

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЧАС ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ

Комарова Г.Л.

Український державний університет залізничного транспорту

Мостова Л.М., Мартиненко Л.Г.

Харківський торговельно-економічний інститут

Київського національного торговельно-економічного університету

Розроблено механізм моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності при термічній обробці за умови, що його температурне поле змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати. Досліджено вплив геометричної форми, розмірів та температури у широкому діапазоні величин на час обробки. Визначено, що енергія активації структурних перетворень у моркві дорівнює  $(130 \pm 10)$  кДж/моль,  $R$  95%.

**Ключові слова:** моделювання, харчові продукти, термічна обробка.

### Постановка проблеми у загальному вигляді.

У харчовій промисловості найбільш поширеним методом обробки харчових продуктів є теплова обробка. Приблизно 75-85% виробів продукції громадського харчування в обов'язковому порядку піддається термічній обробці [1]. Однак все це не означає, що теплова обробка продуктів не позбавлена недоліків.

На жаль, харчові продукти в процесі термічної обробки в закладах ресторанного господарства втрачають значну частину необхідних організму людини компонентів [2]. Це призводить до зниження природної біологічної цінності багатьох продуктів, що призводить не тільки до зростання нестачі продуктів харчування, але спричиняє порушення обмінних процесів в організмі і як наслідок нераціонального харчування – погіршення стану здоров'я людини [3].

У зв'язку з цим, задача удосконалення та створення нових механізмів моделювання, технологій та обладнання, які супроводжують термічний процес обробки харчових продуктів є актуальною.

Моделювання зміни споживчих властивостей (харчова цінність, органолептичні властивості та інше) харчового продукту, як правило потребує визначення терміну термічної обробки протягом якого він досягає стану кулінарної готовності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій,** які присвячені розробці механізмів моделювання термічного процесу обробки харчових продуктів доводить, що до сучасного часу не розроблено механізм визначення терміну обробки, протягом якого продукт досягає кулінарної готовності під дією температурного поля, що змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати.

Так, наприклад, у роботі [2] в якісній формі розглянуто механізм впливу фітинової кислоти, що міститься у клітинах гороху на час його варіння. Дослідним шляхом визначається термін його варіння.

У роботі [4] в кількісній формі досліджується час теплової обробки харчових продуктів. В цих дослідженнях не враховано, що температурне поле продукту в процесі обробки змінюється за часом та вздовж просторової координати.

Дослідження температурного поля картоплі у процесі гідротермічної обробки проведене у роботі [5] показує, що воно змінюється з часом та неоднорідне вздовж просторової координати практично протягом усього терміну термічної обробки.

Тому нехтування залежністю температурного поля харчового продукту від часу та просторової координати при моделюванні процесу гідротермічної обробки харчових продуктів може привести до

великих похибок в дослідженнях. Це унеможливило створення технологій та обладнання, які спроможні доводити харчові продукти до кулінарної готовності без значної втрати необхідних організму людини компонентів.

**Метою даної роботи** є удосконалення механізму моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності при термічній обробці за умови, що його температурне поле змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** У процесі термічної обробки харчового продукту за рахунок енергії теплового руху атомів і молекул, в його структурі відбуваються перетворення. Механізм структурних перетворень розглянемо, на прикладі варки гороху [2].

Іони  $K^+$  і  $Na^+$ , які знаходяться в клітинах гороху за рахунок енергії теплового руху проходять по прошаркам водяного розчину в серединні пластинки і заміщають іони  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  в сольових мостиках. Це приводить до розриву полігалактуринових ланцюгів.

Оскільки цей процес зворотний, то для того щоб відбувалося розчеплення протопектину, необхідно вивести із реакції вивільнювані іони  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$ . Цю функцію шляхом осадження виконує фітинова кислота, яка утворює із іонами  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  нерозчинну у воді сіль (фітат).

У процесі структурних перетворень обумовлених вивільненням іона  $Ca^{2+}$  беруть участь чотири об'єкти – два полігалактуринових ланцюга об'єднані іоном  $Ca^{2+}$ , два іони  $Na^+$  та молекула фітинової кислоти.

Для визначення кількості розірваних ланцюгів скористаємося відомим виразом, що характеризує швидкість проходження хімічних реакцій в залежності від концентрації речовин, що беруть участь в цьому процесі [6]

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = -\kappa_0 \cdot \exp[-U/(R_r \cdot T(r, \tau))] \cdot n \cdot n_N^2 \cdot n_\phi, \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація структурних зв'язків,  $m^{-3}$ ;  $n_N$  – концентрація іонів  $Na^+$ ,  $m^{-3}$ ;  $n_\phi$  – концентрація молекул фітинової кислоти,  $m^{-3}$ ;  $\kappa_0$  – коефіцієнт пропорційності,  $s^{-1}$ ;  $U$  – енергія активації, Дж/моль;  $R_r$  – універсальна газова постійна Дж/(моль · К);  $T(r, \tau)$  – температурне поле продукту, К;  $r$  – просторова координата, м;  $\tau$  – час, с.

Температурне поле харчового продукту, що має геометричну форму кулі та занурюється у нагріту рідину з постійною температурою  $T_k$  може бути представлено у наступному вигляді [5]:

$$T(r, \tau) = 273 + T_k + 2 \cdot (T_k - T_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot r}{R}\right)}{r} \cdot \frac{R}{n \cdot \pi} \cdot \exp\left[-\eta \cdot \left(\frac{n \cdot \pi}{R}\right)^2 \cdot \tau\right], \quad (2)$$

де  $T_k$  – температура нагрітого середовища, °C;  $T_0$  – початкова температура харчового продукту, °C;  $r$  – просторова координата, м;  $R$  – радіус харчового продукту, м;  $\eta$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Аналітичні вирази температурного поля для твердих тіл, що мають геометричну форму циліндра, прямокутного паралелепіпеда та занурюється у нагріту рідину з постійною температурою  $T_k$  наведено у роботі [7, с. 184, 223].

Зміну відносної кількості структурних зв'язків в продовж часу термічної обробки  $t$ , можна обчислити за допомогою наступного виразу:

$$N = \frac{n}{n_0} = \exp \left[ -\kappa \cdot \int_0^t \exp(-U/(R_f \cdot T(r, \tau))) \cdot d\tau \right], \quad (3)$$

де  $n_0$  – концентрація зв'язків до початку термічної обробки, м<sup>-3</sup>;  $n$  – концентрація зв'язків, після термічної обробки протягом часу  $t$ ;  $\kappa = \kappa_0 \cdot n_N^2 \cdot n_\phi$ .

Невідомі постійні  $\kappa$  і  $U$  для кожного харчового продукту визначаються дослідним шляхом.

Механізм обчислення енергії активації структурних зв'язків та часу протягом якого харчовий продукт досягає кулінарної готовності розглянемо на прикладі моркви. Морква, покладена у воду з температурою  $T_{ki}$  – 100, 90, 80, °C, набуває кулінарної готовності протягом часу  $t_i$  – 20, 45, 120 (нерівномірно проварена), хв [2].

Підставимо в рівняння (3) вираз для температурного поля харчового продукту (2) в якому зафіксовані дослідні значення першої точки (температура води  $T_{k1}$ , при якій обробляється морква та час  $t_1$ , протягом якого вона обробляється). Отримаємо рівняння для обчислення відносної концентрації структурних зв'язків, при якій морква набуває кулінарної готовності.

Потім таким же чином підставимо у рівняння (3) значення температури води  $T_k$  при якій виконується обробка моркви та обчислюється час  $\tau$  за який вона досягає стану кулінарної готовності. Праві частини отриманих рівнянь повинні бути рівні, тому що і в першому і в другому випадках морква досягає кулінарної готовності.

Час  $\tau$ , протягом якого морква досягає кулінарної готовності при гідротермічній обробці, можна обчислити за допомогою інтегрального рівняння:

$$\int_0^{t_1} \exp \left\{ -\frac{U}{R_f \cdot T(r=0, \tau, T_{k1})} \right\} \cdot d\tau = \int_0^{\tau} \exp \left\{ -\frac{U}{R_f \cdot T(r=0, \tau, T_k)} \right\} \cdot d\tau. \quad (4)$$

В цьому рівнянні зафіксовано, що температура навколишнього простору дорівнює 20°C, а концентрація зв'язків обчислюється в центрі моркви.

Дослідження рівняння (4) у заданому діапазоні параметрів ( $U$ ,  $R$ ,  $r$ ,  $T_k$ ,  $T_{ki}$ ,  $\tau$ ,  $t_i$ ,  $\eta$ ) виконано у системі Mathcad 14. Коефіцієнт температуропровідності моркви взятий рівним  $14,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с [8]. Результати досліджень наведено на рисунках 1, 2.

Визначення енергії активації виконувалося методом знаходження мінімуму відносного середньоквадратичного відхилення часу протягом, якого морква досягає кулінарної готовності, отриманого з дослідів ( $t_i$ ) та з теоретичних обчислень ( $\tau_i$ ):

$$\delta_{\min} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_i - \tau_i)^2}{t_i}}. \quad (5)$$

Найменше відхилення теоретичних розрахунків часу протягом, якого морква досягає кулінарної готовності з дослідними ( $\delta_{\min} = 4\%$ ) відповідає умові що середнє значення енергії активації структурних перетворень моркви дорівнює 132 кДж/моль. Похибка визначення енергії структурних перетворень оцінювалася за методикою обчислення не прямих вимірювань приведеною у роботі [9]. При оцінці похибки інтегральне рівняння (4) використано як рів-

няння вимірювання енергії активації. На підставі отриманих результатів дослідження енергія активації структурних перетворень у моркві може бути представлена у наступному вигляді:

$$U = (130 \pm 10) \text{ кДж/моль}, P=95\%. \quad (6)$$

На рис. 1 приведена залежність часу протягом якого морква, що має геометричну форму циліндра діаметром 20 мм. досягає кулінарної готовності у залежності від температури обробки в широкому інтервалі величин.

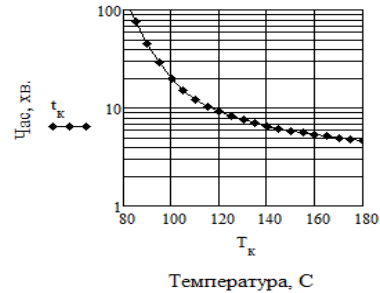
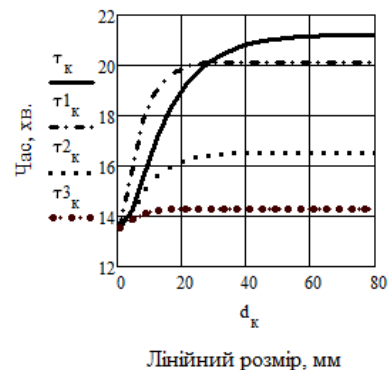


Рис. 1. Залежність часу термічної обробки від температури

Хід кривої на цьому рисунку підтверджує відоме явище, що час обробки харчового продукту зменшується при збільшенні температури обробки.

На рис. 2 приведені залежності часу протягом якого морква, що має геометричну форму циліндра та прямокутного паралелепіпеда з різними лінійними розмірами досягає кулінарної готовності при температурі 100°C у залежності від їх висоти  $d_k$ .



- $\tau_k$  (—) – прямокутний паралелепіпед ( $a = v = 20$  мм,  $d_k$ );  
 $\tau_{1k}$  (- · - · -) – циліндр ( $R = 10$  мм,  $d_k$ );  
 $\tau_{2k}$  (· · ·) – прямокутний паралелепіпед ( $a = 20$  мм,  $v = 10$  мм,  $d_k$ );  
 $\tau_{3k}$  (· · ·) – прямокутний паралелепіпед ( $a = 20$  мм,  $v = 5$  мм,  $d_k$ )

Рис. 2. Залежність часу термічної обробки від лінійного розміру

Хід кривих на цьому рисунку також підтверджує відоме явище, що час обробки харчового продукту в основному залежить від його найменшого лінійного розміру і значно менше залежить від геометричної форми.

**Висновки.** У роботі розроблено механізм моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності при термічній обробці за умови, що його температурне поле змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати. За допомогою розробленого механізму визначено час протягом якого морква досягає стану кулінарної готовності у залежності від температури

обробки в діапазоні від 80°C до 180°C та лінійних розмірів – (1–80) мм. Визначено, що енергія активації структурних перетворень у моркві дорівнює  $(130 \pm 10)$  кДж/моль, Р 95%. Теоретичні результати обчислень відповідають дослідним в межах похибки  $\pm 10\%$  їх вимірювань.

#### Список літератури:

1. Беляев Михаил Иванович. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов: Монография / М. И. Беляев, П. Л. Пахомов. – Харьков: Харьковский институт общественного питания, 1991. – 160 с.
2. Ростовський Володимир Сергійович. Теоретичні основи технології громадського харчування. – К.: Кондор, 2006. – 200 с. – ISBN 966-351-026-9.
3. Технологія харчових продуктів функціонального призначення: Монографія / А. А. Мазаракі, М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко, П. О. [та ін.]; за ред. М. І. Пересічного. – 2-ге вид., переробл. і доп. – К.: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2012. – 1116 с.
4. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / Соколенко А. И., Украинец А. И., Яровой В. Л. [и др.]. – К: АртЭк, 2003. – 432 с.
5. Моделювання гідротермічного процесу обробки харчових продуктів / Л. Г. Мартиненко, К. В. Карпенко, Л. К. Карпенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 119. «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Харків. 2011. – С. 232–241. – Резюме рос., англ. – Бібліогр.: с. 298.
6. Лебідь Валентин Ілліч. Фізична хімія. – Харків: Гімназія, 2008. – 478 с.
7. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука. – 1964. – 487 с.
8. Гинзбург Абрам Соломонович. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.
9. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. – М.: Издательство стандартов. – 1983. – 264 с.

**Комарова А.Л.**

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

**Мостовая Л.Н., Мартыненко Л.Г.**

Харьковский торгово-экономический институт

Киевского национального торгово-экономического университета

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВРЕМЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ

#### Аннотация

Разработан механизм моделирования процесса достижения пищевым продуктом состояния кулинарной готовности при термической обработке при условии, что его температурное поле меняется со временем и неоднородное вдоль пространственной координаты. Исследовано влияние геометрической формы, размеров и температуры в широком диапазоне величин на время обработки. Определено, что энергия активации структурных преобразований в моркови равна  $(130 \pm 10)$  кДж/моль, Р 95%.

**Ключевые слова:** моделирование, пищевые продукты, термическая обработка

**Komarova A.L.**

Ukrainian State University of Railway Transport

**Mostova L.M., Martynenko L.G.**

Kharkiv Institute of Trade and Economics

Kyiv National University of Trade and Economics

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS DURING HEAT TREATMENT PRODUCT

#### Summary

The mechanism of the modeling process of achieving food product status culinary readiness during heat treatment, provided that its temperature field varies with time and nonuniform along the spatial coordinate. The effect of geometric shapes, sizes and in a wide temperature range for processing time values. Determined that the activation energy of structural reforms in carrots is  $(130 \pm 10)$  kJ / mol, Р 95%.

**Keywords:** modeling, food products, heating.