

Луговський О. Ф.

Національний  
технічний університет  
України "Київський  
політехнічний  
інститут"

Берник І. М.

Лобань Ю. М.

Вінницький  
національний  
аграрний  
університет

УДК 66.084.8

## МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ВИЛУЧЕННЯ ПЕКТИНУ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

*Представлена математическая модель прогнозирования эффективности технологического процесса извлечения пектина в ультразвуковом поле с использованием теории нечётких множественных чисел, которая позволяет повысить эффективность получения конечного продукта, при учете влияния значительного количества факторов, и оценить их влияние на выходные переменные.*

*The mathematical model of prognostication of efficiency of technological process of exception of pectin is presented in the ultrasonic field with the use of theory of unclear plurals, which allows to promote efficiency of receipt of the finished good, at the account of influence of far of factors, and to estimate their influence on a weekend a change.*

Прогнозування ефективності технологічних процесів можливо проводити з використанням різних видів нечітких математичних моделей до яких, зокрема, належать нечіткі алгоритмічні математичні моделі, нечіткі багатовимірні математичні моделі, нечіткі динамічні моделі типу імплікації для одновимірних об'єктів, функціонально-лінгвістичні нечіткі моделі [1–8]. Сутність теорії нечітких множин зводиться до розгляду елементів з певної множини із зазначенням ступеня задоволення ними [9–11].

Моделювання процесу вилучення пектину з рослинної сировини можливе за рахунок використання методів нечітких множин та нечіткої логіки, що дасть можливість організувати новий підхід та використовувати кількісні і якісні дані, досвід персоналу, технічне оснащення.

Розробка моделі базується на системному підході з урахуванням таких вимог, як:

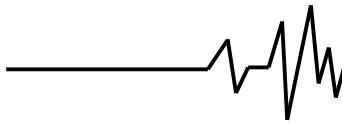
- відобразити особливості процесу в ультразвуковому кавітаційному полі;
  - ідентифікувати процес при проведенні експериментів;
  - не містити протиріч у системі операцій;
  - опиратися на інформативні параметри.
- Створення моделі процесу вилучення

пектину в ультразвуковому кавітаційному полі з яблучних вичавок складається з послідовних операцій: визначення критеріїв ефективності та кінцевих результатів; розгляд підсистем та встановлення рівнів їх взаємозв'язку; аналіз можливих результуючих варіантів.

Відповідно, до технологічних вимог пектинового виробництва та на основі проведених експериментальних досліджень [12–14], оцінку будемо проводити з урахуванням кількості вилученого цільового компонента та якісних показників яблучного пектину. Вихідні змінні ( $d$ ) можуть бути відображені, як:

- достатнє значення виходу та якості цільового компонента ( $d_1$ );
- низький вихід пектину при задовільній якості ( $d_2$ );
- високий рівень виходу та руйнування полімеру ( $d_3$ );
- низький вихід цільового компонента та високі витрати на процес ( $d_4$ ).

Перераховані рівні  $d_1 \div d_4$  необхідно розпізнавати при обґрунтованому розгляді основних технологічних та технічних параметрів, які можливо встановлювати у лабораторних умовах. Для вхідних параметрів проведена класифікація за ознаками: фізичні та фізико-хімічні показники сухих яблучних



вичавок, параметри ультразвукової та технологічної обробки сировини.

За необхідності, для поліпшення прогнозування технологічного процесу вилучення пектину або у випадку розгляду всього виробництва пектинового концентрату, в систему можливо вводити і нові зміни.

Функцію, яка виражає ступінь належності елемента множини до нечіткої множини, здійснюють з використанням функцій належності, які для зручності подамо у параметричній формі. Серед найбільш вживаних типів функцій можна виділити трикутну, трапецієвидну та дзвіноподібну. Для зменшення розмірності задачі будемо розглядати дзвіноподібний тип, який подамо у вигляді:

$$\mu^T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

де  $c$  – координата максимуму функції належності;  $b$  – коефіцієнт концентрації.

Розглядаючи вихід пектину та його якість на системному рівні, лінгвістичну змінну  $d$  від укрупнених параметрів стану, представимо у вигляді:

$$d = f_d(Q, Y, Z, W) \quad (2)$$

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

$$Y = f_Y(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad (4)$$

$$Z = f_Z(x_8, x_9, x_{10}) \quad (5)$$

$$W = f_W(x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}) \quad (6)$$

$d$  – вихід та якість пектину, який вимірюється рівнями  $d_1 \div d_4$ ;

$Q$  – стан, що залежить від фізичних властивостей вихідної сировини  $\{X_1, X_2, X_3\}$ ;

$Y$  – стан, що залежить від фізико-хімічних показників сировини  $\{X_4, X_5, X_6, X_7\}$ ;

$Z$  – стан, що залежить від параметрів ультразвукової обробки  $\{X_8, X_9, X_{10}\}$ ;

$W$  – стан, що залежить від технологічних параметрів обробки  $\{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}\}$ .

Структура моделі дерева логічного висновку (рис. 1) відповідає співвідношенням (2)...(6). Корінь дерева логічного висновку відповідає величині вихідної змінної, а вершини ( $x_1 \div x_{14}$ ) – факторам, що впливають на його величину.

Оцінку значень лінгвістичних змінних  $x_1 \div x_{14}$  та їх укрупнених параметрів проводимо з використанням шкали якісних термів (табл. 1 і 2).

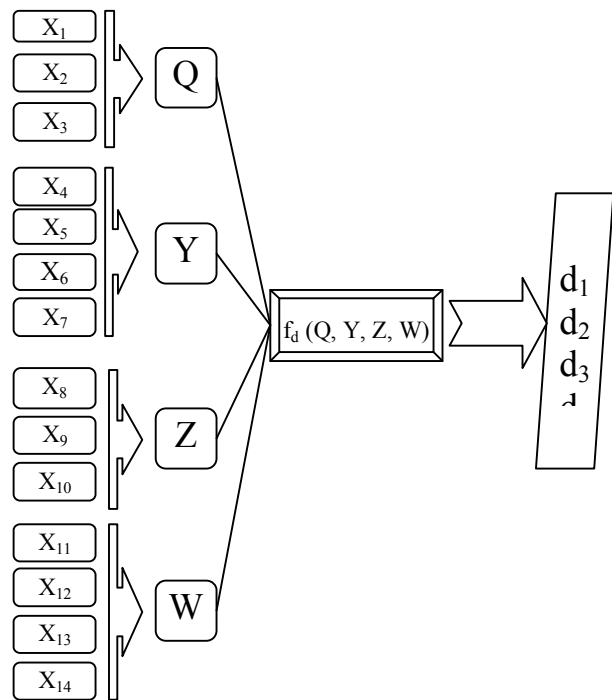
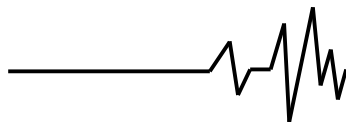


Рис. 1. Дерево логічного висновку

Таблиця 1  
Формалізація параметрів лінгвістичними змінними

Параметр стану	Універсум	Терми оцінки
1	2	3
$X_1$ – колір	[0, 1] у.о.	специфічний (сп), частково неспецифічний (чнсп), неспецифічний (нсп)
$X_2$ – запах	[0, 1] у.о.	специфічний (сп), частково неспецифічний (чнсп), неспецифічний (нсп)
$X_3$ – розмір частинок	[1, 5] мм	дрібний (др), середній (с), великий (в)
$X_4$ – масова частка спиртоосаджувальних пектинових речовин	[6, 20] %	низька (н), достатня (д), висока (в)
$X_5$ – ступінь етерифікації	[35, 78] %	низька (н), середня (с), висока (в)
$X_6$ – комплексотворююча льна здатність	[50, 210] мг Pb <sup>2+</sup> /г	низька (н), середня (с), висока (в)



Продовження таблиці 1

1	2	3
X <sub>7</sub> – гелеутворювальна здатність	[30, 75] кПа	низька (н), середня (с), висока (в)
X <sub>8</sub> – інтенсивність звуку	[1, 10] Вт/см <sup>2</sup>	низька (н), середня (с), висока (в), дуже висока (дв)
X <sub>9</sub> – частота ультразвукових коливань	[22, 66] кГц	низька (н), середня (с), висока (в)
X <sub>10</sub> – амплітуда ультразвукових коливань	[5, 20] мкм	мала (м), середня (с), велика (в)
X <sub>11</sub> – товщина шару	[10, 60] мм	мала (м), середня (с), велика (в)
X <sub>12</sub> – температура обробки	[25, 75] °C	низька (н), середня (с), висока (в)
X <sub>13</sub> – тривалість обробки	[30, 90] хв.	нетривала (нт), середня (с), тривала (т)
X <sub>14</sub> – гідромодуль	[1:5, 1:20]	малий (м), достатній (д), великий (в)

Таблиця 2

**Формалізація укрупнених параметрів стану лінгвістичними змінними**

Укрупнений параметр стану	Терми для лінгвістичної оцінки
Q – стан вихідної сировини	вимоги не дотримані (нд), вимоги частково дотримані (чд), вимоги дотримані (вд)
Y – фізико-хімічні показники сировини	низькі (н), середні (с), високі (в)
Z – параметри ультразвукової обробки	недостатні (нд), достатні (д), високі (в), дуже високі (дв)
W – технологічні параметри	низькі (н), достатні (д), високі (в)

Для оцінки лінгвістичних змінних використовували знання вимог пектинового

виробництва, дані експериментальних досліджень та експертні оцінки.

Математичною моделлю технологічного процесу вилучення пектину є система нечітких логічних рівнянь для укрупнених параметрів стану:

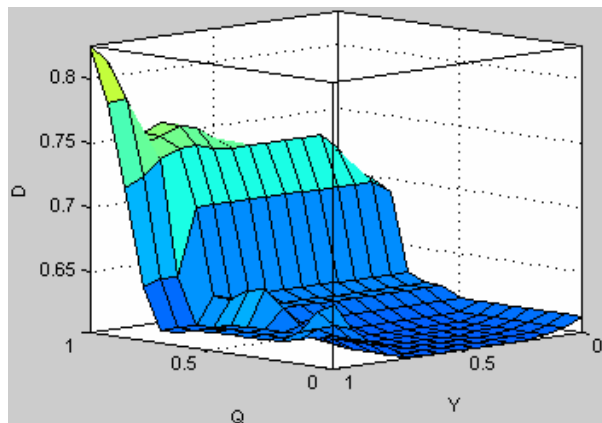
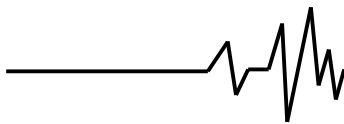
$$\mu^{d1}(d) = [\mu^{BD}(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^D(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^{BD}(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^D(W)] \quad (7)$$

$$\mu^{d2}(d) = [\mu^D(Q) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^D(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^{CD}(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^H(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^H(W)] \vee [\mu^{CD}(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^{DB}(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^{HD}(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^D(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^{HD}(Q) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^{HD}(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^{CD}(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^{HD}(Z) \cdot \mu^D(W)]; \quad (8)$$

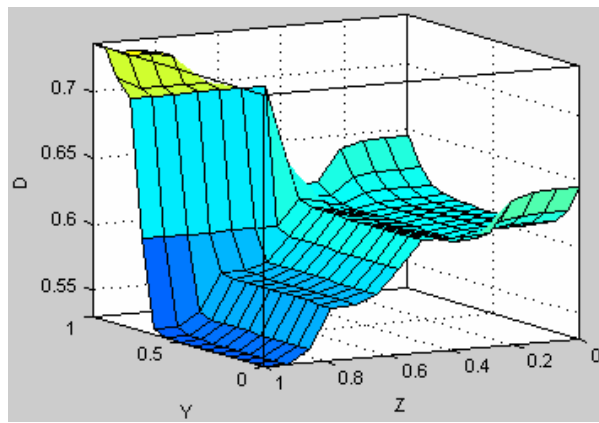
$$\mu^{d3}(d) = [\mu^D(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^D(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^{CD}(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^{DB}(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^D(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^D(W)]; \quad (9)$$

$$\mu^{d4}(d) = [\mu^D(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^{DB}(Z) \cdot \mu^D(W)] \vee [\mu^{CD}(Q) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^B(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^{HD}(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^{DB}(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^{HD}(Z) \cdot \mu^B(W)] \vee [\mu^D(Q) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{DB}(Z) \cdot \mu^H(W)]; \quad (10)$$

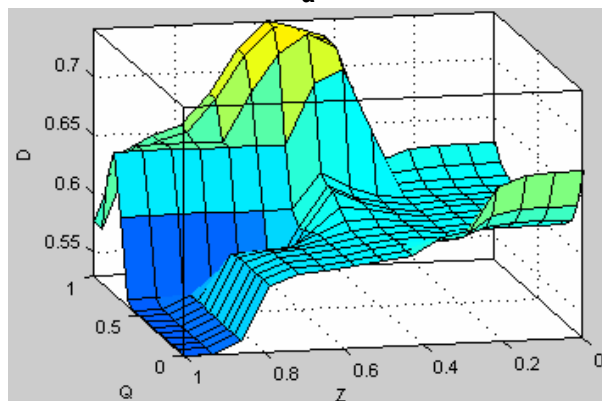
Математичну оцінку процесу проводили з використанням програмного забезпечення Matlab 7.7.0.471 (R2008b) надбудова Fuzzy logic [15, 16], результатом є графічні поверхні вихідних змінних від укрупнених параметрів стану (рис. 2).



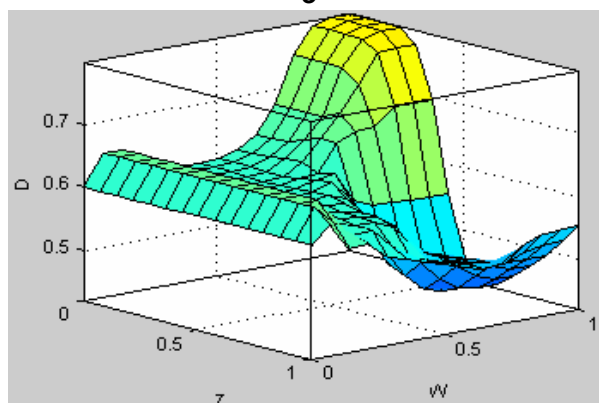
а



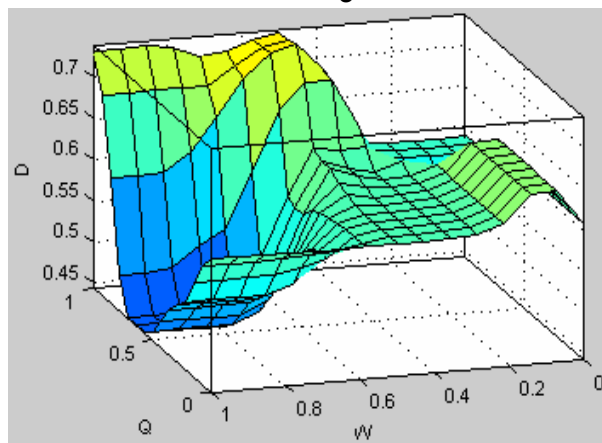
б



в



г



д

**Рис. 2. Залежність виходу пектину та його якості від:**

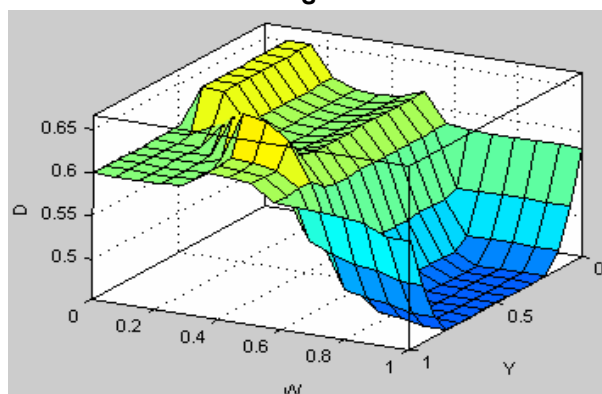
а – стану вихідної Q та фізико-хімічних показників Y сировини; б – стану вихідної сировини Q та параметрів ультразвукової обробки Z; в – стану вихідної сировини Q та технологічних параметрів обробки W; г – технологічних параметрів обробки W та фізико-хімічних показників сировини Y; д – фізико-хімічних показників сировини Y та параметрів ультразвукової обробки Z; е – параметрів ультразвукової обробки Z та технологічних параметрів обробки W

Для тонкого налаштування моделі в подальшому необхідно використовувати апарат генетичних алгоритмів, який забезпечує результат у залежності від вибірки.

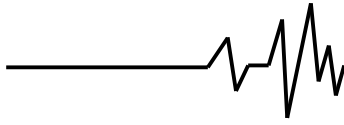
Модель можна рекомендувати для застосування у пектиновому виробництві, при цьому її використання не вимагає значної кількості експериментальних даних, які здебільшого не вдається отримати, оскільки це потребує значних затрат.

**Висновки**

1. Прогнозування процесу переробки пектиновмісної сировини є необхідним елементом його організації. З формальної



е



точки зору, ця задача відноситься до широкого класу задач прогнозування дискретних послідовностей (сукупності значень при фіксованих показниках), які можливі при оцінці якості сировини та при налаштуванні параметрів її переробки.

2. Математичну модель прогнозування ефективності технологічного процесу вилучення пектину в ультразвуковому полі з використанням теорії нечітких множин, що пов'язують сировинний, технологічний та апаратно-схемний ієрархічні рівні, можна розглядати як альтернативний підхід щодо аналізу функціонування та причин порушення якості його виконання.

### Література

1. Кудинов Ю.И. Нечеткое моделирование и идентификация технологических процессов // Измерение, контроль, автоматизация. – М.: Мир, 1988. – С. 77–86.
2. Wagenknecht M., Otto O. Hartman K. Theoretical and Applicational Aspects of Fuzzy Modeling // Fuzzy logic in engineering and natural sciences. -1996. Vol.8. –P.138–149.
3. Kartman P., Unbehauen H. Identification of the structure of fuzzy models // Fuzzy logic in engineering and natural sciences. - 1996. Vol. 8. –P. 36-48.
4. Модель нечеткой системы, основанная на логической структуре. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения /Топака Х., Цукияма Т., Асан Л./ Под ред. Ягора Р.Р. – М.: Мир, 1986. – С. 186–199.
5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to a modeling and control // Fuzzy Sets and Systems. - 1986. – Vol. 12. – P. 211–234.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Перевод с английского Р. Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с. – Библиограф.: С. 273–275.
7. Ротштейн О. П. Моделирование та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів / О. П. Ротштейн, С. Д. Штовба, О. М. Козачко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2007. – 211 с.– Библиогр.: с. 186–198. – ISBN 978-966-641-231-0.
8. 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.– ISBN 978–966–641–247–1.
9. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике. — Винница: Континент—ПРИМ, 1996. – 132 с.
10. 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.
11. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба / Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108с: іл., табл. – Библиограф.: с. 96–101. – ISBN 966-641-135-0.
12. Берник І.М. Встановлення оптимальних параметрів технологічного процесу вилучення пектину з яблучних вичавок в ультразвуковому полі // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. Тематический выпуск “Химия, химическая технология и экология”. – 2009. – № 45. – С. 21–27.
13. Берник І. М. Особливості вилучення пектину в ультразвуковому кавітаційному полі та його властивості / І.М. Берник, О.Ф. Луговський, І.О. Крапивницька // Наукові праці Національного університету харчових технологій – 2010. – № 32. – С. 59–63.
14. Патент 47866 Україна МПК А 23L 1/0524 / Спосіб вилучення пектину з пектиновмісної сировини / О.Ф. Луговський, І.М. Берник, І.О. Крапивницька; заявник та власник патенту Вінницький держ. аграрний ун-т – №200909435; заявл. 14.09.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 4/2010.
15. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 736 с.: ил. – Библиограф.: с. 717–719. – ISBN 5–94157–087–2.
16. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил. – Библиограф.: с. 286. – ISBN 5–94074–395–1 («ДМК Пресс»), ISBN 978–5–388–00020–0 («Питер»).