

УДК 621.647.23

Е.А. Луговская, инж., **О.М. Яхно**, д-р техн. наук, проф.,
НТУ Украины «Киевский политехнический институт»

И.Н. Берник, канд. техн. наук, доц., Винницкий
национальный аграрный университет

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ЭЛАСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Представлена математическая модель прогнозирования эффективности технологического процесса ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей, в частности, тканевых. При составлении модели использована теория нечетких множеств, которая позволяет повысить эффективность получения конечного результата. При этом учитывается значительное количество различных факторов и дается оценка их влияния на параметры качества конечного результата технологического процесса очищения.

Ключевые слова: математическая модель, ультразвуковая очистка, теория нечетких множеств.

Введение.

В различных отраслях промышленности широко используется технология ультразвуковой кавитационной очистки загрязненных изделий. При этом в основном очистке подвергаются детали с твердыми поверхностями. В последнее время эта технология нашла применение и при очистке эластичных изделий, например, тканевых. Ультразвуковая очистка эластичных поверхностей представляет собой сложный физико-химический процесс, который представлен комплексным взаимодействием химически активированной среды и эффектами, вызванными упругими колебаниями приложенного акустического поля.

Принцип ультразвуковой очистки заключается в реализации различных способов разрушений загрязнений, среди которых выделяют следующие: отслоение, эмульгирование, эрозия, гидроабразивное разрушение и растворение [1].

Математическое описание технологического процесса ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей с помощью традиционных методов моделирования вызывает значительные трудности, обусловленные необходимостью анализа значительного количества факторов влияния и большим набором вариантов

выходных программ очистки, а также невозможностью получения их аналитических зависимостей.

Современные экспертные системы управления технологическими процессами для адекватного их описания построены с использованием различных видов нечетких математических моделей, для которых необходим минимальный набор закономерностей, в отличие от традиционного моделирования [2-8].

Моделирование технологических процессов с помощью системы управления Fuzzy logic определяется взаимосвязью входящих и выходящих переменных процесса, степень принадлежности которых определяется экспериментальными данными и знаниями экспертов, что позволяет сократить объемы вычислений и, как следствие, формирует быстродействие технологической системы [9-10].

Целью статьи является создание модели управления технологическим процессом ультразвуковой кавитационной очистки эластических поверхностей с помощью математического аппарата нечеткой логики.

Математическая модель технологического процесса.

Разработка модели предполагает наличие и использование информационных параметров, отражение особенностей процесса ультразвуковой очистки, а также отсутствие противоречий. Состоит из операций по определению критериев влияния и конечных результатов, установления уровней связей подсистем, возможных вариантов результатов.

Входными переменными выбраны показатели технологического процесса и обрабатываемой поверхности, а выходными – степень очистки. При необходимости изменения показателей очистки, в математическую модель возможно введение дополнительных переменных.

Очистку эластических поверхностей определяем на следующих уровнях (выходные переменные):

d_1 – полное удаление загрязнений с поверхности; d_2 – высокая степень очистки; d_3 – средний уровень очистки; d_4 – низкий уровень удаления загрязнений.

Перечисленные уровни $d_1 \div d_4$ рассматриваем с учетом следующих основных параметров, которые измеряются в лабораторных условиях.

Входные параметры:

- тип волокон изделий (x_1) – современные эластичные тканевые поверхности в зависимости от назначения и стоимости производят из натуральных, синтетических и смешанных типов волокон. Что в свою очередь сильно отличает их по качеству и по параметрам очистки. В большинстве случаев рекомендовано перед очисткой проводить сортировку. Сортировать необходимо как в зависимости от вида поверхности, так и от ряда других не менее важных показателей, среди которых, на наш взгляд, необходимо выделить следующие:

- интенсивность окраски (x_2) и стойкость красок (x_3) – показатели, которые существенно влияют на интенсивность технологических параметров очистки;

- плотность изделий (x_4) – расстояние между волокнами в изделии, а также их натяжение. Очистка изделий ажурных и типа «резинка» несколько проблематично, поскольку они наиболее деформируемы;

- вид загрязнений (x_5) – показатель, зависящий от природы загрязнения и характера его связи с поверхностью [11]. Различают следующие основные виды загрязнений:

- неорганические, механически слабо связанные с поверхностью, механически шаржированные в поверхность, осажденные на поверхность;

- органического характера или на органических связках, механически слабо связанные с поверхностью, обладающие небольшой степенью адгезии к поверхности;

- химически связанные или прочно сцепленные с поверхностью;

- биологические (в том числе и патогенная микрофлора);

- смешанные;

- время очистки (x_6) – фактор, который определяет время пребывания изделий в среде моющего раствора под воздействием ультразвукового поля. Естественно, что увеличение времени кавитационной обработки положительно влияет на эффективность очистки, но при этом возрастают энергозатраты;

- интенсивность ультразвуковых колебаний (x_7) – решающим фактором ультразвуковой очистки является кавитация, наличие и степень развития которой зависит от уровня данного фактора;

- амплитуда колебаний рабочей поверхности вибрационного привода (x_8) – определяет картину поля в объеме жидкости, зависит от типа ультразвукового привода-излучателя;

- плотность ультразвуковой энергии (x_9) – количество энергии в технологическом объеме жидкости;

- частота колебаний (x_{10}) – параметр, который определяет энергетику кавитационного поля, а также уровень шума технологического оборудования.

Рассмотренные входящие и выходящие переменные в математической форме могут быть представлены в виде:

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \rightarrow d \in D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, \quad (1)$$

где x – множество параметров, которые определяют качество очистки эластических поверхностей; D – множество вариантов ультразвуковой очистки.

Используя методологические принципы нечеткой логики, входящие переменные рассмотрим, как лингвистические, которые оценим нечеткими качественными термами (табл. 1).

Таблица 1

Формализация параметров лингвистическими переменными

Параметр состояния	Универсум	Термы оценки
1	2	3
x_1 – тип волокон	[0...1] у.ед.	шерсть (шр), шелк (шл), синтетические (сн), смешанные (см), хлопчатобумажные (хб)
x_2 – цвет	[0...1] у.ед.	цветной (цв), смешанный (см), белый (бл)
x_3 – стойкость красок ткани	[0...1] у.ед.	нестойкие (нст), средние (ср), стойкие (ст)
x_4 – плотность	[0...1] у.ед.	ажурные (а), средние (ср), плотные (пл)
x_5 – вид загрязнений	[0...1] у.ед.	неорганические (норг), органического характера или на органических связках (орг), химически связанные с поверхностью (хс), биологические (б), смешанные (см)
x_6 – время стирки	[15...60] мин	малое (м), среднее (ср), длительное (дл), очень длительное (одл)
x_7 – интенсивность ультразвуковых колебаний	[5...20] Вт/см ²	низкая (н), средняя (ср), высокая (в), очень высокая (ов)

Продолжение таблицы 1

1	2	3
x_8 – плотность ультразвуковой энергии	[0,02...0,1] Вт/см ³	низкая (н), средняя (ср), высокая (в), очень высокая (ов)
x_9 – показатель распределения энергии	[1/3...3] у.е.	низкий (н), средний (ср), высокий (в)
x_{10} – частота ультразвуковых колебаний	[22...66] кГц	низкая (н), средняя (с), высокая (в), очень высокая (ов)

Для лингвистических переменных $x_1 \div x_{10}$ установим иерархические связи факторов, введем укрупненные лингвистические переменные:

Q – состояние, которое зависит от физико-механических параметров эластической поверхности и определяет их стойкость к очистке $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$;

Y – состояние, которое зависит от параметров энергетика ультразвуковой обработки $\{x_7, x_8\}$.

Структура модели для прогнозирования очистки с использованием ультразвуковых кавитационных технологий представлена в виде дерева логического вывода (рис.1), которое отвечает соотношениям:

$$d = f_d(Q, x_5, x_6, Y, x_9, x_{10}); \quad (2)$$

$$Q = f_Q(x_1, x_2, x_3, x_4); \quad (3)$$

$$Y = f_Y(x_7, x_8), \quad (4)$$

d – степень очистки эластических поверхностей, определяется уровнями $d_1 \div d_4$.

Оценку укрупненных параметров, представленных у соотношении (2) проводим с использованием качественных термов (табл. 2).

Таблица 2

Формализация укрупненных параметров состояния
лингвистическими переменными

Укрупненный параметр состояния	Термы для лингвистической оценки
Q – физико-механические свойства эластической поверхности	нестойкие (нс), средние (ср), стойкие (ст)
Y – энергетика ультразвуковой обработки	низкая (н), средняя (ср), высокая (в), очень высокая (ов)

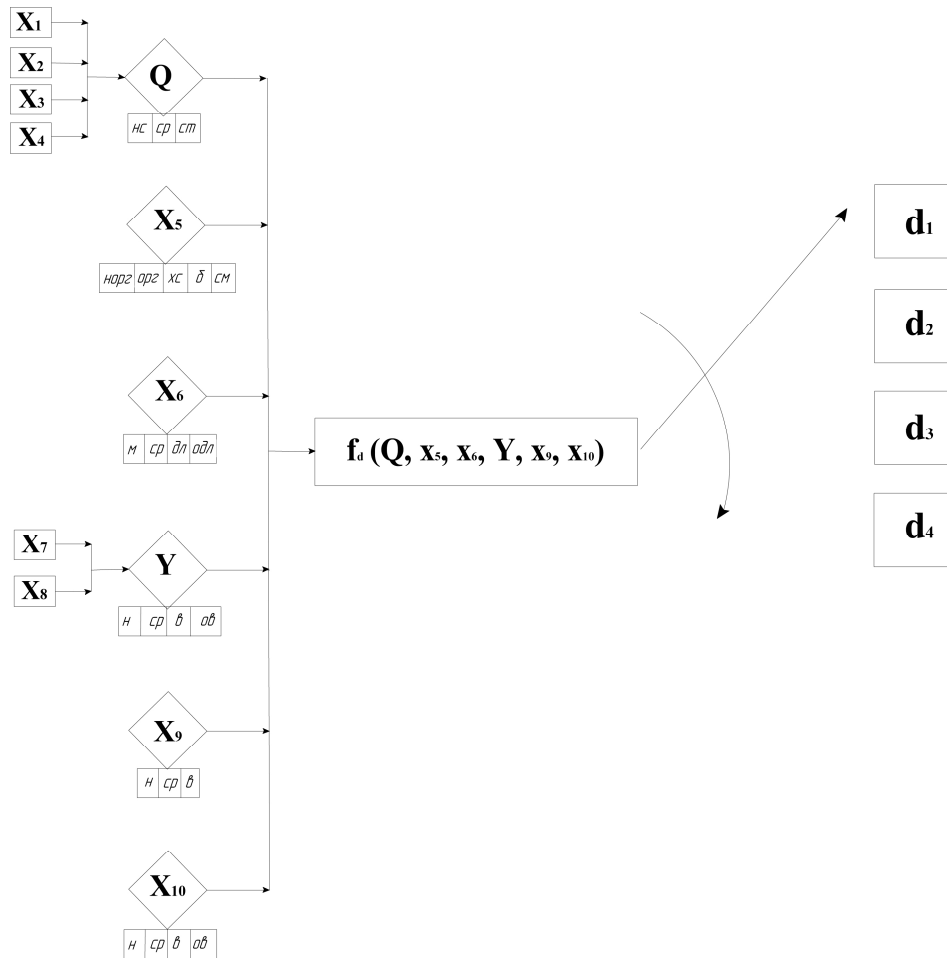


Рис.1. Дерево логического вывода иерархических связей факторов

Нечеткие базы знаний, которые отвечают соотношениям (2) – (4) представлены в табл. 3 – табл. 5.

Таблица 3

База знаний о соотношении (2)

Q	x_5	x_6	Y	x_9	x_{10}	D
нс	норг	дл	н	н	ср	d_1
нс	орг	дл	ср	ср	ов	
нс	хс	одл	в	ср	в	
нс	б	одл	в	в	ов	
нс	см	одл	в	в	в	
ст	норг	м	в	н	н	
ст	орг	ср	в	ср	ов	
ст	хс	дл	ов	ср	ср	
ст	б	дл	ов	в	в	
ст	см	дл	ов	в	в	
ср	норг	ср	ср	н	н	
ср	орг	ср	ср	ср	в	
ср	хс	одл	в	ср	ср	

Q	x_5	x_6	Y	x_9	x_{10}	D
ср	б	дл	в	в	ов	
ср	см	одл	в	в	в	
нс	норг	ср	н	н	ср	d_2
нс	орг	ср	ср	ср	ов	
нс	хс	дл	в	ср	ов	
нс	б	дл	в	в	в	
нс	см	дл	в	в	в	
ср	норг	м	ср	н	н	
ср	орг	ср	н	ср	в	
ср	хс	дл	в	ср	ср	
ср	б	ср	в	в	ов	
ср	см	дл	в	в	в	
ст	норг	м	ср	н	н	
ст	орг	ср	н	ср	н	
ст	хс	ср	ов	ср	в	
ст	б	ср	в	ср	в	
ст	см	ср	ов	в	в	
нс	норг	м	н	н	в	d_3
нс	орг	м	ср	ср	ов	
нс	хс	ср	ср	ср	в	
нс	б	дл	в	ср	в	
нс	см	дл	ср	ср	в	
ср	норг	м	н	ср	н	
ср	орг	м	ср	ср	в	
ср	хс	ср	ср	в	в	
ср	б	м	ср	в	в	
ср	см	ср	ср	в	—	
ст	норг	м	н	ср	в	
ст	орг	м	в	ср	ов	
ст	хс	м	ср	ср	в	
ст	б	м	ср	ср	—	
ст	см	ср	ср	н	—	
нс	норг	м	н	в	в	d_4
нс	орг	ср	н	н	ср	
нс	хс	ср	н	н	в	
нс	б	ср	ср	ср	в	
нс	см	ср	н	н	в	
ср	норг	м	н	в	в	
ср	орг	ср	н	н	в	
ср	хс	ср	н	н	—	
ср	б	м	ср	н	—	
ср	см	ср	н	н	—	
ст	норг	м	н	в	ов	
ст	орг	м	н	н	ов	
ст	хс	м	н	н	—	
ст	б	м	ср	н	—	
ст	см	м	н	н	—	

Таблиця 4

База знаній о соотношении (3)

x_1	x_2	x_3	x_4	Q	
шр	цв	нст	а	нс	
шр	см	нст	а		
шл	цв	нст	а		
сн	цв	нст	а		
см	цв	нст	а		
шл	см	нст	а		
сн	см	нст	а		
см	см	нст	а		
шр	см	ср	пл	ср	
шл	см	ср	пл		
сн	см	ср	пл		
см	см	ср	пл		
шр	бл	ср	пл		
шл	бл	ср	пл		
сн	бл	ср	пл		
см	бл	ср	пл		
шр	см	ст	ср		
шл	см	ст	ср		
сн	см	ст	ср		
см	см	ст	ср		
шр	бл	ст	ср		
шл	бл	ст	ср		
сн	бл	ст	ср		
см	бл	ст	ср		
хб	цв	нст	а		ст
хб	цв	ср	а		
хб	см	ст	ср		
хб	бл	ст	ср		
хб	см	ст	пл		
хб	бл	ст	пл		

Таблиця 5

База знаній о соотношении (4)

x_7	x_8	Y
н	н	н
ср	н	
ср	ср	ср
в	ср	
н	ср	
в	в	в
ср	в	
ов	в	
ов	ов	ов
в	ов	

Используя табл. 3 - табл. 5 можно записать систему нечетких логических уравнений, связывающих функции принадлежности очистки поверхности и входных переменных:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(d) &= \left[\begin{array}{l} \mu^{нс}(Q) \cdot \mu^{норг}(x_5) \cdot \mu^{\partial л}(x_6) \cdot \\ \mu^H(Y) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^{ср}(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{нс}(Q) \cdot \mu^{орг}(x_5) \cdot \mu^{\partial л}(x_6) \cdot \\ \mu^{ср}(Y) \cdot \mu^{ср}(x_9) \cdot \mu^{ов}(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{нс}(Q) \cdot \mu^{хс}(x_5) \cdot \mu^{одл}(x_6) \cdot \\ \mu^в(Y) \cdot \mu^{ср}(x_9) \cdot \mu^в(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{нс}(Q) \cdot \mu^{\bar{б}}(x_5) \cdot \mu^{одл}(x_6) \cdot \\ \mu^в(Y) \cdot \mu^в(x_9) \cdot \mu^{ов}(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{нс}(Q) \cdot \mu^{см}(x_5) \cdot \mu^{одл}(x_6) \cdot \\ \mu^в(Y) \cdot \mu^в(x_9) \cdot \mu^в(x_{10}) \end{array} \right]; \\ \\ \mu^{d_1}(d) &= \left[\begin{array}{l} \mu^{см}(Q) \cdot \mu^{норг}(x_5) \cdot \mu^M(x_6) \cdot \\ \mu^в(Y) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{см}(Q) \cdot \mu^{орг}(x_5) \cdot \mu^{ср}(x_6) \cdot \\ \mu^в(Y) \cdot \mu^{ср}(x_9) \cdot \mu^{ов}(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{см}(Q) \cdot \mu^{хс}(x_5) \cdot \mu^{\partial л}(x_6) \cdot \\ \mu^{ов}(Y) \cdot \mu^{ср}(x_9) \cdot \mu^{ср}(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{см}(Q) \cdot \mu^{\bar{б}}(x_5) \cdot \mu^{\partial л}(x_6) \cdot \\ \mu^{ов}(Y) \cdot \mu^в(x_9) \cdot \mu^в(x_{10}) \end{array} \right] \vee \\ &\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{см}(Q) \cdot \mu^{см}(x_5) \cdot \mu^{\partial л}(x_6) \cdot \\ \mu^{ов}(Y) \cdot \mu^в(x_9) \cdot \mu^в(x_{10}) \end{array} \right]; \end{aligned}$$

$$\mu^{d_1}(d) = \left[\begin{array}{l} \mu^{cp}(Q) \cdot \mu^{норз}(x_5) \cdot \mu^{cp}(x_6) \cdot \\ \mu^{cp}(Y) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \end{array} \right] \vee$$

$$\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{cp}(Q) \cdot \mu^{орз}(x_5) \cdot \mu^{cp}(x_6) \cdot \\ \mu^{cp}(Y) \cdot \mu^{cp}(x_9) \cdot \mu^6(x_{10}) \end{array} \right] \vee$$

$$\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{cp}(Q) \cdot \mu^{xc}(x_5) \cdot \mu^{одл}(x_6) \cdot \\ \mu^6(Y) \cdot \mu^{cp}(x_9) \cdot \mu^{cp}(x_{10}) \end{array} \right] \vee$$

$$\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{cp}(Q) \cdot \mu^{\bar{б}}(x_5) \cdot \mu^{\partialл}(x_6) \cdot \\ \mu^6(Y) \cdot \mu^6(x_9) \cdot \mu^{ов}(x_{10}) \end{array} \right] \vee$$

$$\vee \left[\begin{array}{l} \mu^{cp}(Q) \cdot \mu^{см}(x_5) \cdot \mu^{одл}(x_6) \cdot \\ \mu^6(Y) \cdot \mu^6(x_9) \cdot \mu^6(x_{10}) \end{array} \right].$$

Аналогично записываются выражения для

$$\mu^{d_2}(d), \mu^{d_3}(d), \mu^{d_4}(d).$$

$$\mu^{nc}(Q) = \left[\mu^{шр}(x_1) \cdot \mu^{цв}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

$$\vee \left[\mu^{шр}(x_1) \cdot \mu^{см}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

$$\vee \left[\mu^{шл}(x_1) \cdot \mu^{цв}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

$$\vee \left[\mu^{сн}(x_1) \cdot \mu^{цв}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

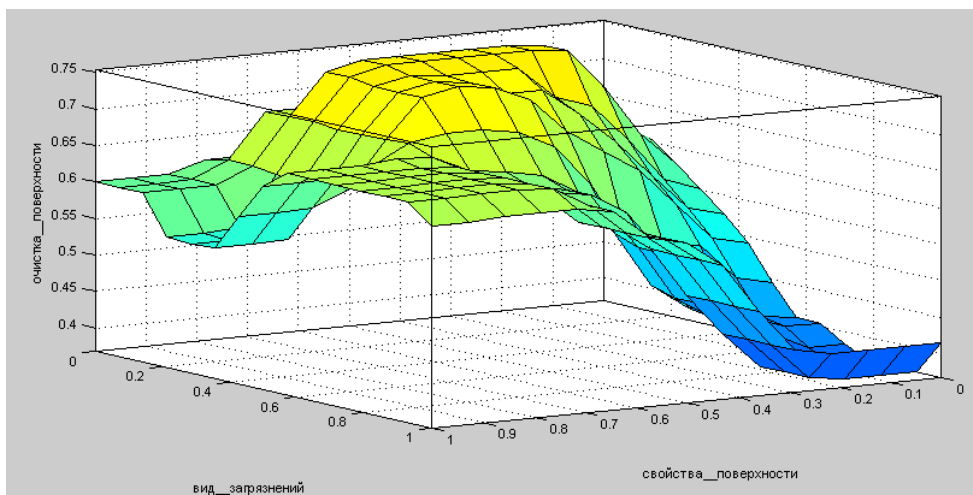
$$\vee \left[\mu^{шл}(x_1) \cdot \mu^{см}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

$$\vee \left[\mu^{сн}(x_1) \cdot \mu^{см}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right] \vee$$

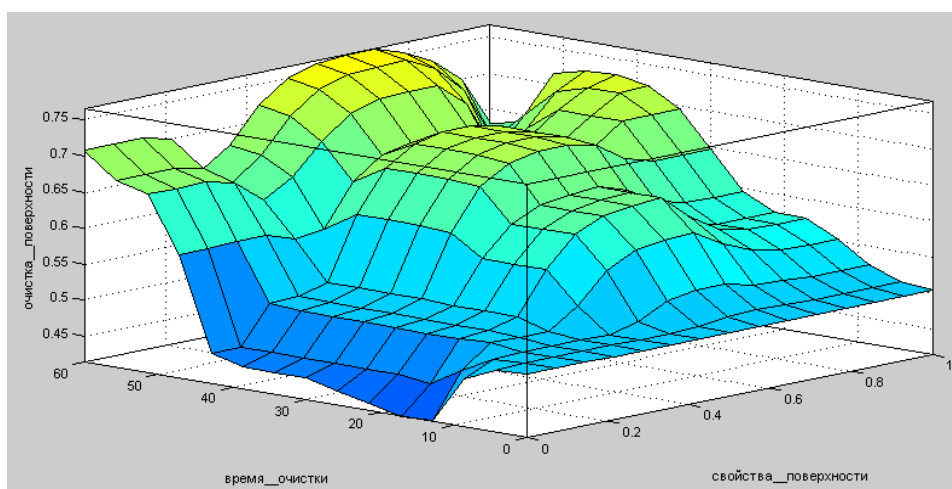
$$\vee \left[\mu^{см}(x_1) \cdot \mu^{см}(x_2) \cdot \mu^{нст}(x_3) \cdot \mu^a(x_4) \right].$$

Аналогично записываются выражения для

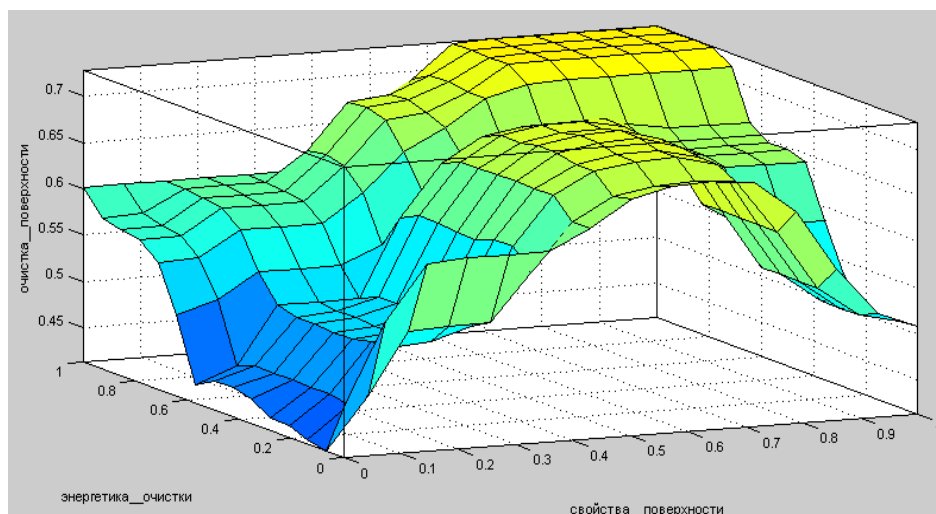
$$\mu^{cp}(Q), \mu^{см}(Q).$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Примеры графических зависимостей качества очистки эластической поверхности от укрупненных параметров состояния (а – вида загрязнений и свойств поверхности; б – времени очистки и свойств поверхности; в – энергетики очистки и свойств поверхности)

$$\mu^h(Y) = \left[\mu^h(x_7) \cdot \mu^h(x_8) \right] \vee \left[\mu^{cp}(x_7) \cdot \mu^h(x_8) \right].$$

Аналогично записываются выражения для

$$\mu^{cp}(Y), \mu^6(Y), \mu^h(Y).$$

Математическая модель экспертной системы управления технологическим процессом очистки эластических поверхностей с использованием теории нечетких множеств визуализирована в среде Matlab 6.5 в виде поверхностей нечеткого вывода (рис.2).

Таким образом, предложена модель управления технологическим процессом ультразвукового удаления загрязнений с эластических поверхностей.

Использование аппарата нечеткой логики в математической модели позволило формализовать причинно-следственные связи оценки качества ультразвуковой очистки эластических поверхностей от свойств поверхности, вида загрязнений и технологических параметров обработки. Полученные результаты моделирования позволяют выбрать рациональное соотношение параметров технологического процесса, при котором может быть достигнуто максимальное качество очистки эластичной поверхности при конкретном виде загрязнения.

Список литературы

1. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский и др. – М.: Металлургия, 1974. – 384 с.
2. Кудинов Ю.И. Нечеткое моделирование и идентификация технологических процессов / Ю.И. Кудинов // Измерение, контроль, автоматизация. – М.: Мир, 1988. – С.77–86.
3. Ротштейн О.П. Моделювання та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів / О.П. Ротштейн, С.Д. Штовба, О.М. Козачко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – 211 с., іл., табл. – Бібліогр.: с. 186–198.
4. Ротштейн О.П. Soft Computing в біотехнології: багатофакторний аналіз і діагностика: монографія / О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 144 с., іл., табл. – Бібліогр.: с. 135–143.
5. Wagenknecht M. Theoretical and Applicational Aspects of Fuzzy Modeling / Wagenknecht M., Otto O. Hartman K. // Fuzzy logic in engineering and natural sciences. – 1996. – Vol. 8. – P. 138–149.
6. Kartman P. Identification of the structure of fuzzy models / P. Kartman, H. Unbehauen // Fuzzy logic in engineering and natural sciences. – 1996. – Vol. 8. –P. 36-48.
7. Takagi T. Fuzzy identification of systems and applications to a modeling and control / Takagi T., Sugeno M. // Fuzzy Sets and Systems. – 1986. – Vol. 12. – P. 211–234.
8. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с. – Библиограф.: с. 273–275.

9. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
10. Панкевич О.Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань: монографія / О.Д. Панкевич, С.Д. Штовба. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с: іл., табл. – Бібліограф.: с. 96–101.
11. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / О.В. Абрамов, И.Г. Хорбенко, Ш. Швегла; под ред. О.А. Абрамова. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с. : ил.; 22 см.

Стаття надійшла до редколегії 12.10.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Струтинський В.Б.

Є.О. Луговська, О.М. Яхно, І.М. Бернік. Модель керування технологічним процесом ультразвукового очищення еластичних поверхонь. Представлена математична модель прогнозування ефективності технологічного процесу ультразвукового кавітаційного очищення еластичних поверхонь, зокрема, тканинних. При складанні моделі використана теорія, яка дозволяє підвищити ефективність отримання кінцевого результату. При цьому враховується значна кількість різноманітних факторів та надається оцінка їх впливу на параметри якості кінцевого результату технологічного процесу очищення.

Ключові слова: математична модель, ультразвукове очищення, теорія нечітких множин.

E. Lugovskay, O. Yachno, I. Bernik. Model of Technological Process of Ultrasonic Clearing of Elastic Surfaces Management. The mathematical model of predicting the effectiveness of the process of ultrasonic cavitation treatment of elastic surfaces, including fabric is presented. In drawing up the model we used the theory of fuzzy sets that increased the efficiency of obtaining the final result.

Keywords: mathematical model, ultrasonic treatment, theory of indistinct sets.

© Луговская Е.А., Яхно О.М., Берник И.Н., 2012