УДК 664.8.037.1: 635.63

Антоніна ДУБІНІНА,
Галина СЕЛЮТІНА,
Вікторія БІЛОУС

ОПТИМІЗАЦІЯ УМОВ ОХОЛОДЖЕННЯ ОГІРКІВ

Консервування плодоовочевої продукції низькими температурами (охолодження і заморожування) широко використовується для її цілорічного споживання, насичення раціону харчування населення життєво необхідними вітамінами, макро- та мікроелементами, для швидкого приготування страв, покращання санітарно-гігієнічних показників продукції тощо. Для переважної кількості плодів і овочів заморожування – один із прийнятних способів консервування і зберігання, проте тільки не для огірків.

Огірки – це овочі з високим вмістом вологи (до 94 %), яка сконцентрована переважно у м'якоті й складається з клітинного соку, міжклітинної рідини та плазми. При заморожуванні зовнішній вигляд і консистенція їх погіршується через руйнування клітинних стінок кристалами льоду, які утворюються при замерзанні клітинного та міжклітинного соку. Саме тому актуальними для огірків є застосування таких режимів охолодження, які мінімізують погіршення сенсорних властивостей та морфологічної структури.

© *Антоніна Дубініна, Галина Селютіна, Вікторія Білоус, 2010*

Під час охолодження овочів важливу роль відіграють клітинні білкові сполуки. Завдяки своїм фізичним властивостям вони відносяться до колоїдів, які, розчиняючись у воді, утворюють гідрогелі та гідрозолі. Частина води, активність якої в останніх нижче за відповідну для певного продукту, є зв'язаною водою, решта – вільна волога. Під дією зміни температури золі переходять у гелі, та навпаки. Зміни в клітинах при охолодженні починають відбуватися поблизу точки замерзання. Для огірків кріоскопічна точка замерзання (значення якої залежить від концентрації розчинених у клітинній волозі речовин) становить від –0.48 до –0.53 °С. Саме в цьому інтервалі в'язкість клітинної протоплазми огірків зростає, утворюючи гель [1].

При проведенні досліджень виникає необхідність визначення динамічних характеристик харчових продуктів із метою подальшого їх опису у вигляді диференціальних рівнянь. Після знаходження необхідних співвідношень доречно розробити алгоритми керування та синтезу системи управління цими об'єктами [2]. Визначення коефіцієнтів рівняння для них – достатньо складна проблема, оскільки під час дослідження на результати вимірювань впливають зовнішні фактори. Також об'єкт може мати нестабільні властивості, що не дає можливості використовувати традиційні регресійні підходи.

Мета дослідження – розроблення науково обґрунтованих методів прогнозування динаміки та визначення оптимальних умов охолодження огірків.

Для окреслення динамічних характеристик об'єктів харчової промисловості використано математичне моделювання регресійними методами (за стандартної програми *MathCad*).

Для охолодження придатні повністю розвинені плоди огірків довжиною 15–25 см, рівні, без пухирців, із білими ворсинками, насіннєва камера невелика, насіння незатверділе. Плід повинен мати щільну поверхню, бути пружним, зі шкірочкою зеленого кольору та щільною м'якоттю [1].

Обрані для дослідження огірки сорту *Ксана* відповідали наведеним вище характеристикам. Їх охолоджено у фризері при температурі –18 °С протягом 60 і 90 хв. Температуру виміряно напівпровідниковим датчиком марки DS1821 всередині огірка та реєстровано цифровим термометром на базі мікроконтролера PIC16F84A.

При проведенні досліджень структура динамічного об'єкта зазвичай відома. Необхідно знайти значення коефіцієнтів рівняння, що описує об'єкт. Використовують переважно системи диференційних рівнянь, в яких і стан речовини, що досліджується, і сигнали управління – вектори відповідного порядку. Коефіцієнти ж перед ними є відповідними матрицями. Їхні елементи необхідно знайти. Існує багато підходів щодо ідентифікації динамічних об'єктів, які розрізняються складністю технічної реалізації, методами обробки експериментальних даних [3]. Одними із сучасних є регресійні методи, за допомогою яких можна визначити їх аналітичні співвідношення.

Завданням дослідження є окреслення коефіцієнтів динамічних об'єктів із урахуванням особливостей використання сучасних методів регресії, які можна поділити на дві групи. Перша – методи для визначення коефіцієнтів співвідношень після завершення повного циклу проведення досліджень; друга – методи, що уможливлюють поступове уточнення необхідних коефіцієнтів під час проведення досліджень. Методи першої групи використовуються переважно для ідентифікації стаціонарних об'єктів, параметри яких або не змінюються в часі, або їх зміною можна знехтувати під час досліджень. До другої групи можна віднести методи стохастичної ідентифікації, навчання тощо. Вони базуються на використанні адаптивного підходу та дають змогу безпосередньо обчислювати та коректувати обчислення в ході дослідження. Однак ці методи, порівняно з методами першої групи, мають відносно невелику збіжність до істинних значень співвідношень. Іноді обсяг здобутої інформації не дає можливості оцінити значення коефіцієнтів з потрібною точністю. Саме тому при практичному застосуванні вони потребують значного обсягу дослідів, що іноді викликає певні труднощі.

Припустимо, що об'єкт дослідження можна описати рівнянням стану:

$$\dot{X} = \alpha X + \beta U, \tag{1}$$

де X – n-мірний вектор стану;
U – m-мірний вектор управління відповідно.

Для подальшого проведення дослідження рівняння (1) необхідно записати в дискретній формі [2]:

$$X_{k+1} = AX_k + BU_k, \tag{2}$$

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \cong I + \Delta t \cdot \alpha,$$

$$B = \begin{vmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & & \\ b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{vmatrix} \cong \Delta t \cdot \beta.$$

Величина Δt – інтервал часу, в якому проводяться вимірювання стану об'єкта при дослідженні.

Введемо позначення параметрів, що вимірюються:

$$w_k = \left| x_{1,k} \cdots x_{n,k}; u_{1,k} \cdots u_{m,k} \right|^T = \left| w_{1,k} \cdots w_{n+m,k} \right|^T, \tag{3}$$

$$F = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n}, & b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & & & & & \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn}, & b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (F_1)^T \\ \vdots \\ (F_n)^T \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Рівняння (2) можна виразити:

$$X_{k+1} = F \cdot w_k. \quad (5)$$

Цей вираз аналогічний регресійному співвідношенню, яким можна описати будь-який об'єкт, коли він має декілька входів і виходів [4]. Ось чому, коли під час експериментів зафіксувати r одночасних сукупностей вимірювань ($r \geq n+m+1$) величин $x_k + l^w k$ (тобто x_{k+1}, x_k, u_k), елементи i-го рядка матриці F можна визначити за допомогою лінійної регресійної процедури методом найменших квадратів:

$$\hat{F}_i^T = \left[(W_k)^T W_k\right]^{-1} (W_k)^T \chi_{i,k+1} = \left| a_{1,i} \quad \cdots \quad a_{ni} \quad b_{1i} \quad \cdots \quad b_{mi} \right|, \quad (6)$$

де W_k має вигляд:

$$W_k = \begin{vmatrix} w_{1(1)k} & \cdots & w_{m+n(1)k} \\ \vdots & & \\ w_{1(r)k} & \cdots & w_{m+n(r)k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_{1(1)k} & \cdots & x_{n(1)k}, & u_{1(1)k} & \cdots & u_{m(1)k} \\ \vdots & & & & & \\ x_{1(r)k} & \cdots & x_{n(r)k}, & u_{1(r)k} & \cdots & u_{m(r)k} \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$$\chi_{i,k+1} = \left| x_{i(1)k+1} \quad \cdots \quad x_{i(\mu)k+1} \quad \cdots \quad x_{i(r)k+1} \right|^T. \quad (8)$$

$x_{i,k+1}$ означає μ-е вимірювання i-го стану x_{k+1} (μ=1,2,...,r); r – число вимірювань W_k, x_{k+1}.

Саме тому для обчислення всіх коефіцієнтів рівняння (1) необхідно зафіксувати r величин x_{k+1} та r одночасних сукупностей вимірювань векторів x_k, u_k, що належать до попереднього інтервалу часу Δt, які позначені як w_k. Взагалі, для обчислення матриць A та B відповідно з рівнянням (2) необхідно зафіксувати $2r$ вимірювань x та r вимірювань u. Сучасні системи дають можливість запам'ятати необхідні сукупності вимірювань і визначити коефіцієнти рівняння (2) після завершення дослідів.

Цей метод використано для знаходження параметрів процесу охолодження огірка.

При проведенні досліджень через час Δt фіксувалася температура всередині огірка та охолоджувальної поверхні фризера. Результати вимірювання наведено на *рис. 1*. Величина x_i відповідає точкам вимірювання з інтервалом в 1 хв. Величина y_i відтворює зміну температури огірків під час досліджень при температурі фризера –18 °С.

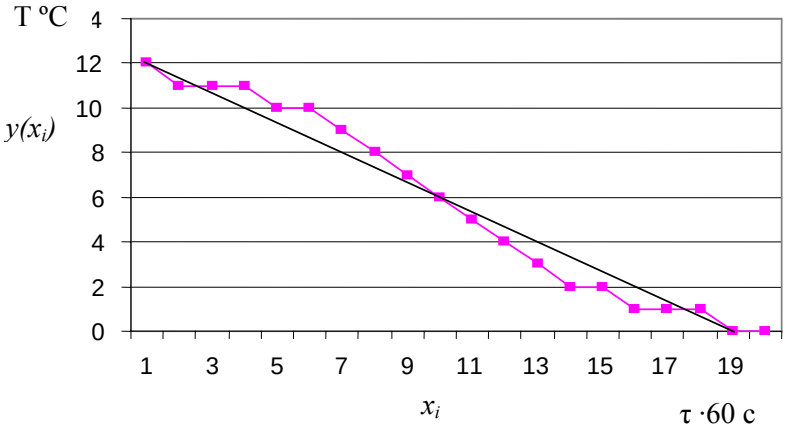

Рис. 1. Параметри вимірювання процесу охолодження огірка

Графік відображає зміну температури на початку процесу охолодження в центрі огірка (протягом 20 хв) і дає змогу орієнтовано визначити динамічні характеристики об'єкта відносно швидкості змін, які відбуваються під час охолодження до 0 °С.

Залежність $f(x_i)$ знайдено апроксимацією отриманих даних рівнянням:

$$y(x) = 13.03 - 1.54x + 0.46x^2 - 0.071x^3 + 4.2 \cdot 10^{-3}x^4 - 8.3 \cdot 10^{-5}x^5. \quad (9)$$

За допомогою рівняння (9) підраховано зміни температури об'єкта, які зображено у вигляді неперервної лінії (див. *рис. 1*).

Із використанням виразу (5) знайдено коефіцієнти рівняння (2).

При визначенні коефіцієнтів за експериментальними даними отримано:

$$y_{k+1} = 0.9809 \cdot y_k - 0.0287 \cdot T_\phi, \quad (10)$$

де y_k – температура огірка у k час вимірювання;
T_ϕ – температура камери фризера.

При визначенні коефіцієнтів за апроксимованими експериментальними даними одержано рівняння:

$$y_{k+1} = 0.9865 \cdot y_k - 0.0305 \cdot T_\phi. \quad (11)$$

Таким чином, у результаті досліджень методом регресії отримано співвідношення, які дають змогу описати процес охолодження огірка у холодильній камері. Визначення коефіцієнтів об'єкта безпосередньо за експериментальними даними та такими, які були згладжено регресійною залежністю, показало, що вони приблизно однакові. Відхилення в них обумовлено похибками вимірювань, особливо на початку проведення досліджень. Із здобутих співвідношень видно, що на зміну стану впливає переважно початкова температура об'єкта дослідження,

ніж температура охолоджувальної камери фризера. Це свідчить про суттєву інерційність об'єкта, що зменшує вимоги до показників стабілізації температури камери охолодження. Тобто процес охолодження огірка можна реалізувати з використанням існуючого обладнання без його доробки. Дані, отримані в ході експерименту охолодження огірка протягом 90 хв, відображено на *рис. 2*. На графіку показано зміну температури всередині огірка. Істотне охолодження настає після 60 хв і підтверджується результатами експериментального дослідження. У цьому інтервалі температура огірка не знижується нижче критичної точки, внаслідок чого не утворюються кристалики льоду та не погіршуються його органолептичні властивості. Зразок огірка мав тверду консистенцію, на поверхні спостерігався незначний льодовий наліт.

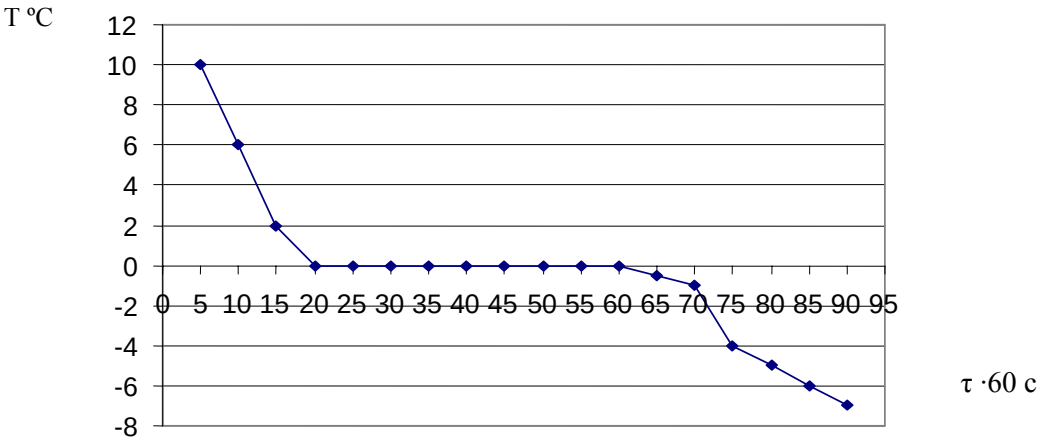

Рис. 2. Залежність зміни температури від часу охолодження огірка

Усередині м'якоть була охолоджена повністю без утворення льоду. Після цього зразок зберігали 7 год у холодильнику при температурі 4–6°С. В кінці зберігання шкірка огірка була досить щільна, хрумка, м'якоть – водяниста та м'яка.

Зразок огірка після 90 хв охолодження був повністю покритий крижаною кіркою, твердої консистенції. Усередині м'якоть заморожена, утворилися великі кристали льоду. Через 7 год зберігання при температурі 4–6 °С огірок розтанув і мав дуже м'яку, крихкотілу консистенцію, при натисканні на м'якоть вона розпливалася. Погіршення структури огірка можна пояснити застосуванням тривалого охолодження, коли зміни починають відбуватися при наближенні температури всередині продукту до точки замерзання, що призводить до потовщення пластин, які зв'язують клітини. Однак істотні зміни починаються після замерзання деякої частки клітинної води й утворення міжклітинного льоду.

Отже, можна зробити висновок, що для огірків найбільш прийнятним є охолодження при температурі –18 °С протягом 60 хв, адже за таких умов клітинний сік охолоджується до кріоскопічної точки, а зберігання при 4–6 °С уможливлює подальше використання продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Э. Алмаши.* Быстрое замораживание пищевых продуктов / Э. Алмаши, Л. Эрдели, Т. Шарой. — М. : "Легкая и пищевая пром-сть", 1981. — 408 с.
2. *Олсон Г.* Цифровые системы автоматизации процессов управления / Г. Олсон, Д. Пиани. — СПб. : Невский диалект, 2002. — 556 с.
3. *Власова К. П.* Методы исследований и организация экспериментов / под. ред. проф. К. П. Власова. — Харків : "Гуманитарный Центр", 2002. — 256 с.
4. *Дрейпер Н. Р.* Прикладной регрессионный анализ / Н. Р. Дрейпер, Г. Смит. — М. : Издательский дом "Вильямс", 2007. — 912 с.