

Дослідження та моделювання впливу конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт

О. М. Семеген, З. М. Одосій, В. В. Кустов

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

Із метою оцінки впливу конструкторсько-технологічних параметрів виготовлення армованого озброєння шарошкових бурових доліт на величину їх зношування в процесі буріння проведено дослідження на розробленому стенді. За результатами досліджень отримано математичні моделі, що описують вплив цих параметрів на показники зношування армованих поверхонь зубків бурового інструменту, які виготовлено за різними схемами армування їх робочих поверхонь. Показано, що оптимальною схемою наплавлення робочої поверхні зубків релітом є збільшення площі армування за шириною зубка.

Ключові слова: бурове шарошкове долото, зубок, схема армування, реліт, зношування.

Вступ. Тришарошкові долота – основний породоруйнівний інструмент, що використовується при бурінні нафтових і газових свердловин у м'яких та середньої твердості породах. Умови роботи бурового інструменту досить важкі, що пов'язано з комплексним впливом експлуатаційних чинників, таких як високі статичні та динамічні навантаження, температурний вплив у зоні контакту, наявність абразиву і промивної рідини під високим тиском [1]. У процесі буріння відбувається інтенсивне руйнування гірської породи, що призводить до зношування озброєння породоруйнівного інструменту. Під час взаємодії з породою озброєння долота, що виконане у вигляді зубків клиновидної форми з невеликим притупленням у вістрі, зношується та руйнується. Це стає причиною зміни початкових геометричних параметрів зубків, у першу чергу кута загострення зубка та його висоти, що призводить до поступового збільшення площі контакту зубка з породою, зниження питомого тиску на породу і, як наслідок, зменшення ефективності процесу руйнування породи і механічної швидкості самого буріння. Окрім того, зношування зубків супроводжується виникненням у їхньому тілі значних деформацій і знакозмінних напружень (рис. 1). На рис. 1 показано епюри напружень за різних кутів загострення зубка в залежності від прикладеного до нього навантаження P . Видно, що в зубках клиновидної форми напруження вздовж контуру розподіляються нерівномірно [2]. Максимальна їх величина виникає в зоні вершини зубка, яка інтенсивно взаємодіє з вибоєм свердловини і тому зазнає найбільшого зношування.

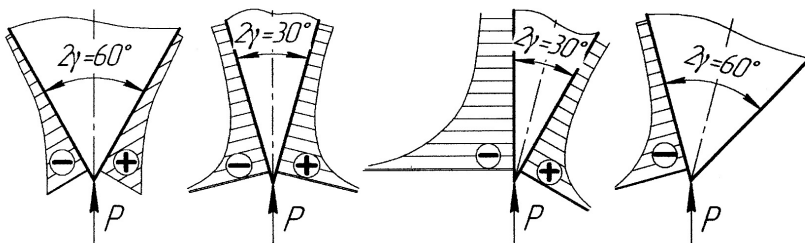


Рис. 1. Характер розподілу напружень у залежності від кута загострення зубка.

Огляд результатів відомих досліджень. Проведений аналіз результатів досліджень впливу кута загострення зубків шарошки на ефективність руйнування гірських порід показав, що він є одним з основних факторів, який зумовлює ступінь ефективності використання породоруйнівного інструменту [3].

Для зменшення процесу зношування зубків, зокрема у зоні їх вершини, використовують різні методи покращання фізико-механічних властивостей їх робочих поверхонь. Найбільш поширеним є метод наплавлення такими зносостійкими армуючими матеріалами, як реліт, лікар, стеліт, сормайт [4].

Відомо, що технологічний процес наплавлення зубків шарошок зумовлений багатьма факторами, які досить часто є взаємопов'язаними, а також випадковим збуренням, зміною окремих факторів, які не можна належно проконтролювати. Тому проблема розроблення і наплавлення захисних шарів є досить складною для вирішення, а процес наплавлення відноситься до багатофакторних.

Основні фактори процесу наплавлення зносостійких армуючих матеріалів на робочі поверхні зубків шарошок можна умовно поділити на групи:

- 1) ті, що визначають умови наплавлення (вібродуговий процес, під шаром флюсу, відкритою дугою, із використанням середовища захисних шарів та ін.);
- 2) ті, що пов'язані з умовами подачі матеріалу, що наплавляється (розхід, кут подачі матеріалу до поверхні зубка та ін.);
- 3) ті, що визначають умови наплавлення (дистанція та час наплавлення, кут нахилу пальника, швидкість відносного переміщення, вид захисного газу, температура попереднього підігріву та ін.);
- 4) ті, що визначають властивості матеріалу, що наплавляється (тип матеріалу – пруток, стрічка, порошок – і його склад, форма порошку або дроту, грануляція порошку та ін.);
- 5) ті, що визначають властивості основного металу (фізико-механічні, хімічний склад, спосіб попередньої обробки поверхні, її розміри, форма, що наплавляються, та стан (шорсткість, температура й ін.);
- 6) ті, що пов'язані з розмірами та формою армованої зони (товщина покриття та ін.).

Взаємодія указаних факторів окремо та разом формує фізико-механічні властивості наплавлених поверхонь (твердість, міцність, стійкість до зношування, ударна в'язкість та ін.). Процес формування фізико-механічних властивостей робочої поверхні наплавлених зубків шарошки можна вважати в значній мірі процесом стохастичним. Для його вивчення рекомендується використовувати ймовірнісний метод планування експериментів. Тому побудова математичної моделі, яка оснований на вхідних і вихідних конструкторського-технологічних параметрах та за допомогою якої можна визначити ступінь їх впливу на оптимальні показники ефективності роботи армованого озброєння шарошки, є актуальною.

Результати проведених досліджень. Із використанням концепції багатофакторного експерименту оцінимо вплив конструктивного оформлення і технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт. За параметр оптимізації прийнято інтенсивність зношування наплавленого шару в умовах абразивного зношування, яку визначали на розробленому стенді, що дозволяє моделювати наближені до реальних умови зношування дослідних зразків [5, 6]. Конструктивні параметри дослідних зразків вибирали з урахуванням конструктивного виконання і розмірів найбільш розповсюджених зубків шарошкових бурових доліт типу М та С та з параметрами, відмінними від них (рис. 2). Дослідні зразки виготовляли з шириною зубка $l = 12,5$ і 25 мм, висотою робочої частини $h = 26$ мм, кутом загострення $2\gamma = 30, 45$ і 60° та величиною початкового притуплення $n = 0,5; 1,0$ і $1,5$ мм.

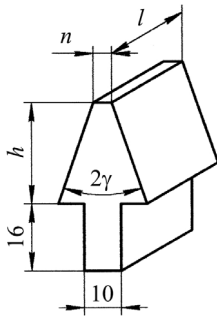


Рис. 2

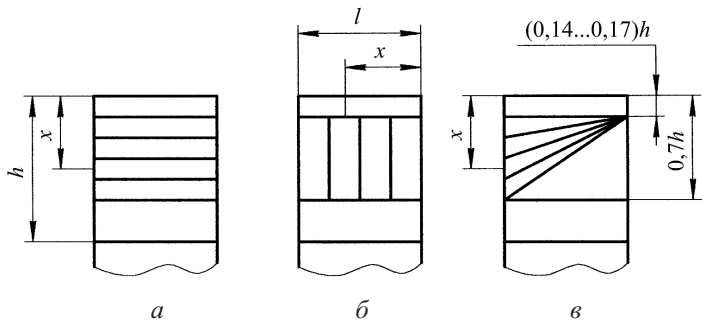


Рис. 3

Рис. 2. Схема дослідного зразка у вигляді зубка та основні його розміри.

Рис. 3. Схеми розміщення твердого сплаву на поверхнях зразків у заданих напрямках x : а, б, в – схеми збільшення площі армування за висотою робочої частини зубка h , за шириною l зубка і обмеженою діагоналлю відповідно.

Поверхні, що армувалися релітом, на кожному наступному дослідному зразку поступово збільшувались у напрямках x відносно вершини зразка, по профільній поверхні та двох бічних гранях, як показано на рис. 3.

Дані дослідження проводилися для трьох схем наплавлення зносостійких шарів на робочі поверхні зубків (рис. 3).

За результатами аналізу факторів, що впливають на ефективність застосування армованих зубків, було прийнято: X_1 – кут загострення зубка 2γ , град; X_2 – розмір зерен реліту, мм; X_3 – температура підігріву поверхонь зубка, °С; X_4 – початкове притуплення вершини зубка, мм.

Розглянемо побудову повного факторного експерименту для процесу зміцнення та визначення геометричних параметрів зубка за схемою збільшення площі армування обмеженою діагоналлю. Для зубків з іншими схемами наплавлення зносостійких шарів на робочі поверхні побудова повного факторного експерименту проводилась аналогічно.

Перший етап – побудова лінійної моделі типу

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

де y – вибіркова оцінка зносостійкості в факторному просторі; b_0 – коефіцієнт пропорційності, що враховує вплив усіх інших факторів процесу формування зони зміцнення зубка; b_i – коефіцієнт пропорційності при досліджуваному факторі; x_i – кодове значення досліджуваного фактору.

Дослідження випробуваних зубків проводили на основі матриці планування експерименту, що реалізує повний факторний експеримент $N = 2^k = 2^4 = 16$. Основний рівень та інтервал варіювання факторів узято з результатів аналізу попередніх дослідів і прийнято варіювати їх на двох рівнях [7]. Інтервали зміни факторів та їх значення в натуральному масштабі на основному, верхньому і нижньому рівнях наведено в табл. 1.

Кодування значень факторів x_i проводиться за співвідношенням

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2)$$

де ΔX_i – інтервал варіювання, значення i -го фактора в кодованому масштабі,

$$\Delta X_i = \frac{X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}}}{2};$$

X_i – значення i -го фактора в натуральному масштабі на максимальному або мінімальному рівні; X_{i_0} – середнє значення i -го фактора в натуральному масштабі.

Дослідження зношування випробуваних зубків три рази реалізовано в часі шляхом вимірювання величини зношування зубка (середнє значення з трьох) лінійним методом [7].

План експериментів (2^4) у кодованому масштабі наведено в табл. 2.

Т а б л и ц я 1

Рівні факторів, що визначають конструкцію зубка

Рівень	Фактори			
	X_1 , град	X_2 , мм	X_3 , °C	X_4 , мм
Основний (X_{i_0})	45	1	615	1,0
Інтервал варіювання (ΔX_i)	15	0,6	35	0,5
Верхній ($x_i = 1$)	60	1,6	650	1,5
Нижній ($x_i = -1$)	30	0,4	580	0,5

Т а б л и ц я 2

Матриця планування

№ досліду u	x_1	x_2	x_3	x_4	y
1	+	+	+	+	2,85
2	-	+	+	+	3,50
3	+	+	-	+	3,90
4	-	-	+	+	3,70
5	+	+	-	+	3,30
6	-	+	-	+	3,85
7	+	-	-	+	3,45
8	-	-	-	+	4,95
9	+	+	+	-	3,60
10	-	+	+	-	3,95
11	+	-	+	-	2,75
12	-	-	+	-	4,35
13	+	+	-	-	3,25
14	-	+	-	-	3,00
15	+	-	-	-	3,80
16	-	-	-	-	4,70

Дисперсії дослідів визначаються за формулою

$$S_{y_u}^2 = \frac{1}{n_u - 1} \sum_{j=1}^{n_u} (y_{ju} - \bar{y}_u)^2, \quad (3)$$

де n_u – кількість дублів j кожного u -го випробування; u – номер дослідів, загальна кількість яких $N = 16$; y_{ju} – результат j -го дослідів в u -му рядку матриці ($j = 3$); \bar{y}_u – середньоарифметичне значень j -х повторів всіх дослідів у u -му рядку матриці, $\bar{y}_u = \frac{1}{n_u} \sum_{j=1}^{n_u} y_{ji}$.

В табл. 3 наведено розрахункові дані проведених дослідів, для кожного з яких розраховано початкові дисперсії.

Т а б л и ц я 3

Розрахунок дисперсії дослідів

№ дослідів u	№ дубля j	Зношування зубка y_{ju} , мм	\bar{y}_u	$S_{y_u}^2$	№ дослідів u	№ дубля j	Зношування зубка y_{ju} , мм	\bar{y}_u	$S_{y_u}^2$
1	1	2,45	2,85	0,13	9	1	3,10	3,60	0,26
	2	2,95				2	3,65		
	3	3,15				3	4,05		
2	1	3,50	3,50	0,063	10	1	3,45	3,95	0,33
	2	3,75				2	4,45		
	3	3,25				3	4,35		
3	1	4,20	3,90	0,13	11	1	2,35	2,75	0,13
	2	4,00				2	2,85		
	3	3,50				3	3,05		
4	1	3,15	3,70	0,28	12	1	4,00	4,35	0,10
	2	3,75				2	4,50		
	3	4,20				3	4,55		
5	1	3,55	3,30	0,053	13	1	2,80	3,25	0,26
	2	3,25				2	3,20		
	3	3,10				3	3,75		
6	1	3,45	3,85	0,16	14	1	2,50	3,00	0,25
	2	3,85				2	3,00		
	3	4,25				3	3,50		
7	1	3,65	3,45	0,04	15	1	4,20	3,80	0,21
	2	3,45				2	3,90		
	3	3,25				3	3,30		
8	1	5,25	4,95	0,07	16	1	4,20	4,70	0,19
	2	4,80				2	4,90		
	3	4,80				3	5,00		

Перевірку на однорідність порядкових дисперсій виконували з використанням G -критерію за формулою

$$G^P = \frac{(S_{y_u}^2)_{\max}}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (4)$$

де $S_{y_u}^2$ – порядкова дисперсія; $(S_{y_u}^2)_{\max}$ – найбільша з дисперсій; розрахункове значення G -критерію буде

$$G^P = \frac{0,33}{2,66} = 0,124.$$

Отримане значення G^P порівнювалося з табличним стандартним значенням G -критерію. Величина його для рівня значущості $\alpha = 0,05$ становить $G^T = 0,322$ [8].

З урахуванням залежності $G^P \leq G^T$ можна вважати, що деякі дисперсії є однорідними [8]. У нашому випадку дана залежність виконується: $G^P = 0,124 < G^T = 0,322$. Це свідчить, що розсіювання результатів випробувань y_u відповідає нормальному закону розподілу, тому дисперсію дослідів необхідно розраховувати за формулою

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_{y_u}^2; \quad (5)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_{y_u}^2 = \frac{2,66}{16} = 0,17.$$

Наступним етапом побудови є розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, що описують лінійну модель (1). Для розрахунку цієї моделі, враховуючи дані роботи [8], визначаються коефіцієнти b_0, b_i . Вільний коефіцієнт знаходимо з виразу

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u. \quad (6)$$

Коефіцієнти регресії b_i розраховуються за залежністю

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (7)$$

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

Значення коефіцієнтів, розрахованих за формулами (6) і (7), є такими: $b_0 = 3,68$; $b_1 = -0,32$; $b_2 = -0,27$; $b_3 = -0,11$; $b_4 = 0,06$.

Далі проводиться перевірка статистичної значущості коефіцієнтів. Суть цієї перевірки полягає у порівнянні певного критерію, розрахованого за даними експериментів, із наведеними його стандартними табличними значеннями при вибраному рівні значущості α або довірчій ймовірності $1-\alpha$. Для перевірки вказаної вище гіпотези розраховується дисперсія оцінок коефіцієнтів S_b^2 за формулою [8]

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{nN}, \quad (8)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{2,66}{16} = 0,17.$$

Перевіряємо довірчий інтервал Δb_i :

$$\Delta b_i = t_\alpha \cdot f_1 \cdot S_{bi}, \quad (9)$$

де t_α – критерій Стюдента, який вибираємо зі стандартних табличних значень [8] при даному рівні значущості α ; f_1 – кількість ступенів вільності, $f_1 = (n-1)N$, $f_1 = 16(3-1) = 32$; S_{bi} – середньоквадратична похибка при визначенні коефіцієнтів регресії.

Враховуючи, що $f_1 = 32$, та згідно з даними роботи [8] критерій Стюдента в нашому випадку буде: $t_\alpha(0,05; 32) = 2,04$.

Оскільки використовуємо рівномірне дублювання дослідів, дисперсія оцінок розраховується за формулою

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{nN}, \quad (10)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{0,17}{3 \cdot 16} = 0,0035.$$

Отже, $S_{bi} = 0,051$. Тому $\Delta b_i = 2,04 \cdot 0,051 = 0,104$.

Коефіцієнт регресії буде значущим статично, якщо виконуватиметься залежність $|b_i| \geq \Delta b_i$. Коефіцієнти, абсолютна величина яких рівна або більша довірчого інтервалу, необхідно визнати статистично значимими. У даному випадку це будуть b_0 , b_1 , b_2 і b_3 .

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

$$y = 3,68 - 0,32x_1 - 0,27x_2 - 0,11x_3 + 0,006x_4. \quad (11)$$

Далі за рівнянням побудованої математичної моделі визначаємо розрахункові значення параметрів оптимізації (табл. 4).

Із використанням даних табл. 4 розраховуємо величину дисперсії неадекватності за формулою [9]

$$S_n^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{u=1}^M (y_{u_p} - y_{u_c}), \quad (12)$$

де y_{u_p} , y_{u_c} – значення в u -му досліді, розраховані відповідно за отриманим рівнянням регресії і визначені експериментально; f_2 – кількість ступенів вільності; M – кількість дослідів, що залишилися.

Кількість ступенів вільності f_2 визначаємо за формулою [9]

$$f_2 = M - k, \quad (13)$$

де k – кількість коефіцієнтів у рівнянні.

Т а б л и ц я 4

Зіставлення експериментальних даних із розрахунковими

№ досліджу u	y_{i_c}	y_{i_p}	$ \Delta y $	Δy^2	№ досліджу u	y_{i_c}	y_{i_p}	$ \Delta y $	Δy^2
1	2,85	2,98	0,136	0,018	9	3,60	2,98	0,62	0,380
2	3,50	3,62	0,120	0,014	10	3,95	3,61	0,34	0,110
3	3,90	3,53	0,370	0,140	11	2,75	3,51	0,76	0,580
4	3,70	4,16	0,460	0,210	12	4,35	4,15	0,20	0,040
5	3,30	3,21	0,090	0,008	13	3,25	3,19	0,06	0,004
6	3,85	3,85	0	0	14	3,00	3,80	0,80	0,640
7	3,45	3,74	0,290	0,084	15	3,80	3,73	0,07	0,005
8	4,95	4,39	0,560	0,310	16	4,70	4,37	0,33	0,110

На заключному етапі статистичних розрахунків перевірялась гіпотеза про адекватність моделі, що описується рівнянням (11), за критерієм Фішера (F -критерій). Таким чином, критерій Фішера показує, наскільки обрана модель гірша, ніж дослідна:

$$F = \frac{S_{\text{н}}^2}{S_{\text{у}}^2}. \quad (14)$$

Модель рахується адекватною, якщо розрахункове значення F -критерію буде меншим за табличне стандартне значення [9]:

$$F^{\text{р}} \leq F^{\text{т}}. \quad (15)$$

Отже, підставивши необхідні значення в рівняння (14), отримаємо

$$F^{\text{р}} = \frac{0,22}{0,17} = 1,29.$$

Як показує розрахунок, значення F -критерію при зношуванні є меншим за табличне при п'ятивідсотковому рівні значущості: $F^{\text{р}} = 1,29 < F^{\text{т}} = 2,12$.

Таким чином модель вважається адекватною.

Аналогічно отримали математичні моделі, що описують вплив конструкторсько-технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованих поверхонь зубків зі збільшенням площі армування за шириною l та висотою h зубків (рис. 3), які описуються відповідно рівняннями:

$$y = 2,79 - 0,52x_1 - 0,15x_2 - 0,29x_3 - 0,22x_4, \quad (16)$$

$$y = 4,02 - 0,26x_1 - 0,38x_2 + 0,09x_3 + 0,01x_4. \quad (17)$$

На базі проведених дослідів було отримано математичні моделі (11), (16), (17), що описують вплив конструктивного оформлення та технологічних параметрів виготовлення на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт.

Висновки

1. Аналіз отриманих математичних моделей дозволив відмітити спільні особливості впливу досліджуваних факторів на процеси зношування армованих елементів озброєння, а саме: зі збільшенням кута загострення зубків 2γ і розмірів зерен реліту величина зношування зменшується. Це зумовлено тим, що зі зростанням кута загострення тіло зубка стає міцнішим, як наслідок, зубок буде стійкішим до процесу зношування. При цьому найбільший сумарний вплив досліджуваних факторів відмічається для зубків, виготовлених за схемою збільшення площі армування за шириною зразка. Зі збільшенням розмірів зерен реліту зношування робочої поверхні зубків зменшується. Фізичне пояснення полягає в тому, що за умовами проведеного дослідження шарошкове бурове долото працює у породах середньої твердості. Це дозволяє отримувати менші значення зношування в порівнянні з більш твердими породами типу доломіт, аргіліт – “Т”.

2. Із всіх факторів, розглянутих окремо, найбільший вплив на величину зношування армованих поверхонь зубків має кут загострення 2γ , тобто фактор X_1 . У меншій мірі порівнянно з кутом загострення на величину зношування впливає підігрів поверхні зубка перед армуванням (фактор X_3). Цей фактор сприяє більш повному проходженню термічних процесів, які зумовлюють взаємодію армуючого матеріалу зубка з матеріалом основи, що сприяє більш міцному зчепленню зерен реліту з основним металом і, як наслідок, збільшенню стійкості від викришування зерен реліту. Підвищення температури підігріву поверхні зубка призводить до зменшення зношування армованої поверхні зубка, виготовленого за схемами збільшення площі армування за шириною зразка та обмеженою діагоналлю. Для зубків, виготовлених за схемою збільшення площі армування за висотою зразка, характер дії даного фактора протилежний, тобто з її збільшенням зростає величина зношування. Початкове при-туплення для зубків (фактор X_4) суттєво не впливає на показники зношування армованого озброєння шарошкових доліт.

3. Отримані результати проведених досліджень показують, що оптимальною схемою наплавлення робочої поверхні зубків є схема збільшення площі армування за шириною зубка. При цьому оптимальними значеннями цих параметрів будуть такі: $X_1 = 60^\circ$; $X_2 = 1,6$ мм; $X_3 = 650^\circ\text{C}$; $X_4 = 1,5$ мм.

Резюме

С целью оценки влияния конструкторско-технологических параметров изготовления армированного вооружения шарошечных буровых долот на величину их износа в процессе бурения проведены исследования на разработанном стенде. По результатам исследований получены математические модели, описывающие влияние этих параметров на показатели износа армированных поверхностей зубцов бурового инструмента, изготовленных по разным схемам армирования их рабочих поверхностей. Показано, что оптимальной схемой наплавки рабочей поверхности зубцов релитом является увеличение площади армирования по ширине зубца.

1. Жидовцев Н. А., Кершенбаум В. Я., Гинзбург Э. С. Долговечность шарошечных долот. – М.: Недра, 1992. – 266 с.
2. Крылов К. А., Стрельцова О. А. Повышение долговечности и эффективности буровых долот. – М.: Недра, 1983. – 206 с.
3. Закиров Н. Н. Контактная прочность вооружения буровых долот // Бурение и нефть. – 2003. – № 7-8. – С. 46 – 47.
4. Шамт В. М. Порошковая металлургия. Спеченные композиционные материалы. – М.: Металлургия, 1983. – 235 с.

5. *Семеген О. М.* Пристрій для дослідження параметрів ударно-абразивного зношування елементів озброєння бурового інструменту // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 2 (43). – С. 152 – 158.
6. *Пат. 101775 Україна, МПК G01N 3/56 (2006.01).* Стенд для випробування на абразивне зношування елементів озброєння бурового інструменту / О. М. Семеген, З. М. Одосій, П. І. Войтенко, М. М. Семеген. – Чинний від 25.04.2013.
7. *Семеген О. М.* Вплив форми армованої поверхні зубків озброєння шарошkových доліт на енергоємність руйнування гірської породи // Наук. вісн. Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2013. – № 3 (34). – С. 134 – 139.
8. *Пляскин И. И.* Оптимизация технических решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
9. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Поступила 23. 09. 2013