

УДК 519+33658:621.78:519.866

Н. Ю. Шевченко,

кандидат економічних наук,

Д. В. Гузенко,

Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

## УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ТЕРМООБРОБКИ МЕТАЛУ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ

**Постановка проблеми.** Термічною обробкою називається технологічний процес теплової обробки металів і сплавів, у результаті якого змінюються їх властивості в потрібному напрямку.

Процесами термічної обробки керують два основних елементи – температура і час. Тому будь-який процес термічної обробки можна зобразити у вигляді графіка, де по осі ординат відкладається температура, а по осі абсцис – час [1]. При термічній обробці сталі потрібно точно знати критичні температури, при яких відбуваються ті чи інші перетворення. Регулюючи температуру і час, можна здійснити такі види термічної обробки сталі: загартування, нормалізація, відпал, відпуск.

Для ефективного управління технологічним процесом термообробки необхідно сформувати комплексну систему, що дозволяє з урахуванням технічних особливостей моделювати процес термообробки металів.

Моделювання технологічних процесів термічної обробки ставить перед собою мету встановити найбільш економічний спосіб обробки. При цьому обробка деталей температурою повинна забезпечувати виконання вимог, що пред'являються до міцності і пластичності металів, з яких виготовлена заготовка.

Актуальність напряму дослідження обумовлена тим, що управління технологічним процесом термообробки за допомогою моделювання його основних елементів дозволить підвищити якість матеріалу при заданих обмеженнях, збільшити продуктивність праці технолога за рахунок виконання робіт з більшою точністю.

**Аналіз останніх досліджень.** Управлінню технологічним процесом з метою знаходження оптимальних параметрів термообробки завжди присвячувалося багато уваги науковців та практиків (В.О. Крупицького [1], О.Н. Тихонова [2], К.З. Шепеляковського [3] та ін.). Новим підходам до управління технологічним процесом присвячені роботи М.В. Дилигенського, Л.Г. Димова, П.В. Севастьянова [4], Д.О. Мережка, О.О. Соловйової та ін.

Проте потребують подальшого розвитку та вдосконалення підходи до визначення оптимальних параметрів технологічного процесу з позиції досягнення інтегрального ефекту.

**Метою статті** є опис математичної моделі управління технологічним процесом з метою визначення оптимальних параметрів процесу термічної обробки металу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Різноманітність технологічних процесів і параметрів, що впливають на їх ефективність, приводять до різноманіття моделей, що використовуються для управління технологічними процесами.

На практиці для вибору оптимального технологічного процесу серед інших використовують методи багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності. Опис технологічного процесу можна провести, використовуючи сукупність наближених моделей різної складності, що містять різні набори невизначених параметрів. Це визначає необхідність структурно-параметричної ідентифікації як загального підходу до підвищення якості опису аналізованих процесів [3].

Розглянемо технологічний процес термічної обробки прокату [3]. Термічна обробка є останньою операцією в технологічному ланцюгу виробництва прокату. Правильний вибір режимів термообробки з урахуванням хімічного складу металу і його температури після гарячої прокатки повинен забезпечити необхідні механічні властивості сталі і розмір зерна при обмеженнях технологічного характеру на значення режимних параметрів і відсотковий вміст основних компонентів складу сталі.

Технологічна схема термообробки прокату є двостадійною. Вона передбачає ступінчасте водяне охолодження в чотирьох секціях. Для вирівнювання температурного поля по товщині прокату між секціями передбачені розриви (компенсаційні ділянки). Установка режиму охолодження здійснюється включенням необхідної кількості форсунок в секціях водяного охолодження. Після охолодження від температур 1010÷1070 до 750÷900 °С на першій стадії прокат потрапляє на гвинтоукладник. Далі відбувається їх менш інтенсивне, ніж на першій стадії, охолодження повітрям на спеціальному транспортері. Транспортер має декілька зон охолодження, під якими встановлені нагнітають вентилятори.

У відповідності з цим основними факторами, що визначають технологічний режим термообробки прокату, є:

- тиск газового середовища  $p$ ;
- витрата газової середовища на 1 м. п. виробу  $\varepsilon$ ;
- швидкість охолодження  $\Delta$ .
- відносні витрати води в секціях водяного охолодження  $T$ .

Основними показниками якості процесу термічної обробки є такі характеристики металу:

- межа міцності  $\sigma_B$ ;
- відносне звуження  $\psi$ ;
- відносне подовження  $\delta$ ;
- розмір зерна  $d$ .

Для «зв'язування» вихідних показників якості з факторами, що визначають технологічний режим, пропонується побудувати регресійну модель.

Оскільки в розглянутому випадку показники якості багато в чому залежать і від вихідного хімічного складу сталі, в число факторів слід включити відсотковий вміст основних легуючих компонентів, наприклад,  $C$  та  $Mn$ .

Тоді в загальному вигляді рівняння множинної лінійної регресії матимуть вигляд:

$$\sigma_B = f(T, C, Mn, p, \varepsilon, \Delta), \quad (1)$$

$$\delta = f(T, C, Mn, p, \varepsilon, \Delta), \quad (2)$$

$$\psi = f(T, C, Mn, p, \varepsilon, \Delta), \quad (3)$$

$$d = f(T, C, Mn, p, \varepsilon, \Delta), \quad (4)$$

$$\theta = f(T, C, Mn, p, \varepsilon, \Delta). \quad (5)$$

Загальний вигляд рівняння множинної регресії:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (6)$$

де  $y$  – залежна змінна;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – незалежні змінні (фактори).

Множинний регресійний аналіз є розширенням парного регресійного аналізу. Він застосовується в тих випадках, коли поведінку залежної змінної необхідно пов'язати з впливом більш ніж однієї факторної, незалежної змінної [2]. Доцільність використання множинної регресії також підтверджується адекватністю регресійних моделей, побудованих науковцями для різних прикладних задач [7-8].

Побудова моделі множинної регресії полягає в знаходженні рівняння зв'язку декількох показників  $y$  та  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . В якості експерименту можна використати логістичну криву для визначення форми зв'язку:

$$y_i = \frac{a}{1 + b \cdot e^{f(x_i)}}. \quad (7)$$

Логістичні криві добре описують процеси, які мають «лавиноподібний» характер, тобто коли приріст в основному залежить від досягнутого рівня, а різного роду обмеження, фактори практично не враховуються. S-подібні криві описують два послідовних процеси: один із прискоренням розвитку, інший – з уповільненням. Логістичні криві при певних значеннях параметра мають асимптоти, які проходять вище цих кривих, тому ці криві придатні для опису різного виду технічних процесів.

Перетворення логістичної кривої до лінійного виду представлено у формулах (8-11):

$$\left(\frac{y_i}{a}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{1 + b \cdot e^{-x_i}}\right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\frac{a}{y_i} = 1 + b \cdot e^{-x_i}, \quad (9)$$

$$\frac{a}{y_i} - 1 = b \cdot e^{-x_i}, \quad (10)$$

$$\ln\left(\frac{a - y_i}{y_i}\right) = \ln b - x_i. \quad (11)$$

Зробивши заміну змінних і параметрів ( $y^*_i = \ln\left(\frac{a - y_i}{y_i}\right)$ ;  $B = \ln b$ ), отримаємо лінійну регресію:  $y^*_i = B \cdot (-x_i)$ .

Для аналізу рівняння множинної регресії застосовується метод найменших квадратів (МНК).

В загальному випадку «якість» економетричної моделі оцінюється за допомогою різних характеристик, найпоширенішою з яких є середня помилка апроксимації (12):

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (12)$$

Вважається, що допустима межа помилки не повинна перевищувати 8-10% [4].

Розглянутий технологічний процес характеризується наявністю сукупності приватних критеріїв якості та обмежень, які в загальному випадку знаходяться в протиріччі один з одним, коли поліпшення одного з них веде до погіршення іншого і навпаки. Це неминуче вносить елементи якісного, суб'єктивного характеру в постановку задачі оптимізації, розв'язання питань про компроміс між приватними критеріями, про їх ранжирування і згортку в узагальнений показник якості технологічного процесу.

Іншим джерелом невизначеності є приватні критерії й обмеження, у створенні яких неминуче присутня інформація, заснована на досвіді та інтуїції осіб, відповідальних за ведення процесу. Тому для опису критеріїв якості доцільно застосувати положення теорії нечітких множин [3]. Для формалізації приватних критеріїв і обмежень пропонується використовувати функції приналежності трапецієвидного типу (рис. 1).

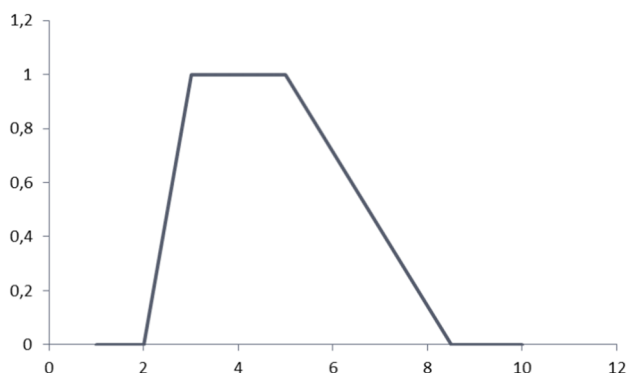


Рис. 1. Графік трапецієподібної функції належності

Трапецієподібна функція приналежності в загальному випадку може бути задана аналітично таким виразом (13):

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (13)$$

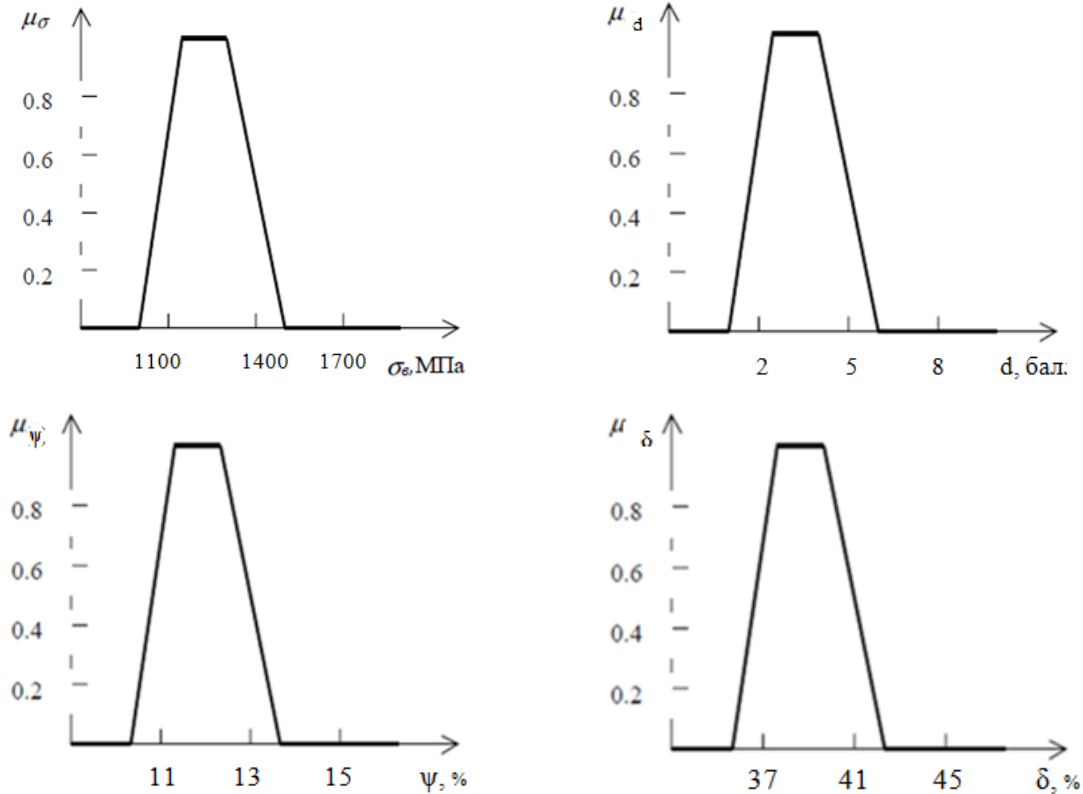


Рис. 2. Функції приналежності приватних критеріїв

Оскільки сформульовані приватні критерії досягаються за різних умов зміни варійованих параметрів технологічного процесу, то оптимальне рішення є компромісом суперечливих вимог. Для

де  $a, b, c, d$  – числові параметри, що приймають довільні дійсні значення і впорядковані відношенням (13).

На рис. 2 представлено функції належності показників якості, що відображають усереднені вимоги до технологічного процесу.

цього приватні критерії слід агрегувати в узагальнений критерій якості процесу з урахуванням відносної важливості задоволення різних вимог.

Узагальнений критерій якості процесу прийме вигляд:

$$D(C, Mn, T, v, \varepsilon, \Delta) = \min(\mu_\sigma^{\alpha_1}(\sigma(C, Mn, T, v, \varepsilon, \Delta)), \mu_\psi^{\alpha_2}(\psi(C, Mn, T, v, \varepsilon, \Delta)), \mu_d^{\alpha_3}(d(C, Mn, T, v, \varepsilon, \Delta)), \mu_\delta^{\alpha_4}(\delta(C, Mn, T, v, \varepsilon, \Delta))), \quad (14)$$

де  $\alpha_1 \dots \alpha_4$  – коефіцієнти відносної важливості критеріїв.

Даний критерій  $D$  буде примати значення в діапазоні  $[0;1]$ . Чим ближче інтегральний показник до 1, тим більша частина параметрів якості лежать в своїх оптимальних рівнях і вище рівень якості деталі в цілому.

Доцільно ввести наступні групи якісної оцінки параметра  $D$ :

- «Низький рівень якості»,  $D \in [0;0.6)$ ;
- «Прийнятний рівень якості»,  $D \in [0.6;0.8)$ ;
- «Високий рівень якості»,  $D \in [0.8;1)$ .

Вихідні дані моделі для практичного експерименту наведені в табл. 1.

Приклад реалізації моделі багатокритеріальної оптимізації процесу термообробки прокату представлений на рис. 3, де наведене рівняння регресії для параметру «межа міцності».

Результати моделювання всіх параметрів якості технологічного процесу термообробки наведені на рис. 4.

Для заданих умов експерименту значення інтегрального показника якості технологічного процесу складає 0,875, що свідчить про досягнення високого рівня якості технологічного процесу при параметрах, наведених в табл. 2.

**Висновки.** Управління технологічними процесами зводиться до встановлення найбільш економічного способу обробки металу. При цьому обробка деталей температурою повинна забезпечувати виконання вимог, що пред'являються до міцності і пластичності металів з яких виготовлена заготовка. Правильний вибір режимів термообробки з урахуван-

Таблиця 1

Технологічні параметри процесу термообробки

[довідкові дані]

Тиск газового середовища	Витрати газового середовища	Вміст вуглецю	Вміст марганцю	Витрати води	Швидкість охолодження
0,031	49	0,1	0,5	2,5	8,30
0,033	48	0,12	0,53	3,5	9,56
0,035	46	0,14	0,56	4,7	10,34
0,037	44	0,16	0,59	5	10,40
0,039	42	0,18	0,62	5,5	10,85
0,041	40	0,2	0,65	6	11,50
0,043	38	0,22	0,68	6,5	12,50
0,045	36	0,24	0,71	7	13,10
0,047	34	0,26	0,74	9	13,27
0,049	32	0,28	0,77	10	13,75
0,051	30	0,3	0,8	12	14,90
0,053	28	0,32	0,83	13	15,30
Межа міцності	Розмір зерна	Відносне звуження		Відносне подовження	
1250	5	12		43	
1270	5	12		42	
1285	5	12		41	
1290	4	12		40	
1315	4	12		40	
1320	4	13		39	
1340	4	13		39	
1350	3	13		38	
1355	3	14		37	
1360	2	14		36	
1380	2	14		35	
1410	2	12		34	

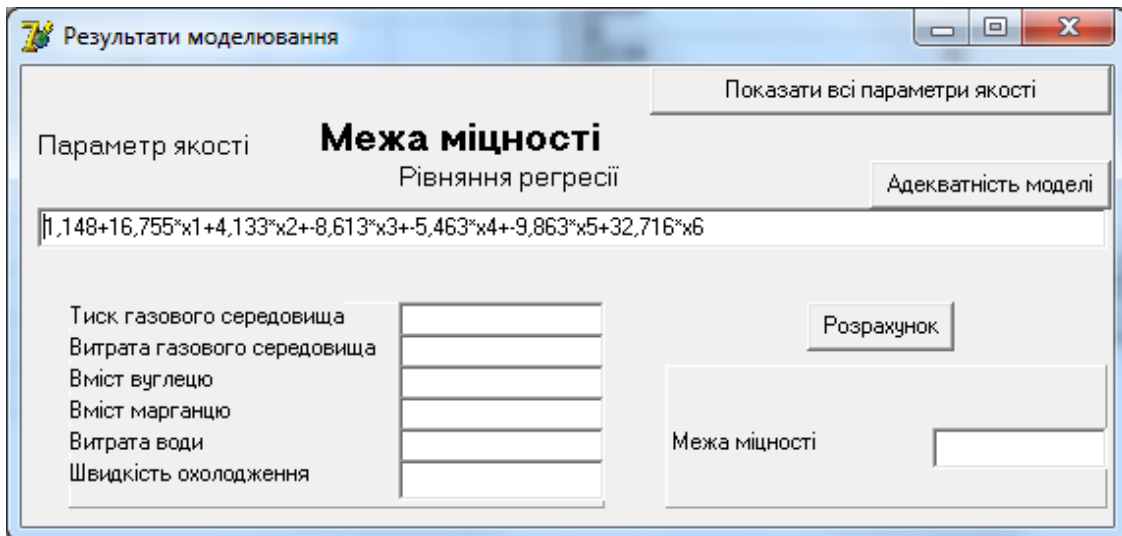


Рис. 3. Моделювання параметру якості «Межа міцності»

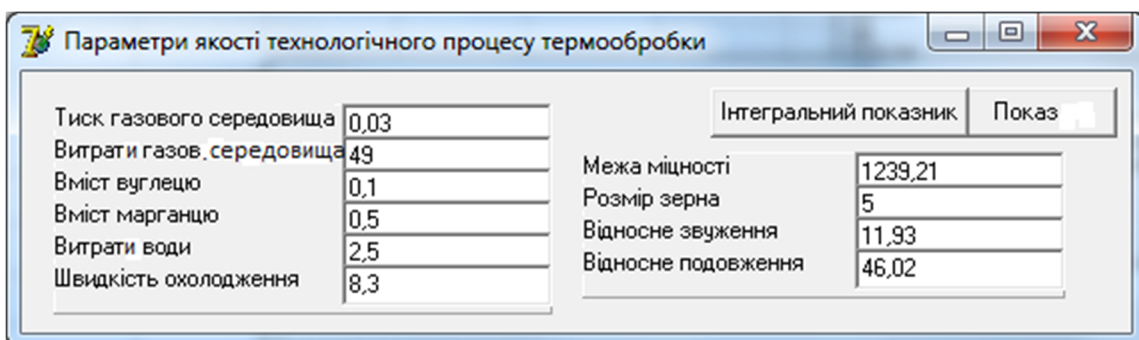


Рис. 4. Параметри якості технологічного процесу термообробки

Таблиця 2

**Оптимальні технологічні параметри процесу термообробки [моделльні дані]**

Тиск газового середовища	Витрати газового середовища	Вміст вуглецю	Вміст марганцю	Витрати води	Швидкість охолодження
0,03	49	0,1	0,5	2,5	8,3

ням хімічного складу металу і його температури після гарячої прокатки забезпечує необхідні механічні властивості сталі і розмір зерна при обмеженнях технологічного характеру на значення режимних параметрів і відсотковий вміст основних компонентів складу сталі. Запропонована математична модель визначення параметрів технологічного процесу термообробки металу дозволяє при заданих вхідних параметрах визначити параметри якості технологічного процесу, а також розрахувати інтегральний показник як компромісний рівень якості технологічного процесу термообробки.

**Література**

1. **Крупницький В.А.** Основы термической обработки: учеб. пособие / В.А. Крупницький. – Л.: Лениздат, 1959. – 120 с. **Лахтина Ю.М.** Термическая обработка в машиностроении: справочник / Под ред. Ю.М. Лахтиной, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с. 2. **Тихонов А.Н.** Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / А.Н. Тихонов, В.Д. Карнер, В.Б. Гласко. – М.: Машиностроение, 2009. – 264 с. 3. **Шепеляковский К.З.** Технология термической обработки металлов / под ред. К.З. Шепеляковского. – Том 2. Изд. 2-е переработ. – М.: Машиностроение, 1967. – 450 с. 4. **Дилигенский Н.В.** Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 397 с. 5. Сучасні технології знімальних робіт у системах управління технологічними процесами / Д.О. Мережко // Гірничий вісник. – 2014. – Вип. 97. – С. 108-111. 6. **Соловйова О.О.** Моделирование технологических процессов и систем / О.О. Соловйова. – Электронне видання кафедри Моделирования складних систем. – 2009. – URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/11872>. 7. **Рядно О. А.** Антиінфляційна політика фінансової безпеки держави / О. А. Рядно, Л. В. Рибальченко. // Вісник економічної науки України. – 2016. – № 2 (31). – С. 161-166. 8. **Chernata T.** Statistical analysis of the relationship of the enterprise indicators of capital use efficiency and the profitability / T. Chernata. // Економічний вісник Донбасу. – 2016. – № 4(46). – С. 145-149.

**Шевченко Н. Ю., Гузенко Д. В. Управління технологічним процесом термообробки металу на основі моделювання його вхідних параметрів**

Розглянуто особливості управління технологічним процесом термообробки металу на машинобудівному підприємстві. Проведено аналіз методи ба-

гатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності. Запропоновано математична модель визначення параметрів якості технологічного процесу термообробки металу. Описано особливості використання логістичної кривої Перла-Ріда і теорії нечітких множин для визначення вхідних параметрів технологічного процесу і його параметрів якості. Представлено алгоритм розрахунку інтегрального показника як компромісного рівня якості технологічного процесу.

*Ключові слова:* управління, моделювання, технологічний процес, множинна нелінійна регресія, інтегральний показник якості, функції приналежності, нечіткі множини.

**Шевченко Н. Ю., Гузенко Д. В. Управление технологическим процессом термообработки металла на основе моделирования его входных параметров**

Рассмотрены особенности управления технологическим процессом термообработки металла на машиностроительном предприятии. Проведен анализ методы многокритериальной оптимизации в условиях неопределённости. Предложена математическая модель определения параметров качества технологического процесса термообработки металла. Описаны особенности использования логистической кривой Перла-Рида и теории нечётких множеств для определения входных параметров технологического процесса и его параметров качества. Представлен алгоритм расчета интегрального показателя как компромиссного уровня качества технологического процесса термообработки.

*Ключевые слова:* управление, моделирование, технологические процесс, множественная нелинейная регрессия, интегральный показатель качества, функции принадлежности, нечёткие множества.

**Shevchenko N.Yu., Guzenko D.V. Management by the technological process of heat treatment of metal on the basis of design of his entry parameters**

Management features are considered by the technological process of heat treatment of metal on a machine-building enterprise. An analysis is conducted methods of multicriterion optimization in the conditions of vagueness. The mathematical model of determination of parameters of quality of technological process of heat treatment of metal is offered. The features of the use of Pearl-Reed's logistic curve and theories of fuzzy sets are described for determination of entry parameters of technological process and his parameters of quality. The algorithm of calculation of integral index is presented as a compromise level of quality of technological process of heat treatment.

*Keywords:* management design, technological process, multiple nonlinear regression, integral index of quality, fuzzy sets

Стаття надійшла до редакції 08.09.2017

Прийнято до друку 12.09.2017