забезпечення якості процесів на основних етапах життєвого циклу виготовлення доліт.

**Ключові слова:** ступенево-логічний аналіз; критерій відмови; зубок; шарошка; функціонально-орієнтована технологія; тришарошкове бурове долото; життєвий цикл

## ASSESSMENT OF RELIABILITY AND CRITERIA FOR IMPROVING THE QUALITY OF ROCK CUTTING EQUIPMENT OF TRICONE DRILLING BITS FOR WELL-BORING ESPECIALLY HARD ROCK

**R. JAKYM, A. SLIPCHUK**

*Department of Technological and Professional Education, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Drohobych, UKRAINE*

*Department of Mechanical Engineering, Lviv Polytechnic National University, L'viv, UKRAINE*

**ABSTRACT** One of the options for solving the problem - a comprehensive improvement in the quality of the bit was proposed. The most widespread damages that are caused by premature failure of the rock cutting equipment of tricone rock drilling bit when we have been process well-boring by especially hard rocks are analyzed. The main idea is to develop a step-logical model. Such model is created on the basis of reasons that bring to a failure of tricone drilling bit, which are rock cutting equipment. It is prescribed that the failure of rock cutting equipment is the reason of the logical sequence of the most probable events, and the criterion of failure is the minimum cross-section in the failure model. This article presents a stepwise logical analysis, which makes it possible to establish the nature of the relationship between the basic factors that are taken into account when making decisions. Researches were conducted on the basis of mathematical planning of experiments in the real production of drill bits. One example is shown of how modules can be used that describe one of the possible reasons for the failure of a rock cutting equipment's tricone drilling bit. The three main factors are the basic events. This is determined by the analysis that in all cases, in the failure models of the bit. These main factors are the initial material properties and design parameters set at the design and construction stage, as well as technological factors that are formed at the stages of design and implementation of manufacturing processes. A step-by-step analysis makes it possible to detect the relationship between under control factors and failures. A scheme is proposed for determining the

*parameters of technological system element, with the help of which it is possible to establish quality indicators of insert rock cutting equipment of tricone drilling bits. The choice of the optimal variant of parameters is carried out in accordance with the criterion of maximum efficiency. Thus, the application of step-logic models makes it possible not only to find out the reasons for the failure of rock cutting equipment for tricone drilling bit, but also to make correct and substantiated decisions for quality assurance of processes at the main stages of the lifecycle for manufacturing tricone drilling bit.*

**Keywords:** *step-logic analysis; failure criterion; inset cutter; roller cutter; function-oriented technology; tricone drilling bit; lifecycle*

## Вступ

Однією з найскладніших задач сучасного долотобудування є забезпечення нафтогазової та гірничої промисловості високоякісними тришарошковими буровими долотами для буріння особливо міцних порід. Такі бурові долота виготовляють з породоруйнівним оснащенням шарошок на основі вставних твердосплавних вставок. Особливості конструкції породоруйнівного оснащення та надзвичайно важкі умови експлуатації доліт висувають комплекс вимог, які досить важко задовольнити в умовах реального виробництва. Тому розробка надійних критеріїв щодо підходів у вдосконаленні технології виготовлення тришарошкових бурових доліт є актуальною проблемою та має важливе практичне значення для вітчизняного долотобудування [1-3].

Отримані експериментальні результати підтвердили ефективність розробленого комплексного підходу на основі системного забезпечення якості й економії матеріалів на основних етапах життєвого циклу доліт [4-6]. Для реалізації такого підходу було розроблено структуру єдиної інформаційної системи підтримки процесів створення доліт [7], що дало можливість об'єднати усі процеси, починаючи від проектування, підготовки виробництва і виготовлення доліт, а також системи комплексного підвищення якості доліт на довиробничому та виробничому етапах життєвого циклу тришарошкових бурових доліт. Це відкрило можливості для застосування функціонально-орієнтованої технології та забезпечувати заданий рівень якості усіх процесів виробництва доліт.

У долотобудуванні широко застосовується імітаційне моделювання на основі математичних моделей які запропоновано в [8]. Проте, застосування сучасних положень функціонально-орієнтованої технології та реалізації комп'ютерно-інтегрованих систем, CALS тощо, вимагає розробки та впровадження узагальнених моделей. Вони легко інтегруються в інформаційну систему управління процесами виробництва доліт [9-11].

Одним з перспективних шляхів вирішення окресленої проблеми є розробка ступенево-логічних моделей. Вони створюються на основі причин, які призводять до відмови тришарошкових бурових доліт з шарошками, які оснащені твердосплавним породоруйнівним вставним оснащенням [5,12,13]. Важливим моментом у цьому є формулювання критеріїв мінімізації мінімальних перерізів для вибору шляхів підвищення довговічності бурових

доліт. Тут залишається відкрите питання про формальне представлення критеріїв, а саме мінімального шляху та мінімального перерізу, яке частково розв'язано в [13]. Однак, тут не враховується елемент ризику. Це, як виявилось, спричинює низку проблем у коректності прийняття однозначних рішень, які складають кореневі події в деревах чи матрицях рішень при побудові процесів на основних етапах життєвого циклу бурових доліт.

## Мета роботи

Проаналізуємо характерні причини, що спричинили відмови породоруйнівного оснащення шарошkových доліт. Застосуємо ступенево-логічний аналіз, що дасть можливість встановити характер взаємозв'язків між базовими чинниками, які враховуються при прийнятті рішень. При цьому такий комплекс враховує якісні показники (металознавчі, фізико-механічні, конструкторсько-технологічні, експлуатаційні та економічні), які визначають параметри технічного стану елементів долота. Оцінкою є відмова.

## Основна частина

Дослідження проводились в умовах реального виробництва бурових доліт, за умов математичного планування експериментів, комплексним застосуванням експериментальних лабораторних та натурних випробовувань.

На етапі проектування бурових доліт використовується інформація про експлуатаційні показники. Така інформація отримана з даних напрацювання аналогічних конструкцій в реальних чи стендових умовах буріння [14,15]. Також із статистики відмов деталей доліт, через які долото втратило працездатність, можна оцінити ймовірність виникнення аналогічних ситуацій із запроєктованим долотом [16].

Після проведеного аналізу можна виділити декілька типових пошкоджень долота [13] через які породоруйнівне оснащення виходить з ладу (рис. 1). Характерні пошкодження долота, яке воно отримало у перші години роботи на вибої, веде до неприпустимих економічних збитків та ускладнень бурових робіт. Особливо небезпечними серед пошкоджень є втрата фрагментів шарошки, тіл кочення (рис. 1, а) чи цілої секції (рис. 1, б). Це веде до аварійних робіт і вимагає видалення з вибою фрагментів металу. Заклинювання опор є причиною зупинки обертання шарошок (рис. 1, в). При цьому прохід долота зупиняється, а шарошки

інтенсивно стираються об вибій. Не менш небезпечним є руйнування вставного породоруйнівного оснащення шарошок (рис. 1, г). При цьому прохід долота різко зменшується і швидкість буріння падає. Також небезпеку становить твердий сплав, який накопичується на вибої.

Якісна оцінка тришарошкових доліт, як і будь-якого складного і відповідального виробу, здійснюється через призму комплексної множини параметрів якості з оцінки характеристик процесів на усіх етапах створення доліт. Оскільки всі елементи долота працюють у вкрай важких умовах, то якість долота повинна гарантувати задану безвідмовність роботи. Тому в долотобудуванні прийнято, що якість окремих елементів конструкції деталей долота визначає якісні показники цілого долота. При цьому в структурі конструкції елементів опори та поророруйнівного оснащення застосовується принцип резервування, що дає можливість розвантажити найбільш навантажені та відповідальні елементи.

Загалом, аналізом пошкоджень елементів тришарошкових бурових доліт призначених для буріння особливо міцних гірських порід виявлено, що проблема підвищення надійності вставного породоруйнівного оснащення вимагає комплексного розв'язання низки задач з підвищення довговічності усіх деталей і вузлів. А саме, тіла шарошки та лапи, опорних вузлів, твердосплавних вставок тощо.

Відомо, що одним з основних параметрів у встановленні довговічності породоруйнівного оснащення тришарошкового бурового долота є питання формулювання поняття відмови. При цьому, суттєвим є виявлення тих елементів і вузлів, відмова яких спричинює повну чи часткову втрату працездатності долота із заданою ймовірністю чи ризиком. Для цього необхідно встановити причини відмов та взаємозв'язок між найбільш імовірною причиною відмови та імовірним наслідком, що спричинив вихід із ладу елемента долота.

Імовірність виникнення відмови і-того елемента долота представимо імовірністю технічного стану елемента системи [12].

$$p_i = P[X_i = 1] = EX_i \quad (1)$$

де  $X_i$  – двійкова випадкова величина, що приймає значення 1 і 0 та означає однозначність технічного стану і-того елемента долота.

Тоді для системи елементів долота можна ввести структурну функцію  $\varphi(x)$ , яка є двійковою випадковою величиною із розподілом імовірності, що визначається сумісним розподілом ймовірностей величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ :

$$p_s = P[\varphi(X) = 1] = E\varphi(X) \quad (2)$$



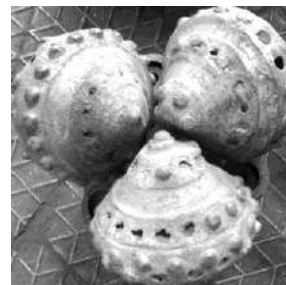
а



б



в



г

- а – розколювання тіла шарошки,  
б – відламування цапфи лапи,  
в – заклинювання опор і зупинення обертання шарошок,  
г – розколювання, зношування, випадання вставного породоруйнівного оснащення шарошок

Рис. 1 – Найбільш поширені пошкодження, які спричинюють передчасний вихід з ладу породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт, призначених для буріння особливо міцних гірських порід

Оскільки базові події, що спричинюють конкретний стан елемента системи, є незалежними, сумісний розподіл ймовірностей величин

$X_1, X_2, \dots, X_n$  визначитися значеннями  $P_1, P_2, \dots$ , тоді функція надійності долота як системи, в якій стаються визначені події, буде мати вигляд

$$P_s = P_s(p), \tag{3}$$

при цьому

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n). \tag{4}$$

Формально деталі і елементи долота можуть знаходитись у двох станах: подія (відмова) яка відбулася, чи відсутність події (відмови) [12]:

$$P_s(0) = E[\varphi(X) | p_1 = 0, \dots, p_n = 0] = \varphi(0) = 0, \\ P_s(1) = E[\varphi(X) | p_1 = 1, \dots, p_n = 1] = \varphi(1) = 1. \tag{5}$$

Тоді можна описати аналіз відмов, які реалізуються в умовах експлуатації, за допомогою ступеневих логіко-імітаційних моделей. Побудова дерев відмов і їх аналіз дає можливість виявити імовірні шляхи, які ведуть до відмови долота.

Маючи за основу викладки подані в [17], побудовано низку структурно-логічних модулів які входять в цільну модель, що описує взаємозв'язок між базовими, початковими чинниками, що контролюються та відмовою бурових тришарошкових доліт з твердосплавним вставним оснащенням, відкритою опорою Р-К-Р осьовими підшипниками ковзання [12].

Встановлено [12,13], що для виникнення послідовності відмов у єдиній моделі структури відмови долота кореневими чинниками є:

- якісні показники та відповідність чинним вимогам фізико-механічних, технологічних експлуатаційних показників матеріалів деталей долота;

- якісні показники та відповідність необхідних вимог параметрів конструкції елементів долота;

- якісні показники та відповідність чинним вимогам параметрів технологічних процесів виготовлення деталей та елементів долота.

Відтак, відмова породоруйнівного оснащення долота є причиною логічної послідовності найімовірніших подій, а критерієм відмови є мінімальні перерізи в моделі відмов. Ці мінімальні перерізи є мінімальною множиною варіантів послідовностей логічних подій, що ведуть до кінцевого результату – відмови породоруйнівного оснащення тришарошкового бурового долота.

### Обробка результатів дослідження

Наприклад, розглянемо представлений на рис. 2 один з розроблених модулів, що описує одну з

імовірних причин виходу з ладу вставного породоруйнівного оснащення долота. В колах вписано базові підконтрольні фактори, в прямокутниках – проміжні логічні стани. В ромбах представлено базові стани, які для зручності та компактності описуються окремими модулями. У окремих випадках базові стани в ромбах можуть виступати окремими причинами відмови долота, наприклад: розколювання тіла шарошки та утворення недопустимих люфтів в опорі.

Базовими подіями чи факторами є [12, 13]: властивості матеріалів оснащення та конструкційні параметри, які вибираються при проектуванні, конструюванні, а також множина технологічних факторів, які слугують базою для проектування технологічних процесів, підготовки виробництва й виготовлення.

Визначити ймовірності (P) цих подій (A) можна з формули:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x}{n}, \tag{6}$$

де  $x$  – число випадків виникнення подій A, що відбулися з числа  $n$ , повторених дослідів.

На рис. 2 прямокутниками позначено проміжні найімовірніші логічні стани. Для зручності та компактності побудов модулів, а також для застосування тиражування логічних станів ромбами обведено базові стани, для яких існують окремі модулі. Інколи базові стани позначені ромбами можуть рахуватися як окремі причини відмови породоруйнівного оснащення долота, наприклад, як розколювання тіла шарошки чи люфти в опорі.

Для кожного стану долота, як системи  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , можна виділити дві підмножини:

$$A = \{i : x_i = 1\}, \\ B = \{i : x_i = 0\}. \tag{7}$$

Якщо  $f(x)=1$  і  $f(y)=0$  для довільного  $y \leq x$ , але не тотожнорівного  $x$ , то A є мінімальний шлях у дереві відмов тришарошкового бурового долота.

Якщо  $f(x)=0$  і  $f(y)=1$  для довільного  $y \geq x$ , але не тотожнорівного  $x$ , то B є мінімальний переріз у дереві відмов тришарошкового бурового долота.

Мінімальний шлях є мінімально можлива множина елементів, які забезпечують нормальне функціонування породоруйнівного оснащення долота.

Мінімальний переріз – це мінімальна множина елементів тришарошкового бурового долота, відмова яких веде до відмови породоруйнівного оснащення долота.

Розмір мінімального шляху (мінімального перерізу) визначається числом елементів, які належать цьому шляху (перерізу) у дереві відмов. З

кожним мінімальним шляхом  $A_j$  (де  $j=1, 2, \dots, \kappa$ ), можна зв'язати двійкову функцію

$$\delta_j(x) = \prod_{i \in A_j} x_i$$

Ця функція приймає значення 1, якщо всі елементи в мініальному шляху нормально функціонують, і 0 коли навпаки. Відтак функція  $\delta_j$

описує структуру системи у якій всі елементи, які належать  $j$ -му мініальному шляху, з'єднані послідовно. Аналогічним чином, для кожного мінімального перерізу  $B_\varepsilon$  (де  $\varepsilon=1, 2, \dots, \lambda$ ), можна взяти двійкову функцію

$$\theta_\varepsilon(x) = 1 - \prod_{i \in B_\varepsilon} (1 - x_i)$$

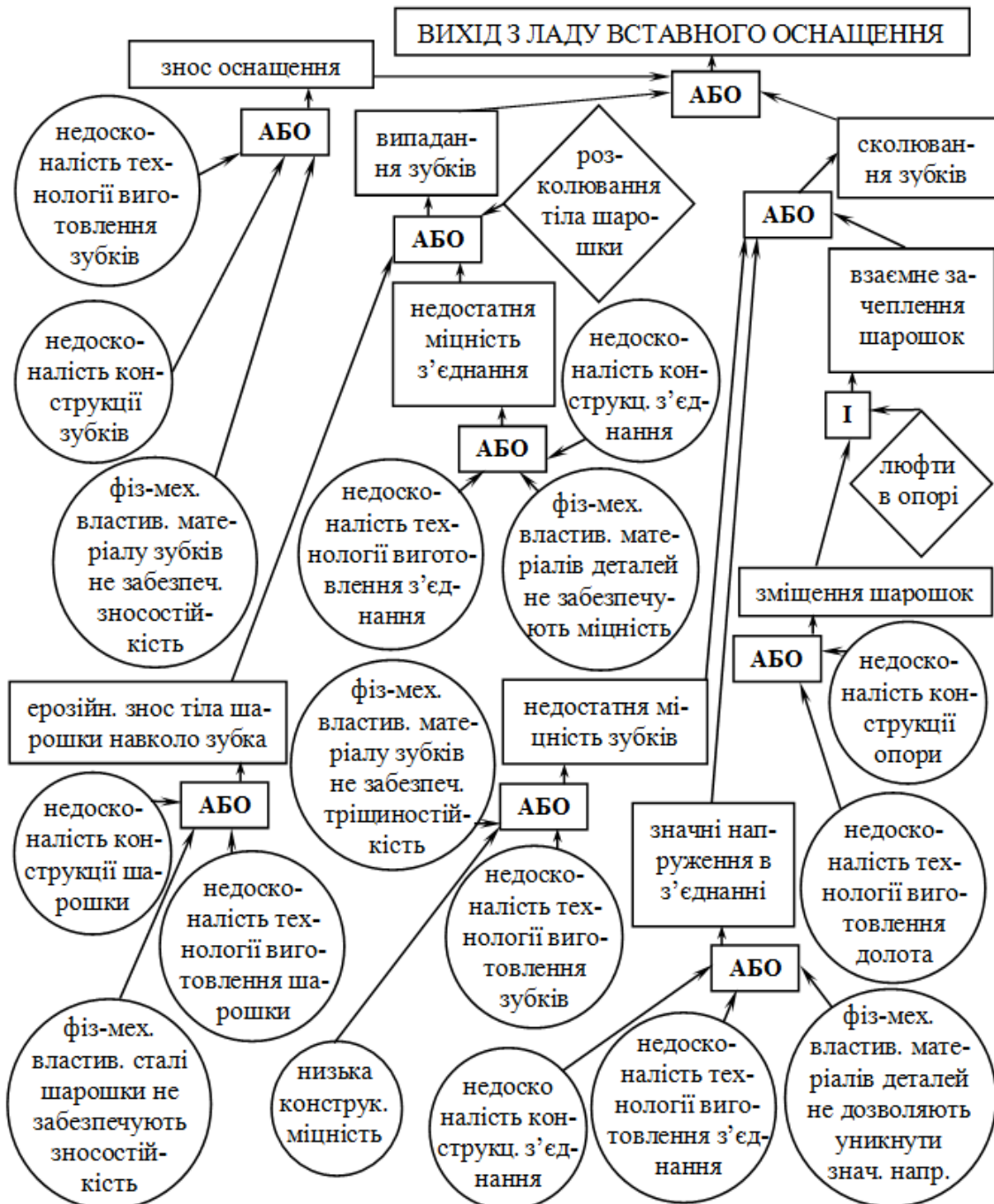


Рис.2 – Ступенево-логічний модуль виходу з ладу вставного твердосплавного оснащення на шарошці бурового долота

Дана функція приймає значення 0, якщо всі елементи в мінімальному шляху несправні і 1 коли навпаки. Тобто, функція  $\theta_\varepsilon$  описує структуру системи у якій всі елементи, які належать  $\varepsilon$ -му мінімальному перерізу, з'єднані паралельно.

Мінімальні (небезпечні) перерізи у деревах відмов породоруйнівного оснащення доліт є тільки такі, які є ланцюгами послідовності найбільш імовірних відмов. Наприклад, у розглядуваному випадку, що ілюструється на рис. 2, можуть бути такі варіанти послідовностей подій:

1) недосконалість технології виготовлення шарошки  $\rightarrow$  ерозійний знос тіла шарошки навколо зубка  $\rightarrow$  випадання зубків;

2) недосконалість технології виготовлення з'єднання «зубок-шарошка»  $\rightarrow$  недостатня міцність з'єднання «зубок-шарошка»  $\rightarrow$  випадання зубків;

3) розколювання тіла шарошки  $\rightarrow$  випадання зубків.

Генерація таких варіантів логічних послідовностей дає усесторонній аналіз причин відмов та дає можливість розробити шляхи та способи попередження, усунення чи суттєвого відтермінування в часі.

Небезпечний переріз дерева відмов може мати два кроки в дереві відмов і більше. Однак аналіз починається з тих послідовностей, які мають найменшу кількість кроків.

Зауважимо, що спочатку аналізують ті послідовності подій, де зафіксовані найвищі значення імовірності відмов.

Аналізом встановлено, що у всіх випадках в моделях відмов елементів долота базовими подіями виступають три основні чинники [12,13]: вихідні властивості матеріалу та параметри конструкції, що задаються на стадії проектування та конструювання, а також технологічні фактори, які формуються на стадіях проектування і реалізації технологічних процесів виготовлення.

Отже, ступенево-логічний аналіз виходу з ладу шарошкових доліт дає можливість виявити взаємозв'язок між підконтрольними чинниками та відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Використовуючи критерій мінімізації мінімальних перерізів, можна формулювати відповідні вимоги до якості всіх засобів і заходів на всіх етапах створення бурових доліт, що сприяє підвищенню їх надійності.

Вибір оптимального варіанта параметрів здійснюється відповідно до критерію максимальної ефективності. При цьому рішення щодо тих чи тих параметрів не може бути однозначним, оскільки максимальний результат може досягатися багатократно за різних обставин. Тоді вибирають одне з декількох приблизно однаково виграних рішень. В іншому випадку, з альтернативного вибирається те, що можна реалізувати за мінімальних затрат. Наприклад, коли довговічність породоруйнівного оснащення спрогнозувати

неможливо, а відомі навантаження на його елементи. Необхідно вирішити, які параметри необхідно призначити при вирішенні конструкторсько-технологічних задач з виготовлення з'єднання «зубок-шарошка».

Одними з варіантів вирішення такої проблеми може бути:

$E_1$  – вибір розмірів, що забезпечили б максимальну надійність, тобто виготовлення з'єднання з мінімальними затратами за умов, що матеріали зубка і шарошки будуть забезпечувати свої фізико-механічні та експлуатаційні показники протягом заданого часу;

$E_m$  – вибір розмірів за умов мінімальної надійності з'єднання;

$E_i$  – проміжне рішення;

Для прийняття рішення необхідні умови, яких необхідно дотримуватися:

$F_1$  – умови, що забезпечують максимальну надійність;

$F_n$  – умови, що забезпечують мінімальну надійність;

$F_j$  – проміжні рішення.

Під результатом рішення  $e_{ij}$  можна вважати таку оцінку, яка відповідає варіанту  $E_i$  і умовам  $F_j$  та характеризує ефективність, надійність з'єднання «зубок-шарошка». Отримані у ході аналізу математичні сімейства рішень складають у вигляді матриць.

Оцінюючи варіанти, необхідно вибрати рішення з найкращим результатом, але приймати до уваги всі оцінки  $e_{ij}$ , що відповідають варіанту  $E_i$ . Відтак задача щодо максимізації  $\max_i e_i$  згідно критерію

$$E_0 = \left\{ E_{i_0} \mid E_{i_0} \in E \wedge e_{i_0} = \max_i e_i \right\}$$

де  $E_0$  – множина оптимальних варіантів рішення,

$E_{i_0}$  – варіанти рішення, у яких оцінка є максимальна,

$E$  – множина усіх варіантів рішення,

$e_{i_0}$  – максимальні оцінки варіантів рішень,

$e_i$  – оцінки варіантів рішень.

має бути замінена такою, яка має якнайкраще враховувати всі наслідки будь-якого з варіантів рішення  $E_i$ . При цьому слід орієнтуватися на найбільш сприятливий випадок з числа альтернативних варіантів. Після цього вибирається найкращий варіант, тобто очікується найкращий результат у найгіршому випадку.

## Висновки

Досліджено характер пошкодження та основні причини низької довговічності породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт призначених для розбурювання особливо міцних гірських порід. Запропоновано схему виявлення параметрів елементів технологічної системи, які визначають якісні показники вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт. Застосовуючи ступенево-логічний аналіз для виявлення причин відмов долота досліджено характер взаємозв'язків між кореневими чинниками (як подіями, що формуються на етапах проектування доліт та технології їхнього виготовлення) та відмовами з позиції параметрів технічного стану елементів долота. Застосування ступенево-логічних моделей дає можливість не тільки виявляти причини відмов породоруйнівного оснащення бурових доліт, а й приймати коректні й обґрунтовані рішення щодо забезпечення якості процесів на основних етапах життєвого циклу виготовлення доліт. Формалізація критеріїв визначення умов мінімальних шляхів та мінімальних перерізів для ступенево-логічних моделей відмов породоруйнівного оснащення доліт дає можливість застосовувати інтегровані інформаційні технології в управлінні процесами виробництва.

Надалі перспективним є розробка комплексного підходу у оцінці технологічних операцій виготовлення породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт для реалізації функціонально-орієнтованих інтегрованих технологій виробництва доліт.

## Список літератури

1. **Deng, Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters / **Y. Deng, M. Chen, Y. Jin, Y. Zhang, D. Zou, Y. Lu** // *Journal of natural gas science and engineering*. – 2016. – Vol. 36. – P. 117-123. – doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.019.
2. **Schroder, J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life / **J. Schroder, M. Di Pasquale, A. Richards, J. Yorty** // *Oil & gas journal*. – 2016. – Vol. 114. – № 6. – P. 50-55.
3. **Naganawa, S.** Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration / **S. Naganawa** // *Journal of petroleum science and engineering*. – 2012. – Vol. 82. – P. 140-150. – doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014.
4. **Schroder, J.** Extending Bit Life Through Bearing Innovations / **J. Schroder, A. AlDarwaish, J. W. Richards, M. Di Pasquale, M. Mohamed, J. Yorty** // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. – London, England, UK. Publisher Society of Petroleum Engineers. – 2015. – doi: 10.2118/173031-MS.
5. **Zhiqiang, H.** Optimization of cone bit bearing seal based on failure analysis / **H. Zhiqiang, Li Gang** // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, issue 3. – doi: 10.1177/1687814018767485.
6. **Huang, Z.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on

- the failure analysis / **Z. Huang, Q. Z. Li, S. Jing, Y. Ma, W. Hu, Y. Fan** // *Engineering failure analysis*. – 2013. – Vol. 29. – P. 12-26. – doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.018.
7. **Portwood, G.** Development of Improved Performance Roller Cone Bits for Middle Eastern Carbonate Drilling Applications / **G. Portwood, B. Boktor, R. Munger et al.** // *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference*. – Bahrain. – 2001. – SPE-72298-MS. – doi: 10.2118/72298-MS.
  8. **Неупокоев, В. Г.** Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / **В. Г. Неупокоев** – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с.
  9. **Chen, S. L.** A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit / **S. L. Chen, J. Dahlem, C. Rayburn** // *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – Jakarta, Indonesia. – 2003. – 80493-MS.
  10. **Bybee, K.** Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit / **K. Bybee** // *Journal of Petroleum Technology*. – 2003. – № 12. – P. 49-50. – doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
  11. **Zhou, R. S.** A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue / **R. S. Zhou, H. Nixon** // *SAE Technical Transactions Journal*. – 1992. – Vol. 101, № 2. – 921720.
  12. **Крижанівський, Є. І.** Теоретичні основи обґрунтованого вибору критеріїв відмов і шляхів підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт / **Є. І. Крижанівський, Р. С. Яким, Л. Є. Шмандровський, Ю. Д. Петрина** // *Вісник Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Машинобудування*. – К.: КТУУ „КПІ”. – 2009. – Вип. 56. – С. 6 – 13.
  13. **Яким, Р. С.** Оцінка надійності та критерії підвищення якості тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід / **Р. С. Яким** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2014. – № 4 (53). – С. 43 – 51.
  14. **Sonowal, K.** How Continuous Improvement Lead to the Longest Horizontal Well in the World / **K. Sonowal** // *2009 SPE/IADC Drilling Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands*. – 2009. – SPE-119506-MS. – doi: 10.2118/119506-MS.
  15. **Сліпчук, А. М.** Покращення якості технології процесу запресовування зубків у шарошки бурових доліт / **А. М. Сліпчук, Р. С. Яким** // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2017. – Вип. 1 (27). – 186 с. – С. 134-143. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.15.
  16. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit. US. Patent Application US 13/287,792, filed November 2, 2011.
  17. **Бегун, В. В.** Вероятностный анализ безопасности атомных станций / **В. В. Бегун, О. В. Горбунов, И. Н. Каденко [и др.]**. – К.: НТУУ КПІ „Віпол” 2000. – 568 с.

## References (transliterated)

1. **Deng, Y., Chen, M., Jin, Y., Zhang, Y., Zou, D., Lu, Y.** Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters. *Journal of natural gas science and engineering*, 2016, **36**, 117-123, doi: 10.1016/j.jngse.2016.10.019.

2. **Schroder, J., Di Pasquale, M., Richards, A., Yorty, J.** Bearing innovations extend roller-cone bit life. *Oil & gas journal*, 2016, **114**, 6, 50-55.
3. **Naganawa, S.** Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of petroleum science and engineering*, 2012, **82**, 140-150, doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.014.
4. **Schroder, J., AlDarwaish, A., Richards, J. W., Di Pasquale, M., Mohamed, M., Yorty, J.** Extending Bit Life Through Bearing Innovations. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2015, London, England, UK. Publisher Society of Petroleum Engineers, doi: 10.2118/173031-MS.
5. **Zhiqiang, H., Gang, Li.** Optimization of cone bit bearing seal based on failure analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, **10**, 3, doi: 10.1177/1687814018767485.
6. **Huang, Z., Li, Q. Z., Jing, S., Ma, Y., Hu, W., Fan, Y.** Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering failure analysis*, 2013, **29**, 12-26, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.08.018.
7. **Portwood, G., Boktor, B., Munger, R. et al.** Development of Improved Performance Roller Cone Bits for Middle Eastern Carbonate Drilling Applications. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference*, Bahrain, 2001, SPE-72298-MS, doi: 10.2118/72298-MS.
8. **Neupokoev, V. G.** Voprosi teorii i praktiki proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii burovyyih sharoshechnykh dolot. Samara: Izdatelstvo Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 2000, 376.
9. **Chen, S. L., Dahlem, J., Rayburn, C.** A Study of Drilling Performance of Energy Balanced Roller Cone Bit. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 2003, Jakarta, Indonesia, 80493-MS.
10. **Bybee, K.** Drilling Performance of an Energy-Balanced Roller-Cone Bit. *Journal of Petroleum Technology*, 2003, **12**, 49-50, doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
11. **Zhou, R. S., Nixon, H.** A Contact Stress Model for Predicting Rolling Contact Fatigue. *SAE Technical Paper 921720 in SEA Transactions Journal*, 1992, **101**, 2, doi: 10.2118/1203-0049-JPT.
12. **Kryzhanivsky, Ye. I., Yakom, R. S., Shmandrovsky, L. E., Petrin, Yu D.** Teoretychni osnovy obgruntovanoho vyboru kryteriiv vidmov i shlyakhiv pidvyshchennya dovhovichnosti trysharoshkovykh burovyykh dolit [Theoretical bases of the reasoned choice of criteria of failures and ways of increasing the durability of tricone drill bits]. *Bulletin of the National Technical University „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. Publ. – K.: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2009, **56**, 6 – 13.
13. **Yakim, R. S.** Otsinka nadiynosti ta kryteriiv pidvyshchennya yakosti trysharoshkovykh burovyykh dolit dlya burinnya osoblyvo mitsnykh porid [Estimation of the criteria and criteria for the development of drilled bits for the borer, especially hard rock]. *Exploration and development of oil and gas fields*, 2014, **4** (53), 43 – 51.
14. **Sonowal, K.** How Continuous Improvement Lead to the Longest Horizontal Well in the World. *Paper SPE 119506 presented at the 2009 SPE/IADC Drilling Conference & Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, 2009, doi: 10.2118/119506-MS.
15. **Yashkym, R. Slipchuk, A.** Refinement technology pressing of tungsten carbide inset cutter in roller cone bit. *Bulletin of NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies.*– Kharkiv: NTU KhPI, 2017, 7(1229), 110–117, doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.15.
16. **Schroder, J.** Cone Retention and Tapered Bearing Preload System for Roller Cone Bit. US. Patent Application US 13/287,792, filed November 2, 2011.
17. **Begun, V. V., Gorbunov, O. V., Kadenko, I. N. et al.** Veroyatnostnyy analiz bezopasnosti atomnykh stantsiy [Probabilistic analysis of the safety of nuclear power plants] – *National Technical University „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. K., Publ. „Vipol”, 2000, 568.

#### Відомості про авторів (About the Authors)

**Яким Роман Степанович** – док. техн. наук, проф. Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І.Франка, проф. Кафедра технологічної та професійної освіти, м. Дрогобич, Україна, e-mail: Jakym.r@online.ua.

**Roman Yashkym** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Professor of Department of Technological and Professional Education. c. Drohobych, Ukraine, e-mail: Jakym.r@online.ua.

**Сліпчук Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, Національний університет «Львівська політехніка», доц. кафедри технології машинобудування м. Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-6104>, тел.: , e-mail: andsl@ukr.net.

**Andrey Slipchuk** - Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University Docent of the Department of Technology of Mechanical Engineering, c. Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0584-6104>, e-mail: andsl@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Яким, Р. С.** Оцінка надійності та критерії підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід / **Р. С. Яким, А. М. Сліпчук** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 77-85. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.10

*Please cite this article as:*

**Яким, Р., Slipchuk, A.** Assessment of reliability and criteria for improving the quality of rock cutting equipment of tricone drilling bits for well-boring especially hard rock. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 77-85, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10.



*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Якым, Р. С.** Оценка надежности и критерий повышения качества вставного породоразрушающего оснащение трёхшарошечных буровых долот для бурения особо крепких пород / **Р. С. Якым, А. М. Слипчук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 77-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.10.

**АННОТАЦИЯ** Предложено одно из направлений решения задачи - комплексного повышения качества долота. Проанализированы наиболее распространенные повреждения, которые вызывают преждевременный выход из строя породоразрушающего оснащение трёхшарошечных буровых долот при бурении особо прочных горных пород. Основная идея этой работы заключается в разработке ступенчато-логической модели. Такая модель создается на основе причин, приводящих к отказу трёхшарошечных буровых долот с шарошками, которые оснащены твердосплавными породоразрушающими вставными зубками. Установлено, что отказ породоразрушающего оснащение долота является причиной логической последовательности вероятных событий, а критерием отказа является минимальные сечения в модели отказов. В данной статье показано ступенчато-логический анализ, который дает возможность установить характер взаимосвязей между базовыми факторами, которые учитываются при принятии решений. Исследования проводились на основе математического планирования экспериментов в условиях реального производства буровых долот. Показан один из примеров применения модулей, описывающих одну из возможных причин выхода из строя вставного породоразрушающего оснащение долота. Анализом установлено, что во всех случаях в моделях отказов элементов долота базовыми событиями выступают три основных фактора: исходные свойства материала и параметры конструкции, которые задаются на стадии проектирования и конструирования, а также технологические факторы, которые формируются на стадиях проектирования и реализации технологических процессов изготовления. Ступенчато-логический анализ выхода из строя шарошечных долот позволяет показать взаимосвязь между подконтрольными факторами и отказами с позиции параметров технического состояния элементов долота. Предложенная схема определения параметров элементов технологической системы, на которой можно установить качественные показатели вставного породоразрушающего оснащение тришарошечных буровых долот. Выбор оптимального варианта параметров осуществляется в соответствии с критерием максимальной эффективности. Таким образом, применение ступенчато-логических моделей дает возможность не только выявлять причины отказов породоразрушающего оснащение буровых долот, но и принимать корректные и обоснованные решения по обеспечению качества процессов на основных этапах жизненного цикла изготовления долот.

**Ключевые слова:** ступенчато-логический анализ; критерий отказа; зубок; шарошка; функционально-ориентированная технология; трёхшарошечное буровое долото; жизненный цикл

Надійшла (received) 18.02.2019