

УДК 664.8.038
© 2014

В.М. РАДІОНЕНКО,
кандидат технічних наук

Донецький національний
університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ
ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКІВ
ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ
РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В
МОДУЛЯХ З МОДИФІКОВАНИМ
СЕРЕДОВИЩЕМ

Розглянуто використання компактних модулів з модифікованим середовищем у технології холодильного зберігання продуктів рослинного походження в камерах побутових холодильників. На основі обмежених експериментальних даних щодо кінетики псування яблук залежно від різних чинників побудовано штучні нейронні мережі для прогнозування термінів зберігання.

Ключові слова: холодильне зберігання, штучні нейронні мережі, прогнозування терміну схоронності.

Постановка проблеми. Збільшення строків холодильного зберігання біологічної продукції в умовах контрольованого або модифікованого середовища досягається за рахунок фізіологічних (респірація, дозрівання, псування) і мікробіологічних процесів, що відбуваються в харчових продуктах. Розробка компактних модулів з модифікованим середовищем (ММС) є однією з актуальних проблем технології холодильного зберігання продуктів рослинного походження, що спрямована на підвищення якості рослинної продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технології збільшення строків зберігання: озонування, регульоване й модифіковане середовище, плівкоутворювальні композиції, антимікробні й біоактивні плівки, що іонізують випромінювання, та інші показали свою ефективність у промисловому масштабі, завдяки низькій вартості й простоті застосування [1–13]. Можливості застосування зазначених технологій, наприклад у побутових холодильниках, що значно розширює їхні функціональні можливості й підвищує конкурентоспроможність, практично не досліджені. Проектування ММС залежить від типу збереженої продукції й не існує універсального рішення, яке б задовольняло всім специфічним критеріям для кожного виду продукції. Створення необхідного складу середовища залежить від швидкості респірації, маси й виду продукту, площі мембрани,

її товщини, селективної здатності, відносини проникності для кисню й вуглекислого газу, а також безлічі інших факторів. Розмаїтість продуктів вимагає такої ж розмаїтості рішень при виборі мембран, керуючих процесом газообміну.

Мета статті – розробити підхід до оптимального вибору експлуатаційних характеристик мембран, які б забезпечили необхідні параметри модифікованого середовища всередині модуля для збільшення строків холодильного зберігання рослинної продукції. Для досягнення зазначеної мети в роботі розроблена нейромережева модель прогнозу строків зберігання, де вхідними змінними слугують умови зберігання й технологічні властивості мембрани. У роботі розглянутий компактний модуль із напівпроникними мембранами, у якому відбувається саморегульований газообмін між модифікованим газовим середовищем усередині обмеженого об'єму й повітряним середовищем у камері холодильника [14, 15].

Матеріали і результати досліджень. Як об'єкт дослідження обрані яблука сорту Ренет Семиренко. Оцінку ефективності роботи модуля проводили на основі експериментальних даних про динаміку показників якості яблук (вміст вітаміну С, твердість) і складу газового середовища (вміст етилену, CO₂, O₂ і N₂) у процесі зберігання [14, 15]. Оптимальний режим для збереження товарної якості:

- температура повітря $t = 0-(+1) \text{ }^\circ\text{C}$;
- відносна вологість повітря $\varphi = 90-95 \%$.

Подих є основним процесом, у результаті якого змінюються хімічний склад і харчова цінність яблук, а також стійкість до інфекційних і функціональних захворювань. Інтенсивність подиху яблук характеризується кількістю виділюваного CO_2 , що для зимових сортів південних районів України, Молдавії й Росії становить 7,9–10 мг/кг/год. Уміст сухих речовин для яблук сорту Ренет Семиренка до кінця товарного зберігання зменшується на 20–25 %. Спочатку, протягом перших 3–4 місяців, уміст сухих речовин змінюється повільно, а потім зменшується все швидше. Для яблук цього сорту при зберіганні в МГС і РГС оптимальна температура становить 2–3 $^\circ\text{C}$. Допускається зберігання за більш низької температури, тобто $t = 1-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, але не нижче 0 $^\circ\text{C}$ з відносною вологістю повітря не нижче 95 %. Чутливість цього сорту до впливу CO_2 підвищується в міру зниження температури й підвищення відносної вологості повітря. Межа зниження концентрації O_2 для яблук Ренет Семиренка – 2 %, оскільки за більш низької концентрації підсилюються процеси анаеробіозу.

Модифіковане середовище створюється природним шляхом організації газообміну між плодами й середовищем у замкненому просторі, а також між зовнішнім повітрям через газообмінники (мембрани) з матеріалів, селективно проникних для компонентів газового середовища. Тривалість формування газового середовища за рахунок подиху фруктів і овочів не перевищувала трьох діб з моменту їхньої герметизації.

Для характеристики якості продукції необхідно враховувати безліч критеріїв K_i , які мають різні розмірності, фізичний вміст і діапазон зміни. Просте усереднення таких показників не має сенсу й для побудови узагальнених критеріїв необхідно використовувати методи багатокритеріального аналізу. У роботі [2] нами був запропонований підхід до оцінки такого критерію якості на основі схеми Беллмана–Заде [3], у якій остаточне рішення досягається як результат перетинання всіх нечітких критеріїв, представлених

функціями приналежності $\mu(X)$,

$$\mu_{до}(X) = \mu_{до1}(X) \cap \dots \mu_{Ki}(X) \cap \dots$$

$$\mu_{Ki}(X), i = 1, 2, \dots, n; X \in X_p.$$

Функції приналежності показників якості можуть бути обрані різними способами, залежно від контексту завдання. У даній роботі функції приналежності, які зводять всі критерії до інтервалу [0–1], попередньо обирали максимальну й мінімальну границі критеріїв. Мінімальну границю K_i^{min} приймали рівною нулю, а максимальну (“ідеальна точка”) K_i^{max} вибирали рівній початковій величині, що фіксували на початку зберігання.

Функція приналежності для всіх нечітких цілей представлена у вигляді:

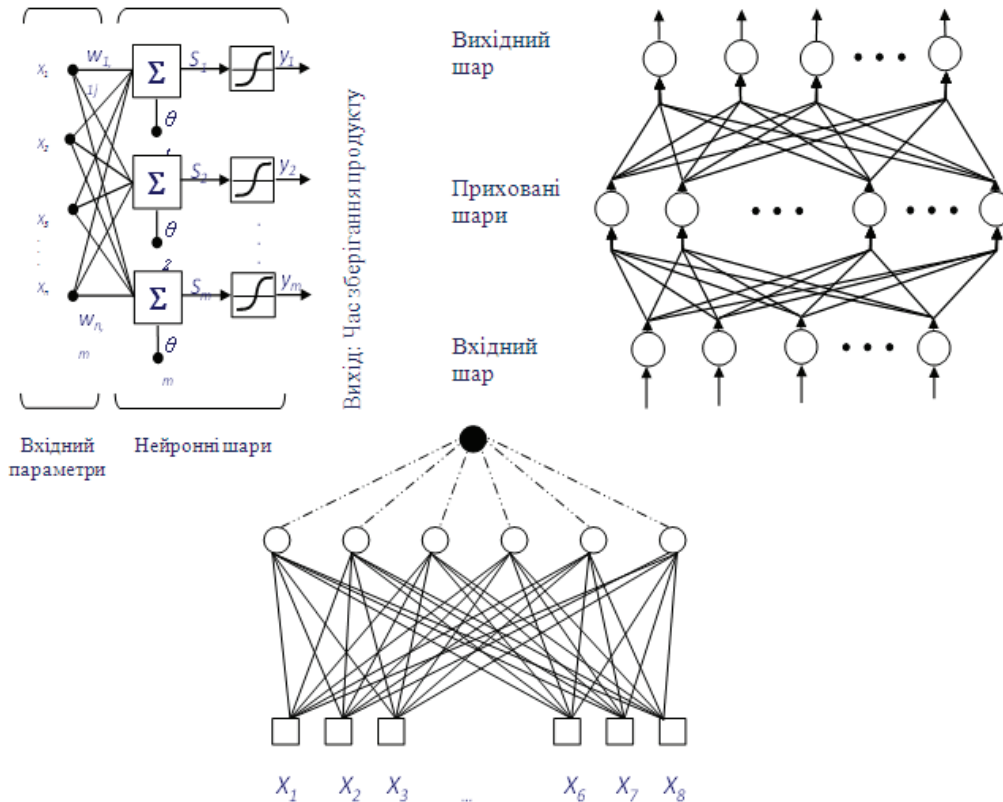
$$\mu_{Ki} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_i(X) > K_i^{max} \\ \frac{K_i^{max} - K_i}{K_i^{max} - K_i^{min}}, & K_i^{min} < K_i \leq K_i^{max} \\ 1, & \text{якщо } K_i(X) \leq K_i^{min} \end{cases}$$

Остаточне рішення, що формує узагальнений критерій, визначене як перетинання всіх нечітких критеріїв, представлених їхніми функціями приналежності. У загальному випадку дана проблема зводиться до стандартного завдання нелінійного програмування: знайти такі значення X і λ , за яких виконуються умови:

$$\lambda \leq \mu_{Ki}(X), i = 1, 2, \dots, n.$$

Для двох показників (наприклад вмісту вітаміну С у продукті та вмісту кисню в модулі з мембраною) зміна узагальненого критерію, що характеризує деградацію продукту за період зберігання, являє собою убутну функцію, що у кожний момент визначається перетинанням функцій приналежності кожного із критеріїв. Значення цільової функції – строки зберігання, знаходили з кінетичних кривих псування продукту, заздалегідь задаючи компромісне значення узагальненого критерію.

Для оптимального вибору мембран для ММС розглянуті дві категорії продуктів (А і В), які розрізняються наявністю/відсутністю респіраційних властивостей. Перша група ділиться на 4 підгрупи залежно від складу кисню й вуглекислого газу, необхідних для збільшення тривалості строків зберігання. Підгрупа А1 не вимагає певного вмісту CO_2



Структура штучної нейронної мережі для прогнозу строків зберігання рослинної продукції

і O_2 ; підгрупа A2, до якої входять в основному овочі, потребує невеликого вмісту кисню (1–5 %) за відсутності CO_2 . Підгрупа A3 (в основному фрукти й деякі овочі) вимагає збалансованої кількості обох газів (1–5 % O_2 і 0–5 CO_2); підгрупа A4 – відносно високої концентрації $CO_2 > 5\%$. До групи В мають відношення такі продукти, як м'ясо, риба і т.ін.

У роботі запропонована математична модель, що використовує штучні нейронні мережі, для прогнозування строків зберігання залежно від характеристик мембрани, типу продукції та умов зберігання для групи А.

Час зберігання рослинної продукції (Shelf life) (SL) представлено у вигляді функції від змінних, що характеризують умови зберігання й специфікацію мембран,

$$SL = SL(X_1, X_2, \dots, X_8),$$

де X_1 – інтенсивність подиху; X_2 – об'єм мо-

дуля; X_3 – температура; X_4 – відносна вологість; X_5 – інтенсивність переносу кисню; X_6 – селективна проникність мембрани; X_7 – товщина мембрани; X_8 – робочий діаметр мембрани.

Структура нейронної мережі, що імітує систему прогнозу строків зберігання залежно від вхідних змінних, представлена на рисунку. Як навчальна вибірка обрані результати експериментальних досліджень зі збільшення строків зберігання рослинної продукції (яблука) [14, 15]. Навчання проводили методом зворотного поширення помилки [16, 17], у якому поширення сигналів помилки від виходів нейронної мережі до її входів відбувається в напрямку, зворотному прямому розповсюдженню сигналів у нормальному режимі роботи. При навчанні вирішували завдання мінімізації функції помилки

$$\min \sum_{i=1}^p (y_i - y_i^0)^2,$$

де y_i реальне, а y_i^0 – ідеальне (задане) значення для i -го виходу.

Підстроювання вагових коефіцієнтів синаптического зв'язку w_{ij} між вузлами штучної нейронної мережі (рисунок) i та j здійснюється за допомогою емпіричного коефіцієнта швидкості навчання [18]. Для підгрупи A2 використовували два приховані шари. Перший містив два нейрони, другий – один. Як передатні функції використовували гіперболічний тангенс – tansig і лінійну функцію – purelin. Програма розрахунку SL реалізована в середовищі Matlab [19] для продуктів групи А і може бути рекомендована для практичного застосування. Області застосовності моделі при виборі необхідної мембрани, що забезпечує задані строки зберігання яблук у ММС, обмежені певними значеннями параметрів.

Умови зберігання

- ◆ Інтенсивність подиху = 5–20 мг CO₂/кг/год
- ◆ Температура = 0–7 °C
- ◆ Відносна вологість = 30–95 %
- ◆ Об'єм модуля = 10–30 л.

Специфікація мембрани

- ◆ Інтенсивність переносу кисню = 5–10×10³ см³/м²/добу

- ◆ Селективна проникність = 0–2,5
- ◆ Товщина мембрани = 20–50 мк
- ◆ Робочий діаметр мембрани = 20–50 мм.

Основні показники полімерних мембран, які були використані в експериментах (напівпроникна мембрана марки СИМА – фірми НПО “ТЕХНОФИЛЬТР”): діаметр робочої зони – 23,0±0,5 мм; товщина мембрани – 0,120±0,020мм; площа мембрани – 4,15 см². Визначення строків зберігання яблук за холодильного зберігання проводили для трьох альтернативних варіантів [15]:

- ізольований модуль: розміщення яблук у герметичній ємкості із пластмаси (модуль із закритою кришкою);
- модуль із мембраною: розміщення яблук у герметичній ємкості зі селективною вставкою;
- відкритий модуль – розміщення яблук в ємкості із пластмаси з відкритою кришкою.

Для вивчення впливу площі мембрани на газообмін додатково розглядали три варіанти, які включали поряд із стандартною мембраною, половинну й подвійну площі поверхні.

Результат роботи програми прогнозу оптимальні строки зберігання яблук для таких умов 3,7 місяця.

Висновки

Застосування напівпроникних мембран із заздалегідь заданими властивостями дозволяє збільшити строки зберігання рослинної продукції в умовах модифікованого середовища в 2–3 рази порівняно з традиційними методами холодильного зберігання.

Різноманіття суперечливих умов, які пред'являються до оптимальних концентрацій кисню й діоксиду вуглецю зі збільшення строків зберігання різних видів продукції в побутових холодильниках, дозволяє зробити висновок про відсутність універсального матеріалу мембрани. Тому для кожного із продуктів вибір мембрани повинен бути здійснений індивідуально.

Рішення зазначеної проблеми відкриває можливість створення так званих “інтелектуальних” модулів для зберігання різних видів продукції.

Оптимальний вибір мембран залежить від матеріалу, варіювання робочої площі й перфорації мембран, які регулюють швидкості газообміну в модулях. Розроблена модель прогнозу строків зберігання рослинної продукції базується на методі штучних нейронних мереж, за допомогою якого встановлений взаємозв'язок між цільовою функцією – часом схоронності продукту й змінними керування: умовами зберігання й властивостями мембрани.

Бібліографія

1. Bellman R. Decision-making in a fuzzy environment / R. Bellman, L. Zadeh // Management Science. – 1970. – № 17. – P. 141–164.
2. Galic K. Shelf Life of Packaged Bakery Goods / K. Galic, D. Curic, D. Gabric // A Review Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2009. – № 49. – P. 405–426.
3. Applications of chitosan for improvement of quality and shelf life of foods: a review / H. No, S.P. Meyers, W. Prinyawiwatkul, Z. Xu // Journal of food science. – 2007. – № 72. – P. 87–100.
4. Soliva-Fortuny R.C. New advances in extending the shelf-life of fresh-cut fruits: a review / R.C. Soliva-Fortuny, O. Martin-Belloso // Trends in Food Science and Technology. – 2003. – № 14. – P. 341–353.
5. Arvanitoyannis I. Irradiation applications in vegetables and fruits: a review / I. Arvanitoyannis, A. Stratakos, P. Tsarouhas // Critical reviews in food science and nutrition. – 2009. – № 49. – P. 427–462.
6. Decontamination methods to prolong the shelf-life of minimally processed vegetables, state-of-the-art / V. Gyzmez-Lypez, P. Ragaert, J. Debevere, F. Devlieghere // Critical reviews in food science and nutrition. – 2008. – № 48. – P. 487–495.
7. Zambre S.S. Tomato redness for assessing ozone treatment to extend the shelf life / S.S. Zambre, K.V. Venkatesh, N.G. Shah // Journal of Food Engineering. – 2010. – № 96. – P. 463–468.
8. Rocha A.M.C.N. Shelf life of minimally processed apple (cv. Jonagored) determined by colour changes / A.M.C.N. Rocha, A.M.M.B. Morais. // Food Control. – 2003. – № 14. – P. 13–20.
9. Use of biodegradable films for prolonging the shelf life of minimally processed lettuce / M.A. Del Nobile, A. Conte, M. Cannarsi, M. Sinigaglia // Journal of Food Engineering. – 2008. – № 85. – P. 317–325.
10. Corbo M. A novel approach for calculating shelf life of minimally processed vegetables / M. Corbo, M. Del Nobile, M. Sinigaglia // International Journal of Food Microbiology. – 2006. – № 106. – P. 69–73.
11. Бедин Ф.П. Технологія хранения растительного сырья. Физиологические, теплофизические и транспортные свойства / Бедин Ф.П., Белан Е.Ф., Чумак Н.И. – Одесса: Астропринт, 2002. – 306 с.
12. В.В. Дятлов. Сохраняемость яблок с защитным пленочным покрытием / В.В. Дятлов. – Донецк: ДонГУЭТ, 2004. – 214 с.
13. Sandhya. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs, LWT / Sandhya // Food Science and Technology. – 2010. – № 43. – P. 381–392.
14. Радіоненко В.М. Динаміка показників якості рослинної продукції за холодильного зберігання в модулях із модифікованою атмосферою / Радіоненко В.М., Кочетов В.П., Мазур В.О. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2009. – 368 с.
15. Радионенко В.Н. Кинетика процессов деградации качества растительной продукции при холодильном хранении в модулях с модифицированной атмосферой. Холодильная техника и технология / В.Н. Радионенко, В.А. Мазур. – Одесса: ОГАХ, 2009. – 187 с.
16. Галушкин А.И. Синтез многослойных систем распознавания образов / А.И. Галушкин. – М.: “Энергия”, 1974. – 244 с.
17. Werbos P.J. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences / P.J. Werbos // Ph.D. thesis Harvard University. – Cambridge, MA, 1974. – 300 p.
18. Artificial neural networks in chemometrics: History, examples and perspectives / F. Marini, R. Bucci, A.L. Magrini, A.D. Magrini // Microchem. Journal. – 2008. – № 88. – P. 178–185.
19. MATLAB 7.9. <http://www.mathworks.com/products/matlab>

Рецензенти – доктори технічних наук,
професори О.М. Горін, С.С. Тищенко