



## Максимизация комплексного показателя качества процесса волочения с учетом квалиметрической оценки параметров производства

*Разработан метод определения рациональных значений управляемых технических, технологических и (или) организационных факторов, обеспечивающих максимально возможный уровень комплексного показателя качества объекта с учетом коэффициентов значимости выбранных единичных показателей качества и неопределенности описания процесса. Метод использован в сфере волочения. Он может послужить основой для улучшения системы управления качеством производства и самой организации, в частности, как эффективное средство получения достоверной информации при принятии решений для удовлетворения требований потребителей. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** квалиметрия, показатели качества объекта, оптимизация управляемых факторов, волочение

*A method for determining the rational values of managed technical, technological and (or) the organizational factors that ensure the highest level of the complex quality index object with regard to the significance of the coefficients of selected individual quality indices and uncertainty of the process was developed. This method is used in the field of drawing. It can serve as a basis for improving the quality management system and the organization, in particular, as an effective means of obtaining reliable information for decision-making to meet customer requirements.*

**Keywords:** qualimetry, quality indices of the object, optimization of controllable factors, drawing

### Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными и практическими задачами

Для общества важным является создание и потребление качественной продукции (услуг). При этом потребитель заинтересован в наивысшем качестве при минимальной цене, а производитель – в получении наибольшей прибыли при минимальных затратах. Это предполагает наличие оптимума некоторого количественного критерия качества продукции, который обычно представляется комплексным показателем качества  $Q$  [1]. Этот параметр формируется совокупностью  $n$  единичных показателей качества  $y_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ), которое определяется нормативными документами (ДСТУ, ГОСТ, ТУ, ISO и т.д.), а также потребностями потребителей и возможностями производителей продукции. Существенную роль играет также значимость  $k_i$  каждого из  $y_i$ , определяемая обычно экспертным методом.

Обычно для обеспечения максимального уровня комплексного показателя качества стремятся обеспечить наивысшие значения единичных показателей качества, что математически представляется решением системы [1]

$$\frac{dQ}{dy_1} = 0; \frac{dQ}{dy_2} = 0; \frac{dQ}{dy_n} = 0, \quad (1)$$

откуда находят соответствующие значения  $y_{i\max}$ . Но при этом вопрос об обеспечении рациональных значений  $y_{i\max}$  остается открытым.

Для управления процессом формирования качества возникает общая проблема поиска такой сово-

купности  $m$  технических, технологических и (или) организационных факторов  $x_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ), которая обеспечила бы приемлемый максимум комплексного показателя качества  $Q$ , минуя явный учет значений  $y_i$ .

### Анализ последних исследований и публикаций

Согласно данным исследования [2], единичные показатели качества  $y_i$  могут быть представлены соответствующими функциями, а комплексный показатель качества функционалом  $Q = f(y_1; y_2 \dots y_i)$ , где  $y_i = \phi(x_1; x_2 \dots x_j)$ .

Указанные зависимости могут быть найдены в ходе специальных исследований, например, путем регрессионного или корреляционного анализа с последующей аналитической аппроксимацией полученных результатов, в частности, разложением функций в ряд [3] и др.

Величину  $Q$ , в зависимости от условий процесса, находят как одно из средних взвешенных: арифметическое, геометрическое, квадратическое или гармоническое [1]. Необходимо также учитывать, что совокупность коэффициентов значимости, единичных показателей качества  $y_i$  подчиняется зависимости [2]

$$\sum_1^n k_i = k_1 + k_2 + \dots + k_n + c \equiv 1, \quad (2)$$

где  $c$  - неопределенность представления процесса формирования качества продукции.

В отличие от понятия «погрешность», здесь термин «неопределенность» применяется в более широком смысле, так как она характеризует не только по-

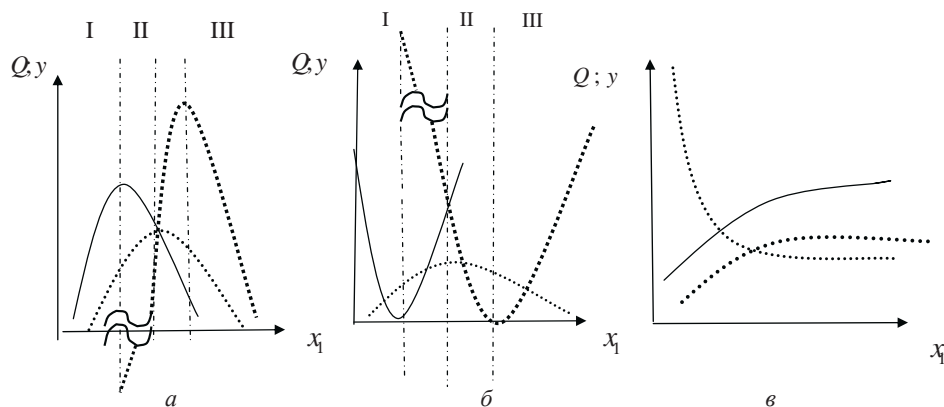


Рис. 1. Некоторые сочетания функций единичных показателей качества, формирующих комплексный показатель качества (обозначения в тексте)

грешности измерений, но и другую информацию, относящуюся к измерениям, например, разнообразие справочных данных, надежность экспертных оценок и т.п.

Тогда комплексный показатель качества при использовании полинома  $z$ -й степени для среднего арифметического взвешенного представляется выражением [2]

$$Q = \sum_{i=1}^n (k_i \sum_{j=1}^m \sum_{h=0}^z (a_{ji} \cdot x_{ji}^h)), \quad (3)$$

де  $0 \leq h \leq z$  - номера членов разложения функций в ряд,  $a_{ji}$  - коэффициенты при соответствующих членах разложения, а система (1) трансформируется к виду

$$\frac{dQ}{dx_1} = 0; \quad \frac{dQ}{dx_2} = 0; \quad \dots \quad \frac{dQ}{dx_m} = 0, \quad (4)$$

откуда находят соответствующие значения  $x_{j \max}$ .

Соответствующий анализ для двух  $x_j$  в общем виде и для условий волочения проволоки был выполнен в работе [2] в нескольких вариантах: при сочетании зависимостей  $y_1 = \phi_1(x_1; x_2)$  и  $y_2 = \phi_2(x_1; x_2)$ , каждая из которых имела максимум или минимум, а также вид возрастающей или убывающей двумерной функции.

**Часть проблемы, которая нуждается в решении, и постановка задачи**

С увеличением количества рассматриваемых  $y_i$  и  $x_j$  резко возрастает число возможных вариантов совмещения указанных параметров при определении  $Q$ .

Так, при рассмотрении трех единичных показателей  $y_i$  качества такие сочетания могут включать: три возрастающие функции, одну возрастающую и две убывающие, две возрастающие и одну убывающую, три убывающие, а также сочетание их с функциями или сами функции, которые имеют, например, один минимум или максимум или несколько экстремумов одного или обоих типов.

Дополнительные сложности вносят уровни коэффициентов  $k_i$  значимости при функциях  $y_i$ , неопределенность  $c$  описания объекта, а также используемый вид среднего взвешенного при представлении комплексного показателя качества  $Q$ . В результате функционал  $Q$  может иметь один или несколько эк-

стремумов или не иметь их вообще. Все это делает решение поставленной задачи в *общем виде* неопределенно объемной и, как следствие, приводит к необходимости рассмотрения в соответствии с некоторым алгоритмом конкретных примеров, важных для практики.

В частности, оказалось целесообразным дополнить анализ, выполненный в работе [2], по формированию комплексного показателя качества с помощью двух единичных показате-

лей качества (предел прочности  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$  проволоки), зависящих от степени деформации  $\epsilon$  металла и полуугла  $\alpha$  конусности волоки, добавочной оценкой влияния третьего единичного показателя: энергетическими затратами при волочении. Это и стало *целью работы*.

**Изложение основных материалов исследований**

Вначале рассмотрели формирование комплексного показателя качества  $Q$  по формуле (3) тремя единичными показателями качества  $y_1 = \phi(x_1)$ ,  $y_2 = \phi(x_1)$  и  $y_3 = \phi(x_1)$ , которые определялись одним  $x_1$  и описывались наглядным сочетанием различных функциональных зависимостей.

Для такого случая при некоторых коэффициентах значимости  $k_1, k_2, k_3$ , и неопределенности  $c = 0$

$$Q = k_1 \cdot y_1 + k_2 \cdot y_2 + k_3 \cdot y_3. \quad (5)$$

Графическая интерпретация части выполненных исследований при  $k_1 = k_2 = k_3$  представлена на рис. 1.

Эти данные свидетельствуют, что при совместном рассмотрении согласно равенству (5) трех выпуклых парабол, в местах нахождения их максимумов в соответствующих сечениях I, II и III (см. рис. 1а) появление максимума их суммы проблематично. Абсцисса такого характерного места (и, следовательно, рационального значения  $x_1$  зависит от формы парабол и, скорее всего, аналогично результатам исследования [2] будет находиться в некотором сечении между I и III. Более того, в месте расположения максимума параболы (например, в сечении I) может образоваться *минимум* суммы трех рассматриваемых функций, а экстремумов может быть несколько.

Соответствующая «зеркальная» ситуация наблюдается на рис. 1б: ордината суммы трех функций в сечении I, которое характерно для *минимума* первой функции, может оказаться *наибольшей*. Здесь также могут иметь место несколько экстремумов обоих видов.

Рис. 1в демонстрирует ситуацию, при которой появление (или отсутствие) максимума суммы ординат функций зависит от интенсивности их изменения.

Если же учесть, что перечень единичных показателей качества и уровни их коэффициентов значимости определяются экспертным методом, то на сум-

марной кривой  $Q$  (на графиках не показана) могут иметь место несколько максимумов и минимумов, причем с превышением по абсолютной величине одним из минимумов  $Q$  его других максимальных значений. Во всех случаях требуется также анализ возможности реализации на практике значений  $x_j$ , найденных аналитически представленным путем.

Переходя к конкретике, рассмотрим формирование комплексного показателя  $Q$  качества процесса волочения по формулам (2)-(4) комбинацией трех единичных показателей качества: предел прочности  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$  и энергозатраты на деформацию металла, зависящих от  $\varepsilon$  и  $\alpha$  (понятно, что в реальности формирование  $Q$  может быть обусловлено и другими факторами).

Необходимые зависимости  $\sigma_B = \phi_1(\varepsilon, \alpha)$  и  $\delta = \phi_2(\varepsilon, \alpha)$  приняты по данным И. Юхвеца (рис. 2) при учете

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1-\gamma}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  - относительная степень деформации металла в пропуске, а в качестве характеристики энергозатрат использована формула Е. Зибеля для определения напряжения волочения  $\sigma$ , дающая экстремум (минимум) этой величины при некотором значении  $\alpha$  [4]

$$\sigma = \sigma_{Bcp} \left(1 + \frac{f}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon + 0,667 \cdot \alpha, \quad (7)$$

$\sigma_{Bcp}$  - средний предел прочности деформируемого металла в очаге деформации;  $f$  - коэффициент трения.

Согласно положениям квалиметрии [1] учли, что увеличению комплексного показателя качества должен соответствовать рост  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и уменьшение энергозатрат, а также необходимость безразмерного представления относительно 1 всех значений исходных параметров.

Последнее обеспечили делением текущих значений величин  $\sigma_B$  и  $\delta$  по рис. 2 на 750 МПа и 50 %, соответственно, а единичный показатель качества, «ответственный» за энергозатраты в соответствии с формулой (7) представили в виде

$$U = \frac{\sigma_{Bcp}}{\sigma} = \frac{1}{\left(1 + \frac{f}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon + 0,667 \cdot \alpha}. \quad (8)$$

На основании (3) с учетом (2) (при  $c \neq 0$ ) комплексный показатель качества выразили

$$Q = k_1 \cdot S + k_2 \cdot \Delta + (1 - k_1 - k_2 - c) \cdot U, \quad (9)$$

для которого после компьютерной аппроксимации с учетом данных рис. 2 определены функции единичных показателей качества для:

- предела прочности металла

$$S = 0,508 + 0,514 \cdot \varepsilon^{0,643} + 0,14 \cdot \alpha^{1,237}; \quad (10)$$

- относительного удлинения металла

$$\Delta = \frac{1}{-2,786 + 9,53 \cdot \varepsilon^{0,542} + 5,01^{0,4827}}; \quad (11)$$

- энергетических затрат (на основании формулы

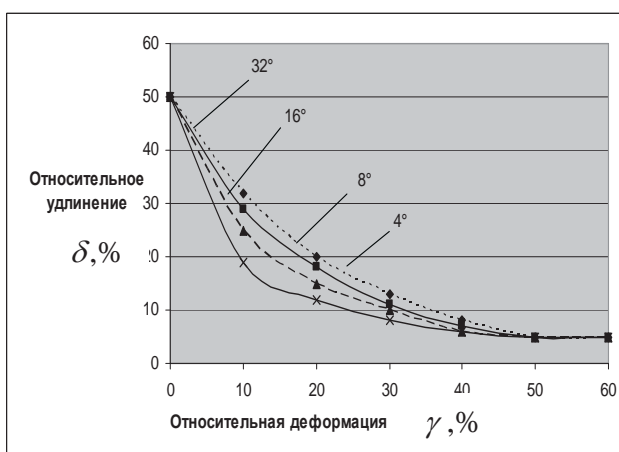
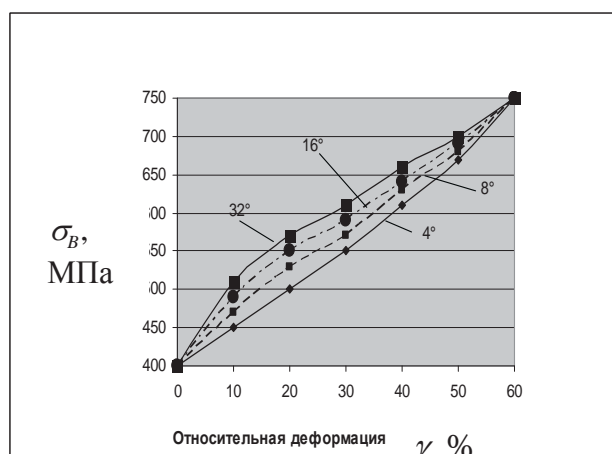


Рис. 2. Зависимость предела прочности (а) и относительного удлинения (б) проволоки от условной степени деформации  $\gamma$  и угла конусности  $\alpha$  волокна при волочении [4]

(8) при  $f = 0,08$ )

$$U = \frac{0,667 \cdot \alpha}{\left(1 + \frac{0,08}{\alpha}\right) \cdot \varepsilon + 0,667 \cdot \alpha}. \quad (12)$$

Каждый из представленных единичных показателей качества зависит от двух факторов, один из которых «полуугол конусности волокна  $\alpha$ » может быть условно отнесен к техническим, а другой — «степень деформации металла  $\varepsilon$ » к технологическим (организационным). Эти величины также приводятся к безразмерному виду:  $\varepsilon$  по формуле (6), а угол  $\alpha$  в радианах.

При анализе следует учитывать особенности реального процесса волочения. Так, разовая степень деформации в волокне  $\varepsilon$  должна находиться в пределах 0,1-0,5. Выход в меньшую сторону за указанные пределы приводит к усиленному износу волок, а в большую — к обрывам проволоки. Полуугол  $\alpha$  волокна при сухом волочении проволоки обычно равен 0,05-0,15. Выход за указанные пределы сопровождается увеличением силы волочения и энергетических затрат на ведение процесса [4].

В рассматриваемом конкретном примере применение операций (4) к выражениям (10)-(12) формально не выявило наличия экстремумов. В подобной ситуации поиск рациональных значений технических, технологических и (или) организационных факторов

Таблица. Уровни влияющих факторов (переменных)

№ переменной	Переменные	Уровни переменных				
		1	2	3	4	5
1	$\varepsilon$	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
2	$k_1$	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4
3	$\alpha$	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
4	$k_2$	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4
5	$c$	0	0,025	0,05	0,075	0,1

12345	23451	34512	45123	51234
24153	41532	15324	53241	32415
45231	52314	23145	31452	14523
53412	34125	41253	12534	25341
31524	15243	52431	24315	43152

Рис. 3. Матрица ортогонального латинского квадрата 5-го порядка

следует вести прямым расчетом.

Для уменьшения объема работы и облегчения анализа полученных результатов при сохранении их статистической достоверности целесообразно проводить виртуальные (расчетные) эксперименты с использованием методов их планирования, например, по ортогональным латинским квадратам. Положительной стороной применения такого метода является возможность учета как качественных, так и количественных уровней независимых переменных. Порядок соответствующего квадрата при этом выбирается на единицу больше, чем количество начальных влияющих факторов (или равным ему). Таким же образом определяется количество уровней изменения этих факторов [5].

В рассматриваемом примере выделили 5 независимых переменных ( $\varepsilon, \alpha, k_1, k_2, c$ ), для которых выбрали ортогональный квадрат 5-го порядка (рис. 3). Уровни указанных переменных, для которых проводили определение  $Q$  по формулам (9)–(12), отображены в таблице.

В каждой  $w$ -й ячейке плана расчетного эксперимента (рис. 3) представлена группа цифр. Место цифры означает номер переменной, а ее значение – уровень каждой переменной согласно данным таблицы. Так, например, группе цифр «45231» в 11-й ячейке соответствует значение  $Q = 0,4312$  (рассчитано отдельно), которое получено при  $\varepsilon = 0,35; \alpha = 0,45; k_1 = 0,25; k_2 = 0,3; c = 0$ .

После расчета значений комплексного показателя качества для всех ячеек матрицы, их логарифмирования, усреднения данных для каждого уровня каждой переменной

и потенцирования (согласно известным процедурам обработки [5]) получили частные зависимости  $Q$  от каждой переменной (рис. 4).

Согласно использованной методике планирования, величина  $Q$  определяется формулой [5]

$$Q = N \cdot Q_1(\varepsilon) \cdot Q_2(\alpha) \cdot Q_3(k_1) \cdot Q_4(k_2) \cdot Q_5(c), \quad (13)$$

где  $Q_1 \dots Q_5$  - ординаты на графиках для выбранных значений аргументов.

Аппроксимация полученных данных представлена трендами на графиках и аналитическими зависимостями, приведенными ниже:

- для степени деформации металла (рис. 4а):

$$Q_1(\varepsilon) = \frac{1}{3,08 - 0,15 \cdot \varepsilon^{-0,591}}; \quad (14)$$

- для угла волоки при  $\alpha \geq 0,05 \dots 0,21$  (рис. 4б):

$$Q_2(\alpha) = -7,88 \cdot \alpha^2 + 2,23 \cdot \alpha + 0,26; \quad (15)$$

при  $\alpha \geq 0,21$ ;

$$Q_2(\alpha) = 4,79 \cdot \alpha^2 - 2,88 \cdot \alpha + 0,77; \quad (16)$$

- для коэффициента значимости  $k_1$  при характеристике  $S$  предела прочности металла (рис. 4в)

$$Q_3(k_1) = 0,485 \cdot k_1 + 0,2416; \quad (17)$$

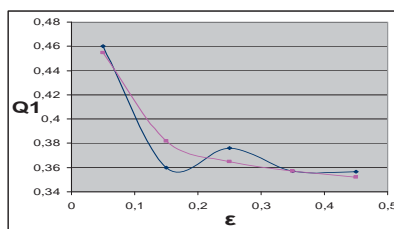
- для коэффициента значимости при характеристике относительного удлинения металла для  $k_2 \geq 0,15 \dots 0,275$  (рис. 4г)

$$Q_4(k_2) = 0,392 - 0,001626 \cdot k_2; \quad (18)$$

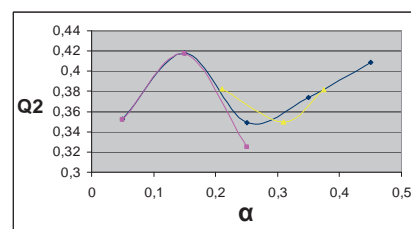
для  $k_2 > 0,275$ ;

$$Q_4(k_2) = -5,58 \cdot k_2^2 + 3,3875 \cdot k_2 - 0,1197; \quad (19)$$

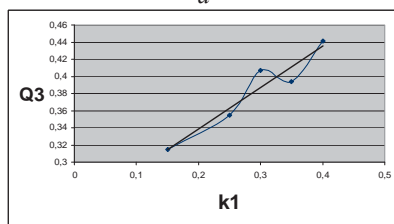
- для характеристики неопределенности описания объекта (рис. 4д)



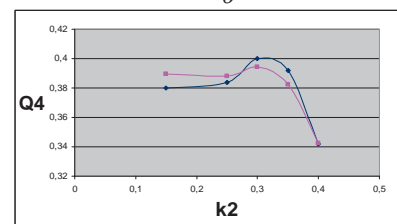
а



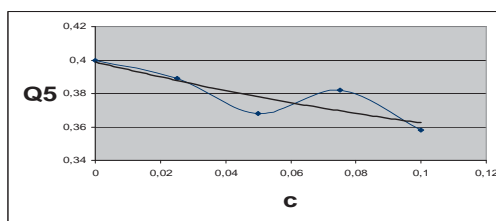
б



в



г



д

Рис. 4. Частные зависимости комплексного показателя качества  $Q$  от степени деформации (а), полуугла волоки (б), коэффициентов значимости (в, г), и неопределенности (д)

$$Q_5(c) = 1,04 \cdot c^2 - 0,4676 \cdot c + 0,3989. \quad (20)$$

При этом нормирующий коэффициент  $N$  находится по формуле

$$N = \frac{\sum_1^w N(w)}{w}, \quad (21)$$

для которого значения  $N_w$  для каждой  $w$ -й ячейки квадрата определяются с учетом трендов на рис. 4 и вычисляются по выражению

$$N_w = \frac{Q_w}{Q_1(\varepsilon) \cdot Q_2(\alpha) \cdot Q_3(k_1) \cdot Q_4(k_2) \cdot Q_5(c)}, \quad (22)$$

где  $Q_1 - Q_5$  - ординаты представленных частных зависимостей, которые соответствуют значениям переменных согласно числовому коду переменных в квадрате (см. рис. 3) и их значениям в таблице, а  $Q_w$  - найденные расчетом значения комплексного показателя качества для соответствующих ячеек квадрата.

Набор значений  $N_w$  позволил с учетом средней величины  $N$  определить точность обработки данных путем вычисления их среднего квадратического отклонения и соответствующего коэффициента вариации. Для рассмотренного примера  $N = 47,71$  с коэффициентом вариации  $\sim 0,12$  при вероятности 95 %.

Использование представленных данных позволяет при учете возможностей реализации выбранной совокупности технических, технологических и (или) организационных факторов выбрать такие их значения, которые соответствуют наибольшему возможному уровню комплексного показателя  $Q$  качества процесса. В рамках данного примера этому соответствуют следующие значения:

- степень разовой деформации в волоке  $\varepsilon \leq 0,15$  (рис. 4а), что объясняется уменьшением энергетических затрат на ведение процесса волочения (при необходимости увеличения степени деформации можно рекомендовать значения  $\varepsilon \approx 0,25$ );

- полуугол волоки  $\alpha \approx 0,15$  (см. рис. 4б), что соответствует минимуму энергозатрат на ведение процесса и практике волочения;

- следует предпринимать меры по повышению значимостей  $k_1$  (рис. 4в) и  $k_2$  (рис. 4г).

Естественно, что уменьшение неопределенности  $c$  описания процесса приводит к увеличению  $Q$  (рис. 4д).

Сопоставление результатов анализа с аналогичными материалами, опубликованными в работе [2], выявило зависимость рекомендаций о путях повышения качества процесса от выбранной совокупности единичных показателей качества. Так, введение в рассмотрение значимого единичного показателя качества, «ответственного» за энергозатраты, повлияло на рекомендуемые значения  $\varepsilon$  и  $\alpha$  (ранее -  $\varepsilon < 0,1$  и  $\alpha > 0,3-0,4$ ;  $\alpha < 0,1$ ).

Изложенные материалы сопоставлены с результатами деятельности одного из метизных предприятий Днепропетровска, что выявило их корреляцию с применяемыми на практике значениями полуугла волоки и тенденцией к уменьшению частных деформаций

для снижения энергетических затрат на ведение процесса волочения.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Разработан метод определения рационального уровня технических, технологических и (или) организационных факторов, определяющих наибольший возможный уровень качества процесса на всех этапах его жизненного цикла с учетом выбранных экспертным методом единичных показателей качества, их коэффициентов значимости и неопределенности описания.

Впервые в рамках разработанного метода рассмотрен пример взаимодействия трех единичных показателей качества объекта, формирующих комплексный показатель его качества, при различном сочетании видов функциональных зависимостей единичных показателей качества от технических, технологических и (или) организационных управляемых факторов. Показано, что такая совокупность может обеспечить наличие максимума комплексного показателя качества (который, как правило, не совпадает с максимумом указанных функций), но такой экстремум может и не иметь места. Для последнего случая разработаны рекомендации по поиску рациональных значений факторов путем реализации расчетного эксперимента с использованием методов планирования.

Представленный метод использован в сфере волочения. Выявлены рациональные, соответствующие производственной практике значения факторов, позволяющие максимизировать качество процесса в рамках выбранных ограничений.

Перспективой исследований является введение в рассмотрение дополнительных единичных показателей качества, например, ответственных за производительность оборудования, а также расширение перечня исходных факторов, влияющих на процесс.

Метод может послужить основой для улучшения системы управления процессами и качеством самой организации, в частности, как эффективное средство при принятии решений для удовлетворения требований потребителей.

### Библиографический список

1. Менеджмент якості та системи управління якістю / А. Должанський, Н. Очеретна, І. Ломов. – Дніпропетровськ: СВІДЛЕР А.Л., 2011. – 452 с.
2. Должанський А.М., Бондаренко О.А. Метод максимізації комплексного показника якості об'єкту шляхом оптимізації керуючих дій // Стандартизація, сертифікація, якість. - 2012. - № 4. - С. 50-55.
3. Математика / Уч. пособие для вузов/ М. Абрамович, М. Стародубцев. - М.: Высшая школа, 1976. – 304 с.
4. Юхвец И.А. Волочильное производство. - М.: Металлургия, 1965. – 374 с.
5. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту. – Львів: Вид. Національного університету «Львівська політехніка», 2000. – 205 с.

Поступила 24.10.2012