

**Udoenko Oleg**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of general engineering disciplines and equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0671472630; e-mail: Udoleg@mail.ru.

**Омельченко Олександр Володимирович**, канд. техн. наук, доц., кафедра загальноінженерних дисциплін і обладнання. Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Адреса: вул. Островського, 16, м. Кривий Ріг, Україна, 50005. Тел.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

**Омельченко Александр Владимирович**, канд. техн. наук, доц., кафедра общинженерных дисциплин и оборудования. Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. Адрес: ул. Островского, 16, г. Кривой Рог, Украина, 50005. Тел.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

**Omelchenko Aleksandr**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of general engineering disciplines and equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

DOI: 10.5281/zenodo.1306602

УДК 641.5

## **ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ КІНЕТИКИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ**

**В.О. Потапов, С.М. Костенко**

*Проведено імітаційне моделювання кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення. Створена модель дозволяє визначати середню температуру внутрішніх шарів продукту відповідно до зміни типу м'ясної сировини та потужності випромінювача апарата.*

***Ключові слова:** імітаційна модель, інфрачервоне жарення, кінетика температури, м'ясний напівфабрикат.*

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КИНЕТИКИ ИНФРАКРАСНОЙ ЖАРКИ МЯСНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

**В.А. Потапов, С.Н. Костенко**

*Проведено имитационное моделирование кинетики температуры мясных полуфабрикатов при инфракрасной жарке. Созданная модель позволяет определять среднюю температуру внутренних слоев продукта в соответствии с изменениями типа мясного сырья и мощности излучателя аппарата.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, инфракрасная жарка, кинетика температуры, мясной полуфабрикат.

## SIMULATION MODELING OF TEMPERATURE KINETICS OF INFRARED FRYING OF MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS

**V. Potapov, S. Kostenko**

*Infrared frying of meat semi-finished products is a complex mass-exchange process, qualitative research and optimization of that are possible only through system-dynamic modeling, which is based on analytical connections of the system and physical experiment. The aim of the study was to create a simulation model for the temperature of meat semi-finished products during the infrared frying using the Vensim software package and determining the influence of the type of meat raw material and the power of the emitter of the apparatus on the temperature of inner layers of the product. In previous studies, the authors obtained an equation describing kinetics of temperature of the inner layers of the product, what became analytical basis of the simulation model. The heat receiver is a meat semi-finished product, normal cut of which is a semi-ellipse. To verify the results, real frying was carried out in the apparatus ARJM-0.07-1 that became physical basis of the simulation model. Using the software complex Vensim, a computer experiment was conducted: the temperature of inner layers of meat semi-finished from pork and beef was determined for their identical form and identical power of the emitter, as well as the temperature of inner layers of beef semi-finished products at different emitter power. Comparison of the obtained results of the simulation model of temperature kinetics and real frying proves the adequacy of the created model. Use of the simulation model allows optimize the process of foods products based on the selected reactions through a computer experiment with change and combination of criteria values, providing a quality product.*

**Keywords:** simulation modeling, infrared frying, temperature kinetics, meat semi-finished product.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Жарення м'ясних напівфабрикатів є складним масообмінним процесом, якісне дослідження та оптимізація якого можливі лише шляхом системно-динамічного моделювання, яке ґрунтується на аналітичних зв'язках системи та фізичному експерименті. Імітаційне моделювання точно та всебічно відображує динаміку функціонування системи, тоді як звичайне фізичне чи аналітичне моделювання обмежується спостереженням та формальними статистичними зв'язками між її елементами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Забезпечення енергетичної ефективності інфрачервоного обладнання харчових виробництв ускладнено тим, що існуючі моделі жарення переважно орієнтовані на прикладні інженерні розрахунки [1–3].

**Мета статті** – створення імітаційної моделі кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення шляхом використання програмного комплексу Vensim та визначення впливу типу м'ясної сировини та потужності випромінювача апарата на середню температуру внутрішніх шарів продукту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Рівняння, що описує кінетику температури внутрішніх шарів продукту [4], виглядає таким чином:

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

У рівнянні (1):

- $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{С})$  – коефіцієнт тепловіддачі,
- $\eta = 0,2$  – коефіцієнт поглинання потужності,
- $T_0 = 5^\circ\text{С}$  – початкова температура внутрішніх шарів продукту,
- $T_A = 20^\circ\text{С}$  – температура повітря всередині апарата,
- $P_E$  – потужність інфрачервоного випромінювача,
- $c$  – питома теплоємність продукту,
- $\rho$  – густина продукту,
- $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності продукту,
- $S$  – площа зовнішньої поверхні продукту,
- $R_V$  – відношення об'єму продукту до площини його поверхні,
- $Vi_F = \alpha R_x / (2K_F \lambda)$  – модифіковане число Біо,
- $K_F$  – коефіцієнт форми продукту,
- $\tau$  – час.

Коефіцієнт форми  $K_F$  враховує геометрію продукту [5]:

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

де  $R_x$  – напівтовщина продукту;  $R_y$  та  $R_z$  – половинні розміри продукту за двома координатами ( $R_x, R_y, R_z$  взаємно перпендикулярні).

Приймачем тепла є м'ясний напівфабрикат, нормальним перерізом якого є напівеліпс із напівосями 0,05 м та 0,0225 м. Довжина напівфабриката становить 0,2 м [4].

Із використанням програмного комплексу Vensim створено імітаційну модель кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення (рис. 1). Для верифікації результатів реальне жарення здійснювалося в апараті АРЖМ-0.07-1 [6].

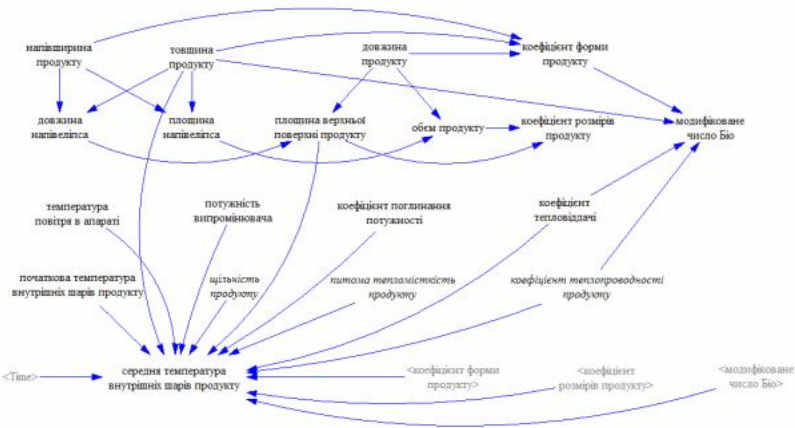


Рис. 1. Імітаційна модель кінетики температури

Нехай питома теплоємність яловичини  $c = 3500$  Дж/(кг °С), свинини  $3000$  Дж/(кг °С); густина яловичини  $\rho = 1100$  кг/м<sup>3</sup>, свинини  $1100$  кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт теплопровідності яловичини  $\lambda = 0,5$  Вт/(м<sup>2</sup> °С), свинини  $0,4$  Вт/(м<sup>2</sup> °С). Потужність випромінювача  $P_E$  становить  $1000$  Вт. За температури готовності  $75$  °С свинина готова через  $521$  с ( $8,7$  хв), яловичина готова через  $635$  с ( $10,6$  хв) (рис. 2, 3), що відповідає реальному жаренню.



Рис. 2. Зростання середньої температури внутрішніх шарів: *a* – свинина; *б* – яловичина

Time (Seconds)	середня температура внутрішніх шарів продукту	середня температура внутрішніх шарів продукту
517	74.5896	62.9333
518	74.7133	63.0378
519	74.837	63.1424
520	74.9606	63.2469
521	75.0842	63.3514
522	75.2077	63.4558
523	75.3313	63.5603
524	75.4547	63.6647
525	75.5782	63.769
526	75.7015	63.8734
527	75.8249	63.9777
528	75.9482	64.082
529	76.0714	64.1863
530	76.1947	64.2906
531	76.3179	64.3948
532	76.441	64.499
533	76.5641	64.6031
534	76.6872	64.7072

*a* *б*

Time (Seconds)	середня температура внутрішніх шарів продукту	середня температура внутрішніх шарів продукту
625	87.7222	74.0692
626	87.8417	74.1708
627	87.9612	74.2724
628	88.0805	74.374
629	88.1999	74.4755
630	88.3192	74.5771
631	88.4385	74.6786
632	88.5578	74.78
633	88.677	74.8815
634	88.7961	74.9829
635	88.9153	75.0843
636	89.0344	75.1857
637	89.1534	75.287
638	89.2725	75.3883
639	89.3914	75.4896
640	89.5104	75.5909
641	89.6293	75.6921
642	89.7481	75.7933

*a* *б*

Рис. 3. Готовність м'ясного продукту: *a* – свинина; *б* – яловичина

Потужність випромінювача  $P_E$  становить 1000 Вт та 750 Вт. За температури готовності  $75^\circ\text{C}$  яловичина готова через 635 с (10,6 хв) за потужності 1000 Вт, яловичина готова через 861 с (14,4 хв) за потужності 750 Вт (рис. 4, 5), що відповідає реальному жаренню.

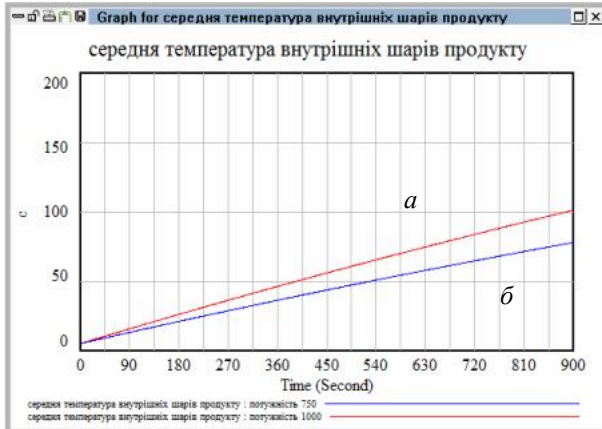


Рис. 4. Зростання середньої температури внутрішніх шарів:  
а – 1000 Вт; б – 750 Вт

Time (Second)	"середня температура внутрішніх шарів продукту"	середня температура внутрішніх шарів продукту
627	температура	57.5262 74.2724
628	внутрішніх	57.6032 74.374
629	шарів	57.6802 74.4755
630	продукту"	57.7572 74.5771
631	Рух:	57.8341 74.6786
632	потужність	57.9111 74.78
633	750	57.988 74.8815
634	потужність	58.0649 74.9829
635	1000	58.1418 75.0843
636		58.2186 75.1857
637		58.2955 75.287
638		58.3723 75.3883
639	а	58.4491 75.4896
640		58.5259 75.5909
641		58.6026 75.6921

а

Time (Seconds)	"середня температура внутрішніх шарів продукту"	середня температура внутрішніх шарів продукту
853	температура	74.4269 96.5615
854	внутрішніх	74.4995 96.6572
855	шарів	74.5721 96.7528
856	продукту"	74.6446 96.8485
857	Runs:	74.7171 96.9441
858	потужність	74.7896 97.0397
859	750	74.8621 97.1353
860	потужність	74.9345 97.2309
861	1000	75.0069 97.3264
862		75.0793 97.4219
863		75.1517 97.5174
864	<i>a</i>	75.2241 97.6128
865		75.2965 97.7082
866		75.3688 97.8036
867		75.4411 97.899
868		75.5134 97.9943

б

Рис. 5. Готовність м'ясного продукту: *a* – 1000 Вт; *б* – 750 Вт

Таким чином, порівняння отриманих результатів імітаційної моделі кінетики температури та реального жарення доводить адекватність створеної моделі.

**Висновки.** Використання імітаційної моделі дозволяє оптимізувати процес виробництва харчової продукції за обраними реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв, забезпечуючи якісний продукт. Предметом подальших досліджень стане врахування теплових втрат і маси продукту, а також вплив комплексу екзогенних змінних на готовність продукту.

#### Список джерел інформації / References

1. Потапов В. О. Наближена модель динаміки теплообмінних процесів / В. О. Потапов, О. С. Сомов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. / Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2008. – Вип. 1 (7). – С. 380–388.

Potapov, V., Somov, O. (2008), "Approximate model of the dynamics of heat transfer processes", *Progressive Technique and Technologies of Food Productions, Restaurant Economy and Trade* [“Nablyzhena model” dynamiky teploobminnykh protsesiv”], Vol. 1 (7), pp. 380-388.

2. Потапов В. О. Моделювання процесу жарення кулінарних виробів основним способом / В. О. Потапов, О. В. Петренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. / Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2008. – Вип. 2 (8). – С. 248–252.

Potapov, V., Petrenko, O. (2008), "Frying process modeling of culinary by main way", *Progressive Technique and Technologies of Food Productions,*

*Restaurant Economy and Trade* [“Modeliuvannia protsessu zharennia kulinamykh vyrobiv osnovnymy sposobom”], Vol. 2 (8), pp. 248-252.

3. Рамазанов С. К. Моделювання динаміки теплопровідності в процесі двостороннього жарення м'яса на основі нелінійної оптимізації / С. К. Рамазанов, В. О. Скрипник, Н. Ю. Молчанова // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 3 (3). – С. 41–47.

Ramazanov, S., Skrypnyk, V., Molchanova, N. (2015), “Modeling of heat conductivity dynamics in the process of two-sided frying meat based nonlinear optimization”, *Technological Audit and Production Reserves* [“Modeliuvannia dynamiky teploprovodnosti v protsesi dvostoronniogo zharennia na osnovi nelineinoy optimizatsii”], Vol. 3/3 (23), pp. 41-47.

4. Potapov, V., Kostenko, S., Lobov, S. (2016), “Kinetics of Meat Semi-finished Products Temperature at Infrared Frying”, *III International Conference “Industrial Technologies and Engineering”*, M. Auevov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan, pp.366-370.

5. Potapov, V. (2013), *The kinetics of transfer phenomena in the drying process: monograph*, LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 319 p.

6. 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), pp. 54-61.

**Потапов Володимир Олексійович**, д-р техн. наук, проф., кафедра холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: potapov\_hduht@kharkov.com.

**Потапов Владимир Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., кафедра холодильной и торговой техники и прикладной механики, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Ключковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: potapov\_hduht@kharkov.com.

**Potapov Vladimir**, Dr. of Science, Professor, Department of Refrigeration and Trade Equipment and Applied Mechanics, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-88; e-mail: potapov\_hduht@kharkov.com.

**Костенко Станіслав Миколайович**, ст. викл., кафедра холодильної та торговельної техніки і прикладної механіки, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-67; e-mail: dlyastasa@gmail.com

**Костенко Станислав Николаевич**, ст. преп., кафедра холодильной и торговой техники и прикладной механики, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Ключковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-67; e-mail: dlyastasa@gmail.com

**Kostenko Stanislav**, Assistant of Professor, Department of Refrigeration and Trade Equipment and Applied Mechanics, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-67; e-mail: dlyastasa@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.1306616