

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ АРМОВАНИХ ЗУБКІВ ШАРОШОК БУРОВИХ ДОЛІТ

І. О. Шуляр*, В. В. Кустов, Л. О. Борушак, А. Б. Вірстюк

ІФНТУНГ; 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 066 6083852;
e-mail: ira.shuliar@gmail.com

Зростання об'ємів бурових робіт на нафту і газ тісно пов'язане з використанням високопродуктивних надійних і довговічних шарошочкових бурових доліт, оснащених суцільними або вставними, армованими зносостійкими матеріалами зубками. Вирішальним фактором, що впливає на техніко-економічну ефективність процесу розбурювання гірських порід із залягаючими нафтовими і газовими покладами, є зносостійкість породоруйнівних елементів доліт, виконаних у вигляді зубків вставних та виготовлених у корпусі шарошки. В даній роботі за результатами конструкції бурових доліт і технологій їх виготовлення обрано для дослідження шарошки, оснащені вставними зубками, сформованими методом відцентрового армування твердими сплавами із обертанням навколо двох взаємоперпендикулярних осей, з метою оцінки впливу технологічних параметрів процесу виготовлення на величину зношування зубків під час буріння. Дослідження проведено на розробленому стенді. За результатами дослідів отримано математичну модель, що описує вплив технологічних факторів на параметр оптимізації – величину зносу зубків. Як фактори, що впливають на ефективність застосування армованих зубків, було прийнято: X_1 - температуру заливки сталі, $^{\circ}\text{C}$; X_2 - кількість введеного твердого сплаву, г; X_3 - частоту обертання ливарної форми навколо вертикальної осі, хв^{-1} ; X_4 - частоту обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі, хв^{-1} . Встановлено їх основний рівень та межі варіювання – верхню та нижню. В роботі використовувався повний факторний експеримент 2^4 . Було складено план експерименту. У відповідності із обраним планом було виконано 16 активних експериментів, причому кожний дослід повторювався тричі. Далі проведено побудову математичної моделі і рівняння регресії, що її описує. Встановлено ступінь впливу факторів процесу на величину абразивного зносу зубків та оптимальні їх значення.

Ключові слова: відцентрове армування, стійкість, знос, зубок, математична модель, технологічні фактори.

Рост объемов буровых работ на нефть и газ тесно связан с использованием высокопроизводительных надежных и долговечных шарошечных буровых долот, оснащенных сплошными или вставными, армированными износостойкими материалами зубками. Решающим фактором, влияющим на технико-экономическую эффективность процесса разбуривания горных пород с нефтяными и газовыми залежами, является износостойкость породоразрушающих элементов долот, выполненных в виде зубков вставных и изготовленных в корпусе шарошки. В данной работе по результатам конструкции буровых долот и технологий их изготовления выбраны для исследования шарошки, оснащенные вставными зубками, сформированными методом центробежного армирования твердыми сплавами с вращением вокруг двух взаимноперпендикулярных осей, с целью оценки влияния технологических параметров процесса изготовления на величину износа зубков в процессе бурения. Исследование проведено на разработанном стенде. По результатам опытов получена математическая модель, описывающая влияние технологических факторов на параметр оптимизации - величину износа зубков. В качестве факторов, влияющих на эффективность применения армированных зубков были приняты: X_1 - температура заливки стали, $^{\circ}\text{C}$; X_2 - количество введенного твердого сплава, г; X_3 - частота вращения литейной формы вокруг вертикальной оси, мин^{-1} ; X_4 - частота вращения литейной формы вокруг горизонтальной оси, мин^{-1} . Установлен их основной уровень и пределы варьирования – верхний и нижний. В работе использовался полный факторный эксперимент 2^4 . Был составлен план эксперимента. В соответствии с выбранным планом было выполнено 16 активных экспериментов с трехкратным повторением опытов. Далее проведено построение математической модели и уравнение регрессии, которое ее описывает. Установлены степень влияния факторов процесса на величину абразивного износа зубков и оптимальные их значения.

Ключевые слова: центробежное армирование, стойкость, износ, зубок, математическая модель, технологические факторы.

The increase in oil and gas drilling is closely linked to the use of high-performance, reliable and durable cone drill bits equipped with solid teeth or plug-in, reinforced wear-resistant materials. The decisive factor influencing the technical and economic efficiency of the process of drilling rocks, where oil and gas deposits occur, is the wear resistance of rock-destroying elements of chisels, made in the form of plug-in teeth and made together with the cone

body. In this work, based on the results of drill bits design and manufacturing technologies, cones equipped with plug-in teeth formed by centrifugal reinforcement by hard alloys with rotation around two mutually perpendicular axes are selected for evaluation. The research was conducted on the developed stand. According to the results of experiments, a mathematical model was obtained that describes the influence of technological factors on the optimization parameter - the amount of tooth wear. As factors influencing the efficiency of the use of reinforced teeth were taken: X_1 - pouring temperature of steel, $^{\circ}\text{C}$; X_2 - the amount of introduced hard alloy, g; X_3 - frequency of rotation of the mold around the vertical axis, min^{-1} ; X_4 - the frequency of rotation of the mold around the horizontal axis, min^{-1} . Their basic level and limits of variation of the upper and lower are established. The full factorial experiment 24 was used in the work. The plan of the experiment was made. In accordance with the selected plan, 16 active experiments were performed, and each experiment was repeated three times. Next, a mathematical model and a regression equation describing it are constructed. The degree of influence of process factors on the amount of abrasive wear of teeth and their optimal values is established.

Keywords: centrifugal reinforcement, durability, wear, chisel, mathematical model, technologic factors.

Вступ

Успішний розвиток економіки країни неможливий без створення потужної паливно-енергетичної бази, зростання темпів розвитку її нафтогазової промисловості. Досягнення високого рівня у видобутку нафти і газу потребує розширення об'єму бурових робіт, техніко-економічні показники яких значною мірою залежать від застосування високопродуктивних, надійних породоруйнівних інструментів. При бурінні свердловин на нафту і газ основними породоруйнівними інструментами є шарошкові бурові долота, оснащені переважно зубками суцільними і зміцненими наступною обробкою або вставними, виготовленими із твердих сплавів або армованими твердими сплавами [1, 2, 3].

Вирішальним фактором, що суттєво впливає на ефективність процесу руйнування гірських порід, в яких знаходяться поклади нафти і газу, є зносостійкість зубків як породоруйнівних елементів. Відомо, що зношування породоруйнівних елементів озброєння шарошок за відсутності їх крихких руйнувань є поєднання двох процесів, а саме, стирання робочих поверхонь цих елементів до породи, що називають абразивним зносом, та їх викришування. Абразивне стирання інструмента відбувається безперервно в ході руйнування породи. Викришування, проявом якого є відколювання від робочої частини інструмента частинок неправильної форми, відбувається періодично. Зазначені процеси зношування бурового інструмента призводять до суттєвих змін у динаміці руйнування гірських порід, що викликає зростання на порядок діючих зусиль і навантажень. Тому питання підвищення зносостійкості озброєння бурових доліт є актуальним і вимагає подальшої розробки на науковій основі досліджень як теоретичного характеру, так і конструкторсько-технологічного та експлуатаційного спрямування. При цьому необхідно врахувати фактори, що впливають на процеси спрацювання породоруйнівного інструменту, а саме: характе-

ристики матеріалу, що зношує інструмент; характеристики самого інструменту, який піддається зносу; характеристики середовища, в якому проходять процеси руйнування, та параметри режиму зношування. Як наслідок, такий підхід сприятиме зростанню ефективності процесу буріння.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Вирішення зазначених проблем при створенні породоруйнівних інструментів здійснюються за різними напрямками. Наприклад, в дослідженнях [4, 5] представлено результати процесів виготовлення шарошкових доліт із зубками, сформованими на їх корпусі шляхом литва або фрезерування. Для покращання фізико-механічних властивостей робочих поверхонь цих зубків їх піддають хіміко-термічній обробці, яка складається з цементації на певну глибину та термообробки [6]. Недоліком таких породоруйнівних елементів [7] є те, що у міру їх зношування змінюється механізм інтенсивності їх зношування, внаслідок того, що по контуру зубки мають твердість найбільшу, а в напрямку осердя цей показник суттєво зменшується. З метою підвищення зносостійкості зубчастого озброєння доліт застосовують поверхневе армування реліту (наплавленням на робочі поверхні армуючих матеріалів: реліту, твердих сплавів ВК). Характеристикою такого армованого шару є крихкість та неоднорідність, що призводить до тріщиноутворення та крихкого викришування [8].

В праці [9] розглядаються шарошки із вставними твердосплавними зубками. Для таких зубків характерне неефективне використання дефіцитних твердих сплавів, оскільки більша частина їх запресовується в корпус шарошки. Крім того, у ході експлуатації відбувається сколювання та випадання зубків, з потраплянням їх у вбій, що призводить до виходу з ладу бурового долота.

В останні роки набули поширення розробки і створення об'ємних локальних композиційних матеріалів, розміщених на робочих поверхнях та прилягаючих до них шарів матеріалу породоруйнівних елементів. Сутність таких композицій полягає в тому, що в об'ємі оснащення створюється армована зона з використанням зносостійких твердих сплавів і металевих матриць. Регулювання процесів розчинення твердого сплаву і додаткового легування металозв'язки об'ємно легованої зони дозволяє поряд з концентрацією твердого сплаву створювати оптимальні композиції з набором диференційованих властивостей, що задаються на стадії виготовлення. Недоліком таких композицій є складність оптимального розміщення армуючих твердих сплавів на робочій поверхні породоруйнівного озброєння [10].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

З вище наведеного аналізу попередніх досліджень випливає, що недосконалість зубків (як суцільних, так і вставних) можна усунути конструктивними та технологічними шляхами, оптимізуючи їх будову та технологічний процес формування їх робочих поверхонь. Реалізація процесу виготовлення таких зубків може ґрунтуватися, зокрема, на застосуванні технології відцентрового армування з обертанням заготовки зубка навколо двох осей.

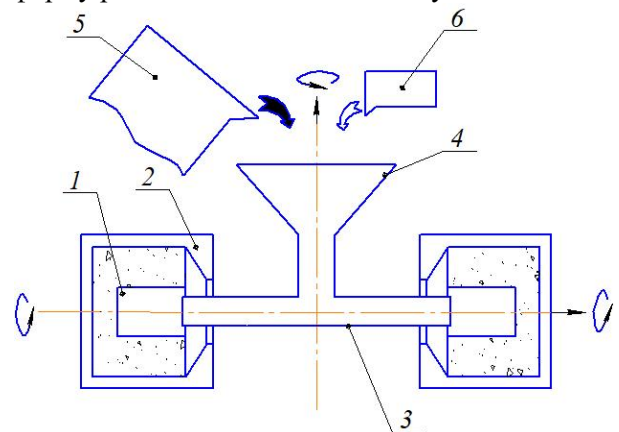
Формулювання цілей

Метою даної роботи буде дослідження технології відцентрового армування з обертанням ливарної форми навколо двох взаємоперпендикулярних осей, шляхом побудови математичної моделі технологічного процесу виготовлення зубків зазначеним методом із визначенням впливу режимів процесу на їх зносостійкість.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Підвищити стійкість бурових доліт, армованих твердими сплавами, можна за рахунок оптимального розміщення зносостійких шарів у об'ємі різальної частини зубків. Формування таких зубків досягається застосуванням технології, в основі якої лежить спосіб відцентрового литва із двома осями обертання [11]. Суть способу полягає в наступному (рис. 1). Керамічні ливарні форми 1 для отримання виливків обертаються навколо двох взаємоперпендикулярних осей. Форми встановлені в патроні 2, що забезпечує їх обертання навколо горизонталь-

ної осі. Для подачі рідкого металу і гранул твердого сплаву в керамічну ливарну форму 1 служать горизонтальні ливникові канали 3, що мають телескопічне з'єднання з ливниковою лійкою 4. Розплавлений метал (сталь) і гранули твердого сплаву подають у ливникову лійку із тигелів 5 і 6 відповідно. Керамічні форми попередньо підігрівають і надають їм обертання навколо вертикальної осі. Потім заливають рідку сталь і вводять твердий сплав. Після заливання сталі і введення гранул в ливникову лійку 4, ливарні керамічні форми 1 призводять до обертання навколо горизонтальної осі, а обертання навколо вертикальної осі – зупиняють. Таким чином, обертовий рух навколо вертикальної осі виконує роль транспортуючого руху, який доставляє гранули твердого сплаву з потоком рідкого металу в керамічну форму, а обертовий рух навколо вертикальної осі дозволяє раціонально розподілити гранули в об'ємі та по периметру робочої частини зубка. Підвищення стійкості робочих поверхонь деталей досягається зосередження твердого сплаву в її робочій частині, а також оптимальним легуванням металеві матриці армованої зони. Процеси, що відбуваються в об'ємно армованій зоні, при реалізації способу пов'язані з технологічними параметрами армування зубків, регулюючи які можна отримати оптимальну структуру армованої зони сталеві матриці, а також осесиметричну форму робочої частини головки зубка.



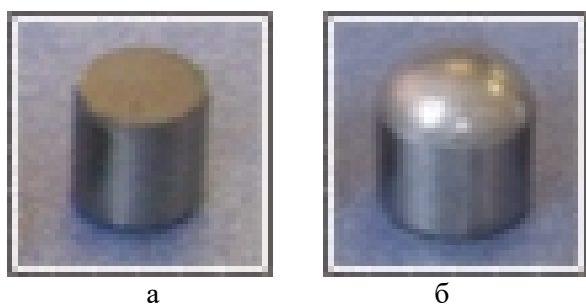
1 – керамічна форма; 2 – патрон; 3 – ливникові канали; 4 – ливарна форма-лійка; 5 – дозатор твердого сплаву; 6 – тигель

Рисунок 1 – Схема установки відцентрового армування з двома взаємоперпендикулярними осями обертання ливарної форми

Однак досліджень з оцінки впливу технологічних параметрів на структуру, фізико-механічні і відповідно різальні властивості армованої зони таких зубків, на нашу думку, є ще недостатньо.

Це обумовило необхідність розроблення нових методик та підходів з метою керування процесом формування властивостей робочих поверхонь породоруйнівних елементів бурових доліт. У представленій роботі, враховуючи, що процес виготовлення зубків шарошок відцентровим армуванням зумовлений великою кількістю стохастичних факторів, дослідження цього процесу доцільно було проводити методом планування експерименту, вивчаючи при цьому вплив технологічних параметрів процесу відцентрового армування, яким ці зубки отримувались, на їх зносостійкість [5, 12]. Цей показник обрано нами за параметр оптимізації, який характеризується величиною розмірного зносу зубків.

Для проведення експериментів нами використовувались зразки, зображені на рис.2. Характерною особливістю форми таких зубків є розвинена торцева поверхня, тому для деталі такої конфігурації є доцільним використання способу і технології відцентрового армування з двома осями обертання.



а – плоска; б – сферична

Рисунок 2 – Форми твердосплавних зубків

На підставі результатів аналізу визначимо фактори, що характеризують режими технологічного процесу відцентрового армування зубків, а саме:

X_1 - температура заливання сталі, $^{\circ}\text{C}$;

X_2 - кількість введеного твердого сплаву, г;

X_3 - частота обертання ливарної форми навколо вертикальної осі, хв^{-1} ;

X_4 - частота обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі, хв^{-1} .

Розглянемо побудову моделі повного факторного експерименту для процесу об'ємного армування зубків [13, 14]. На першому етапі будуємо лінійну модель, що описується залежністю

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (1)$$

де y - вибіркова оцінка зношування зубків у факторному просторі (параметр оптимізації) зубка;

b_0 - вільний член рівняння, що враховує вплив усіх інших факторів процесу формування армованої зони зубка;

b_i - коефіцієнт пропорційності при факторі, що досліджується;

x_i - кодове значення фактору, що досліджується.

Зубки досліджувалися на підставі даних матриці планування експерименту, що реалізує повний факторний експеримент $N = 2^k = 2^4 = 16$.

Інтервали варіювання і точність підтримання вхідних змінних наведені в табл. 1 і обрані з урахуванням рівня відтворюваності і отримання істотних змін вихідних параметрів.

Таблиця 1 – Інтервали варіювання і точність підтримання вхідних змінних

Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
$X_1, ^{\circ}\text{C}$	1520	1570	1620	50
$X_2, \text{г}$	32	94	156	62
$X_3, \text{хв}^{-1}$	400	500	600	100
$X_4, ^{\circ}\text{C}$	120	180	240	60

Кодування значень факторів x_i виконували за виразом

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (2)$$

Тут Δx_i - інтервал варіювання значення i -го фактора в кодовому масштабі

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2}, \quad (3)$$

де x_i - значення i -того фактора в натуральному масштабі на максимальному або мінімальному рівнях;

x_{i0} - середнє значення i -го фактора в натуральному масштабі.

Спрацювання армованих зубків вивчали мікрометричним методом. За результат брали середнє значення зносу після триразового проведення експерименту.

В таблиці 2 наведено план експериментів у кодовому масштабі.

Дисперсія дослідів визначалася за відомим виразом

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum (y_{ju} - \bar{y}_u)^2}{n_u - 1}, \quad (4)$$

де n_u - кількість дублів j кожного u -го досліду (випробування);

u - номер досліду (із $N=16$);

Таблиця 2 – Матриця планування

План	№ дослідю	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄
2 ⁴	1	+	-	-	-	-	+	-	-	+
	2	+	-	-	-	+	-	+	+	-
	3	+	-	-	+	-	-	+	+	-
	4	+	-	-	+	+	+	-	-	+
	5	+	-	+	-	-	+	-	+	-
	6	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	7	+	-	+	+	-	-	+	-	+
	8	+	-	+	+	+	+	-	+	-
	9	+	+	-	-	-	+	+	-	-
	10	+	+	-	-	+	-	-	+	+
	11	+	+	-	+	-	-	-	+	+
	12	+	+	-	+	+	+	+	-	-
	13	+	+	+	-	-	+	+	+	+
	14	+	+	+	-	+	-	-	-	-
	15	+	+	+	+	-	-	-	-	-
	16	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Таблиця 3 – Розрахунок дисперсії дослідю

Номер дослідю	Номер дубля j та спрацювання зубка y _{ju} , мм			Середнє значення \bar{y}_j	Дисперсія дослідю S ² _{yu}
	1	2	3		
1	2,45	2,48	2,60	2,51	72x10 ⁻⁴
2	2,12	2,23	2,34	2,23	172
3	2,64	2,83	2,58	2,68	57
4	2,28	2,51	2,43	2,41	101
5	2,36	2,42	2,51	2,43	325
6	2,24	2,15	1,98	2,13	185
7	2,43	2,62	2,58	2,54	287
8	2,22	2,41	2,25	2,29	129
9	2,29	2,00	2,33	2,21	172
10	1,78	1,83	2,03	1,88	131
11	2,15	1,88	1,99	2,01	175
12	1,77	1,82	1,98	1,86	105
13	2,10	1,95	1,92	1,99	175
14	1,60	1,80	1,73	1,71	133
15	1,74	2,03	1,95	1,91	103
16	1,95	2,02	1,91	1,96	31

y_{ju} – результат j-го дослідю u-му рядку (j=3).

В табл. 3 зведеної дані розрахунків за результатами проведених дослідю, для кожного з яких розраховані початкові дисперсії S²_{yu}.

Наступна дія в обробці експериментальних даних – перевірка однорідності дослідю дисперсій S²_{yu} за критерієм Кохрена (G-критерієм)

$$G^{розр} = \frac{S_{yu}^2 \max}{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2} = \frac{0,05}{0,348} = 0,144, \quad (5)$$

де S²_{yu} – дисперсія u-го дослідю;

S²_{yu} max - найбільша дисперсія.

При рівні значущості α = 0,05, числі степенів вільності f = n - 1 = 2 та кількості дослідю N=16, значення G-критерію табличне становить G^{табл}=0,322 [15]. Оскільки виконується умова G^{розр} ≤ G^{табл}, тобто 0,144 < 0,322, ряд дисперсій можна вважати однорідним. Як бачимо, похибки результатів дослідю випробувань y_u відповідають нормальному закону розподілу, тож і дисперсію дослідю можна визначити за формулою

Таблиця 4 – Зіставлення експериментальних і розрахункових даних

Номер досліджу <i>u</i>	$y_{u\text{експ}}$	$y_{u\text{розрах}}$	$ \Delta y $	Δy^2	Номер досліджу <i>u</i>	$y_{u\text{експ}}$	$y_{u\text{розрах}}$	$ \Delta y $	Δy^2
1	2,51	2,57	0,06	0,0004	9	2,21	2,066	0,144	0,0081
2	2,23	2,304	0,074	0,0081	10	1,88	1,84	0,04	0,0100
3	2,68	2,602	0,078	0,0100	11	2,01	2,138	0,128	0,0144
4	2,41	2,376	0,034	0,0016	12	1,86	1,912	0,052	0,0064
5	2,43	2,428	0,002	0,0004	13	1,99	1,964	0,026	0,0004
6	2,13	2,172	0,042	0,0256	14	1,71	1,738	0,028	0,0004
7	2,54	2,500	0,04	0,0289	15	1,91	2,036	0,126	0,0036
8	2,29	2,274	0,016	0,0196	16	1,96	1,81	0,115	0,0081

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}{N} = \frac{0,236}{16} = 0,01475 \quad (6)$$

Кількість ступенів вільності
 $f = (n - 1) \cdot xN = (3 - 1) \cdot 16 = 32$.

Далі розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії (1), що буде описувати модель досліджуваного процесу. За даними таблиці визначаємо коефіцієнти b_0, b_i . Вільний коефіцієнт b_0 розраховуємо за відомим виразом

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u \quad (7)$$

Коефіцієнти регресії b_i визначаємо за рівнянням

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \quad (8)$$

де i – номер фактора;
 u – номер досліджу;
 N – загальне число дослідів;
 x_{iu} – кодове значення;
 y_u – значення параметра оптимізації в u -му досліді.

За формулами (7), (8) було отримано такі значення коефіцієнтів:

$$b_0 = 2,189; b_1 = -0,13; b_2 = -0,226; b_3 = -0,045; b_4 = -0,016.$$

Проведемо перевірку статичної значущості коефіцієнтів. Для цього необхідно порівняти певний критерій, розрахований заданими дослідів, з наведеним в стандартних таблицях його значенням при обраному рівні значущості α . Для перевірки наведеної вище гіпотези спочатку розраховуємо дисперсію оцінок коефіцієнтів S_{bi}^2

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N} = \frac{0,01475}{3 \cdot 16} = 0,0003073.$$

Відповідно середньоквадратична похибка $S_{bi} = 0,0175$.

Далі обчислюємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δb_i

$$\Delta b_i = \tau_{\alpha;f} \cdot S_{bi} \quad (9)$$

де τ_{α} – критерій Стьюдента. Він береться з таблиць і залежить від рівня значущості α та кількості ступенів вільності f_i при визначенні дисперсії дослідів S_y^2 ;

S_{bi} – середньоквадратична похибка у визначенні коефіцієнта регресії

$$\tau_{0,05;32} = 2,04 [15].$$

Тоді $\Delta b_i = 2,04 \cdot 0,0175 = 0,03576$.

Коефіцієнт буде статично значущим, оскільки $|b_i| \geq \Delta b_i$. Або інакше $|b_i| \geq \tau_{\alpha;f} \cdot S_{bi}$. Останнє означає, що абсолютна величина коефіцієнта повинна бути в τ разів більшою за похибку його визначеності.

Таким чином, коефіцієнти, абсолютна величина яких рівна довірчому інтервалу або більша від нього, слід вважати статично значущими. В нашому випадку це b_0, b_1, b_2 . Статично незначні коефіцієнти b_3, b_4 з моделі можна виключити.

Отже, після реалізації повного факторного експерименту 2^4 отримаємо рівняння регресії

$$y = 2,17 - 0,232x_1 - 0,051x_2 + 0,036x_3 - 0,113x_4 \quad (10)$$

Виконаємо перевірку адекватності моделі. З цієї метою з її рівняння визначаємо розрахункові значення параметра оптимізації та зведемо їх в таблицю, зіставивши їх із експериментальними даними.

На підставі отриманих табличних даних визначаємо величину дисперсії неадекватності $S_{неад}^2$

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum (y_{i\text{ розрах}} - y_{i\text{ експ}})^2}{f_2} = \frac{\sum \Delta y^2}{f_2},$$

де $y_{i\text{ розрах}}$ і $y_{i\text{ експ}}$ - відповідно значення в i -му досліді параметра оптимізації розраховані за отриманим рівнянням регресії та визначеними експериментально;

f_2 - кількість ступенів вільності

$$f_2 = N - k,$$

де N - кількість дослідів плану,

k - кількість коефіцієнтів у рівнянні, включаючи b_0 .

Отже, величина дисперсії неадекватності дорівнює

$$S_{неад}^2 = \frac{0,15}{16-5} = 0,01364.$$

Наступним етапом обробки даних буде перевірка адекватності (відповідності) математичної моделі технологічного процесу експериментальним даним. В цьому пункті перевіряється придатність отриманого рівняння регресії, що описує модель досліджуваного процесу. Перевірку адекватності математичної моделі проводимо за критерієм Фішера (F -критерій)

$$F_{f_2, f_1} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2};$$

$$F_{f_2, f_1}^{розрах} = \frac{0,01364}{0,01475} = 0,9245.$$

Рівняння регресії вважається адекватним, якщо виконується умова $F^{розрах} \leq F^{табл}$, тобто коли розрахункове значення F -критерію не перевищує табличного для обраного рівня значущості α .

$$F^{табл} = 2,12 \text{ при } \alpha = 0,05.$$

Оскільки $F^{розрах} < F^{табл}$ і умова адекватності виконується, то отримане рівняння регресії можна використовувати для опису технологічного процесу виготовлення зубків методом відцентрового армування.

На завершальній стадії дослідження проаналізуємо отримані рівняння регресії, оцінюючи вплив окремих його складових на зносостійкість армованих зубків. Насамперед відзначимо, що дана оцінка факторів впливу на стійкість до зношення зубків стосується тільки обраних в роботі інтервалів варіювання. В цих інтервалах виявилось, що за ступенем впливу на параметр оптимізації в бік його зменшення фактори розташувалися в такому порядку: температура заливання сталі, частота обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі, кількість введенного твердого сплаву, частота

обертання ливарної форми навколо вертикальної осі. При цьому підвищення температури заливання сталі сприяє протіканню термічних та фізико-хімічних процесів у більш повному об'ємі, що створює умови для більш якісного формування властивостей робочої (армованої) зони зубків. Це підвищує зносостійкість зубків і, відповідно, зменшує величину параметра оптимізації, а саме – зношування. В тому ж напрямку впливає і частота обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі. З її збільшенням поліпшуються умови доставки армуючих частинок твердого сплаву до робочої поверхні зубка внаслідок зростання величини відцентрових сил, під дією яких вони транспортуються. При цьому також збільшується і їх кількість (маса) оскільки більша кількість частинок твердого сплаву встигає транспортуватися на периферію робочої зони і рівномірно в ній розміститися до початку процесу кристалізації сталеві матриці. Що стосується впливу кількості твердого сплаву для армування одного зубка, він очевидний і не потребує коментарів. Стосовно фактору швидкості обертання ливарної форми навколо вертикальної осі, то, на відміну від вже проаналізованих факторів, дана складова рівняння регресії діє в зворотному порядку, а саме, з її збільшенням зносостійкість зубків буде знижуватися. На нашу думку, це пов'язано з тим, що, по-перше, армуючі частинки будуть виноситись на периферію робочої поверхні зубка під дією відцентрових сил більш інтенсивно і при контакті зубка в процесі експлуатації з пороною (бурові роботи) будуть легко викришуватись; по-друге, наведені умови транспортування частинок дозволяють їм оптимально розміститися на периферії робочої поверхні зубка під дією відцентрових сил, що виникають під час обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі, оскільки їх рух буде відбуватися в шарах сталеві матриці, які контактують із стінками ливарної форми і, відповідно, швидше кристалізуватимуться, що не сприятиме руху частинок.

Висновки

– проведено вивчення процесу відцентрового армування вставних зубків бурових доліт з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної форми на підставі рекомендацій попередніх досліджень з наданням відповідного конструкторсько-технологічного обґрунтування прийнятих рішень;

– як метод дослідження об'єкта вивчення обрано метод планування експериментів;

– побудовано математичну модель процесу відцентрового армування зубків з двома взаємноперпендикулярними осями обертання ливарної форми. За параметр оптимізації обрано величину лінійного зношування зміцнених релітом зубків;

– аналіз отриманого рівняння регресії показав, що за ступенем впливу на зношування зубків технологічні фактори (параметри) розміщуються в такій послідовності:

X_1 - температура заливання сталі, $^{\circ}\text{C}$; X_4 - частота обертання ливарної форми навколо горизонтальної осі, хв^{-1} ; X_2 - кількість введенного твердого сплаву, г; X_3 - частота обертання ливарної форми навколо вертикальної осі, хв^{-1} . При цьому підсилення впливу факторів X_1 , X_2 , X_4 призводить до зменшення величини зносу, а зростання величини фактору X_3 , навпаки, збільшує її.

Література

1. Симонянц С.Л., Салихов М.С. О выборе рациональных типов буровых долот. *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. 2010. №3. С.15-17.

2. Боярских Г.А., Грибенников Н.В., Горбунов С.А. Ретроспективный анализ развития конструкций буровых шарошечных долот. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2012. № 2. С.107-113.

3. Каталог буровых долот компании Hughes Christensen / [сост. Хьюз Кристенсен]. М.: Бейкер Хьюз Инкорпорейтед, 2008. 44 с.

4. Жидовцев Н. А., Кершеноаум В. Я., Гинзбург Э. С. Долговечность шарошечных долот. М.: Недра, 1992. 266 с.

5. Яким Р. С., Петрина Ю.Д., Яким І.С. Науково-практичні основи технології виготовлення тришарошкових бурових доліт та підвищення їх якості і ефективності: монографія. Івано-Франківськ: вид-во ІФНТУНГ, 2011. 384 с.

6. Яким Р. С., Петрина Ю. Д. Теорія і практика забезпечення якості та експлуатаційних показників цементованих деталей шарошкових бурових доліт: монографія. Івано-Франківськ: вид-во ІФНТУНГ, 2011. 189 с.

7. Кустов В.В., Шуляр І.О., Грабовецький В. М. Моделювання впливу режимів відцентрового армування на зношування зубків шарошок бурових доліт. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, 2019. № 1. С. 32-39.

8. Блохин В.С. Повышение эффективности бурового инструмента. К.: Техника, 1982. 160 с

9. Барило И. Г. Повышение износостойкости вооружения долот за счет использования

комбинированных твердосплавных зубков: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.01 / Игорь Григорьевич Барило. М., 1989. 178 с.

10. Ясашин В. А. Конструкторские и технологические методы повышения эффективности работы буровых шарошечных долот большого диаметра: автореф. дисс. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.13 “Машины, агрегаты и процессы (нефтяная и газовая промышленность)” [Текст] / В. А. Ясашин. М., 2009. 48 с.

11. Шуляр І. О., Кустов В. В., Роп’як Л. Я. Відцентрове армування озброєння бурових інструментів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: тези доп. II міжнар. наук.-прак. конф. (23–25 трав. 2012 р., Чернівці). Чернівці, 2012. С. 29.

12. Бугай Ю. Н., Воробьев И. В. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент. Львов: Выща школа, 1989. 205 с.

13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 281 с.

14. Петрина Ю. Д., Яким Р. С. Основи наукових досліджень для інженерів. Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 153 с.

15. Пляскин И. И. Планирование эксперимента в машиностроении. М.: Машиностроение, 1982. 176 с.

References

1. Simonyants S.L., Salihov M.S. O vyibore ratsionalnyih tipov burovyyih dolot. *Vestnik Assotsiatsii burovyyih podryadchikov*. 2010. No 3. P. 15-17. [in Russian]

2. Boyarskih G.A., Gribennikov N.V., Gorbunov S.A. Retrospektivnyiy analiz razvitiya konstruksiy burovyyih sharoshechnyyih dolot. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2012. No 2. P. 107 -113. [in Russian]

3. Katalog burovyyih dolot kompanii Hughes Christensen / [sost. Hyuz Kristensen]. M.: Beyker Hyuz Inkorporeyted, 2008. 44 p. [in Russian]

4. Zhidovtsev N. A., Kershenoaum V. Ya., Ginzburg E. S. Dolgovechnost sharoshechnyyih dolot. M.: Nedra, 1992. 266 p. [in Russian]

5. Iakym R. S., Petryna Yu.D., Yakym I.S. Naukovo-praktychni osnovy tekhnolohii vyhotovlennia trysharoshkovykh burovyykh dolit ta pidvyshchennia yikh yakosti i efektyvnosti: monohrafiia. Ivano-Frankivsk: vyd-vo IFNTUNH, 2011. 384 p. [in Ukrainian]

6. Yakym R. S., Petryna Yu. D. Teoriia i praktyka zabezpechennia yakosti ta ekspluatatsiinykh pokaznykh tsementovanykh detalei sharoshkovykh burovnykh dolit: monohrafiia. Ivano-Frankivsk: vyd-vo IFNTUNH, 2011. 189 p. [in Ukrainian]
7. Kustov V.V., Shuliar I.O., Hrabovetskyi V. M. Modeliuvannia vplyvu rezhyimiv vidtsentrovoho armuvannia na znoshuvannia zubkiv sharoshok burovnykh dolit. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. 2019. No 1. P. 32-39. [in Ukrainian]
8. Blohin V.S. Povyishenie effektivnosti burovogo instrumenta. K.: Tehnika, 1982. 160 p. [in Russian]
9. Barilo I. G. Povyishenie iznosostoykosti vooruzheniya dolot za schet ispolzovaniya kombinirovannykh tverdospлавnykh zubkov: dis. ... kand. teh. nauk: 05.02.01 / Igor Grigorevich Barilo. M., 1989. 178 p. [in Russian]
10. Yasashin V. A. Konstruktorskie i tehnologicheskie metodyi povyisheniya effektivnosti raboty burovnykh sharoshechnykh dolot bolshogo diametra: avtoref. diss. na soiskanie uch. stepeni dokt. tehn. nauk: spets. 05.02.13 "Mashinyi, agregaty i protsessyi (neftyanaya i gazovaya promyshlennost)" M., 2009. 48 p. [in Russian]
11. Shuliar I. O., Kustov V. V., Ropiak L. Ya. Vidtsentrove armuvannia ozbroiennia burovnykh instrumentiv. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta sys-tem: tezy dop II mizhnar. nauk.-prak. konf. (23–25 trav. 2012 r., Chernihiv)*. Chernihiv, 2012. P. 29. [in Ukrainian]
12. Bugay Yu. N., Vorobev I. V. Tsentrobezchno-armirovannyiy porodorozhayuschiy burovoy instrument. Lvov: Vyischa shkola, 1989. 205 p. [in Russian]
13. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnih usloviy. M.: Nauka, 1976. 281 p. [in Russian]
14. Petryna Yu. D., Yakym R. S. Osnovy naukovykh doslidzhen dlia inzheneriv. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2004. 153 p. [in Ukrainian]
15. Plyaskin I. I. Planirovanie eksperimenta v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie, 1982. 176 p. [in Russian]