

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЧАС ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Л.М. Мостова, М.О. Комарова, Л.Г. Мартиненко

Розроблено механізм моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності під час термічної обробки за умови, що його температурне поле змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати. Досліджено вплив геометричної форми, розмірів та температури в широкому діапазоні величин на час обробки. Визначено, що енергія активації структурних перетворень у картоплі дорівнює (260 ± 20) кДж/моль, R 95%.

Ключові слова: моделювання, харчові продукти, термічна обробка.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВРЕМЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Л.Н. Мостовая, М.А. Комарова, Л.Г. Мартыненко

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 картофеле равна (260 ± 20) кДж/моль, R 95%.

Ключевые слова: моделирование, пищевые продукты, термическая обработка.

MODELING THE IMPACT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DURATION OF HEAT TREATMENT OF FOOD PRODUCTS

L.M. Mostova, M.O. Komarova, L.G. Martynenko

The paper focuses on the impact of technological parameters on the duration of heat treatment of food products. The purpose of the article is to develop the mechanism for modeling the time during which a food product gets culinary preparedness when being heated provided that its temperature field is subject to time changes and is manifold in its spatial value. The method of physical modeling

has allowed developing an integral equation for estimating the activation energy of structural transformations in a food product and the time during which a food product gets culinary preparedness. The equation was solved with the help of the numerical method in Mathcad 14 system. Following the known values of the processing of potatoes in the temperature range 80° C – 100° C, it has been estimated that the activation energy of the structural transformation in a potato makes (260 ± 20) kilojoule/mole, P 95%. Based on the developed mechanism, the duration of heat treatment of potato during which it gets culinary preparedness, subject to the heating temperature in the range 75°–175° C and linear dimensions (1 – 80 мм), has been estimated. The modeling has been performed for potatoes that have the geometric shape of the sphere, cylinder and rectangular parallelepiped.

Theoretical results of the calculations correspond to the experimental results in the error range equal to ±10 %.

Keywords: modeling, food products, heat treatment.

Постановка проблеми у загальному вигляді. У харчовій промисловості найбільш поширеним методом обробки продуктів є теплова обробка. Приблизно 75...85% виробів продукції громадського харчування в обов'язковому порядку піддається термічній обробці [1]. Проте це не означає, що теплова обробка продуктів не має 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, унаслідок чого не тільки збільшується нестача продуктів харчування, але й порушуються обмінні процеси в організмі. Як наслідок нерационального харчування – погіршується стан здоров'я людини [3].

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

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

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

Так, наприклад, у дослідженні [2] в якісній формі розглянуто механізм впливу фітинової кислоти, що міститься в клітинах гороху,

на час його варіння. Дослідним шляхом визначається термін його варіння.

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

Дослідження температурного поля картоплі в процесі гідротермічної обробки, проведене в праці [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 під час моделювання процесу гідротермічної обробки харчових продуктів може призвести до значних похибок у дослідженнях. Це унеможлиблює створення технологій та обладнання, які спроможні доводити харчові продукти до кулінарної готовності без значної втрати необхідних організму людини компонентів.

Метою даної роботи є вдосконалення механізму моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності під час термічної обробки 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 у його структурі відбуваються перетворення. Механізм структурних перетворень розглянемо на прикладі варіння гороху [2].

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

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

У процесі структурних перетворень, що зумовлені вивільненням іона Ca^{2+} , беруть участь чотири об'єкта – два полігалактуронових ланцюга, об'єднані іоном Ca^{2+} , два іони Na^+ та молекула фітинової кислоти.

Для визначення кількості розірваних ланцюгів скористаємося відомим виразом, що характеризує швидкість перебігу хімічних реакцій залежно від концентрації речовин, що беруть участь у цьому процесі [6]:

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

де n – концентрація структурних зв'язків, м^{-3} ; n_N – концентрація іонів Na^+ , м^{-3} ; n_ϕ – концентрація молекул фітинової кислоти, м^{-3} ; κ_0 – коефіцієнт пропорційності, с^{-1} ; U – енергія активації, Дж/моль; R_g – універсальна газова постійна Дж/(моль·К); $T(r, \tau)$ – температурне поле продукту, К; r – просторова координата, м; τ – час, с.

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

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

де T_k – температура нагрітого середовища, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – початкова температура харчового продукту, $^{\circ}\text{C}$; r – просторова координата, м; R – радіус харчового продукту, м; η – коефіцієнт теплопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$.

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

Зміну відносної кількості структурних зв'язків упродовж часу термічної обробки t можна обчислити за допомогою наступного виразу:

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

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

Невідомі постійні κ 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 картоплі. Очищена картопля, покладена у воду з температурою $T_{kl} = 100, 95, 90, 85, (77-80)^{\circ}\text{C}$, набуває кулінарної готовності протягом часу $t_i = 19, 27, 36, 73$ хв, 8 годин [2].

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

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

Час τ , протягом якого картопля досягає кулінарної готовності під час гідротермічної обробки, можна обчислити за допомогою інтегрального рівняння:

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

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

Дослідження рівняння (4) у заданому діапазоні параметрів ($U, R_r, T_k, T_{k1}, \tau, t_1, \eta$) виконано в системі Mathcad 14. Коефіцієнт температуропровідності картоплі дорівнює $16 \cdot 10^8 \text{ м}^2/\text{с}$ [8]. Результати досліджень наведено на рисунках 1, 2.

Визначення енергії активації виконувалося методом знаходження мінімуму відносного середньоквадратичного відхилення часу, протягом якого картопля досягає кулінарної готовності, отриманого з досліду (t_i) та теоретичних обчислень (τ_i):

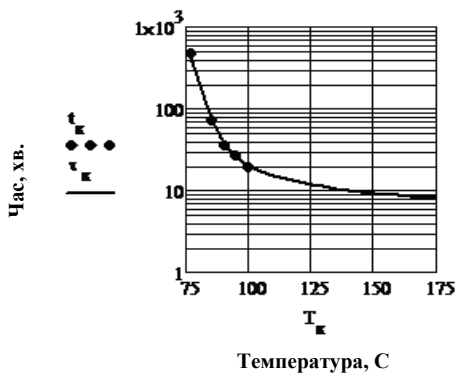
$$\delta_{\min} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \cdot \left[\frac{t_i - \tau_i}{t_i} \right]^2}. \quad (5)$$

Найменше відхилення теоретичних розрахунків часу протягом якого картопля досягає кулінарної готовності, із дослідними ($\delta_{\min}=8,9\%$) відповідає умові, що середнє значення енергії активації структурних перетворень картоплі дорівнює 264 кДж/моль , а її радіус – $22,3 \text{ мм}$.

Похибка визначення енергії структурних перетворень оцінювалася за методикою обчислення непрямих вимірювань, що наведена в праці [9]. Під час оцінки похибки інтегральне рівняння (4) використано як рівняння вимірювання енергії активації. На підставі отриманих результатів дослідження енергія активації структурних перетворень у картоплі може бути представлена в такому вигляді:

$$U = (260 \pm 20) \text{ кДж/моль, } P=95 \% \quad (6)$$

На рис. 1 наведено залежність часу, протягом якого картопля, що має геометричну форму кулі діаметром 44,6 мм, досягає кулінарної готовності залежно від температури обробки в широкому інтервалі величин.



**Рис. 1. Залежність часу термічної обробки від температури:
••• – дослід; — – теорія**

Хід кривої на цьому рисунку підтверджує відоме явище, що час обробки харчового продукту зменшується за умови збільшення температури обробки.

На рис. 2 наведено залежності часу, протягом якого картопля, що має геометричну форму циліндра та прямокутного паралелепіпеда з різними лінійними розмірами, досягає кулінарної готовності за температури 100° С залежно від їх висоти d_к.

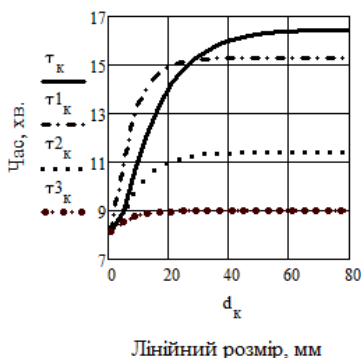


Рис. 2. Залежність часу термічної обробки від лінійного розміру:
 τ_k (—) – прямокутний паралелепіпед ($a = b = 20$ мм, d_k);
 τ_{1k} (- · - · -) – циліндр ($R = 10$ мм, d_k);
 τ_{2k} (···) – прямокутний паралелепіпед ($a = 20$ мм, $b = 10$ мм, d_k);
 τ_{3k} (· · ·) – прямокутний паралелепіпед ($a = 20$ мм, $b = 5$ мм, d_k)

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

Висновки. У дослідженні розроблено механізм моделювання процесу досягнення харчовим продуктом стану кулінарної готовності під час термічної обробки за умови, що його температурне поле змінюється за часом та неоднорідне вздовж просторової координати. За допомогою розробленого механізму визначено час, протягом якого картопля досягає стану кулінарної готовності залежно від температури обробки в діапазоні від 75°C до 175°C та лінійних розмірів – $1 \dots 80$ мм. Визначено, що енергія активації структурних перетворень у картоплі дорівнює (260 ± 20) кДж/моль, R 95%. Теоретичні результати обчислень відповідають досвідним у межах похибки $\pm 10\%$ їх вимірювань.

Список джерел інформації / References

1. Беляев М. И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография / М. И. Беляев, П. Л. Пахомов. –Х.: ХИОП, 1991. – 160 с.

Beljaev, M. I. Pakhomov P.L. (1991), *Theoretical grounds of combined methods of heating food products*: Monograph – Institute of Public Catering, Kharkiv, 160 p.

2. Ростовський В. С. Теоретичні основи технології громадського харчування / В. С. Ростовський. – К. : Кондор, 2006. – 200 с.

Rostovs'kyj V. S. (2006), *Theoretical grounds of catering technology* – Kondor, K.: 200 p.

3. Технологія харчових продуктів функціонального призначення : монографія / А. А. Мазаракі, [та ін.] ; за ред. М. І. Пересічного. – 2-ге вид., переробл. і доп. – К.: 2012. – 1116 с.

A.A. Mazaraki, The technology of food products of functional area: monograph / Mazaraki A. A., Peresichnyj, M. I., Kravchenko M. F., [and others];– 2nd edition–Kyiv National University of Trade and Economics. K., 1116 p.

4. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / А.И. Соколенко, [и др.]. – К.: АртЕк, 2003. – 432 с.

Sokolenko, A.I., Ukrainec, A.I., Jarovoj, V.L. (2003), Referenece book of food production specialist. Book 2. Thermalphysic processes. Energy efficiency / [at al.], ArtJek, K, 432 p.

5. Моделювання гідротермічного процесу обробки харчових продуктів / Л. Г. Мартиненко, К. В. Карпенко, Л. К. Карпенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. – Х., 2011. Вип. 119. С. 232–241.

Marty`nenko, K.V. Karpenko, L.K. Karpenko, L.G. (2011), Modeling of the hydrothermal process of the heating of food products/ // Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. Issue 119. «Modern concepts of the technology and mechnization of the processing and food productions. Kharkiv. 2011. С. 232–241. – Abstr. Russian, English.– References: p. 298.

6. Лебідь В. І. Фізична хімія / В. І. Лебідь. –Х.: Гімназія, 2008. – 478 с.

Lebid,` V.I. (2008), Physical Chemistry.– Gimnaziya, Kharkiv, 478 p.

7. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. М. : Наука, 487 – с.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1964), Conduction of heat in solids. – Nauka. M.: 1964. 487 p.

8. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 272 с.

Ginzburg, A. S., Gromov, M.A. (1987), Thermalphysical characteristics of potatoes, vegetables and fruit / A.S. Ginzburg, M.A. Gromov. – Agropromizdat, M., – 272 p.

9. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. – М. : Издательство стандартов, 1983. – 264 с.

Basic standards in meteorological support.(1983), – Publishing House of Standards M. 264 p.

Мостова Людмила Миколаївна, канд. техн. наук, доц., кафедра технології та організації ресторанного бізнесу, Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету. Адреса: Пров. О. Яроша, 8, м. Харків, 61045, Україна. Тел.: 8 (057) 336-25-90.

Мостовая Людмила Николаевна, канд. техн. наук, доц., кафедра технологии и организации ресторанного бизнеса, Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета. Адрес: Пер. О. Яроша, 8, г. Харьков, 61045, Украина. Тел.: 8 (057) 336-25-90.

Mostova Liudmyla Mykholaiivna, PhD in technical sciences, associate professor, Head of the Department of Technology and Planning of Restaurant Business of Kharkiv Institute of Trade and Economics, Kyiv National University of Trade and Economics. Address: O. Yarosh lane, 8, Kharkiv, 61045, Ukraine. Tel.: 8 (057) 336-25-90.

Комарова Марія Олександрівна, інженер, фірма «Арива Пак». Адреса: вул. Архангельська, 29, м. Харків, 61072, Україна. Тел.: 0939519725, e-mail: mashuna6666@mail.ru.

Комарова Мария Александровна, инженер, фирма «Арива Пак». Адрес: ул. Архангельская, 29, г. Харьков, 61072, Украина. Тел.: 0939519725, e-mail: mashuna6666@mail.ru.

Komarova Mariya Oleksandrivna, engineer, company «Ariva Pack». Address: Arkhangelska str., 29, Kharkiv, 61072, Ukraine. Tel.: 0939519725, e-mail: mashuna6666@mail.ru.

Мартиненко Леонід Григорович, канд. техн. наук, доц., кафедра технології та організації ресторанного бізнесу, Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету. Адреса: Пров. О. Яроша, 8, м. Харків, 61045, Україна. Тел.: 0974721139, e-mail: leonid.martynenko@gmail.com.

Мартыненко Леонид Григорьевич, канд. техн. наук, доц., кафедра технологии и организации ресторанного бизнеса, Харьковский торгово-экономический институт Киевского национального торгово-экономического университета. Адрес: Пер. О. Яроша, 8, г. Харьков, 61045, Украина. Тел.: 0974721139, e-mail: leonid.martynenko@gmail.com.

Martynenko Leonid Grygorovych, PhD in technical sciences, associate professor, the Department of Technology and Planning of Restaurant Business of Kharkiv Institute of Trade and Economics, Kyiv National University of Trade and Economics. Address: O. Yarosh lane, 8, Kharkiv, 61045, Ukraine. Tel.: 0974721139, e-mail: leonid.martynenko@gmail.com.

Рекомендовано до публікації д-ром фіз.-мат. наук А.І. Козарем, д-ром техн. наук, проф. М.І. Погожих.

Отримано 15.03.2014. ХДУХТ, Харків.