



DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-21

УДК 303.732.4:338.27:66-9

С. М. Костенко, к.т.н.

ORCID 0000-0003-0268-8008

О. А. Маяк, к.т.н.

ORCID 0000-0002-3059-4589

Н. В. Федак, к.т.н.

ORCID 0000-0002-7460-3213

Державний біотехнологічний університет

e-mail: kostenkosm.dbtu@gmail.com; тел.: (068)606-31-65

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЯК ІНСТРУМЕНТ СУЧАСНОГО ІНЖИНІРИНГУ

Анотація. В статті розглянуто можливості системного аналізу, а саме імітаційного моделювання, для оцінки ефективності розробленого апарату інфрачервоного жарення. Засобами системно-динамічного моделювання передано динамічну поведінку системи, тобто її функціонування у часі. Це дало можливість уникнути численних ресурсовитратних експериментів завдяки поєднанню аналітичного моделювання з даними проведених експериментів. Програмний комплекс Vensim PLE забезпечив виконання етапів концептуалізації, побудови моделі, імітації, аналізу та оптимізації. Використання імітаційних моделей дозволяє оптимізувати процес виробництва харчової продукції за обраними реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв, забезпечуючи якісний продукт. Наведена в роботі як приклад системно-динамічна модель процесу ГЧ-жарення м'ясних напівфабрикатів у апараті АРЖМ-0.07-1 дала змогу виявити закономірності щодо тривалості отримання готового продукту, продуктивності, а також питомих енергоємності, металоємності та витратності розробленого апарату залежно від наявності певних конструктивних особливостей.

Ключові слова: системний аналіз, імітаційне моделювання, інжиніринг, технологічні процеси, апарат інфрачервоного жарення.

Постановка проблеми. Системний аналіз пов'язує та узагальнює всі засоби вдосконалення процесу виробництва харчової продукції, що дозволяє не тільки одержати кількісну оцінку, але й визначити шляхи оптимізації [1, 2].

Імітаційне моделювання є адекватним інструментом аналізу складних систем зі слабо формалізованими елементами, до яких можна віднести системи харчових виробництв. Імітаційне дослідження



дозволяє поєднувати особливості експериментального підходу і специфіку засобів комп'ютерної підтримки.

Головні задачі створення імітаційної моделі – це реалізація динаміки процесу, який здійснюється у системі, а також визначення зовнішніх умов, за яких оптимізується модельний відгук. Використання імітаційних моделей дозволяє оптимізувати процес виробництва харчової продукції за обраними реакціями шляхом комп'ютерного експерименту зі зміною та комбінуванням значень критеріїв, забезпечуючи якісний продукт [3, 4].

Метод системної динаміки переважно орієнтований на якісне експериментування, що не виключає проведення класичного кількісного експерименту на основі одного з обраних планів з метою побудови регресійних моделей, які пов'язують обрану вихідну змінну з екзогенними факторами, або оптимізації поверхні відгуку, тобто пошуку комбінації значень керованих екзогенних параметрів, які дозволяють максимізувати або мінімізувати значення обраної ендогенної змінної.

Програмний комплекс Vensim PLE забезпечує виконання етапів концептуалізації, побудови моделі, імітації, аналізу та оптимізації. Vensim має підґрунтям потокову концепцію системної динаміки, за якої об'єкт – це динамічна система, що складається з накопичувачів, пов'язаних між собою керованими потоками. Кількісно кожний накопичувач описується рівнем його змісту, а кожний потік – темпом переміщення на основі інформації про вміст резервуарів [5].

Застосування математичних моделей в харчовій інженерії ускладнюється об'єктивними особливостями процесів харчових виробництв – складністю структури багатьох процесів, відсутністю їх формалізованого описання, а також системного підходу до вибору оцінок і принципів удосконалення технологічних ліній. Ефективні методи удосконалення процесів харчових виробництв можуть бути розроблені лише на основі комплексного, або системного підходу до проблеми.

Основне завдання системного підходу – виявлення нових властивостей цього поєднання, не властивих жодному елементові окремо. Отже, види інжинірингових послуг, а саме послуги, пов'язані з підготовкою виробничого процесу (передпроектні, проектні, післяпроектні), послуги щодо забезпечення ефективності наявного виробництва та реалізації виготовленої продукції (роботи, спрямовані на оптимізацію процесів експлуатації, поліпшення функціонування технологічних ліній, залучення до інформаційних систем, поліпшення матеріально-технічного постачання, менеджменту та маркетингу, підбору і підготовки кадрів, а також поради з фінансової політики) можна ефективно реалізовувати із застосуванням імітаційного

моделювання.

Аналіз останніх досліджень. Системний аналіз широко застосовується в багатьох сферах: банківських та фінансових установах, органах державного управління, проектно-конструкторських та науково-дослідницьких організаціях. З цього приводу є велика кількість наукових публікацій, які демонструють переваги та універсальність методів системного моделювання [6–8]. Але застосування імітаційного моделювання для прогнозування та оптимізації технологічних процесів та їх апаратного забезпечення з використанням програмного комплексу Vensim PLE є достатньо інноваційним підходом, який знайшов своє відображення у деяких роботах [9, 10]. Тому актуальним науковим завданням є подальший розвиток застосування системного аналізу, а саме імітаційного моделювання як інструменту сучасного інжинірингу.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Шляхом імітаційного моделювання з використанням програмного комплексу Vensim PLE виконати системно-динамічне оцінювання ефективності розробленого апарату інфрачервоного жарення з відбивачем променевого потоку АРЖМ-0.07-1.

Основна частина. Розроблений апарат із відбивачем променевого потоку АРЖМ-0.07-1 застосовується для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів. Використання відбивача забезпечує рівномірну густину променевого потоку на поверхні продукту.

Комплексне оцінювання ефективності розробленого апарату інфрачервоного жарення з відбивачем променевого потоку АРЖМ-0.07-1 проводили в такий спосіб.

Одиницею виміру часу в моделі була хвилина, що відповідало терміну найменшої затримки. Термін моделювання складав 15 хвилин. Загальний вигляд моделі наведено на рисунку 1.

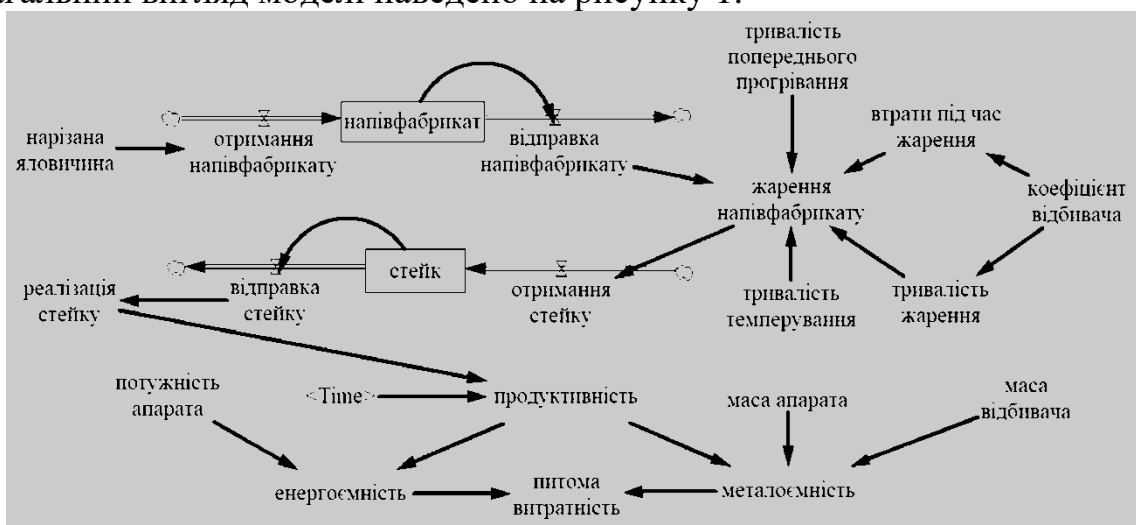


Рисунок 1. Імітаційна модель оцінювання ефективності апарату

Було зроблено такі припущення:

- поставка яловичини була разовою пульсуючою;
- затримки на операціях відповідали рекомендаціям з експлуатації;
- тривалості теплової обробки відповідала типовому обладнанню;
- втрати на операціях відповідали експериментальним дослідженням;
- якість продукту незмінно висока.

Рівні «напівфабрикат» та «стейк» визначалися відповідною різницею керованих потоків – вхідного потоку отримання та вихідного потоку відправки. Отримання напівфабрикату визначалося нарізаною яловичиною, отримання стейку – жаренням напівфабрикату. Відправка напівфабрикату визначалася рівнем «напівфабрикат», відправка стейку – рівнем «стейк».

Екзогенні змінні:

- масові компоненти (нарізана яловичина, маса апарата, маса відбивача);
- енергетичні компоненти (потужність апарата, коефіцієнт відбивача (рис. 2), тривалість попереднього прогрівання, тривалість темперування).

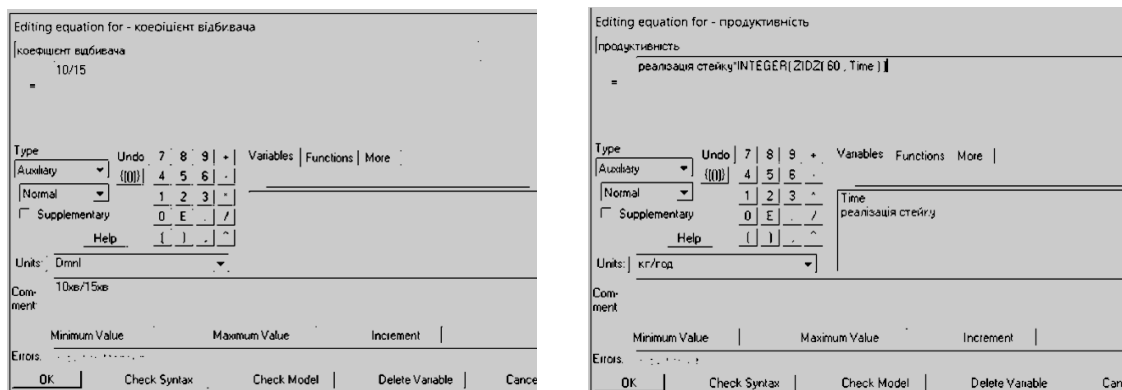


Рисунок 2. Змінні «коефіцієнт відбивача» та «продуктивність»

Ендогенні змінні:

- втрати під час жарення визначалися добутком 0.33 (33 %) та коефіцієнта відбивача;
- тривалість жарення визначалася добутком 10 хв та коефіцієнта відбивача;
- жарення напівфабрикату визначалося фіксованою затримкою відправки напівфабрикату на суму тривалостей попереднього прогрівання, жарення та темперування;
- продуктивність визначалася об'ємом реалізації стейку за годину (рис. 2);



– питома енергоємність визначалася відношенням потужності апарата до продуктивності;

– питома металоємність визначалася відношенням суми мас апарата та відбивача до продуктивності.

Реакцією моделі була питома витратність, яка визначалася множенням питомих енергоємності та металоємності.

Було використано наступні рівні факторів:

- нарізана яловичина складалася з півфабрикату масою 0.4 кг;
- маса апарата складала 3.5 кг;
- маса відбивача складала 0.5 кг;
- тривалість попереднього прогрівання становила 2 хв;
- тривалість темперування становила 2 хв;
- потужність випромінювача становила 1000 Вт;
- коефіцієнт відбивача становив 10/15, тобто відношення тривалості жарення напівфабрикату в експериментальному апараті з відбивачем (10 хв) до тривалості жарення без відбивача (15 хв).

Експеримент проводився без відбивача (коефіцієнт відбивача 1, маса відбивача 0 кг) та з відбивачем (коефіцієнт відбивача 10/15, маса відбивача 0.5 кг). Використання відбивача призвело до наступних результатів:

– скорочення часу отримання продукту на $14 / 11 - 1 = 1.27 - 1 = 0.27$, тобто 27 % (рис. 3–7);

– збільшення реалізації стейку на $0.31 / 0.27 - 1 = 1.15 - 1 = 0.15$, тобто 15 % (рис. 3);

– збільшення продуктивності на $1.56 / 1.07 - 1 = 1.46 - 1 = 0.46$, тобто 46 % (рис. 4);

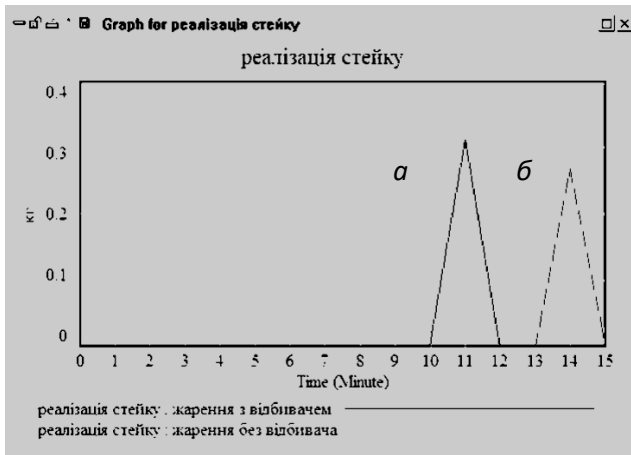
– зменшення питомої енергоємності на $0.94 / 0.64 - 1 = 1.47 - 1 = 0.47$, тобто 47 % (рис. 5);

– зменшення питомої металоємності на $3.28 / 2.57 - 1 = 1.28 - 1 = 0.28$, тобто 28 % (рис. 6);

– зменшення питомої витратності на $3.08 / 1.65 - 1 = 1.87 - 1 = 0.87$, тобто 87 % (рис. 7).

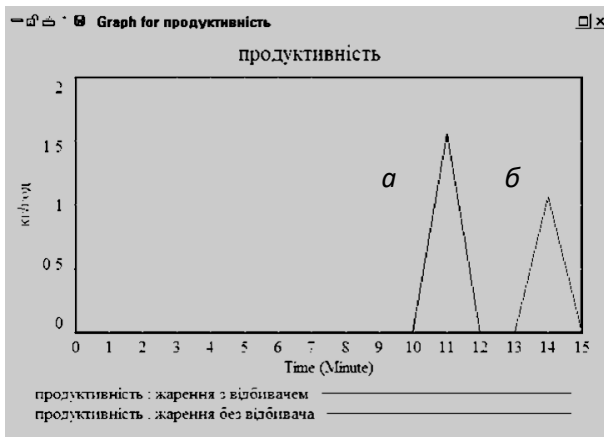
Системно-динамічне моделювання процесу ІЧ-жарення м'ясних напівфабрикатів у апараті АРЖМ-0.07-1 уможливило наступні висновки:

- час отримання продукту скоротився на 27 %;
- продуктивність ІЧ-жарення зросла на 46 %;
- питома енергоємність ІЧ-жарення скоротилася на 47 %;
- питома металоємність ІЧ-жарення скоротилася на 28 %;
- питома витратність ІЧ-жарення скоротилася на 87 %.



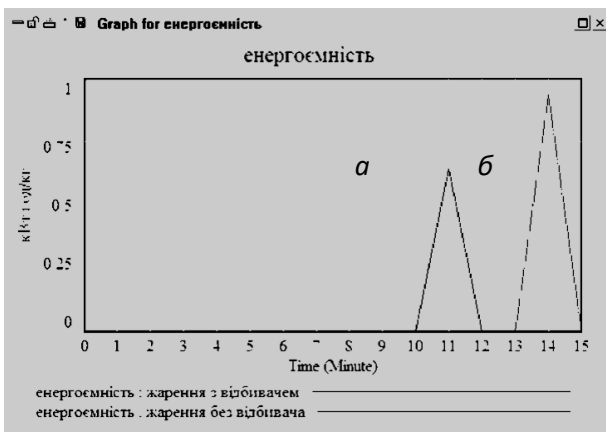
Time (Minute)	реалізація стейку	реалізація стейку
0	стейку"	0
1	Runs:	0
2	жарення з	0
3	відбивачем	0
4	жарення без	0
5	відбивача	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	a	б
10	0	0
11	0	311111
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0

a – жарення з відбивачем, б – жарення без відбивача
Рисунок 3. Реалізація стейку (кг):



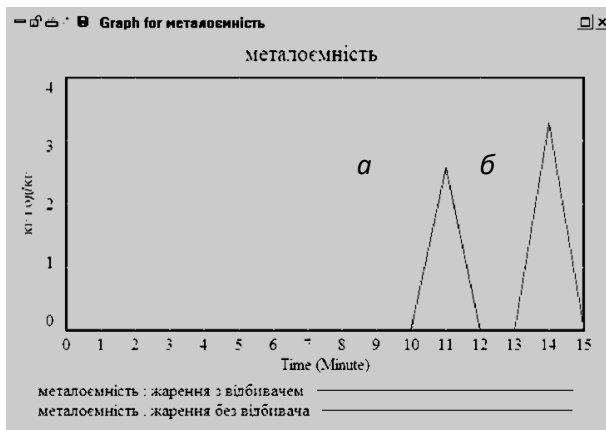
Time (Minute)	продуктивність	продуктивність
0	сть" Runs:	0
1	жарення з	0
2	відбивачем	0
3	жарення без	0
4	відбивача	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	a	б
10	0	0
11	0	1.55556
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0

a – жарення з відбивачем, б – жарення без відбивача
Рисунок 4. Продуктивність (кг / год)



Time (Minute)	енергоємність	енергоємність
0	ть" Runs:	0
1	жарення з	0
2	відбивачем	0
3	жарення без	0
4	відбивача	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	a	б
10	0	0
11	0	0.642857
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0

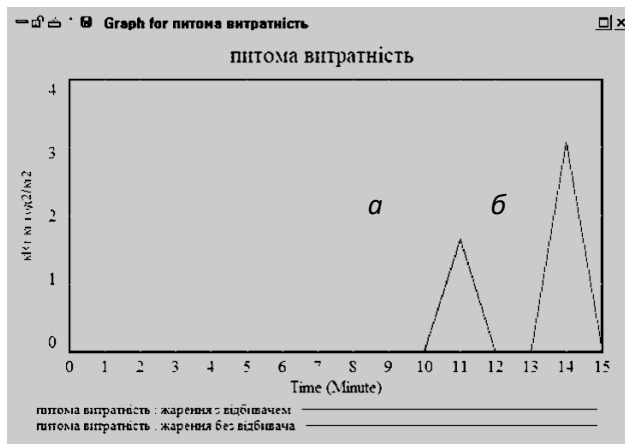
a – жарення з відбивачем, б – жарення без відбивача
Рисунок 5. Питома енергоємність (кВт год / кг)



Time (Minute)	металоємність	металоємність
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	2.57143	0
12	0	0
13	0	0
14	0	3.25124
15	0	0

a – жарення з відбивачем, *b* – жарення без відбивача

Рисунок 6. Питома металоємність (кг год / кг):



Time (Minute)	питома витратність	питома витратність
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	1.65306	0
12	0	0
13	0	0
14	0	3.07617
15	0	0

a – жарення з відбивачем, *b* – жарення без відбивача

Рисунок 7. Питома витратність (кВт кг год² / кг²)

Висновки. Таким чином, шляхом імітаційного моделювання проведено системно-динамічне оцінювання ефективності апарата АРЖМ-0.07-1 порівняно з пристроєм без рефлектора. Визначено, що використання відбивача променевого потоку у апараті АРЖМ-0.07-1 скорочує час отримання продукції на 27 %, збільшує продуктивність ПЧ-жарення на 46 %, зменшує питому енергоємність ПЧ-жарення на 47 %, питому металоємність на 28 %, питому витратність на 87 %.

Список використаних джерел

1. Пивоваров П. П. та ін. *Теоретичні основи харчових технологій*. Х.: ХДУХТ, 2010. 363 с.
2. Перцевий Ф. В. та ін. *Технологія продукції харчових виробництв*. Х.: ХДУХТ, 2006. 318 с.
3. Стеценко І. В. *Моделювання систем*. Черкаси: ЧДТУ, 2010. 399 с.
4. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. *Основи системного*



аналізу. К.: Видавнича група ВНУ, 2007. 544 с.

5. Меркулова Т. В., Биткова Т. В., Кононова Е. Ю. *Экономико-математическое моделирование*. Х.: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2011. 276 с.

6. Merkulova T., Bitkova T. and Kononova K. Tax Factors of Sustainable Development: System Dynamics Approach towards Tax Evasion Analyses. *Rivista di studi sulla sostenibilita*. 2016. Volume 2016, Issue 1. P. 35–47.

7. Weller F., Sherley R., Weller L., Ludynia K., Geldenhuys D., Shannon L. and Jarre A. System dynamics modelling of the Endangered African penguin populations on Dyer and Robben islands, South Africa. *Ecological Modelling*. 2016. Vol. 327: 44–56. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.01.011

8. Mosai A., Tokwana B. and Tutu H. Computer simulation modelling of the simultaneous adsorption of Cd, Cu and Cr from aqueous solutions by agricultural clay soil: A PHREEQS geochemical modelling code coupled to parameter estimation (PEST) study. *Ecological Modelling*. 2022. Vol. 465. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.109872

9. Kostenko S., Fedak N., Mayak O. Simulation of the radiant heat transfer process in the elements of roasting equipment. *ScienceRise*. 2020. No. 5 (70). Pp. 80-88. doi: 10.21303/2313-8416.2020.001474

10. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Оцінка тепломасообмінного обладнання шляхом імітаційного моделювання. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2019. Том 25, № 5. С. 64–73. doi: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-8

Стаття надійшла до редакції 20.04.2022 р.

S. Kostenko, O. Mayak, N. Fedak
State biotechnological university

SYSTEM ANALYSIS AS A MODERN ENGINEERING TOOL

Summary

The article considers the possibilities of system analysis, namely simulation modeling, to evaluate the effectiveness of the developed infrared frying apparatus. By means of system-dynamic modeling, the dynamic behavior of the system, that is, its functioning in time, is transmitted. This made it possible to avoid numerous resource-intensive experiments due to the combination of analytical modeling with the data of the experiments. The Vensim PLE software package provided the stages of conceptualization, model building, simulation, analysis and optimization. Vensim introduces the flow concept of system dynamics, in which an object is a dynamic system consisting of drives connected by controlled flows. The main tasks of creating a simulation model are the implementation of the dynamics of the process carried out in the system, as well as determined the external conditions under which the model response is optimized. The use of simulation models allows you to optimize the process of food production according to the selected reactions through a computer experiment with changing and combining criteria, providing a quality product. The theory of systems makes it possible to consider in aggregate the



regularities of each technological operation and to coordinate them with the ultimate goal of the technological lines functioning. The systematic approach linked and generalized all the mines of improving the technological process and the infrared frying apparatus, which made it possible not only to obtain a quantitative assessment, but also determined the ways of introducing it into production. The system-dynamic model of the process of semi-finished meat products infrared frying in the ARZhM-0.07-1 apparatus, given in this study as an example, made it possible to identify patterns in the durations of the product preparation to readiness, productivity, as well as specific energy consumption, metal consumption and cost of the developed apparatus, depending on the presence of certain design features.

Key words: system analysis, simulation, engineering, technological processes, infrared frying apparatus.