

УДК 641.539:637.521

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ ПОРЦІЙНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Потапов В.О., д.т.н.,

Федак Н.В., к.т.н.,

Костенко С.М.

Харківський державний університет харчування та торгівлі

(Україна)

В роботі розглядається системно-динамічна технологія за використання програмного комплексу Vensim, який реалізує імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів. Обмеження інтенсифікації інфрачервоного жарення зумовлено тим, що за високої густини випромінювання виникає перегрівання поверхні та погіршення якості готових виробів. Для вирішення цієї проблеми проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, метою яких є аналітичне та фізичне підґрунтя імітаційного моделювання, що дозволить проводити якісну та економічну теплову обробку за рівномірної густини променевого потоку на поверхні опуклого продукту та мінімізації втрат теплоти. Шляхом аналітичного моделювання отримано диференціальне рівняння кінетики температури, яке за відомої середньої температури готовності внутрішніх шарів продукту надає потрібний час жарення біфштексів, нормальний переріз яких наближений до півеліпса. Фізичне моделювання за використання апарату з відбивачем променевого потоку доводить адекватність аналітичного моделювання. Профіль відбивача забезпечує рівномірне опромінення опуклого перерізу м'ясного напівфабриката. Імітаційне моделювання має своєю основою аналітичне моделювання, яке описує зв'язки змінних системи, а також фізичне моделювання, яке надає значення та обмеження змінних системи. Досліджувався вплив наявності в апараті відбивача променевого потоку на тривалість інфрачервоного жарення та органолептичні характеристики отриманого продукту. Характер та значення температури внутрішніх шарів продукту, а також термін жарення, отримані шляхом імітаційного моделювання, відповідають аналітичному моделюванню та реальному жаренню. Експериментування з імітаційними моделями процесів та апаратів інфрачервоного жарення надає системне підґрунтя для їх інтенсифікації та оптимізації.

Ключові слова: моделювання, інфрачервоне жарення, м'ясний

напівфабрикат, відбивач променевого потоку, системний аналіз.

Постановка проблеми. Розробка ефективного нового та удосконалення існуючого обладнання інфрачервоного жарення з забезпеченням рівномірної густини променевого потоку на поверхні продукту є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі дослідження процесу інфрачервоного жарення використовують або аналітичне, або фізичне моделювання [1–3], проте задачу удосконалення обладнання треба розглядати і вирішувати в рамках системного аналізу.

Формулювання цілей статті. Метою статті є комплексне дослідження процесу інфрачервоного жарення м'ясних порційних напівфабрикатів шляхом використання аналітичного та фізичного моделювання як основи імітаційної моделі.

Основна частина. Шляхом аналітичного моделювання отримано диференціальне рівняння кінетики температури, яке виглядає наступним чином [4]:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_V R_x} \frac{Bi_F}{Bi_F + 1} \left(\frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A - T \right), \quad (1)$$

де c – питома теплоємність продукту, Дж/(кг К); ρ – густина продукту, кг/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м·К); R_V – відношення об'єму продукту до площини його поверхні, м; V – об'єм продукту, м³; S – площа верхньої поверхні продукту, м²; η – коефіцієнт поглинання випроміненої потужності; P_E – потужність інфрачервоного випромінювача, Вт; T_A – температура повітря всередині апарату, К; T – середня температура внутрішніх шарів, К; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); τ – тривалість процесу, с; $Bi_F = \alpha R_x / (2 K_F \lambda)$ – модифіковане число Біо.

Коефіцієнт форми K_F враховує геометрію теплоприймача [5]:

$$K_F = 1 + \frac{R_x}{R_y} + \frac{R_x}{R_z}, \quad (2)$$

де R_x – половина товщини продукту, м; R_y и R_z – половина розміру продукту за двома іншими координатами, м. R_x , R_y та R_z взаємно перпендикулярні.

Вважаємо, що теплообмін здійснюється з одного боку. Розв'язок цього рівняння з початковою умовою $T(0) = T_0$ має вигляд

$$T = \frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A + \left(T_0 - \frac{\eta P_E}{\alpha S} - T_A \right) \cdot \exp \left(- \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_x R_V} \frac{Bi_F}{Bi_F + 1} \tau \frac{1}{k_B} \right), \quad (3)$$

де коефіцієнта відбивача $k_B = 10/15$ (хвилин/хвилин), тобто відношення терміну жарення напівфабриката з яловичини в експериментальному апараті з відбивачем до терміну жарення без

відбивача.

Нехай T_R – середня температура готовності внутрішніх шарів продукту (температура готовності), тоді з рівняння (3) можна знайти потрібний час жарення τ_R (с):

$$\tau_R = - \frac{c \rho R_x R_V}{2 K_F \lambda} \cdot \left(\frac{\text{Bi}_F + 1}{\text{Bi}_F} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_A - T_R + \frac{\eta P_E}{\alpha S}}{T_A - T_0 + \frac{\eta P_E}{\alpha S}} \right) \cdot k_B. \quad (4)$$

Приймачем тепла є м'ясний напівфабрикат із нормальним перерізом у вигляді півеліпсу. Половини осей півеліпса $a = 0.05$ м и $b = 0.0225$ м. Довжина напівфабрикату $L_p = 0.2$ м. За цих умов довжина півеліпсу $L_h = 0.114$ м, площа півеліпсу $A = 1.767 \cdot 10^{-3}$ м², площа верхньої поверхні напівфабрикату $S = 0.023$ м², об'єм напівфабрикату $V = 0.35 \cdot 10^{-3}$ м³, $R_V = 0.016$ м, $R_x = b/2 = 0.011$ м, $R_y = a = 0.05$ м, $R_z = L_p / 2 = 0.2 / 2 = 0.1$ м, коефіцієнт форми (2) отримує значення $K_F = 1.338$.

У рівнянні (4) питома теплоємність яловичини $c = 3.5 \cdot 10^3$ Дж/кг К, густина яловичини $\rho = 1100$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності яловичини $\lambda = 0.5$ Вт/м К [6], коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 20$ Вт/м² К, температура повітря всередині апарату $T_A = 293$ К (20 °С), температура готовності $T_R = 348$ К (75 °С), початкова температура внутрішніх шарів $T_0 = 278$ К (5 °С), коефіцієнт поглинання випроміненої потужності $\eta = 0.2$, потужність випромінювача $P_E = 1000$ Вт, модифіковане число Біо $\text{Bi}_F = 0.168$.

За таких умов час готовності продукту з яловичини (4) становить $\tau_R = 584$ с (9.8 хвилин) без відбивача та $\tau_R = 390$ с (6.5 хвилин) із відбивачем, що було визначено за допомогою програмного комплексу Mathcad (рис. 1).

Для жарення м'ясних порційних напівфабрикатів було розроблено апарат із відбивачем променевого потоку АРЖМ-0.07-1 [7] (рис. 2).

Усередині корпусу є напрямні для встановлення ґрат 4. Під час жарення біфштексів знизу в напрямні ґрат встановлюється деко 11 для збирання жиру. Під час приготування лангетів деко встановлюється безпосередньо на ґрати посередині робочої камери. Як ІЧ-нагрівач 2 використано випромінювач КИ 220-1000-1.

Рівномірне сумарне опромінення продукту забезпечує полірований рефлектор 3, профіль якого, визначений за розробленою методикою [8] і обчислений за використання створеного програмного продукту в комплексі Mathcad.

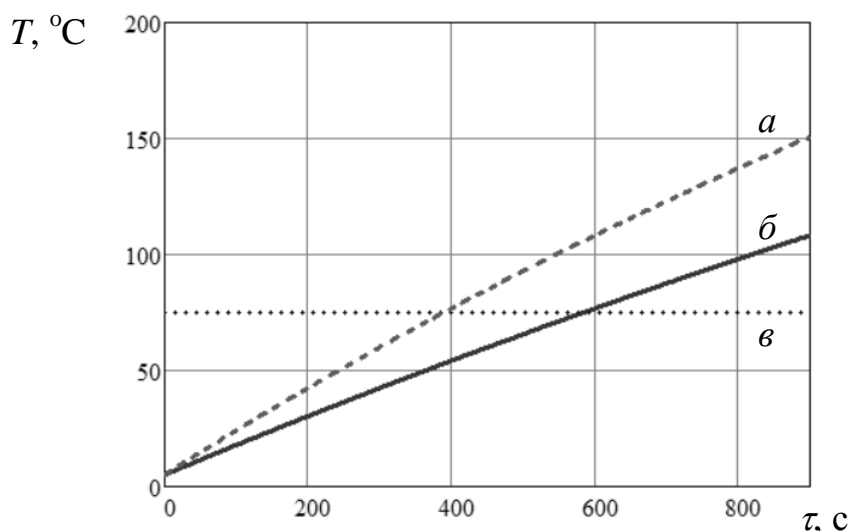


Рис. 1. Кінетика температури:

a – внутрішні шари за жарення з відбивачем; *б* – внутрішні шари за жарення без відбивача; *в* – готовність продукту

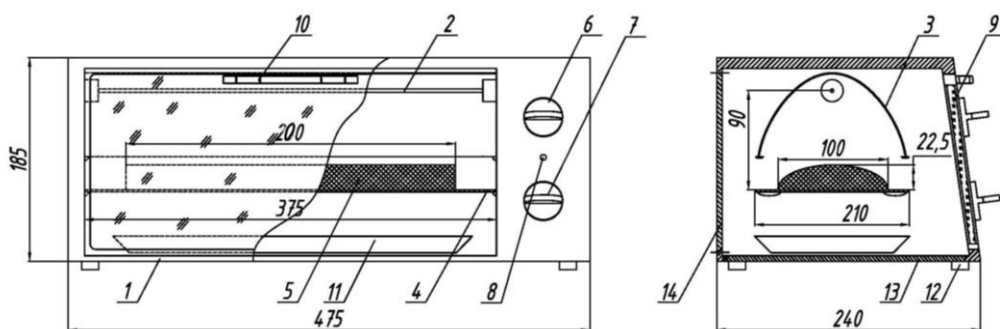


Рис. 2. Загальний вигляд апарата АРЖМ-0.07-1:

1 – корпус; 2 – випромінювач; 3 – рефлектор; 4 – ґрати;
 5 – продукт; 6 – регулятор потужності; 7 – таймер;
 8 – індикаторна лампа; 9 – скляні дверцята; 10 – ручка дверцят;
 11 – деко; 12 – ніжки; 13 – відкидний піддон; 14 – кришка

Під час жарення м'ясних напівфабрикатів із яловичини у апараті без рефлектора готовність продукту наставала через 10 хвилин, із рефлектором – через 7 хвилин. Жарення припинялося за досягання температури 75 °С всередині продукту, що визначалася за допомогою термопари хромель-копель [9]. Готовність визначалася проколюванням кухарською голкою, яка легко входила у продукт. Із готових виробів виділявся прозорий сік без кольору. Неоднакові результати аналітичного та фізичного моделювання є наслідком теплових втрат з нижньої поверхні продукту та втрат маси під час реального жарення.

Якість отриманого продукту з яловичини, жареного в апараті з відбивачем променевого потоку та без нього, було порівняно шляхом органолептичного оцінювання зовнішнього вигляду, кольору на

поверхні та на розрізі, консистенції, запаху та смаку за п'ятибальною шкалою (рис. 3).

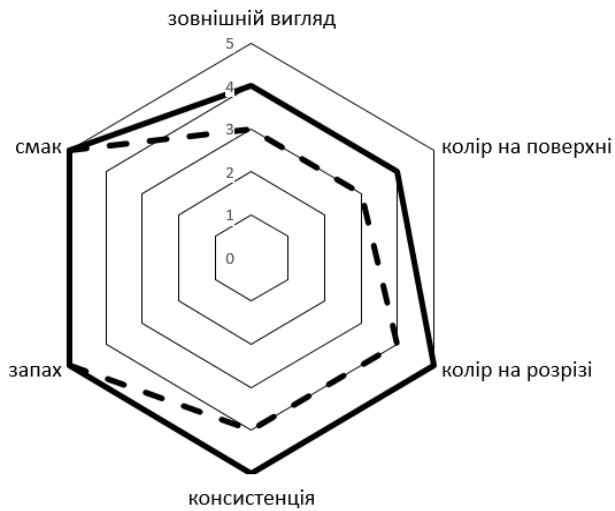


Рис. 3. Профілограма органолептичної оцінки продукту:

————— – жарення з відбивачем; - - - - - жарення без відбивача

На відміну від звичайного моделювання, яке обмежується спостереженням та формальними статистичними зв'язками між елементами системи, імітаційне моделювання як інструмент системного аналізу реалізує морфологію системи для точної та всебічної динаміки процесу функціонування [10]. Шляхом імітаційного моделювання визначено середню температуру внутрішніх шарів продукту із яловичини за жарення без відбивача та з ним.

За використання програмного комплексу Vensim створено імітаційну модель кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення (рис. 4).

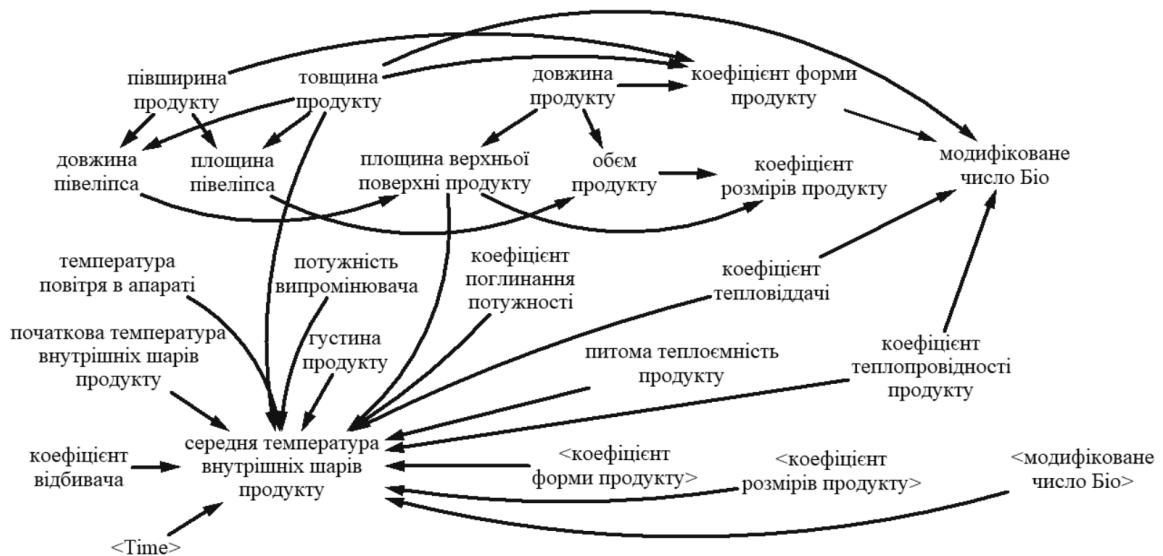


Рис. 4. Імітаційна модель кінетики температури

Програмний комплекс Vensim унаочнює комплексний вплив усіх екзогенних та ендогенних чинників на функцію відгуку моделі (рис. 5).

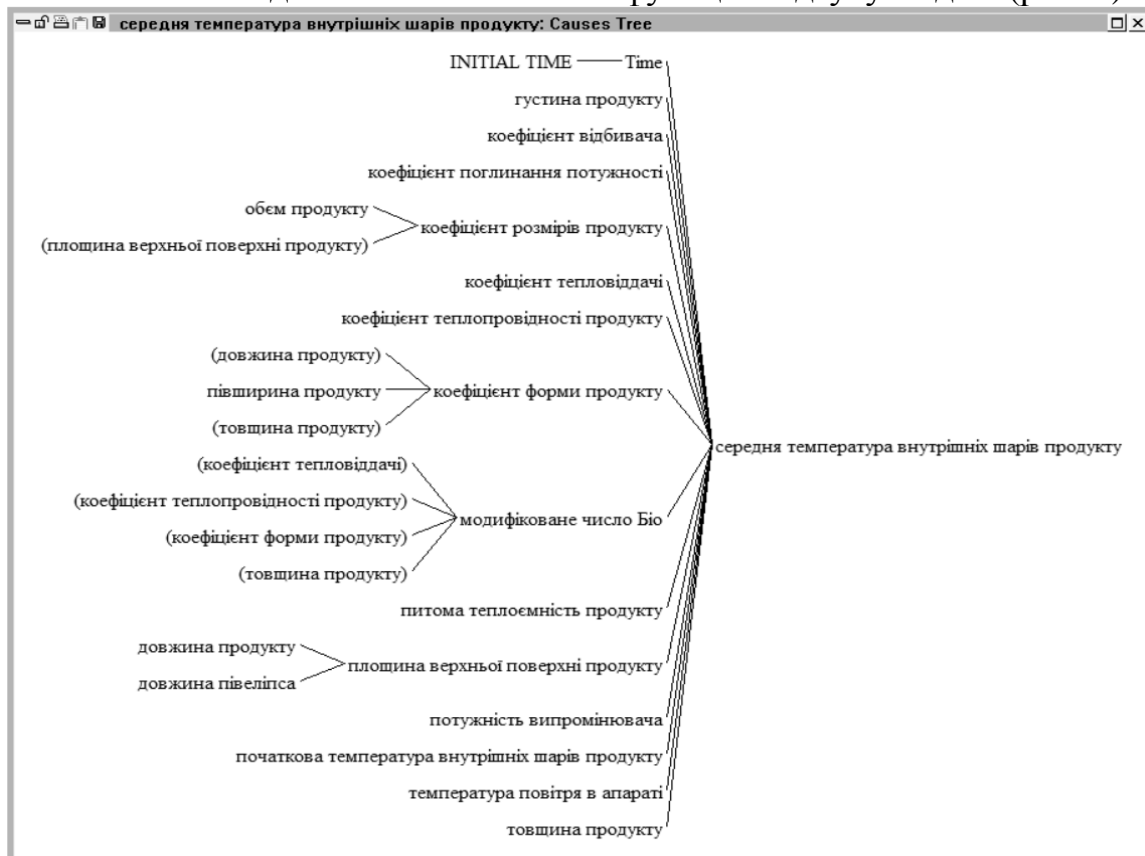


Рис. 5. Дерево причин функції відгуку

Нехай питома теплоємність яловичини $c = 3500$ Дж/(кг К), густина яловичини $\rho = 1100$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності яловичини $\lambda = 0.5$ Вт/(м К) [6]. За температури готовності 348 К (75 С) жарена без відбивача яловичина готова через 584 с (9.8 хвилин), жарена з відбивачем готова через 390 с (6.5 хвилин) (рис. 6), що відповідає реальному жаренню.

Висновки. В результаті аналітичного моделювання процесу інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів отримані рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту та тривалості процесу жарення в розробленому апараті. Якість отриманого продукту з яловичини, жареного в апараті з відбивачем променевого потоку та без нього, було порівняно шляхом органолептичного оцінювання. Отримані профілограми доводять переваги застосування відбивача в процесі інфрачервоного жарення напівфабрикату, а саме досягнення рівномірності кольору на поверхні та розрізі продукту, консистенції та зовнішнього вигляду. Створено імітаційну модель кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення. Порівняння отриманих результатів аналітичного моделювання кінетики температури внутрішніх шарів,

реального жарення та імітаційного моделювання доводить адекватність та актуальність системно-динамічного моделювання, що стає підґрунтям якісного та достовірного удосконалення процесів та апаратів інфрачервоного жарення.

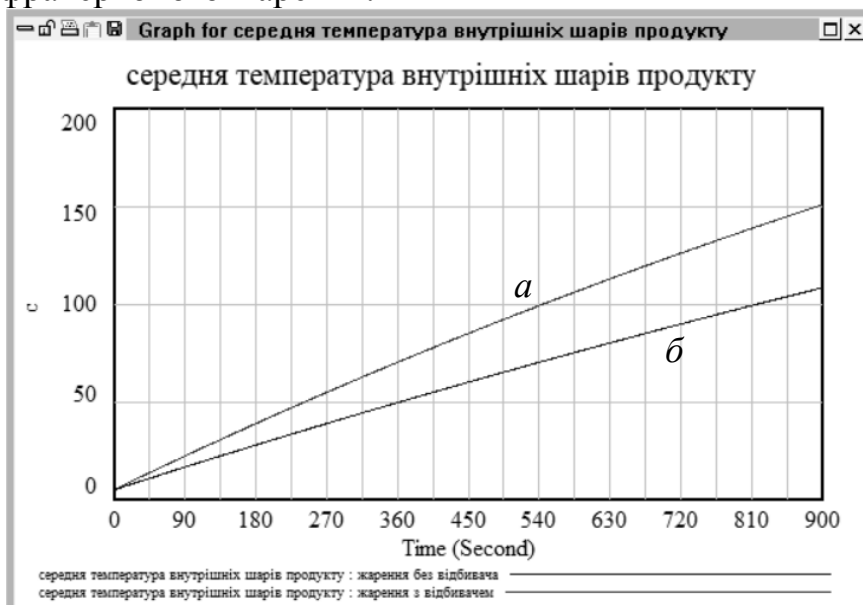


Рис. 6. Зростання середньої температури внутрішніх шарів:
 а – жарення з відбивачем; б – жарення без відбивача

Література

1. Черевко О. І., Михайлов В. М., Бабкіна І. В. Процеси та апарати жаріння харчових продуктів: Навч. посібник, Харк. держ. акад. технол. та орг. харчування. – Харків, 2000. – 332 с.
2. Потапов В. О., Сомов О. С. Наближена модель динаміки теплообмінних процесів. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : Зб. наук. пр. / Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі.* – Харків, 2008. Випуск 1 (7) С.380–388.
3. Рамазанов С. К., Скрипник В. О., Молчанова Н. Ю. Моделювання динаміки теплопровідності в процесі двостороннього жарення м'яса на основі нелінійної оптимізації. *Технологический аудит и резервы производства*, 2015. № 3(3). С. 41–47.
4. Potapov V., Kostenko S., Lobov S. (2016), "Kinetics of Meat Semi-finished Products Temperature at Infrared Frying", *International Conference of Industrial Technologies and Engineering*, October 28-29, 2016, Shymkent, Kazakhstan. P. 366–370.
5. Potapov V. (2013), *The kinetics of transfer phenomena in the drying process: monograph*, LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 319 p.
6. Гинзбург А. С. и др. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник. М.: Пищевая промышленность, 1980.

- 288 с.
7. Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. (2016), “Physical and Analytical Modeling of Infrared Frying in ARJM-0.07-1 Apparatus”, *Industrial Technology and Engineering*, Vol. 3 (20), P. 54–61.
 8. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харків, 2013. Том 6, № 5 (66). С. 42–45.
 9. Наукове обґрунтування енергоефективних процесів і обладнання кондуктивного жарення натуральних м'ясних виробів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків, 2016. 40 с.
 10. Меркулова Т. В., Биткова Т. В., Кононова Е. Ю. Экономико-математическое моделирование: учебное. [2-е изд., дораб.] Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2011. 276 с.

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ЖАРКИ МЯСНЫХ ПОРЦИОННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Потапов В.А., Федак Н.В., Костенко С.Н.

В работе рассмотрена системно-динамическая технология с использованием программного комплекса Vensim, который реализует имитационное моделирование процесса инфракрасной жарки мясных полуфабрикатов. Ограничение интенсификации инфракрасной жарки обусловлено тем, что при высокой плотности излучения появляется перегрев поверхности и ухудшение качества готовых изделий. Для решения этой проблемы проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, целью которых является аналитическое и физическое обоснование имитационного моделирования, что позволит проводить качественную и экономичную тепловую обработку при равномерной плотности лучевого потока на поверхности продукта и минимизации потерь теплоты. Путём аналитического моделирования получено дифференциальное уравнение кинетики температуры, при известной средней температуре готовности внутренних слоёв продукта определяющее необходимое время жарки бифштексов, нормальное сечение которых близко к полуэллипсу. Физическое моделирование с использованием аппарата с отражателем лучевого потока доказывает адекватность аналитического моделирования. Имитационное моделирование имеет своей основой аналитическое моделирование, описывающее связи переменных системы, и физическое моделирование, задающее значения и ограничения

переменных системы. Исследовалось влияние наличия в аппарате отражателя лучевого потока на длительность инфракрасной жарки и органолептические характеристики полученного продукта. Характер и значения температуры внутренних слоев продукта, а также время жарки, полученные путём имитационного моделирования, соответствуют аналитическому моделированию и реальной жарке. Экспериментирование с имитационными моделями процессов и аппаратов инфракрасной жарки даёт системное основание для их интенсификации и оптимизации.

Ключевые слова: моделирование, инфракрасная жарка, мясной полуфабрикат, отражатель лучевого потока, системный анализ.

COMPLEX MODELING OF INFRARED FRYING OF SEMI-FINISHED MEAT PORTIONS

Potapov V., Fedak N., Kostenko S.

In this paper the system-dynamic technology using the Vensim software package, which implements simulation of the infrared frying process of meat semi-finished products, was investigated. The limitation of the intensification of infrared frying is due to the fact that, at a high radiation density, surface overheating and a deterioration in the quality of finished products appear. To solve this problem, a set of theoretical and experimental studies was carried out, the purpose of which is the analytical and physical basis of simulation, which will allow for high-quality and economical heat treatment with a uniform radiation flux density on the product surface and minimize heat loss. By analytical modeling, a differential equation of the kinetics of temperature is obtained, which at a known average temperature of readiness of the inner layers of the product indicates the necessary time for frying the steaks, whose normal section is close to a half-ellipse. Physical modeling using an apparatus with a radiation flux reflector proves the adequacy of analytical modeling. Simulation is based on analytical modeling, which describes the relationships of system variables, and physical modeling, which sets the values and limitations of system variables. The effect of the presence of a radiation flux reflector in the apparatus on the duration of infrared frying and the organoleptic characteristics of the obtained product was studied. The nature and values of the temperature of the inner layers of the product, as well as the frying time obtained by simulation, correspond to analytical modeling and real frying. Experimenting with simulation models of processes and apparatus for infrared frying provides a systematic basis for their intensification and optimization.

Key words: modeling, infrared frying, semi-finished meat product, radiation flux reflector, system analysis.