

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Перспективним технологічним процесом зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильної колони є вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування. Однак формування зміцнених поверхневих шарів вказаним технологічним процесом, не дивлячись на набутий досвід, має ряд невирішених питань, зокрема, такого, як недостатній рівень науково-методичної бази розробки зміцнених поверхневих шарів в умовах одночасної дії статичних та динамічних навантажень, агресивного оточуючого середовища, відсутність принципу керування технологічним процесом за критеріями зносостійкості втомної міцності та корозійної стійкості, який базується на оптимізації технологічного процесу. В наведеній статті досліджено вплив параметрів вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмОВОГО азотування на зносо- і корозійну стійкість, межу витривалості сталі 40 ХН. За результатами досліджень отримано математичні моделі залежності інтенсивності зношування, межі витривалості і питомого збільшення маси від технологічних та експлуатаційних факторів. За допомогою математичних моделей проведено оптимізацію технологічного процесу вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмОВОГО азотування.

Ключові слова: вакуумні технології; іонно-плазмове азотування; критерії; фактори; математичні моделі; оптимізація.

Вступ

Одним із основних напрямів розвитку нафтогазової галузі держави є підвищення рівнів видобутку вуглеводневої сировини. При бурінні і освоєнні нафтових і газових свердловин важливими елементами, які значною мірою визначають надійність бурильних і обсадних труб, є замкові різьбові з'єднання (ЗРЗ). Експлуатаційні характеристики ЗРЗ бурильних труб, значною мірою впливають на технічні показники буріння і економічну ефективність будівництва свердловин.

Постановка проблеми. Підвищення довговічності ЗРЗ бурильної колони (БК) є сьогодні сукупністю багатьох часткових проблем створення умов для забезпечення максимального використання їх потенційних можливостей. Одним із напрямків вирішення є застосування досягнень у галузі формування захисних зміцнених поверхневих шарів, які дозволяють із науковою обґрунтованістю та техніко-економічною цілеспрямованістю вирішувати питання на етапах проектування та виготовлення бурильних труб і підтримання високого рівня надійності ЗРЗ БК у межах експлуатаційних навантажень.

Проте, технологічні процеси зміцнення, що використовуються при виготовленні бурильних труб, необхідні, але недостатні, вони обмежені рівнем розвитку галузей техніки й технологій, які їх реалізують, ресурс зміцнених ними елементів бурильних труб не відповідає сучасним технічним вимогам, а в багатьох випадках залишається низьким. Внаслідок чого, зміцнення ЗРЗ БК на етапах проектування та виготовлення бурильних труб, надання їм необхідного рівня характеристик міцності залишається важливою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про можливості виробництва, а також використання досвіду розвитку технологій зміцнення як в Україні, так і за кордоном, для підвищення надійності ЗРЗ БК шляхом застосування сучасних технологічних процесів. Перспективним технологічним процесом є вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування (ВГТЦПА) [1]. Однак формування зміцнених поверхневих шарів ВГТЦПА, не дивлячись на набутий досвід, має ряд невирішених питань, зокрема, такого, як недостатній рівень науково-методичної бази розробки зміцнених поверхневих шарів в умовах одночасної дії статичних та динамічних навантажень, агресивного оточуючого середовища, які часто призводять до зношування та корозійно-втомних руйнувань елементів БК, а відповідно до аварій і ускладнень, на ліквідацію яких витрачаються значні кошти. Крім цього, є відсутність принципу керування технологічним процесом ВГТЦПА за критеріями зносостійкості втомної міцності та корозійної стійкості, який базується на оптимізації технологічного процесу. Розв'язання цього проблемного питання спроможне забезпечити єдиний науково-обґрунтований підхід щодо їх системного дослідження та впровадження.

Мета статті. Враховуючи вищезазначене метою статті є розробка принципу керування ВГТЦПА шляхом його оптимізації за критеріями зносостійкості, втомної міцності та корозійної стійкості.

Виклад основного матеріалу дослідження

При проведенні експериментальних досліджень, задачу оптимізації технологічного процесу ВГТЦПА розглянуто як багатофакторну з

врахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Об'єктивна та повна оцінка умов роботи елементів бурильної колони зі сталі 40ХН дозволяє в якості критеріїв оптимізації вибрати межу витривалості (Y_1), інтенсивність зношування (Y_2) та питоме збільшення маси зразка (Y_3). В якості керованих факторів вибрано: час дифузійного насичення (X_1), тиск реакційного газу (X_2), склад реакційного газу (X_3), температура газу (X_4), величина температурного циклу (X_5) та питоме навантаження в умовах тертя ковзання (X_6) (таблиця 1).

Таблиця 1.

Фактори та рівні їх варіювання

№	Назва факторів	X	Рівні варіювання		
1	Час дифузійного насичення, хв	X_1	90...240		
2	Тиск реакційного газу, Па	X_2	25...250		
3	Склад реакційного газу	X_3	60%Ar+40% N ₂	75%Ar+25% N ₂	90%Ar+10% N ₂
4	Температура газу, °К	X_4	673	773	873
5	Величина температурного циклу, °К	X_5	25...125		
6	Навантаження, МПа	X_6	2,5–25 (крок 2,5)		

В якості експериментального обладнання для формування зміцненого поверхневого шару використано установку ВПА-1, яка розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Формування зміцненого поверхневого шару ВГТЦПА на сталевих зразках здійснювалося згідно з планом експерименту, який згенеровано на основі ЛП-чисел (всього 16 модифікацій) (таблиця 2). Для дослідження використовувалися зразки зі сталі 40ХН, що є конструкційним матеріалом для елементів БК.

Таблиця 2.

План експерименту в натуральних координатах

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	170	140	75%Ar+25%N ₂	773	75	14
2	130	190	60%Ar+40%N ₂	873	50	20
3	200	80	90%Ar+10%N ₂	673	100	8
4	110	170	90%Ar+10%N ₂	873	90	5
5	190	50	75%Ar+25%N ₂	773	40	16
6	150	100	75%Ar+25%N ₂	673	110	22
7	220	220	60%Ar+40%N ₂	773	60	11
8	100	230	90%Ar+10%N ₂	673	44	3
9	180	120	60%Ar+40%N ₂	873	95	15
10	140	70	90%Ar+10%N ₂	773	65	20
11	210	180	75%Ar+25%N ₂	673	120	9
12	120	90	60%Ar+40%N ₂	873	80	7
13	190	200	90%Ar+10%N ₂	673	30	18
14	160	130	60%Ar+40%N ₂	773	106	24
15	230	40	75%Ar+25%N ₂	873	56	12

16	90	150	75%Ar+25%N ₂	673	70	8
----	----	-----	-------------------------	-----	----	---

Після проведення експериментальних досліджень і обробки результатів отримано математичні моделі, які описують залежність межі витривалості, інтенсивності зношування та корозійної стійкості від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

$$Y_1 = 554,961 + 321,398x_1^2 x_2^2 x_3 x_5^2 + 14,4129x_4 + +39,8087x_1x_4x_5;$$

$$Y_2 = 1,61058 + 0,494431x_1^2 x_6^2 - 0,376419x_4^2x_6^3 - - 0,273589x_4^2 - 0,281322 x_3^2 x_6^2 + 0,124359x_6^2 - - 0,141168x_1^2x_5^2;$$

$$Y_3 = 0,252985 + 0,0232932 x_2^2 x_4^2 - - 0,01990961x_3^2 - 0,02081x_5^2 - 0,0212151x_1x_5 - - 0,0921139x_3^2x_4^2x_5^2 - 0,0908706x_1^2x_3^2x_4^2;$$

де Y_1 , Y_2 , Y_3 – математичні моделі у кодованих значеннях для межі витривалості (Y_1), інтенсивності зношування (Y_2) та питомого збільшення маси зразка (Y_3).

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$x_1 = 0,0142815(X_1 - 160,604);$$

$$x_1^2 = 1,64458(X_1^2 - 0,0191164X_1 - 0,372824);$$

$$x_1^3 = 3,31219(X_1^3 - 0,0582365X_1^2 - 0,654433 X_1 + 0,0145849);$$

$$x_2 = 0,0100246(X_2 - 136,182);$$

$$x_2^2 = 1,56832(X_2^2 - 0,0387083X_2 - 0,34791);$$

$$x_2^3 = 3,195(X_2^3 - 0,0147624X_2^2 - 0,663917 X_2 - 0,08331);$$

$$x_3 = 1(X_3 - 1);$$

$$x_3^2 = 1,6(X_3^2 - 0,625);$$

$$x_4 = 0,00941176(X_4 - 766,75);$$

$$x_4^2 = 1,64632(X_4^2 - 0,0907563X_4 - 0,605536);$$

$$x_5 = 0,0227556(X_5 - 74,8047);$$

$$x_5^2 = 1,55962(X_5^2 - 0,0132701X_5 - 0,354272);$$

$$x_5^3 = 3,1495(X_5^3 - 0,00418042X_5^2 - 0,675089X_5 - 0,00322023);$$

$$x_6 = 0,098507 (X_6 - 13,4424);$$

$$x_6^2 = 1,66877 (X_6^2 - 0,0706331X_6 - 0,349593);$$

$$x_6^3 = 3,23485 (X_6^3 - 0,0766846X_6^2 - 0,623196X_6 - 0,0021555).$$

де X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 та X_6 – конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерії оптимізації, які характеризують межу витривалості, інтенсивність зношування та корозійну стійкість сталі 40ХН із зміцненим поверхневим шаром ВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 1...3).

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функцій відгуку побудовою відповідних геометричних поверхонь, які представлено на рис. 4...6.

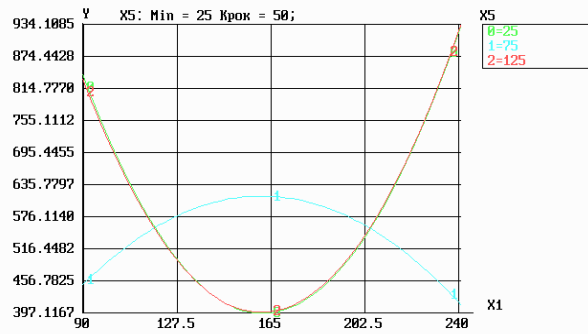


Рис. 1. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_5)$

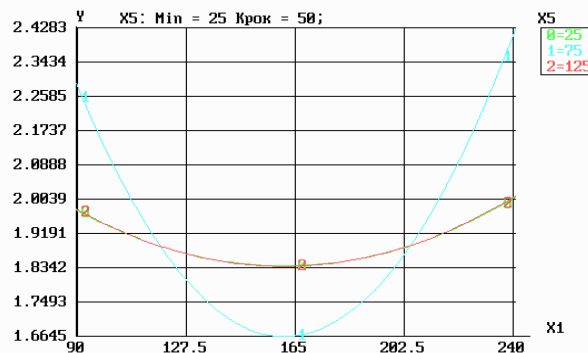


Рис. 2. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_5)$

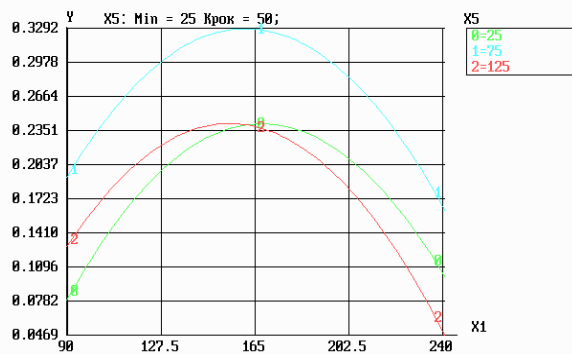


Рис. 3. Графіки частинних рівнянь регресії $Y_3 = f(X_1, X_5)$

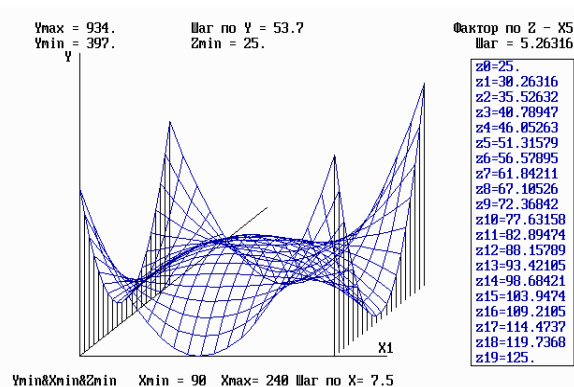


Рис. 4. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

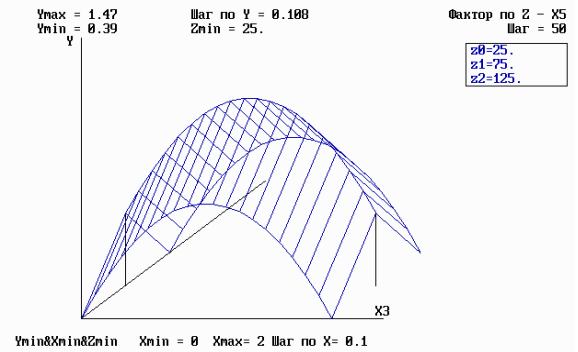


Рис. 5. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_3, X_5)$ в тривимірному просторі

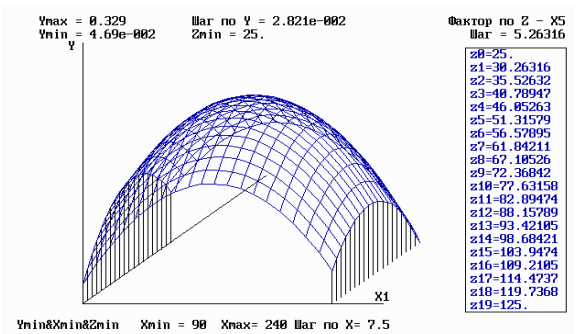


Рис. 6. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

При вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації об'єкт дослідження характеризується декількома критеріями оптимізації, такими як: межа витривалості (Y_1), інтенсивність зношування (Y_2) та питома збільшення маси зразка (Y_3). Унаслідок цього постає проблема вибору важливості цих критеріїв і призначення їм вагових коефіцієнтів. Це пов'язано з тим, що згідно з реальною постановкою задачі оптимізації вплив конкретного критерію на те оптимальне значення режиму технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару може бути різним (більш сильним або менш). Крім того, покращуючи один критерій можна неминуче погіршити значення інших, тобто вони є нерівнозначними. Тому і виникає задача визначення деякої компромісної точки, яка в рівній мірі може задовольняти всім вимогам (компромiс за Парето).

Згідно методики математичного планування експерименту [2], визначення узагальненого критерію, для кожного дослідження експериментальних випробувань [3], полягало у використанні системи експертних оцінок (експерти з Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України), згідно якої кожному критерію оптимізації встановлено "рейтинг". За результатами всіх відповідей виконується розрахунок рангів та вагових коефіцієнтів.

Визначення рангів проводилося за формулою:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} M_i}{n_i} \quad (1)$$

де M_i – місце значимості i -го показника;
 p_i – кількість експертів в оцінці даного показника.

Вагові коефіцієнти визначалися за формулою:

$$K_i = 1 - \frac{P_i - P_{i \min}}{m - 1} \cdot d \quad (2)$$

де P_i – ранг поточного i -го показника;
 $P_{i \min}$ – ранг i -го показника, що має найважливіше значення;
 m – кількість показників;
 d – діапазон зміни вагових коефіцієнтів показників (0,5...1);
 K_i – ваговий коефіцієнт i -го показника.

Результати обчислень представлено в табл. 3. Таким чином, на основі математичних моделей та результатів експериментальних досліджень проведено визначення оптимальних параметрів технологічного процесу формування зміщеного поверхневого шару вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням в імпульсному режимі.

Таблиця 3

Значення рангу критеріїв оптимізації

Експерти	Критерії оптимізації		
	σ_{-1}	I_{3H}	Δm
Експерт 1	1	2	3
Експерт 2	2	1	3
Експерт 3	1	2	3
Експерт 4	1	2	3
Експерт 5	1	3	2
Експерт 6	2	3	1
Експерт 7	1	3	2
Ранг P_i	1,29	2,26	2,43
Ваговий коефіцієнт K_i	1	0,756	0,715

Розрахунок узагальненого критерію оптимізації $y_{узаг}$ здійснювався за формулою:

$$y_{узаг} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jr}]^2 \cdot W_j^2} \quad (3)$$

Література

1. Мірненко В. І. Підвищення довговічності елементів бурильної колони методом дифузійного насичення при вакуумному газотермоциклічному іонному азотуванні в імпульсному режимі / Б. О. Чернов, О. В. Радько, М. Я. Ткач // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

де $y_{узаг}$ – значення узагальненої цільової функції для r -го дослідження експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ($y_{узаг} \rightarrow 0$) і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1; D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j -го відгуку (критерію оптимізації) у r -му дослідженні експерименту, залежно від обраної для певного критерію оптимізації мети це значення обчислюється за різними формулами; W_j – вага j -го критерію оптимізації (відгуку); m – кількість критеріїв якості (відгуків).

Результати розрахунку ефективності узагальненого критерію якості наведено в табл. 4.

З таблиці видно, що найбільше значення ефективності критерію якості (найменше значення узагальненого критерію) відповідає другому дослідженню таблиці 2, а реалізовані параметри його формування і є оптимальними. Це значення узагальненого критерію якості є, по суті, відстанню точки факторного простору до гіпотетичної найкращої точки.

Таблиця 4

Результати багатокритеріальної оптимізації

№	Номер дослідження	Коефіцієнт ефективності ($y_{ефект}$)
1	2	0,683866596
2	9	0,603737245
3	8	0,566761496
4	13	0,516796803

Висновки й перспективи подальших досліджень.

Таким чином, у результаті проведеної з використанням одержаних математичних моделей багатокритеріальної (компроміс за Парето) оптимізації, було знайдено найоптимальніше поєднання рівнів факторів, що впливають на критерії оптимізації: час дифузійного насичення (X_1) – 130 хв., тиск реакційного газу (X_2) – 190 Па, склад реакційного газу (X_3) – 60%Ar+40%N₂, температура газу (X_4) – 873 °K, величина температурного циклу (X_5) – 50 °K.

НАН України. – 2013. – Вып. 16. – С. 136–142.
 2. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО “Укрспецмонтажпроект”, 1998. – 274 с.
 3. Лапач С. Н., Пасечник М. Ф., Чубенко А. В. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка. – К.: ЗАТ “Укрспецмонтажпроект”, 1999. – 312 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВАКУУМНОГО ГАЗОТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ ЗАМКОВЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНОЙ КОЛОНЫ

Николай Ярославович Ткач (слушатель)

Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

Перспективным технологическим процессом упрочнения замковых резьбовых соединений буровой колонны есть вакуумное газотермоциклическое ионно-плазменное азотирование. Но формирование упрочненных поверхностных слоев указанным технологическим процессом, не смотря на полученный опыт, имеет ряд не решенных вопросов, таких, как недостаточный уровень научно-методической базы разработки упрочненных поверхностных слоев в условиях одновременного действия статических и динамических нагрузок, агрессивной окружающей среды, отсутствие принципа управления технологическим процессом по критериям износостойкости усталостной прочности и коррозионной стойкости, который базируется на оптимизации технологического процесса. Было проведено исследование влияния параметров вакуумного газотермоциклического ионно-плазменного азотирования на износ- и коррозионную стойкость, предел выносливости стали 40 ХН. По результатам исследований получены математические модели зависимости интенсивности изнашивания, предела выносливости и удельного увеличения массы от технологических и эксплуатационных факторов. С помощью математических моделей проведена оптимизация технологического процесса вакуумного газотермоциклического ионно-плазменного азотирования.

Ключевые слова: вакуумные технологии; ионно-плазменное азотирование; критерии; факторы; математические модели; оптимизация.

OPTIMIZATION OF VACUUM GASTHERMALCYCLIC ION-PLASMA NITRIDING TECHNOLOGICAL PROCESS OF THREADED TOOL JOINT OF DRILL STRING

Mykola Y. Tkach (Military Student)

National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine

Promising technological process of strengthening threaded tools joint of a drill string is gasthermalcyclic ion-plasma nitriding. However, the formation of hardened surface layers by the specified process, despite the experience gained, has a some unresolved issues, such as inadequate level of scientific and methodological basis of hardened surface layers development under the conditions the simultaneous action of static and dynamic loads, corrosive environment, lack of technological process control principle according to durability criteria of fatigue strength and corrosion resistance, which is based on technological process optimization. The influence of vacuum gasthermalcyclic ion-plasma nitriding parameters on abrasion and corrosion resistance, fatigue strength limit of 40 HN steel was conducted in the article. By result of researches, the mathematical dependence models of ageing intensity, the fatigue resistance limit and specific increase in weight from technological and operational factors were obtained. Using mathematical models the technological process optimization of gasthermalcyclic ion-plasma nitriding was conducted.

Keywords: vacuum technology; ion-plasma nitriding; criteria; factors; mathematical models; optimization.

References

- 1. Mirnenko V.I.,** Chernov B.O., Radko O.V., Tkach M.Y. (2013) Increasing the durability of a drill string by diffusion saturation method in vacuum gasthermalcyclic ion nitriding in a pulsed mode. [*Pidvyshchennia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony metodom dyfuziinoho nasychennia pry vakuumnomu hazotermotsyklichnomu ionnomu azotuvanni v impulsnomu rezhymi*], Sbornik nauchnyih trudov Institutu sverhtverdyih materialov im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy, – No. 16, pp. 136 – 142. **2. Radchenko S.G.** (1998) Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering. [*Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii*], ZAO “Ukrspetsmontazhproekt”, Kiev, 274 p. **3. Lapach S.N.,** Pasechik M.F., Chybenko A.V. (1999), Statistical methods in pharmacology and marketing of pharmaceutical market. [*Statisticheskie metody v farmakologii i marketinge farmatsevticheskogo ryinka*], ZAT “Ukrspetsmontazhproekt”, Kiev, 312 p.

Отримано: 17.09.2014 року