ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОСТЕНКО СТАНІСЛАВ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.3.036.25:641.542.6

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОМЕНЕВОГО ТЕПЛООБМІНУ В ЕЛЕМЕНТАХ ЖАРИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв
Технічні науки

Подається на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.М. Костенко

ЗАСВІДЧУЮ ІДЕНТИЧНІСТЬ ЦЬОГО ПРИМІРНИКА З ІНШИМИ ПРИМІРНИКАМИ ДИСЕРТАЦІЇ, ПОДАНОЇ ДО СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ РАДИ ДФ64.088.01
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР ОНИЩЕНКО В.М.

Науковий керівник:
Федак Наталя Василівна,
кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Костенко С.М. Моделювання процесу променевого теплообміну в елементах жарильного обладнання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми нерівномірності променевого теплообміну під час інфрачервоного жарення харчових продуктів.

В рамках сформульованої мети та завдань дисертаційної роботи вперше розв’язано обернену задачу теплообміну випромінюванням для визначення профілю відбивача з метою рівномірного опромінювання теплоприймача, який має опуклий переріз; уперше отримано рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту за умов інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів та потрібної тривалості процесу в розробленому апараті ІЧ-жарення зі спрофільованим відбивачем; уперше шляхом застосування системного аналізу за умови використання програмного комплексу Vensim створено імітаційні моделі кінетики температури м’ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення та комплексного оцінювання економічної ефективності розробленого апарата ІЧ-жарення з відбивачем променевого потоку.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному: створено методику визначення профілів відбивачів для рівномірного опромінювання приймача опуклого перерізу шляхом розв’язання оберненої задачі опромінення. Проведено верифікацію створеної методики визначення

профілів рефлекторів шляхом комп'ютерного експерименту за використання програмних комплексів TracePro та Mathcad, що доводить її коректність. Валідація створеної методики визначення профілів рефлекторів шляхом фізичного експерименту за використання експериментального апарата ІЧ-жарення довела її прийнятність для проєктування ІЧ-обладнання харчових виробництв та ресторанного господарства. З використанням програмного комплексу Mathcad створено програмний продукт для визначення форм відбивачів, які забезпечать заданий розподіл променевого потоку на поверхні опуклого теплоприймача. Розроблено промисловий зразок апарата з рефлектором для жарення м'ясних напівфабрикатів, який забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку. Розроблено проект технічної документації на нове обладнання – апарат із рефлектором для інфрачервоного жарення м'ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1.

Проведені економічні розрахунки дозволяють зробити висновок щодо доцільності виробництва та впровадження у практичну діяльність розробленого апарата. Новий апарат порівняно з базовим має значні переваги, а саме більш високий показник технічного рівня та меншу собівартість. Це свідчить про високий рівень конкурентоспроможності розробленого апарата для підприємств, які займаються виробництвом устаткування для виготовлення харчових продуктів. Економічні розрахунки свідчать про доцільність впровадження апарата у закладах ресторанного господарства.

У дисертаційній роботі проаналізовано сучасний стан проблеми використання процесу інфрачервоного жарення для харчових продуктів та апаратів для його реалізації, а також досліджень щодо забезпечення рівномірності променевого потоку на поверхні опуклого продукту. Визначено, що застосування ІЧ-випромінювання інтенсифікує технологічні процеси харчових виробництв унаслідок значного збільшення густини теплового потоку на поверхні продукту і проникнення теплової енергії

всередину матеріалу, але існує проблема створення рівномірності густини променевого потоку від одного випромінювача на поверхні опуклого продукту, що стало підґрунтям для розробки нових конструкцій апаратів інфрачервоного жарення.

Було запропоновано теплотехнічну систему, що складається з трубчастого випромінювача, циліндричного відбивача і приймача тепла з опуклою формою перерізу та на її основі розроблено аналітичну методику визначення профілю відбивача, який забезпечить рівномірне опромінювання приймача опуклого перерізу. Здійснено аналітичне моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймачів півкругового, півеліптичного профілю без урахування втрат теплоти на відбивачі та з ними. Проведено моделювання усебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного та еліптичного профілю. Це дало розв’язок оберненої задачі теплообміну випромінюванням для визначення профілю відбивача з метою рівномірного опромінювання теплоприймача, який має опуклий переріз.

На основі проведеного аналітичного моделювання розроблено фрагментовані форми відбивачів, що забезпечує під час інфрачервоної обробки рівномірний променевий потік на поверхні продукту, а також уможливлює як фронтальний, так і бічний доступ до продукту, беручи до уваги технологічні особливості обробки.

Метою експериментального дослідження була оцінка ефективності використання спрофільованого відбивача шляхом фізичного моделювання та порівняння результатів із комп’ютерною верифікацією створеної методики.

Для отримання числового розв’язку у програмному комплексі TracePro, задавали кількість теплових променів, що виходять із джерела. Просторовий розподіл густини потоку випромінювання моделюється шляхом розрахунку траєкторій окремих випадкових променів, і точність розв’язку відповідає їх кількості.

Комп’ютерне моделювання розповсюдження теплових променів у робочих камерах теплотехнічних систем за допомогою програмного комплексу TracePro довело, що отримана методика профілювання рефлекторів теплотехнічних систем є коректною.

Кількісна оцінка ефективності використання спрофільованого рефлектора шляхом визначення температури всередині робочої камери за допомогою термопар хромель-алюмель підтвердила комп’ютерну верифікацію моделі променевого теплообміну.

Розроблено експериментальний апарат із малоінерційними датчиками температури для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів, який уможливлює використання спрофільованого за створеною аналітичною методикою відбивача. В експериментальному апараті використовується один кварцовий випромінювач, у якого напруга живлення 220 В, потужність 720 Вт, довжина випромінювача становить 250 мм. Довжина теплових хвиль складає 1.2 мкм, відповідно кути падіння теплових променів на рефлектор дорівнюють кутам віддзеркалення. Використання експериментального апарату з відбивачем променевого потоку для жарення м’ясних напівфабрикатів доводить, що отримана методика профілювання рефлекторів теплотехнічних систем є прийнятною для проектування ІЧ-обладнання харчових виробництв та ресторанного господарства. Використання в експериментальному апараті спрофільованого відбивача скорочує тривалість жарення натуральних порційних напівфабрикатів з яловичини на 33 %.

Шляхом органолептичного оцінювання визначено якість отриманого продукту з яловичини, жареного в апараті з відбивачем променевого потоку та без нього. Отримані профілограми доводять переваги застосування відбивача в апараті ІЧ-жарення. Готовність біфштексів із яловичини, жарених у експериментальному апараті з відбивачем та без нього, визначалася досягненням температури внутрішніх шарів продукту 75 ^{o}C із подальшим темперуванням.

Розроблено промисловий зразок апарата із рефлектором для жарення м’ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1, який забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку значенням близько 30 кВт/м^2.

В результаті аналітичного моделювання процесу інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів отримані рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту та потрібної тривалості процесу жарення в розробленому апараті ІЧ-жарення зі спрофільованим відбивачем. На основі аналітичного та імітаційного моделювання встановлено, що в апараті АРЖМ-0.07-1 за температури готовності 75 ºС жарена без відбивача яловичина готова через 10 хв, жарена з відбивачем готова через 7 хв. Порівняння отриманих результатів імітаційної моделі кінетики температури та реального жарення в апараті АРЖМ-0.07-1 доводить адекватність створеної імітаційної моделі.

Проведене імітаційне дослідження дозволило поєднати особливості експериментального підходу і специфіку засобів комп'ютерної підтримки. 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.

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

Економічні розрахунки здійснено з дотриманням принципу багатокритеріальної оцінки, відповідно до якого оцінювання наукової розробки здійснено з урахуванням критеріїв його вартості, економії ресурсів,

підвищення продуктивності праці під час експлуатації та економічного ефекту від його впровадження у практику діяльності.

Розрахунки свідчать про доцільність впровадження апарата у закладах ресторанного господарства. Економічний ефект від впровадження розробленого апарата складатиме 190,5 тис. грн на рік на один апарат.

Ключові слова: моделювання, інфрачервоне жарення, відбивач, м'ясний напівфабрикат, біфштекс, системний аналіз, імітаційне моделювання.

ANNOTATION

Kostenko S.M. Modeling of the process of radiant heat exchange in the elements of frying equipment. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the receiving a degree Candidate of Engineering Sciences on specialty 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of irregularity of radiative heat exchange during infrared frying of foodstuffs.

Within the framework of the formulated goal and objectives of the thesis, the inverse problem of heat exchange by radiation was solved for the first time to determine the profile of the reflector in order to uniformly irradiate the heat sink, which has a convex cross section. For the first time, equation of the kinetics of an average temperature of inner layers of the product in the conditions of infrared roasting of meat semi-finished products and the required duration of the process in the developed infrared roasting device with a profiled reflector was obtained. For the first time, simulation models of temperature kinetics of meat semi-finished products during infrared roasting and complex evaluation of economic efficiency

of the developed IR roasting device with a beam reflector were created by applying system analysis using Vensim software.

Practical significance of the obtained results is as follows: a method for determining the profiles of reflectors for uniform irradiation of the receiver of convex cross-section by solving the inverse irradiation problem. We have verified the created methodology for determining reflector profiles through a computer experiment using the TracePro and Mathcad software. That proves its correctness. The validation of the established methodology for determining the profiles of reflectors by physical experiment using the experimental apparatus of IR-frying proved its acceptability for the design of infrared equipment for food production and restaurant industry. The equations of kinetics of the average temperature of the inner layers of the product were obtained for infrared frying of meat semi-finished products and the required duration of the frying process in the developed apparatus of IR-frying with a profiled reflector. For the first time, through the use of system analysis, simulation models of the kinetics of meat semi-finished products temperature during infrared frying and complex evaluation of the cost-effectiveness of the developed IR-apparatus with beam reflector were created.

A software product was created by use the Mathcad software to determine reflector profiles that would provide a uniform beam distribution on the surface of a convex heat receiver. The industrial model of the apparatus with a reflector for frying of meat semi-finished products is developed, which provides a uniform beam flux density on the surface of the product. Draft technical documentation for new equipment – apparatus with reflector for infrared frying of meat portion semi-finished products ARZhM-0.07-1 has been developed.

Economic calculations allow us to draw a conclusion concerning the expediency of the production and introduction of the developed apparatus into practical activity. The new device has significant advantages over the basic one, namely, it has higher technical level and lower cost. This indicates high competitiveness of the developed device for the enterprises engaged in the

production of equipment for food production. Economic calculations indicate the expediency of introducing the device in restaurants.

The dissertation analyzes the current state of the problem of using the infrared frying process for foodstuffs and apparatus for its implementation, as well as studies on ensuring the uniformity of the beam flux on the surface of a convex product. The inability to create a uniform beam flux density from a single emitter on the surface of a convex product was determined, that the use of IR radiation intensifies technological processes of food production due to significant increase in heat flux density on the surface of the product and heat energy penetration into the material, but there is a problem of uniformity of radiation flux density from one emitter on the surface of the convex product, which became the basis for the development of new designs of infrared frying apparatus.

A heat engineering system consisting of a tubular radiator, cylindrical reflector and heat receiver with a convex cross-sectional shape was proposed, and on its basis an analytical method for determining the profile of the reflector is developed, which will ensure uniform irradiation of the receiver of the convex section. Analytical modeling of the uniform irradiation of the upper surface of the receivers of the semicircular, semieliptic profile without taking into account the heat losses on the reflector and with that has been carried out. The modeling of all-round irradiation of the receiver of the semieliptic and elliptical profile is simulated. This gave the solution of the inverse problem of heat transfer by radiation to determine the profile of the reflector with the aim of uniform irradiation of the heat reciever having a convex profile.

On the basis of the analytical simulation, fragmented reflector shapes have been developed, which ensures, during infrared treatment, a uniform beam flux on the surface of the product, as well as allowing both frontal and lateral access to the product, taking into account the technological features of the processing.

The aim of the experimental research is to evaluate effectiveness of using a profiled reflector by physical modeling and comparison of the results with computer verification of the developed technique.

To obtain a numerical solution in the TracePro software package, the number of heat rays emanating from the source was set. The spatial distribution of the radiation flux density is modeled by calculating the trajectories of individual random rays, and the solution accuracy corresponds to their number.

Computer simulation of thermal radiation propagation in working chambers of thermal engineering systems with the help of TracePro software proved that the obtained method of profiling of reflectors of thermal engineering systems is correct.

The quantitative evaluation of the efficiency of the use of a profiled reflector by determining the temperature inside the working chamber using chromel-alumel thermocouples confirmed the computer-based verification of the radiation heat transfer model.

An experimental apparatus with low-inertial temperature sensors for infrared frying of meat semi-finished products has been developed, which makes it possible to use a reflector, which has been created according to the analytical method. The experimental apparatus uses one quartz emitter, which has a supply voltage of 220 V, power 720 W, the emitter length is 250 mm. The wavelength of heat is 1.2 μm, respectively, the angles of incidence of heat rays on the reflector are equal to the angles of reflection. The use of an experimental apparatus with a beam reflector for frying meat semi-finished products proves that the obtained method of profiling of reflectors of thermal engineering systems is acceptable for the design of infrared equipment of food production and restaurant industry. The use of a profiled reflector in the experimental apparatus reduces the roasting time of natural portioned beef semi-finished products by 33 %.

By the organoleptic evaluation, the quality of the beef product roasted in the apparatus with and without the beam reflector was determined. The obtained profiles prove the benefits of using the reflector in the infrared apparatus. The readiness of the beef steaks and langettes fried in the experimental apparatus with and without the reflector was determined by reaching the temperature of the inner layers of the product 75 °C with subsequent tempering.

The industrial model of the apparatus with the reflector for meat semi-finished products ARZhM-0.07-1 was developed, which provides a uniform beam flux density of about 30 kW/m^2 on the surface of the product.

As a result of analytical modeling of the infrared frying process of meat semi-finished products, the kinetics of the average temperature of the inner layers of the product and the required duration of the frying process in a developed IR-apparatus with a profiled reflector were obtained. On the basis of analytical and simulation modeling it is established that in the apparatus of ARZhM-0.07-1 at a temperature of 75 °C fried beef is ready without reflector after 10 minutes, with reflector ready after 7 minutes. Comparison of the obtained results of the simulation model of the kinetics of temperature and real frying in the apparatus ARZhM-0.07-1 proves the adequacy of the created simulation model.

The conducted simulation research allowed to combine the peculiarities of the experimental approach and specificity of means of computer support. The use of simulation models allows to optimize the process of food production by the selected reactions by means of computer experiment with changing and combining values of the criteria, providing a quality product.

An integrated assessment of the cost-effectiveness of the ARZhM-0.07-1 apparatus compared to a device without a beam reflector was carried out by simulation. It is determined that the use of a reflector in the apparatus ARZhM-0.07-1 reduces the time of production by 27 %, increases the frying productivity by 46 %, reduces the specific energy consumption of frying by 47 %, specific metal consumption by 28 %, specific total consumption by 87 %.

Economic calculations are carried out in accordance with the principle of multi-criteria evaluation, according to which the evaluation of scientific development is carried out taking into account the criteria of its cost, resource savings, productivity during the operation and economic effect of its implementation.

Calculations indicate the expediency of implementing the device in restaurants. Economic effect of the implementation of the developed device will be 190.5 thousand UAH per year per device.

Key words: modeling, infrared frying, heat transfer, reflector, meat semi-finished product, steak, system analysis, imitation modeling.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 3. Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням / за заг. ред. О. І. Черевка, В. М. Михайлова. Х.: ХДУХТ, 2012. 130 с. *Здобувачем розроблено та запропоновано низку технічних рішень для підвищення ефективності обладнання з інфрачервоним нагріванням.*

2. Потапов В. О., Костенко С. М. Системно-динамічне моделювання процесу інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів // Повноцінне харчування: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В. В. Євлаш, проф. В. О. Потапова, проф. М. І. Радченко, проф. Н. Л. Савицької. Х.: Світ книг, 2016. С. 252–275. *Здобувачем оброблено та проаналізовано отримані дані щодо енергоефективного виробництва м'ясних напівфабрикатів на основі створених системно-динамічних моделей.*

3. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Фрагментований рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з напівеліптичною формою перерізу // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2008. Вип. 2 (8). С. 266–274. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розроблено методику обчислення форм рефлекторів теплотехнічних систем.*

4. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Визначення форми рефлектора для рівномірного опромінювання приймача з круговою формою перерізу // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ,

2008. Вип. 21. С. 83–90. *Здобувачем проведено аналітичні досліди з вибору форм рефлекторів.*

5. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Рефлектори фрагментованих форм для теплової обробки продукції // Прикладна геометрія та інженерна графіка: міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 80. К.: КНУБА, 2008. С. 259–263. *Здобувачем розроблено нові схеми теплотехнічних установок з рефлекторами різних структур.*

6. Костенко С. М. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінення приймача напівеліптичного перерізу // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 1 (9). С. 261–267. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.**

7. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінювання приймача еліптичного перерізу // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2009. Вип. 21. С. 256–260. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розглянутий процес всебічного опромінення еліптичного приймача з розробленим рефлектором.*

8. Плевако В. П., Костенко С. М. Комп’ютерне моделювання процесу опромінювання приймача напівеліптичного перерізу // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2009. Вип. 22. С. 269–273. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено комп’ютерне експериментування.*

9. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Геометричне моделювання поверхні рефлектора з урахуванням втрат теплоти // Прикладна

геометрія та інженерна графіка // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. пр. / ТДАТУ. Вип. 24, т. 47. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. С. 51–60. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розглянуто двовимірну задачу геометричного моделювання поверхні рефлектора.*

10. Плевако В. П., Костенко С. М., Саєнко С. Ю. Верифікація методики профілювання відбивача // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки / Одеська національна академія харчових технологій. 2012. Вип. 41. Т. 1. С. 157–159. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено комп'ютерну верифікацію аналітичної методики.*

11. Плевако В. П., Костенко С. М., Лобов С. О. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 29. С. 48–52. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем заплановано та проведено експериментальні досліди з апробації аналітичної методики.*

12. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/5 (66). С. 42–45. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем проведено валідацію запропонованої аналітичної методики.*

13. Костенко С. М. Комплексна оцінка якості апарата АРЖМ-0.07-1 // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет

харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2014. Вип. 2 (20). С. 168–173. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.**

14. Potapov, V., Kostenko, S. System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 218–225. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем створено імітаційну модель апарата ІЧ-жарення.*

15. Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. Physical and Analytical Modeling of Infrared Frying in ARJM-0.07-1 Apparatus // Industrial Technology and Engineering. 2016. Vol. 3 (20). P. 54-61. **Стаття у періодичному науковому виданні Республіки Казахстан з наукового напряму, за яким підготовлено дисертацію.** *Здобувачем заплановано та проведено аналітичні та експериментальні дослідження ефективності розробленого апарату.*

16. Потапов В. О., Костенко С. М. Імітаційне моделювання температурної кінетики інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2018. Вип. 1 (27). С. 197–204. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем створено імітаційну модель температурної кінетики ІЧ-жарення.*

17. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т

«Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2018. № 35 (1311). С. 71–77. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем заплановано та проведено імітаційне експериментування.*

18. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2019. Вип. 1 (29). С. 75–85. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем запропоновано системний аналіз для імітаційної моделі процесу теплообміну.*

19. 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. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем запропоновано використання імітаційного моделювання для оцінки тепломасообмінного обладнання.*

20. Kostenko S., Fedak N., Mayak O. Simulation of the radiant heat transfer process in the elements of roasting equipment // ScienceRise. 2020. No. 5 (70). P. 80-88. **Стаття у періодичному науковому виданні Естонської Республіки, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, з наукового напряму, за яким підготовлено дисертацію.** *Здобувачем запропоновано те реалізовано методику розрахунку профілю відбивача.*

21. Потапов В. О., Федак Н. В., Костенко С. М. Комплексне моделювання інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів //

Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. пр. / Мелітопольський державний педагогічний університет ім. Б. Хмельницького. Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2020. Вип. 17. С. 92–100. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено низку експериментів та отримано дані для комплексного моделювання інфрачервоного жарення м'ясних порційних напівфабрикатів.*

22. Пат. на корисну модель 121298 Україна, МПК A 47 J 37/06 (2006.01). Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів / Костенко С. М., Потапов В. О., Педорич І. П.; заявник і патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. № u201706805; заявл. 30.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Здобувачем запропоновано методику розрахунку профілю відбивача.*

23. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Моделювання інфрачервоного жарення в апараті АРЖМ-0.07-1 // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2016 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2016. Ч. 1. С. 316–317. *Здобувачем проведено порівняння аналітичного та фізичного моделювання ІЧ опромінювання.*

24. Potapov V., Kostenko S., Lobov S. Kinetics of Meat Semi-finished Products Temperature at Infrared Frying // Industrial Technologies and Engineering ICITE – 2016: III International Conference, October 28-29, 2016: proceeding. Shymkent: M. Auezov South Kazakhstan State University, 2016. P. 366-370. *Здобувачем досліджено кінетику температури м'ясного напівфабрикату під час ІЧ-жарення.*

25. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Системно-динамічна оцінка апарата АРЖМ-0.07-1 // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 50-річчю заснування ХДУХТ, 18 травня 2017 р.: тези у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 276–277. *Здобувачем створено імітаційну модель апарату за визначених припущень.*

26. Потапов В. О., Костенко С. М. Кінетика температури м’ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення // Хімічна технологія та інженерія: міжнар. наук.-практ. конф., 26–30 червня 2017 р.: тези доп. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2017. С. 170–171. *Здобувачем отримано диференціальне рівняння кінетики температури.*

27. Потапов В. О., Маяк О. А. , Костенко С. М. та ін. Системно-динамічне моделювання процесів харчових виробництв // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: друга міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 85-річчю Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р.: матеріали. Х.: ХДУХТ, 2017. С. 89–90. *Здобувачем доведено ефективність використання відбивача променевого потоку в апараті ІЧ- жарення.*

28. Костенко С. М., Потапов В. О. Імітаційне моделювання кінетики температури під час інфрачервоного жарення // Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі: міжнар. форум молоді, 5–6 квітня 2018 р.: матеріали. Х.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенка, 2018. С. 94. *Здобувачем створено системно-динамічну імітаційну модель кінетики температури м’ясних напівфабрикатів під час ІЧ жарення.*

29. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Використання системного аналізу для оптимізації тепломасообмінного обладнання // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: третя міжнар. наук.-практ. конф., 4–6 вересня 2019 р.: матеріали. Х.: ХДУХТ, 2019. С. 87–88. *Здобувачем використано системний аналіз для дослідження тепломасообмінних процесів.*

30. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Удосконалення тепломасообмінного обладнання шляхом використання системного аналізу // Актуальні проблеми розвитку ресторанного, готельного та туристичного бізнесу в умовах світової інтеграції: досягнення та

перспективи: ІІ Міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 вересня 2019 р.: тези доп. Харків – Варна: ХДУХТ, 2019. С. 164–167. *Здобувачем проведено імітаційне моделювання з використанням програмного комплексу системного аналізу Vensim.*

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 24

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ІСНУЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ…… 30

1.1 Проблеми використання інфрачервоного жарення харчової продукції……. 30

1.2 Аналіз інфрачервоного жарильного обладнання…….. 34

1.3 Аналіз існуючих досліджень рівномірності опромінення харчової продукції……..... 40

1.4 Шляхи вдосконалення інфрачервоного жарильного обладнання та задачі дослідження……. 42

Висновки до розділу 1…… 45

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ ……..…… 46

2.1 Об'єкт і предмети досліджень……...…….. 46

2.2 Методика визначення профілю відбивача променевого потоку……... 46

2.3 Експериментальний апарат для інфрачервоного жарення…… 50

2.4 Оцінка результатів вимірювання температури…….. 55

2.5 Методи комп'ютерного моделювання опромінення…… 57

2.6 Методи визначення якості жарених м'ясних продуктів із яловичини…….…… 57

2.7 Методи системного аналізу…….. 61

2.8 Комплекс імітаційного потокового моделювання…….. 62

Висновки до розділу 2…… 63

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОФІЛЮВАННЯ ВІДБИВАЧІВ ПРОМЕНЕВОГО ПОТОКУ…… 64

3.1 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні

приймача півкругового профілю…… 64
3.2 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймача півеліптичного профілю…… 73
3.3 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймача півеліптичного профілю за врахування втрат теплоти…… 82
3.4 Моделювання всебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного профілю…… 92
3.5 Моделювання усебічного рівномірного опромінення приймача еліптичного профілю…… 97
Висновки до розділу 3…… 102
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОМЕНЕВОГО ТЕПЛООБМІНУ……..... 103
4.1 Верифікація створеної аналітичної моделі……..…….. 103
4.2 Валідація створеної аналітичної моделі…..……..... 111
4.3 Розробка апарата з рефлектором для інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів……. 116
Висновки до розділу 4…… 122
РОЗДІЛ 5. СИСТЕМНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТА АПАРАТУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М’ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ……. 124
5.1 Імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення… 124
5.2 Системно-динамічне оцінювання економічної ефективності апарата АРЖМ-0.07-1……. 136
5.3 Впровадження результатів роботи…….. 145
Висновки до розділу 5…… 146
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ……. 147
6.1 Оцінювання переваг розробленого апарата порівняно з типовим обладнанням…… 148

6.2 Визначення ціни розробленого апарата…….. 151
6.3 Оцінювання економічного ефекту впровадження розробленого апарата…….. 153
Висновки до розділу 6…… 155
ВИСНОВКИ……. 156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 158
ДОДАТКИ…… 172
Додаток А. Оцінка результатів вимірювання температури…… 173
Додаток Б. Визначення густини опромінення півеліпса…… 177
Додаток В. Програма визначення форми відбивача для рівномірного опромінення півеліпса за врахування втрат теплоти……..... 178
Додаток Д. Методика та програмний продукт визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання напівеліптичного приймача ……..... 201
Додаток Ж. Інструкція з експлуатації та технічного обслуговування апарату з рефлектором для ІЧ-жарення м’ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1……..... 214
Додаток З. Кінетика інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів..... 233
Додаток К. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи……..... 237
Додаток Л. Патент на корисну модель № 121298 «Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів…….. 240
Додаток М. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації ……. 245

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Серед прогресивних способів теплової обробки харчових продуктів, що дозволяють вирішити низку технологічних проблем, важливе місце посідає термообробка інфрачервоним (надалі – ІЧ) випромінюванням, яке інтенсифікує більшість технологічних процесів, зокрема жарення. Якісна та економна ІЧ-обробка харчової сировини потребує обладнання, яке забезпечить рівномірну густину променевого потоку на поверхні продукту та використання теплоти з мінімальними втратами. Науковці значну увагу приділяють використанню відбивальних пристроїв, за допомогою яких досягається необхідне опромінювання об’єкта. Для одержання спрямованого потоку випромінювання застосовуються відбивачі різних форм: сферичні, параболічні, гіперболічні, еліптичні тощо. Проте складність використання таких відбивачів обумовлена оптичними аберраціями та скінченністю розмірів тіл випромінювання реальних джерел, кожен елемент поверхні яких є джерелом дифузійного потоку випромінювання.

У розробці прогресивного теплового обладнання, яке реалізує різні комбіновані способи обробки харчової продукції з базовим ІЧ-нагріванням, вагомий внесок належить професорам Л.М. Пахомову, О.І. Черевку, В.М. Михайлову та їх послідовникам. Значний внесок у вирішення проблеми геометричного моделювання відбивальних систем зроблено вченими О.Л. Підгорним, Л.М. Куценком, М.І.Снісаренком, О.Т. Дворецьким, Ю.В. Козаком, В.П. Плевако, Ю.М. Тормосовим та ін. Аналіз праць вітчизняних та зарубіжних дослідників у сфері застосування ІЧ-нагрівання та геометричного моделювання теплопередачі випромінюванням в інфрачервоних установках під час теплової обробки харчових продуктів, досліджень закономірностей моделювання ІЧ-випромінювання в поглинальних газових середовищах показав, що поки не вирішено завдання визначення профілю відбивача для рівномірного опромінення опуклого приймача.

Таким чином, аналітичне дослідження, яке уможливить опис рівняння відбивача променевого потоку для апарата інфрачервоного жарення із подальшим системно-динамічним моделюванням функціонування апарата, є актуальним. Також актуальним науково-прикладним завданням є розробка ефективного ІЧ-обладнання шляхом забезпечення густини променевого потоку відповідно до заданих параметрів. Упровадження та використання такого обладнання забезпечить інтенсивний розвиток підприємств харчових виробництв та ресторанного господарства шляхом підвищення якості продукції та економії ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідної роботи ХДУХТ, зокрема в рамках таких науково-дослідних тем: 1-11 БО (0111U001669) «Розробка прогресивних енерго- та ресурсозберігаючих процесів та обладнання для теплової обробки харчової сировини» на замовлення МОН України; 26-08-09 Б (0107U011053) «Розрахунки теплотехнічних установок із рефлекторами та приймачами тепла ускладнених форм»; 07-10-11 Б (0109U008634) «Розрахунки теплотехнічних установок із приймачами теплоти складної форми перерізу та кількома рефлекторами»; 23-16-17 Д (0117U002045) «Розробка технічного завдання на створення апарата для інфрачервоної обробки харчової сировини»; 05-18-19 Б (0117U005362) «Удосконалення обладнання для теплової та холодильної обробки харчових продуктів на основі системно-динамічного моделювання».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є моделювання процесу променевого теплообміну для забезпечення рівномірного опромінювання харчових продуктів під час інфрачервоного жарення.

Відповідно до поставленої мети сформульовано такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан технічного забезпечення підприємств малих виробництв та ресторанного господарства ефективним обладнанням для ІЧ-жарення харчової продукції;

– розробити нову аналітичну методику моделювання рівномірного опромінення опуклих теплоприймачів із визначенням профілів відбивачів у апаратах інфрачервоного жарення;

– провести експериментальне підтвердження нової методики шляхом моделювання розповсюдження теплових променів у робочих камерах теплотехнічних систем та кількісної оцінки ефективності використання спрофільованого відбивача;

– провести органолептичну оцінку якості продукту з яловичини, жареного в експериментальному апараті з відбивачем променевого потоку;

– розробити апарат із рефлектором для інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів, який забезпечить рівномірну густину променевого потоку на поверхні продукту;

– шляхом аналітичного моделювання процесу інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів отримати рівняння для розрахунку середньої температури внутрішніх шарів продукту та тривалості жарення з використанням відбивача променевого потоку і шляхом імітаційного моделювання довести адекватність отриманих рівнянь для проєктування інфрачервоного обладнання харчових виробництв;

– шляхом імітаційного моделювання провести комплексне оцінювання економічної ефективності розробленого апарата інфрачервоного жарення з відбивачем променевого потоку;

– вжити заходи з упровадження результатів наукової роботи.

Об’єктом дослідження є процес променевої теплопередачі з урахуванням одноразового відбиття променів у ІЧ-апаратах харчових виробництв.

Предмети дослідження: – обернена задача теплообміну випромінюванням, форма відбивача променевого потоку, м’ясні порційні напівфабрикати та їх органолептичні параметри, апарат для ІЧ-жарення з рефлектором.

Методи дослідження: теорія променевого теплообміну, математичний аналіз та статистика, стандартні методи дослідження харчової сировини, комп'ютерне моделювання, імітаційне моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

– уперше розв'язано обернену задачу теплообміну випромінюванням для визначення профілю відбивача з метою рівномірного опромінювання теплоприймача, який має опуклий переріз;

– уперше отримано рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту за умов інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів та потрібної тривалості процесу в розробленому апараті ІЧ-жарення зі спрофільованим відбивачем;

– уперше шляхом застосування системного аналізу за умови використання програмного комплексу Vensim створено імітаційні моделі кінетики температури м'ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення та комплексного оцінювання економічної ефективності розробленого апарата ІЧ-жарення з відбивачем променевого потоку.

Практичне значення одержаних результатів. Створено методику визначення профілів відбивачів для рівномірного опромінювання приймача опуклого перерізу шляхом розв'язання оберненої задачі опромінення. Проведено верифікацію створеної методики визначення профілів рефлекторів шляхом комп'ютерного експерименту з використанням програмних комплексів TracePro та Mathcad, що доводить її коректність. Проведено валідацію створеної методики визначення профілів рефлекторів шляхом фізичного експерименту з використанням експериментального апарата ІЧ-жарення, що доводить її прийнятність для проєктування ІЧ-обладнання харчових виробництв та ресторанного господарства. З використанням програмного комплексу Mathcad створено програмний продукт для визначення форм відбивачів, які забезпечать заданий розподіл променевого потоку на поверхні опуклого теплоприймача. Розроблено промисловий зразок апарата з рефлектором для жарення м'ясних напівфабрикатів, який забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину

променевого потоку. Розроблено проєкт технічної документації на нове обладнання – апарат із рефлектором для інфрачервоного жарення м'ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1.

Реалізація роботи. Методику та програмний продукт визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання напівеліптичного приймача та Інструкцію з експлуатації та технічного обслуговування апарату з рефлектором для ІЧ-жарення м'ясних порційних напівфабрикатів упроваджено на ТОВ «А-1» (акт від 28.01.2017 р.), ПП «Містраль» (акт від 28.01.2017 р.), ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар» (акт від 28.01.2017 р.) (м. Харків).

Особистий внесок здобувача полягає в опрацюванні наукової літератури, аналізі існуючих апаратів ІЧ-жарення та досліджень рівномірності ІЧ-опромінення, формулюванні мети і завдань дослідження, плануванні експерименту, проведенні аналітичних та експериментальних досліджень, обробці та узагальненні отриманих результатів, верифікації та валідації аналітичної методики профілювання відбивачів променевого потоку, створенні імітаційних моделей процесу й апарата ІЧ-жарення, підготовці матеріалів до публікації, розробленні нормативної документації, упровадженні результатів у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися, обговорювалися та були схвалені на міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (Харків – Мелітополь – Кирилівка, ХДУХТ, ТДАТУ, 2015, 2019 рр.); «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, ХДУХТ, 2016, 2017 рр.); III International Conference «Industrial Technologies and Engineering» ICITE – 2016 will be held at the M. Auezov South Kazakhstan State University (Shymkent, Kazakhstan, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Хімічна технологія та інженерія» (Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 2017 р.); XIV Міжнародному форумі молоді «Молодь і

сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2018 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку ресторанного, готельного та туристичного бізнесу в умовах світової інтеграції: досягнення та перспективи» (Харків – Варна, ХДУХТ, 2019 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 30 наукових праць, у тому числі: 2 монографії; 19 статей, серед яких 15 – у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (із них 4 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних), 2 – у періодичних наукових виданнях інших держав із наукового напряму, за яким підготовлено дисертацію (із них 1 – у виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку і Європейського Союзу); 1 патент України на корисну модель; 8 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та 9 додатків. Основний зміст роботи викладено на 131 сторінці друкованого тексту, містить 76 рисунків, 11 таблиць. Список використаних джерел містить 116 найменувань, у тому числі 13 іноземних.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТА УСТАТКУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ

1.1 Проблеми використання інфрачервоного жарення харчової продукції

Одним із прогресивних способів теплової обробки харчових продуктів є термічна обробка інфрачервоним (надалі ІЧ) випромінюванням, що полягає в інтенсивному поглинанні головної частини променевої енергії вільною водою, яку містить структура харчових продуктів. Застосування ІЧ-випромінювання інтенсифікує технологічні процеси харчових виробництв унаслідок значного збільшення густини теплового потоку на поверхні продукту і проникнення теплової енергії всередину матеріалу. ІЧ-промені долають шлях від генератора випромінювання до об'єкта опромінювання майже миттєво і забезпечують ефективне нагрівання матеріалу за рахунок інтенсифікації руху атомів і молекул у його поверхневих і глибинних шарах [1–3].

Для збалансованого харчування, людина потребує комплексу харчових речовин: білки, вуглеводи, жири, жирні кислоти, амінокислоти, мінеральні солі, мікроелементи, вітаміни. Харчова цінність продукту визначається не лише його хімічним складом, а й ступенем засвоювання. М’ясо постачає до організму людини тваринний білок, близький за складом до білка людини, а також жир та мінеральні речовини, які необхідні для повноцінного харчування. Окрім цього, м’ясо містить екстрактивні речовини, які стимулюють утворення харчопереробних соків, покращуючи секретно-моторну діяльність травного тракту людини [4–6].

ІЧ-випромінювання використовують для обжарювання, підсушування та копчення м’яса та м’ясних виробів. Головною перевагою ІЧ-жарення є

скорочення терміну теплової обробки, що приводить до зменшення енерговитрат та впливає на підвищення якості продукту.

Подальша інтенсифікація ІЧ-жарення як самостійного способу має певні обмеження. Вони ґрунтуються на тому, що за нерівномрності ІЧ-опромінювання може відбуватися місцеве перегрівання поверхні та поява «опіків», які значно погіршують якість готових виробів [7–10].

Обробка харчових продуктів ІЧ-променями має такі переваги [10–12]:

– можливість скорочення тривалості процесу завдяки збільшенню потужності теплового потоку;

– розширення зони нагрівання та випаровування завдяки поглинанню променевої енергії граничним шаром матеріалу;

– мала інерційність обладнання з ІЧ-випромінювачами;

– можливість регулювання інтенсивності теплового потоку;

– можливість автоматизації процесу;

– низькі капітальні витрати на створення відповідного обладнання.

Порівняно з нагріванням у традиційних апаратах харчових виробництв, ІЧ-обладнання дозволяє:

– створити локальну теплову зону на об'єкті нагрівання або в робочому просторі технологічного процесу, зводячи до мінімуму теплові втрати на нагрівання навколишнього середовища та поверхні поза обраною зоною;

– сформувати теплове поле складної структури на об'єкті нагрівання;

– керувати процесом нагрівання як у часі, так і в просторі, що забезпечується підбиранням потрібних генераторів випромінювання та характеристик рефлекторів.

Головною умовою одержання високоякісної продукції під час ІЧ-жарення є рівномірний розподіл теплової енергії на поверхні виробу, який залежить від умов опромінювання в робочих камерах печей, сушарок тощо. Через нерівномірність розподілу теплоти під час жарення виникають «опіки»

виробу, що є одним із головних недоліків цього способу, призводячи до обмеженого промислового впровадження ІЧ-устаткування [13; 14].

Прагнення створити високоефективний генератор ІЧ-випромінювання призвело до використання кварцового скла для виготовлення оболонки випромінювача. Кварцове скло має високу термостійкість (температура розм'якшення понад 1100…2000°С) і гарною проникністю в інфрачервоній області (у широкому діапазоні хвиль – від ультрафіолетових до інфрачервоних променів). Висока термостійкість і прозорість кварцового скла дозволяє отримати генератори випромінювання порівняно невеликих розмірів (діаметр трубки 10 мм). У кварцових випромінювачах досягається висока концентрація енергії [15].

Основні переваги випромінювачів із кварцовими трубками:

– відповідність спектральних характеристик до багатьох продуктів ($\lambda_{MAX} \approx 1{,}04$ мкм);

– стійкість до впливу агресивних рідин та середовищ;

– значна номенклатура довжин (25…1000 мм) та потужностей (45…5000 Вт);

– значний термін служби (до 5000 годин) при стабільності променистого потоку протягом усього цього терміну;

– дуже мала термічна інерція;

– висока термостійкість кварцової трубки (дуже швидке нагрівання до температури 800°С и вище);

– простота конструкції цоколів, особливо останніх моделей;

– задовільна механічна міцність і стійкість стосовно впливу води, агресивних середовищ тощо;

– висока концентрація променистої енергії.

Недоліки кварцових випромінювачів:

– тривале їх використання тільки в поземному розташуванні;

– порівняно висока вартість, зумовлена кварцовими трубками.

З огляду на викладені вище переваги кварцових ламп і, зокрема та обставина, що один кварцовий випромінювач по потужності може замінити кілька випромінювачів інших типів, вони знаходять широке застосування в промисловості [7–13].

Значна увага приділяється використанню відбивальних пристроїв, за допомогою яких досягається необхідне опромінювання об'єкта. Для одержання спрямованого потоку випромінювання застосовуються відбивачі різних форм: сферичні, параболічні, гіперболічні, еліптичні тощо. Проте складність використання таких відбивачів викликана оптичними аберраціями та скінченністю розмірів тіл випромінювання реальних джерел, кожен елемент поверхні яких є джерелом дифузійного потоку випромінювання [16; 17].

Найбільш поширеним типом рефлектора в електротермічному устаткуванні спрямованого випромінювання є дзеркальний відбивач. Дзеркальні відбивачі відрізняються різноманітністю конструкцій, але найбільш важливим їх параметром є форма поверхні, яка відбиває, що визначає ефективність усього обладнання. Аналіз поширених форм відбивачів можна знайти в довідковій літературі [18; 19].

Матеріал рефлектора має забезпечувати високий коефіцієнт відбивання, жорсткість конструкції та незмінність форми. Підвищити стійкість полірованих металів до впливу середовища можна шляхом хімічної або електролітичної поліровки їх поверхні.

У реальному устаткуванні відносної рівномірності потоку досягають шляхом раціонального розташування ІЧ-генераторів відносно матеріалу, що опромінюється, вибором відстані між випромінювачами й поверхнею об'єктів опромінювання. Застосування рефлекторів різної форми та наявність бічних поверхонь, що відбивають, дозволяють створити в робочих камерах різні умови опромінювання.

1.2 Аналіз інфрачервоного жарильного обладнання

Найпоширенішими ІЧ-установками для жарення харчових продуктів є грилі, шафи, печі та інші пристрої (рис. 1.1) [7–10]. Головними елементами апаратів інфрачервоного нагріву є камера, випромінювачі (світлі або темні, до спектру яких входить відповідно зона видимих або невидимих променів), і прилади регулювання температурного режиму в камері.

а *б*

в *г*

Рисунок 1.1 – ІЧ-обладнання:
***а* – гриль електричний; *б* – шафа жарильна електрична;**
***в* – піч жарильна електрична; *г* – апарат для шаурми електричний**

Розглянемо ІЧ-обладнання, яке використовується для ІЧ-жарення харчових продуктів, із точки зору рівномірного підведення променевої енергії до поверхні об’єкта від «світлого» випромінювача з відбивачем.

Гриль електричний ГЕ-4 (рис. 1.2) складається з камери і відсіку, де змонтовано електродвигун із редуктором і прилади керування. У верхній частині камери закріплено відбивач, під яким установлено два ІЧ-випромінювачі. У бічній стінці камери розміщено втулку з квадратним отвором, у який встромляється рожен, що обертається електродвигуном через редуктор [7].

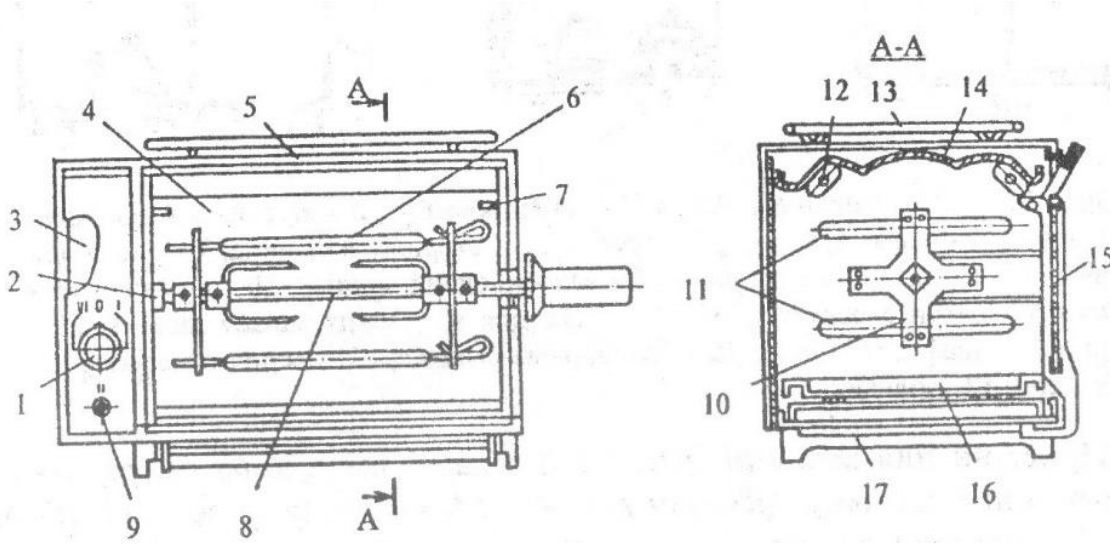


Рисунок 1.2 – Гриль електричний ГЕ-4:
1 – ручка перемикача; 2 – муфта електродвигуна;
3 – відділення електроприладів; 4 – жарильна камера; 5 – кожух; 6 – шпажки;
7 – штирі; 8 – рожен; 9 – вимикачі; 10 – хрестовина; 11 – напрямні;
12 – ІЧ-випромінювач; 13 – гратки; 14 – відбивач; 15 – дверцята;
16 – деко; 17 – ніжка

Пристрій для теплової обробки харчових продуктів (рис. 1.3) має робочу камеру, де встановлено носій для продукту, що містить горизонтальні стрижні з радіальними спицями, і привідний механізм. Обертання носія здійснюється електродвигуном через двоступінчастий редуктор і регулятор швидкості. Як ІЧ-нагрівачі використано лампи КГ-220-1000-Б, що закріплені

затискачами й поєднані з електромережею через магнітний пускач. Внутрішня поверхня робочої камери покрита алюмінієвою фольгою, що виконує функції відбивача променевої енергії [20].

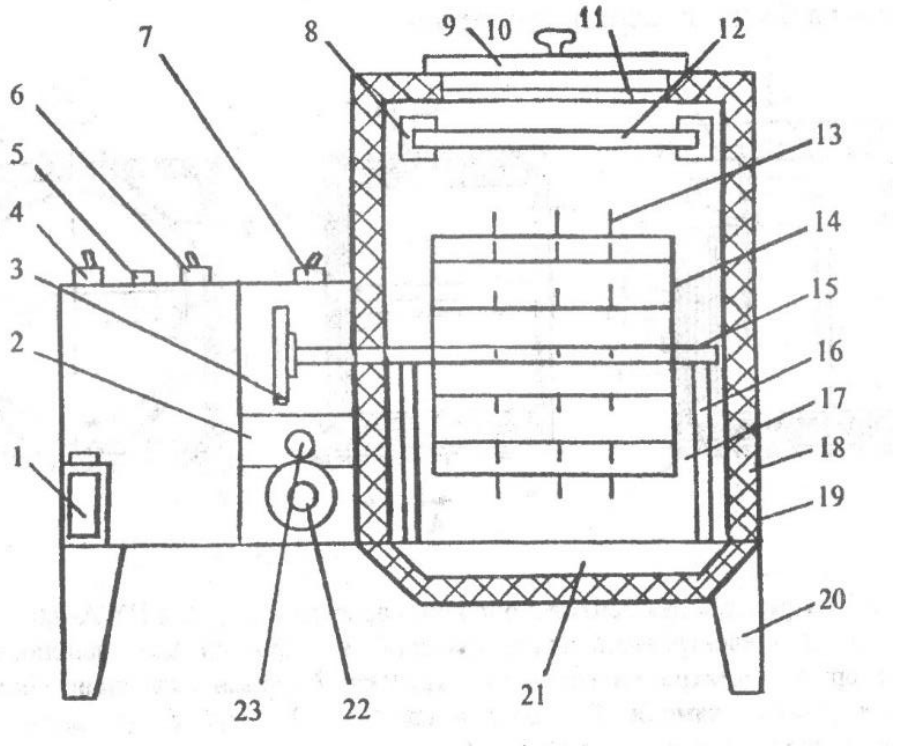


Рисунок 1.3 – Пристрій для теплової обробки харчових продуктів:
1 – магнітний пускач; 2 – двоступінчастий редуктор; 3 – привідна зірочка;
4 – тумблер; 5 – пускова кнопка; 6, 7 – перемикачі потужності; 8 – затискувачі;
9 – кришка; 10 – ручка; 11 – петля; 12 – ІЧ-випромінювачі; 13 – штирі;
14 – носій продукту; 15 – втулки; 16 – тримачі; 17 – жарильна камера;
18 – теплоізоляція; 19 – обечайка; 20 – ніжки; 21 – висувне деко;
22 – електродвигун; 23 – регулятор швидкості обертання

Пристрій для теплової обробки харчових продуктів (рис. 1.4) містить ІЧ-нагрівачі, обладнані поворотними індивідуальними відбивачами. Поворот відбивачів може здійснюватися автоматично зворотно-коливально, безперервно або вручну через важільну систему. Шампур із продуктом, розміщеним на шпажках, установлюють у камеру і приводять в обертання вручну або від індивідуального електроприводу. ІЧ-нагрівачі, установлені у

фокусі поворотних індивідуальних відбивачів, випромінюють основну частину тепла. Для більш повного використання променевого потоку продукт повертається навколо осі нагрівачів на певний кут [21].

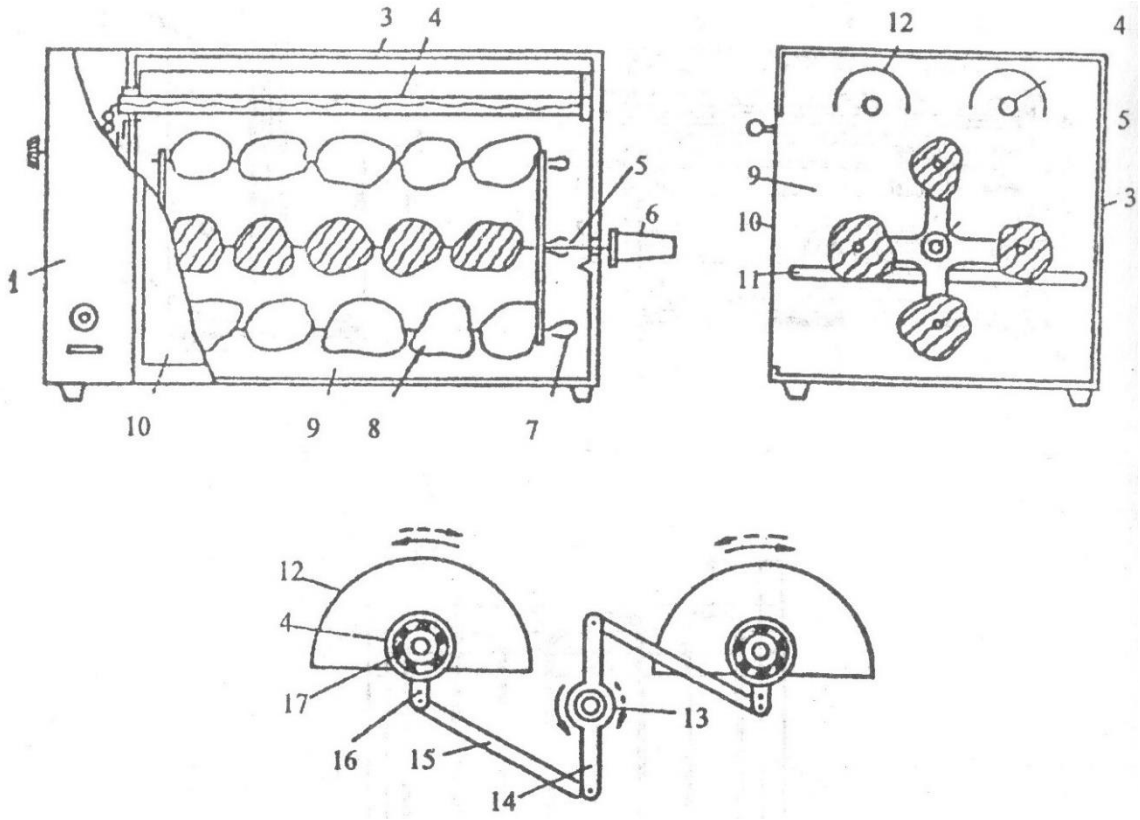


Рисунок 1.4 – Пристрій для теплової обробки харчових продуктів:
1 – передня панель; 2 – рукоятка; 3 – корпус; 4 – ІЧ-нагрівачі; 5 – шампур;
6 – ручка; 7 – шпажки; 8 – продукт; 9 – жарильна камера; 10 – дверцята;
11 – напрямні; 12 – відбивачі; 13 – вісь; 14 – важіль; 15 – тяга;
16 – поводок; 17 – втулка

Пристрій для теплової обробки харчових продуктів (рис. 1.5) містить випромінювальні блоки, кожен з яких складається з випромінювача й відбивача. Випромінювач має вигляд кварцової трубки, в яку встановлено ніхромову спіраль. Випромінювальний блок містить установні елементи з пазами і пластини зі спицями, які фіксуються в пазах. Для зручності встановлення випромінювальних блоків передбачено напрямні. Залежно від виду виробів випромінювальні блоки встановлюються з обох боків носія на

певній відстані один від одного, а пластини фіксуються в пазах за допомогою спиці на визначений кут. Вироби викладають на носій і піддають поетапній тепловій обробці. Для забезпечення рівномірного розподілу променевого потоку і досягнення його потрібної густини в кожній зоні встановлюють щільно по два випромінювальні блоки [22].

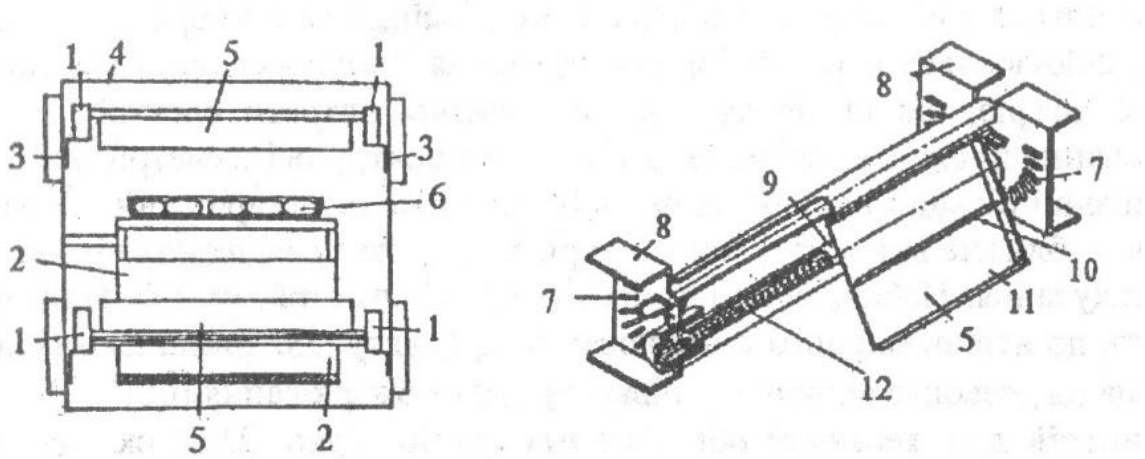


Рисунок 1.5 – Пристрій для теплової обробки харчових продуктів:
1 – випромінювальні блоки; 2 – носій продукту; 3 – напрямні;
4 – жарильна камера; 5 – відбивач; 6 – продукт; 7 – пази;
8 – установочні елементи; 9 – ІЧ-випромінювач; 10 – спиці;
11 – пластина; 12 – ніхромова спіраль

Типові закордонні пристрої, наприклад, для жарення м’яса [23], ІЧ-апарат для приготування харчової продукції [24], гриль Weber [25], плита Bertos [26] також не забезпечують рівномірного опромінення продукту.

У таблиці 1.1 наведено абсолютні значення питомих показників якості типового обладнання для інфрачервоного жарення (грилі для шашлику та курей) [27; 28].

Таблиця 1.1

Питомі показники якості типового обладнання

Модель	Продук-тивність, кг/год	Потужність, кВт	Вага, кг	Питома енергоємність, кВт год/кг	Питома металоємність, кг год/кг	Питома витратність, кВт кг год^2/кг^2
Кий-В ШБ-6 (рис. 1.6 *а*)	3	3	21	1	7	21
Sikom МК-3.8.1 (рис. 1.6 *б*)	8	3.35	39	0.42	4.88	16.33
Командор-2М (рис. 1.6 *в*)	12	4.5	56	0.38	4.67	21
Командор-4М (рис. 1.6 *г*)	8	3.6	46	0.45	5.75	20.7

а

б

в

г

Рисунок 1.6 – Грилі для шашлику та курей:

***а* – Кий-В ШБ-6; *б* – Sikom МК-3.8.1;**

***в* – Командор-2М; *г* – Командор-4М**

Головним недоліком усіх існуючих конструкцій є нерівномірність променевого потоку на поверхні опроміненого продукту або надмірно складна конструкція за використання декількох випромінювачів із відбивачами та механічного приводу. Ця проблема вирішується використанням відбивача променевого потоку, профіль якого визначається за допомогою розв'язку оберненої задачі та створює рівномірний сумарний променевий потік від одного випромінювача на опуклій поверхні продукту без додаткових механічних пристроїв.

Отже, станом на тепер відсутнє інфрачервоне жарильне обладнання, яке за використання одного випромінювача та спрофільованого відбивача променевого потоку забезпечує рівномірне опромінення опуклого приймача, яким є м'ясний напівфабрикат.

Очевидно, що існуючі апарати інфрачервоного жарення мають надмірну питому витратність, яка визначається добутком енергоємності та металоємності. Актуальною задачею стає комплексна оцінка нового обладнання шляхом системно-динамічного моделювання на основі аналітичних та фізичних досліджень.

1.3 Аналіз існуючих досліджень рівномірності опромінення харчової продукції

Науковцями значна увага приділяється використанню відбивальних пристроїв, за допомогою яких досягається необхідне опромінювання об'єкта [29, 30, 115, 116]. Для одержання спрямованого потоку випромінювання застосовуються відбивачі різних форм: сферичні, параболічні, гіперболічні, еліптичні тощо [31]. Проте складність використання таких відбивачів викликана оптичними аберраціями та скінченністю розмірів тіл випромінювання реальних джерел, кожен елемент поверхні яких є джерелом дифузійного потоку випромінювання. В роботі [32] проведений глибокий аналіз досліджень вітчизняних та закордонних дослідників в сфері

застосування ІЧ-нагріву та геометричного моделювання теплопередачі випромінюванням в інфрачервоних установках під час теплової обробки харчових продуктів, досліджено закономірності моделювання ІЧ-випромінювання в поглинаючих газових середовищах. Проте авторами не вирішено проблему визначення профілю відбивача для рівномірного опромінення опуклого приймача. В роботі [33] дослідниками описаний комбінований спосіб обробки харчових продуктів ІЧ-випромінюванням та мікрохвильовим впливом, але також не розглянуто проблему розсіювання теплової енергії під час впливу. В роботі [34] авторами описане комп'ютерне моделювання температурного поля при використанні індукційного та променевого нагрівання, проте не отримано результуючих залежностей з визначення температурі внутрішніх шарів матеріалу, що обробляється. Авторами роботи [35] запропоноване інноваційне рішення з розробки апарата для низькотемпературної обробки м'ясних виробів ІЧ-випромінюванням. Особливістю апарата є можливість використання вторинної теплоти, яка надходить від робочого простору апарата, шляхом поглинання її поглинальним екраном. Але проблему нерівномірності опромінення продуктів різної форми також не вирішено.

У Харківському державному університеті харчування та торгівлі професорами Л. М. Пахомовим, О. І. Черевко та В. М. Михайловим та їх учнями Б. В. Ляшенком, І. В. Бабкіною та І. В. Лебединцем було розроблено низку прогресивного теплового обладнання, яке реалізує різні комбіновані способи обробки харчової продукції з базовим ІЧ-нагріванням [36–43]. Зрозуміло, що в цих дослідженнях проблема рівномірного опромінювання продукту не розглядалася як другорядна.

Вагомий внесок у розв'язання проблеми геометричного моделювання відбивальних систем було зроблено професором О. Л. Підгорним [44–47] та його учнями М. І. Снісаренком [47; 48], О. Т. Дворецьким [49; 50], Ю. В. Козаком [51; 52] та іншими.

Професором Л. М. Куценком створено науковий напрямок, який полягає у розв’язані комплексу задач променевої природи на основі спеціальних геометричних моделей та інтерпретацій [53]. У роботах його учнів О. Д. Мазуренко [54] та Н. І. Середи [55] та інших досліджено геометричні параметри деяких відбивальних систем та створено комплекси програм для моделювання поширення променів.

У працях професора Ю. М. Тормосова, присвячених геометричному моделюванню та оптимізації конструкцій ІЧ-апаратів харчових виробництв, значну увагу приділено проектуванню відбивальних систем на базі пошуку керуючої функції [56; 57], але опуклий теплоприймач не розглядався.

Розв’язок оберненої задачі опромінення з обґрунтуванням плаского підходу отримано під керівництвом професора В. П. Плевако його учнем С. Ю. Саєнком [58–63]. У цих роботах визначено профіль відбивача, який забезпечує потрібний розподіл променевого потоку на приймачеві з профілем у вигляді довільної ламаної лінії (або пласкому як окремий випадок). Зауважимо, що можливість забруднення відбивача під час обробки харчової продукції не бралася до уваги. Окрім цього, запропонована методика не дозволяє працювати з опуклим профілем приймача через наявність так званого «затінку».

Таким чином, аналітичне дослідження, яке уможливить опис рівняння відбивача променевого потоку для апарату інфрачервоного жарення із подальшим системно-динамічним моделюванням функціонування апарату – це актуальне науково-прикладне завдання.

1.4 Шляхи вдосконалення інфрачервоного жарильного обладнання та задачі дослідження

Нерівномірність потоку на поверхні опуклого матеріалу, що обробляється, обмежує широке впровадження ІЧ-апаратів, призводячи до

втрати зовнішніх та смакових якостей, а також до зниження харчової цінності продукту.

Методи розрахунку теплообміну та проектування конструкції, які використовуються, не задовольняють вимогам до теплового обладнання, які висуває сьогодення. Існуючі програмні продукти (TracePro, Ansys тощо) дозволяють розв’язувати виключно пряму задачу променевого теплообміну, визначаючи характер розподілу потоку на поверхні приймача залежно від заданого профілю відбивача.

Існуюче теплове устаткування харчових виробництв не забезпечує рівномірного розподілу теплоти на робочих поверхнях продукту, що неминуче призводить до погіршення якості готової продукції та додаткових витрат енергії. Відбивачі променевого потоку або не використовуються, або їх профілі визначаються за емпіричними формулами без урахування мінімізації витрат електричної енергії.

Вирішення завдання рівномірності теплового потоку променевої енергії на поверхні продукту довільної опуклої форми має ґрунтуватися на розв’язанні оберненої задачі з визначення форми рефлектора на основі двовимірного підходу, який забезпечує рівномірну густину теплового потоку на продукті з урахуванням довільного закону зміни коефіцієнта поглинання вздовж поверхні відбивача. Це дозволить взяти до уваги реальні умови роботи ІЧ-обладнання для жарення, що застосовуються на підприємствах харчових виробництв та ресторанного господарства, з метою створення його прогресивних зразків.

Задачі подальшого дослідження наведено на рисунку 1.7.

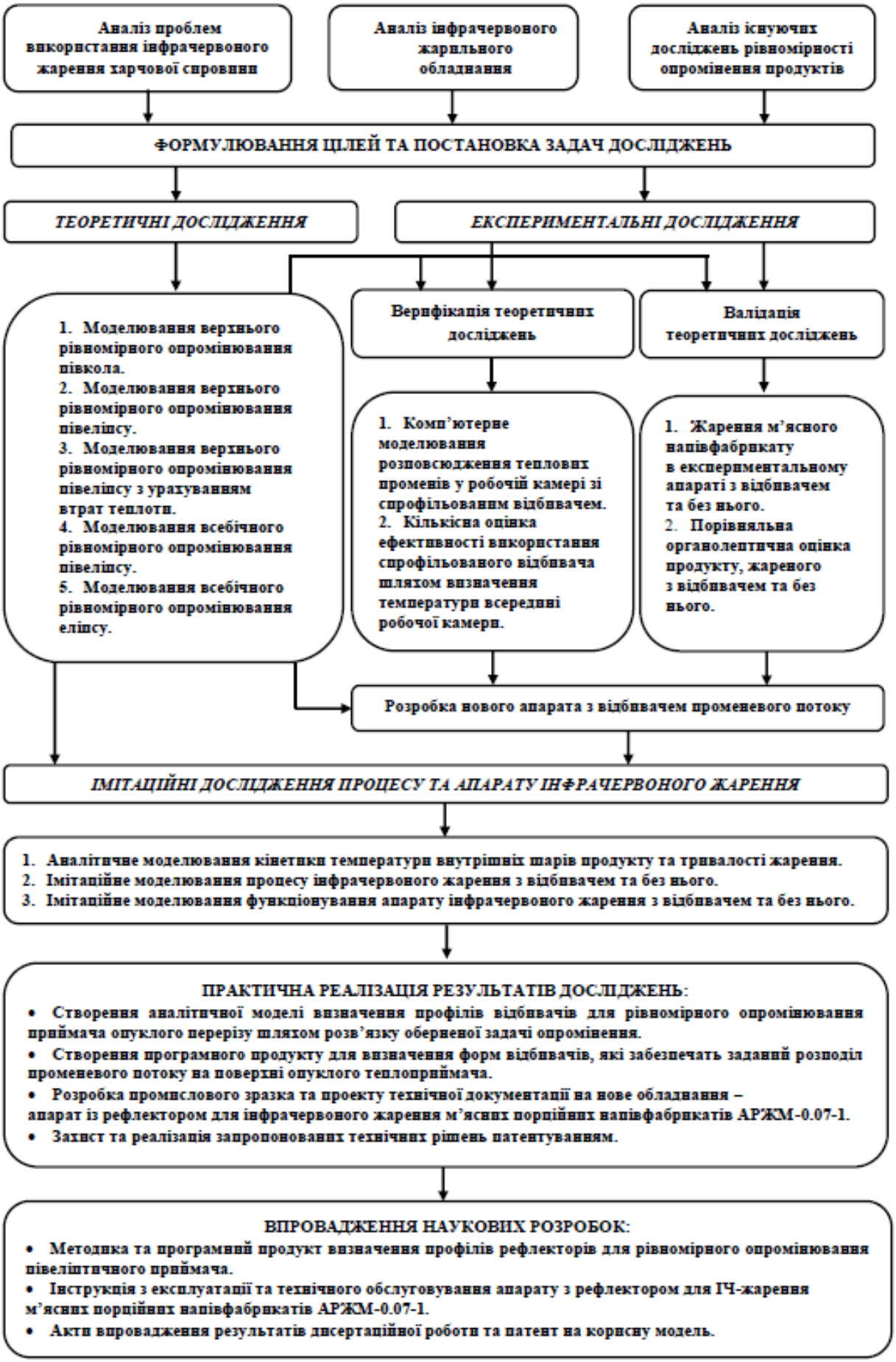


Рисунок 1.7 – План досліджень

Висновки до розділу 1

1. Шляхом аналізу проблеми використання ІЧ-жарення харчової продукції визначено, що ця обробка має низку переваг порівняно з іншими способами теплової обробки, але суттєвою проблемою якості обробленого продукту є нерівномірна густина променевого потоку на його поверхні і, як наслідок, погіршення якості готової продукції.

2. Аналіз конструкцій апаратів, які використовуються для ІЧ-жарення харчових продуктів, довів, що обладнання, яке за використання одного випромінювача та спрофільованого відбивача променевого потоку забезпечує рівномірне опромінення м’ясного напівфабрикату, є відсутнім. Крім того, існуючі апарати ІЧ-жарення мають надмірну питому витратність.

3. Існуючі дослідження, присвячені рівномірності опромінення опуклого харчового продукту, дозволяють змоделювати променевий теплообмін в елементах обладнання лише за описаного аналітичним чином профілю відбивача. Таким чином, аналітичне дослідження, яке уможливить опис рівняння відбивача променевого потоку для апарату інфрачервоного жарення, та системно-динамічне моделювання процесу та апарату ІЧ-жарення – це актуальне науково-прикладне завдання.

РОЗДІЛ 2

ОБ’ЄКТИ, ПРЕДМЕТИ, МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ

2.1 Об’єкт і предмети досліджень

Об’єктом дослідження є процес променевої теплопередачі з урахуванням одноразового відбиття променів в ІЧ-апаратах харчових виробництв.

Предмет дослідження – обернена задача теплообміну випромінюванням, форма відбивача променевого потоку, м’ясні порційні напівфабрикати та їх органолептичні параметри, апарат для ІЧ-жарення з рефлектором.

2.2 Методика визначення профілю відбивача променевого потоку

Підґрунтям подальших досліджень є наступне:

– розглядаються лише ті теплотехнічні установки, в яких припустимо досліджувати розподіл теплових променів відповідно до пласкої задачі [61];

– робота рефлектора теплотехнічної установки ґрунтується на фізичному законі: кут падіння теплового променю дорівнює куту відбивання;

– відбивальні поверхні ідеальні, тобто віддзеркалюють 100 % енергії променів, що на них потрапляють (надалі це буде обґрунтовано), а середовища, в яких вони поширюються, енергію зовсім не поглинають;

– розглянуто лише променеву складову енергії, що випромінюється джерелом, тобто конвекційною складовою нехтуємо;

– лінійні джерела випромінювання не мають товщини.

Теплотехнічна система (рис. 2.1) складається з трубчастого випромінювача 1, циліндричного відбивача 2 і приймача тепла з опуклою формою перерізу 3. Із системою пов’язана декартова система координат так, щоб вісь *Oz* пройшла вздовж випромінювача, а осі *Ox*, *Oy* розташувалися таким чином, як це показано на рисунку.

Використовуються наступні позначення: h – відстань від осі випромінювача до центра приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач AB безпосередньо від випромінювача.

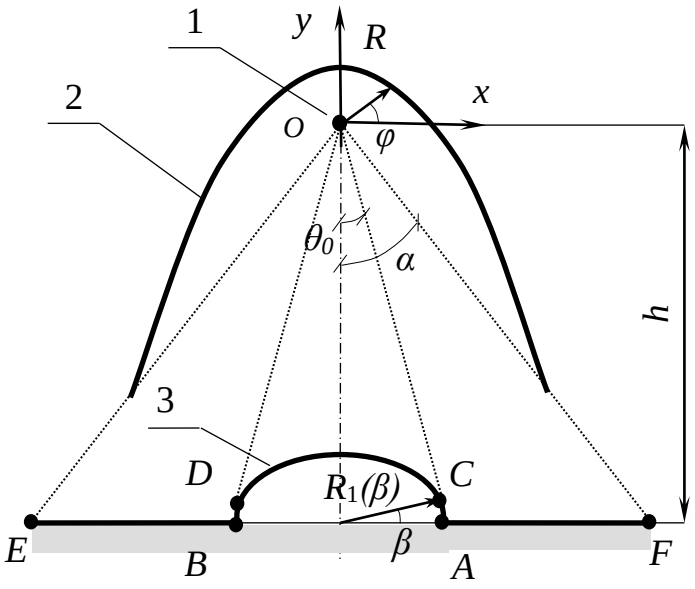


Рисунок 2.1 – Схема теплотехнічної системи

Для позначення полярних координат поверхні перерізу відбивача променевого потоку застосовуються символи $R(\varphi)$ та φ, а координат поверхні приймача – $R_1(\beta)$ та β.

У якості теплоприймача обрано півеліпс з довжинами великої та малої півосей відповідно a та b, чия форма найбільш наближена до перерізу м’ясного порційного напівфабрикату (біфштексу та лангету). Складено рівняння півеліпса у відносних полярних координатах із використанням відношень абсолютних координат та розмірів теплотехнічної системи до великої півосі півеліпса.

Промінь має лише один раз відбитися від поверхні рефлектора. Під час переміщення точки віддзеркалення M вздовж поверхні рефлектора від N до P в бік збільшення полярного кута φ, точка K робочого тіла, куди потрапляє відбитий промінь, монотонно рухатиметься його поверхнею від A до B у бік збільшення координати β (рис. 2.2).

Прямий потік від випромінювача потрапляє лише на ділянку CD, що обмежена дотичними до еліпса (рис. 2.1), а ділянки AC і BD залишаються ним не прогрітими – на них потрапляють лише відбиті від рефлектора промені. Вводимо у розрахунки функцію безпосереднього опромінювання, яка пропорційна густині опромінювання.

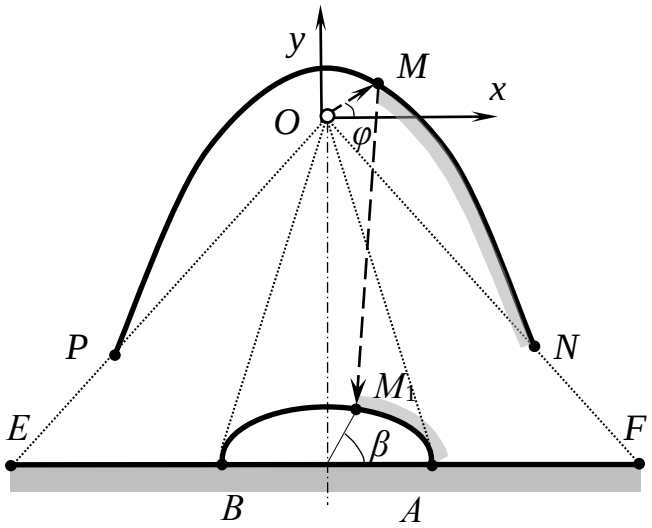


Рисунок 2.2 – Схема руху променя

Значення відносної густини безпосереднього опромінення є максимальним на прямовисній осі теплотехнічної системи, зменшуючись від неї до точок C і D, і є нульовим у так званому «затінку» на ділянках AC і BD.

Значення відносної густини відбитого опромінення є максимальним у так званому «затінку» теплоприймача, куди не потрапляє прямий потік опромінення.

Сумарна енергія, яку отримає півеліпс, складається з енергії безпосереднього опромінення та енергії, відбитої від рефлектора. Беручи до уваги довжину півеліпса, це визначає рівняння відносної густини безпосереднього та відбитого опромінення.

Складаємо баланс енергії, прирівнюючи кількість теплоти за секунду від випромінювача заданої потужності з шуканими параметрами відбивача $R(\varphi)$ та φ до відносної густини відбитого опромінювання, інтегрованої за довжиною півеліпса з шуканими параметрами $R_1(\beta)$ та β. З рівняння балансу енергії отримуємо рівняння для визначення кутової координати перерізу відбивача φ.

Вводимо до розрахунку відносні радіальні координати відбивача та приймача, відповідно як відношення $R(\varphi)$ та $R_1(\beta)$ до a, та отримуємо диференціальне рівняння для визначення профілю відбивача, яке описує зв’язок відносної радіальної координати відбивача та відносної кутової координати приймача.

Програмне середовище Mathcad містить декілька інтегрованих компонентів: потужний текстовий редактор для запису тексту та формул, обчислювальний процесор для виконання розрахунків відповідно до записаних формул, а також символьний процесор. Mathcad є математичним редактором, який уможливлює реалізацію складних чисельних методів для розв’язку диференціальних рівнянь [63].

Диференціальне рівняння має своєю невідомою функцію однієї або декількох змінних. Воно містить співвідношення між шуканими функціями та їх похідними. Розв’язок такого рівняння – це визначення шуканої функції

на визначеному проміжку її змінних. Усі чисельні методи розв'язку базуються на апроксимації диференціальних рівнянь різницевими аналогами. Залежно від конкретної форми апроксимації отримуємо різну точність та швидкодію.

Отримане у дослідженнях диференціальне рівняння розв'язується за допомогою системи комп'ютерної алгебри Mathcad універсальним гібридним методом Адамса-BDF, яка також обчислює та будує сім'ю профілів рефлекторів, один з яких підлягає конструкційній реалізації відповідно до обраного процесу ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів.

2.3 Експериментальний апарат для інфрачервоного жарення

Метою експериментального дослідження була оцінка ефективності використання спрофільованого відбивача шляхом фізичного моделювання та порівняння результатів із комп'ютерною верифікацією створеної методики.

Експериментальний апарат реалізує теплотехнічну систему, схему якої наведено на рисунку 2.3.

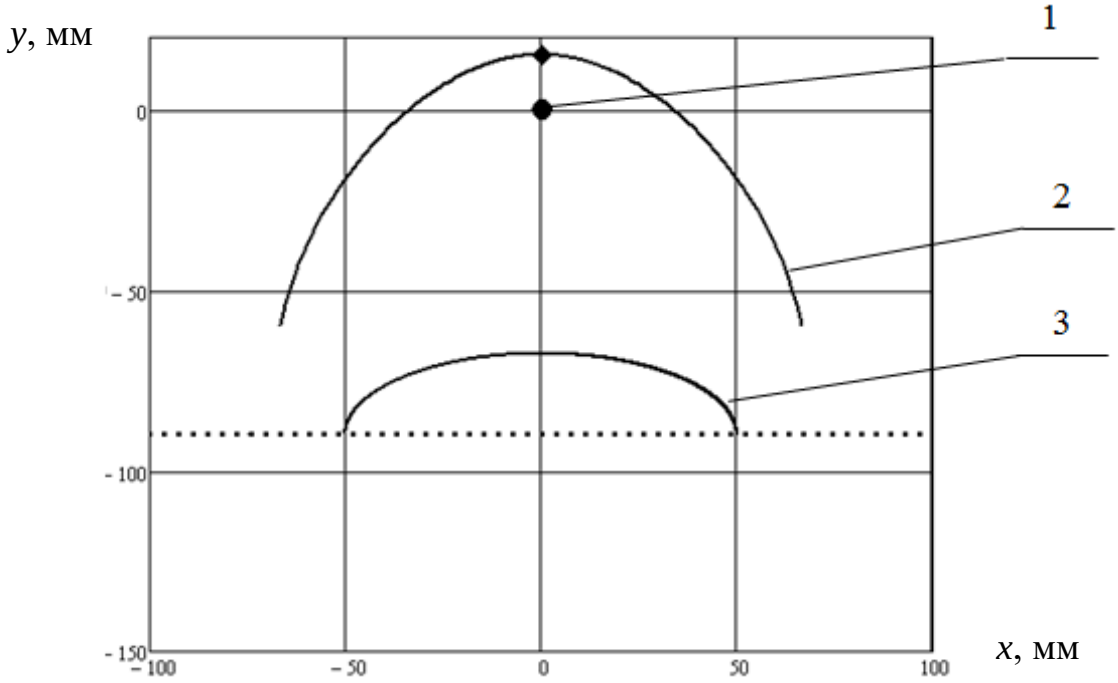


Рисунок 2.3 – Теплотехнічна система: 1 – випромінювач; 2 – відбивач; 3 – приймач

Вона складається з лінійного випромінювача 1, циліндричних відбивача 2 й приймача тепла 3.

В експериментальному апараті використовується один кварцовий випромінювач, у якого напруга живлення 220 В, потужність 720 Вт, довжина випромінювача становить 250 мм. Довжина теплових хвиль складає 1.2 мкм, відповідно кути падіння теплових променів на рефлектор дорівнюють кутам віддзеркалення.

Розташування випромінювачів та відбивачів під м'ясними продуктами є недоцільним, оскільки вони значно забруднюються жиром.

Рефлектор виготовлено з листа полірованого алюмінію, що забезпечує коефіцієнт відбивання близько 90%. Зауважимо, що розмір листа 275х214 мм та профіль рефлектора визначаються перерізом м'ясного півфабрикату та розрахунком у Mathcad відповідно до створеної методики.

В якості приймача обирався напівеліпс завширшки 100 мм і заввишки 20…25 мм (для комп'ютерного моделювання беремо 22.5 мм) та довжиною 200 мм, що відповідало типовим розміру та масі біфштексів і лангету [64; 65]. Відстань між центрами випромінювача та приймача складає 90 мм. Від центру продукту до краю ґратки, де його розташовано, маємо відстань 100 мм (рис. 2.3).

Конструкція експериментального апарата дозволяє монтувати та демонтувати спрофільований відбивач, що робить можливим порівняння продуктів, отриманих за традиційного (без відбивача) та новітнього (з відбивачем) жарення. Робочу камеру та відбивач експериментального апарата показано на рисунках 2.3 та 2.4.

Температура у робочій камері визначалася за допомогою дев'яти датчиків із термопарами хромель-алюмель ТХА (вимірювання до 1100°С), які встановлено на пласку рамку відповідно до рисунку 2.5 (відстань наведено у мм). Рамку з датчиками температури розташовано на відстані 67.5 мм від випромінювача, що відповідає верхній точці півеліптичного перерізу

продукту та дозволяє порівнювати результати вимірювання з комп’ютерним експериментом.

Рисунок 2.3 – Робоча камера експериментального апарата

Рисунок 2.4 – Експериментальний відбивач

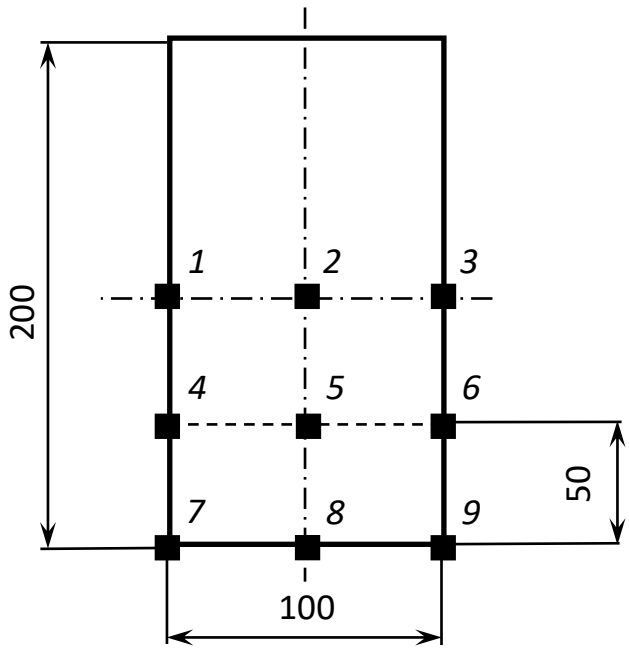


Рисунок 2.5 – Розміри рамки (мм) та номери датчиків

Під час використання ІЧ-випромінювачів продукт знаходиться в умовах складного теплообміну. В аналогічних умовах знаходяться чутливі елементи датчиків. Для оцінки променистого теплового потоку конструктивними та технологічними рішеннями виключено конвективний теплообмін з середовищем та кондуктивний теплообмін з корпусними елементами датчика. Важливими параметрами датчика є неселективність поглинання та мала інерційність.

Датчик температури виконано зі сталі 18ХН10Т, розмір датчика становить 12×12 мм, завтовшки 0.4 мм. Виключення похибки, викликаної стоком тепла проводами термопари та розтяжками кріплення приймача у корпусі датчика, забезпечується виконанням розтяжок та робочої ділянки термопари з проволоки діаметром 0.2 мм (рис. 2.6).

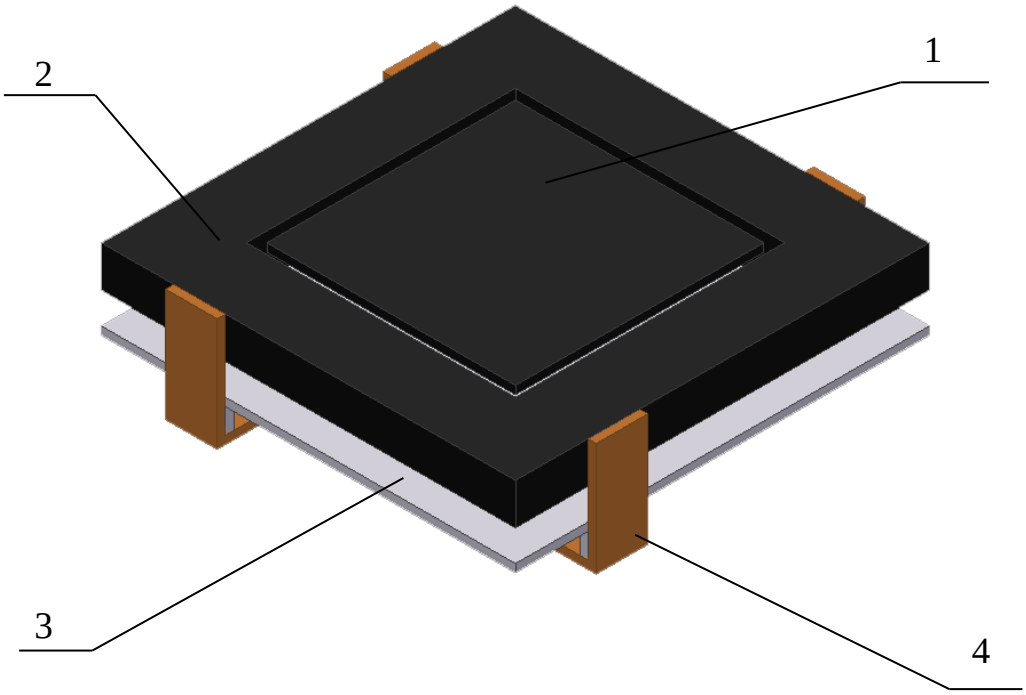


Рисунок 2.6 – Конструкція датчика:
1 – приймач (ТХА); 2 – корпус; 3 – екран приймача; 4 – стійка

За термопарою встановлено екран з полірованого алюмінію з метою виключення стоку тепла випромінюванням з задньої стінки приймача на інші елементи датчика і для підвищення ступеня поглинання. Зачорнений датчик закріплено на вимірювальній панелі стійками малого перерізу, що зменшує стік тепла.

Приймач випромінювання та корпус датчика зачорнені з боку теплового потоку. Покриття з мілкодисперсної сажі та кремнійорганічного зв'язуючого має задовільне поглинання в усьому діапазоні баченого та інфрачервоного випромінювання (0.95...0.98). Загальний вигляд рамки з датчиками наведено на рисунку 2.7.

Термічна електрорушійна сила на термопарах визначалася за допомогою пристрою для реєстрації сигналів Ф266 № 526, температура вільних кінців термопар – технічним термометром.

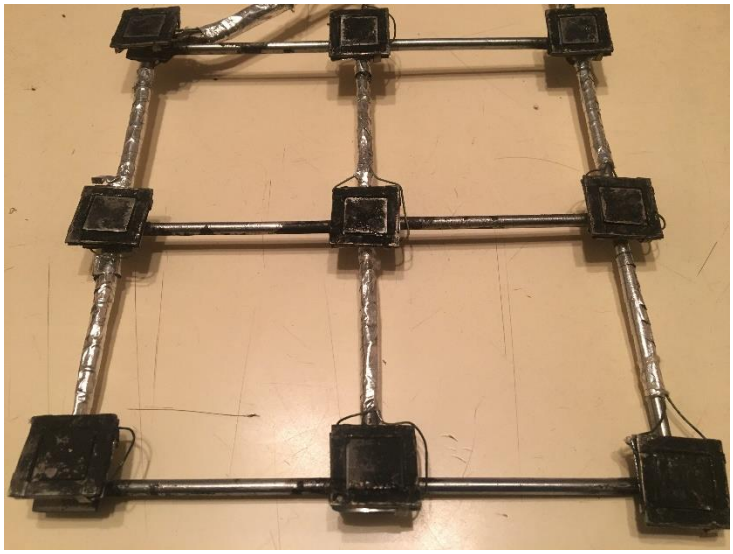


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд рамки з датчиками

Температура на дев’ятьох термопарах визначалася через 2 хвилини після вмикання апарату. За незмінних умов експерименту було оцінено середнє арифметичне значення температури $\overline{T}$ та визначено точність вимірювань. Значення похибки знайденої оцінки середнього арифметичного визначалося довірчим інтервалом ε_β. Вірне значення з заданою довірчою вірогідністю становило $T = \overline{T} \pm \varepsilon_\beta$. Було обрано довірчу вірогідність $\beta = 0.9$, кількість експериментів становила $n = 6$, кількість ступенів свободи вибіркової дисперсії $f = n - 1 = 5$. За цих умов статистичний критерій Стьюдента $t(\beta, f) = 2.015$.

2.4 Оцінка результатів вимірювання температури

Оцінка результатів вимірювання температури виконана за допомогою програмного комплексу Mathcad [63]. Вибіркове середнє значення з шести виміряних для кожної термопари визначено за допомогою вбудованої функції *mean(T)*. Стандартне відхилення та вибіркова дисперсія – відповідно за допомогою вбудованих функцій *Stdev(T)* та *Var(T)*.

Довірчий інтервал визначався за наступною формулою:

$$\varepsilon_\beta = t \cdot \sqrt{\frac{Var(T)}{n}}, \tag{2.1}$$

де T – вектор із шести виміряних кожною термопарою значень температури.

Коефіцієнти асиметрії та ексцесу перевіряють те, що розсіювання експериментальних даних має випадковий характер. Коефіцієнт асиметрії визначає ступінь асиметричності щільності вірогідності відносно вісі, яка проходить через її центр ваги, та обчислюється за допомогою вбудованої функції *skew(T)*. Коефіцієнт ексцесу визначає ступінь положистості щільності вірогідності біля головного максимуму, та обчислюється за допомогою вбудованої функції *kurt(T)*. Розрахункову програму оцінки результатів вимірювання температури наведено у додатку А.

Беручи до уваги значення потужності випромінювача та відсутність примусової конвекції, враховано лише променеву складову теплообміну. Значно більші розміри робочої камери роблять її набагато більш інерційною порівняно із датчиком, що дозволяє знехтувати її наявністю під час розрахунків. Значення променевого потоку визначатимемо за законом Стефана–Больцмана:

$$q_{ПР} = \frac{1}{\varepsilon_Д} \cdot C_O \cdot \left(\frac{T_Д}{100}\right)^4, \tag{2.2}$$

де $q_{ПР}$ – густина падаючого променевого теплового потоку, Вт/м^2; $T_Д$ – температура чутливого елемента датчика, К (визначається експериментально для дев’яти термопар); C_O = 5,67 Вт/м^{2}К^4 – стала Стефана–Больцмана; $\varepsilon_Д \approx 0{,}96$ – коефіцієнт чорноти датчика. Розрахункову програму визначення густини опромінення півеліпса наведено у додатку Б.

2.5 Методи комп’ютерного моделювання опромінення

Існуючі комп’ютерні програми (COSMOSWorks, TracePro, SolidWorks тощо) принципово розв’язують виключно прямі задачі опромінювання, тобто визначають щільність теплоти на поверхні приймача за відомого профілю рефлектора. Окрім цього, необхідна кількість променів визначається експериментально, шляхом наближення результатів до теоретичних висновків, і некоректна кількість променів може призвести до суттєвих похибок [66–68].

Для отримання числового розв’язок у TracePro, задавали кількість теплових променів, що виходять із джерела. Комп’ютерна програма випадковим чином обирає точки на випромінювачі та напрями руху променів, що виходять із них, і автоматично обчислює їх траєкторії, але попередньо треба задати профіль циліндричного рефлектора [67].

Просторовий розподіл густини потоку випромінювання моделюється шляхом розрахунку траєкторій окремих випадкових променів, і точність розв’язку відповідає їх кількості. Для отримання реалістичної картини розподілу променевого потоку треба брати кількість променів не менше мільйона.

2.6 Методи визначення якості жарених м’ясних продуктів із яловичини

Для приготування біфштексів використовували сировину, що відповідає вимогам нормативної документації: м’ясо яловичини (вирізка) та спеції (сіль кухарська, перець чорний молотий). М’ясну сировину було придбано в мережі магазинів «М’ясна хатинка» (м. Харків).

Мікробіологічні показники напівфабрикатів відповідали вимогам, наведеним у ДСТУ 4437:2005 «Напівфабрикати м’ясні та м’ясорослинні

посічені. Технічні умови», для яловичини знежилованої вищого та І сорту [69].

Методика визначення якості готових виробів за мікробіологічними показниками полягала у визначенні рівня мікробіологічної безпечності готових виробів, виготовлених з м’яса яловичини знежилованої, після ІЧ-жарення в есперименталному апараті з відбивачем та без нього до температури в центрі продукту 75 ºС та темперування тривалістю 2 хвилини.

Перелік показників, за якими визначалась мікробіологічна безпечність готових виробів, встановлювався згідно з ДСП 4.4.5.078-2001 [70].

Відповідно до ступеню прожарювання біфштексу (рис. 2.8) температура всередині продукту наступна: 50°С – Rare, 55°С – Medium Rare, 60°С – Medium, 65°С – Medium Well, 70°С – Well Done.

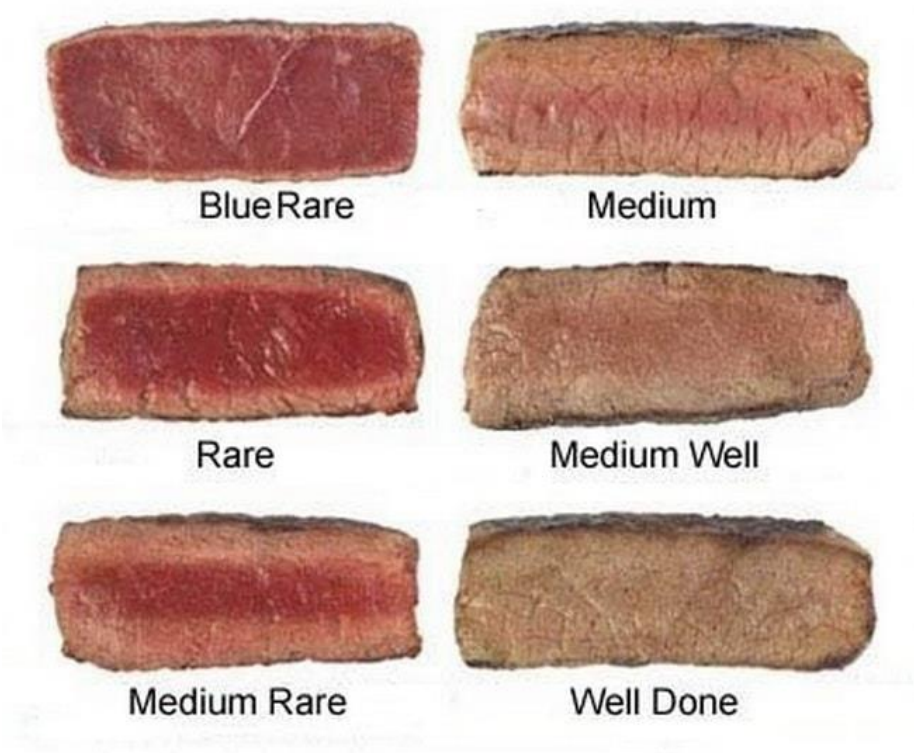


Рисунок 2.8 – Ступені прожарювання біфштексу

За умови якісних напівфабрикатів та досягнення температури внутрішніх шарів продукту 75 ºС для оцінки поживних та смакових характеристик м’ясного продукту визначальною є органолептична оцінка [71, 72]:

- зовнішній вигляд,
- колір (на поверхні, на розрізі),
- консистенція,
- запах,
- смак.

Температура у середині продукту визначалася за допомогою термопари хромель-копель ТХК (вимірювання до 600 ºС) [73; 74], за досягання 75 ºС випромінювач вимикався, виконувалося темперування продукту протягом 2 хвилин [8], після чого виконувалося органолептичне оцінювання якості продукту.

Органолептичний аналіз дозволяє оцінити якість сировини, напівфабрикатів та кулінарної продукції, визначити порушення рецептури, технології виробництва та оформлення блюд [75].

Визначення консистенції містить характеристику агрегатного стану (рідке, тверде), ступеня однорідності (однорідна, звурджена, пластівчаста тощо), механічних властивостей (крихка, еластична, пружна тощо) та інших, які визначаються оглядом або органами відчуття. Наприклад, у роті виникають такі відчуття, як соковитість та волокнистість. Соковитість – відчуття, яке викликається соками продукту під час розжовування, має кількісну оцінку (дуже соковитий, малосоковитий, сухий). Волокнистість – уява, викликана волокнами продукту, які опираються розжовуванню.

Відповідно до харчової сировини та кулінарних виробів розрізняють аромат – природний приємний запах, притаманний вихідній сировині (яловичині, свинині), та букет – запах, який формується за технологічної обробки продукту під чином складних хімічних перетворень. Непритаманні

продукту запахи є наслідком псування на етапі зберігання або порушенням технології приготування.

Важливим параметром якості кулінарної продукції є смак – відчуття, яке виникає за збудження смакових рецепторів і визначається якісно (солодке, солоне, кисле, гірке) та кількісно (інтенсивність смаку). Смакові враження від харчових продуктів є, зазвичай, результатом впливу декількох смаків на рецептори.

Смажені натуральні м’ясні продукти великими шматками з яловичини можуть бути слабо, середнє та сильно прожарені. Колір на розрізі у слабо прожареного м’яса рожевий, у середнє прожареного – від слабо рожевого до сірого, у повністю прожареного – від сірого до брунатного. Має бути аромат смаженого м’яса, смак помірно солоний.

За результатами органолептичного оцінювання зовнішнього вигляду, кольору на поверхні та на розрізі, консистенції, запаху та смаку за п’ятибальною шкалою будували профілограму, яка демонструє переваги продукту, отриманого в процесі ІЧ-жарення з відбивачем променевого потоку.

Вихід готового продукту z за жарення без відбивача визначався наступним чином:

$$z = \frac{m_{ГП}}{m_{НФ}} \ , \tag{2.3}$$

де $m_{ГП}$ – маса готового продукту, кг; $m_{НФ}$ – маса напівфабрикату, кг. Ці маси визначалися за допомогою ваг електронних ВР-4149-02БР.

Втрати маси (видиме усмаження) за жарення без відбивача визначалися відніманням виходу готового продукту від одиниці [8].

2.7 Методи системного аналізу

Системний аналіз – це методологія розв’язку проблем, яка базується на концепції систем. Основою методології системного аналізу є кількісне порівняння альтернатив для вибору тієї, яку треба реалізувати. Кількісні оцінки альтернатив отримують, якщо виконана вимога їх рівної якості.

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. Разом з розробкою прогресивних процесів виникає можливість створювати імітаційні моделі, необхідні для вирішення задач оптимізації [76; 77]. На відміну від звичайного моделювання, яке обмежується спостереженням та формальними статистичними зв’язками між елементами системи, імітаційне моделювання реалізує морфологію системи для точної та всебічної динаміки процесу функціонування.

Системно-динамічне моделювання передає динамічну поведінку системи, тобто її функціонування у часі. У системній динаміці треба ідентифікувати зразки поведінки, які демонструються ключовими змінними, і надалі створювати модель, яка відтворює задані зразки. Якщо модель має цю здібність, вона може бути використана як лабораторний інструмент для тестування політик, спрямованих на зміну системної поведінки потрібним чином.

Імітаційне моделювання є адекватним інструментом аналізу складних систем зі слабо формалізованими елементами, до яких можна віднести системи харчових виробництв [78; 79]. Імітаційне дослідження дозволяє поєднувати особливості експериментального підходу і специфіку засобів комп'ютерної підтримки.

Головні задачі створення імітаційної моделі:

– реалізація динаміки процесу, який здійснюється у системі;

– 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 [80; 81].

2.8 Комплекс імітаційного потокового моделювання

Програмний комплекс Vensim 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 [82; 83].

В роботі було застосовано наступні можливості імітаційного комплексу Vensim:

– діаграма потоків та зв'язків, що детально структурує систему, вводить до моделі та пов'язує змінні;

– операторний запис математичних співвідношень моделі;

– більше ніж 50 вбудованих функцій, зокрема алгебри, логіки, затримки, випадковості, тестування, а також раптові функції;

– результати моделювання у графічному та табличному вигляді;

– порівняння результатів різних імітацій;

– відстеження наслідків та причин змінних.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено аналітичну методику визначення профілю відбивача, який забезпечить рівномірне опромінювання приймача опуклого перерізу.

2. Розроблено експериментальний апарат із малоінерційними датчиками температури для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів, який уможливлює використання спрофільованого за створеною аналітичною методикою відбивача.

3. Готовність біфштексів із яловичини, жарених у експериментальному апараті з відбивачем та без нього, визначається досягненням температури внутрішніх шарів продукту 75 ^{o}C із подальшим темперуванням, якість – органолептичною оцінкою.

4. Комплексна оцінка та оптимізація ІЧ-обладнання харчових виробництв можлива лише в рамках системно-динамічного моделювання, яке ґрунтується на аналітичних зв’язках системи та фізичному експерименті.

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОФІЛЮВАННЯ ВІДБИВАЧІВ ПРОМЕНЕВОГО ПОТОКУ

В інфрачервоному обладнанні харчових виробництв та ресторанного господарства відбивачі променевого потоку зазвичай не використовуються або використовуються такі їх профілі, що не спроможні утворити рівномірний променевий потік на поверхні продукту. Це частково зумовлено відсутністю теоретичного розв'язку відповідної задачі. Визначимо шляхом аналітичного моделювання форми відбивачів за умови рівномірного верхнього та всебічного опромінення теплоприймачів із перерізом у вигляді півкола та півеліпса без урахування втрат теплоти на відбивачі та з ними.

3.1 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймача півкругового профілю

Визначимо форму відбивача теплотехнічної системи за умови рівномірної густини розподілу променевої енергії на приймачі з півкруговим перерізом [84; 85].

Розглянемо теплотехнічну систему (рис. 3.1), яка складається з трубчастого випромінювача 1, циліндричного відбивача 2 і приймача тепла *AB* із півкруговою формою перерізу 3. Із системою пов'яжемо декартову систему координат так, щоб вісь *Oz* пройшла вздовж випромінювача, а осі *Ox, Oy* розташувалися так, як це показано на рисунку.

Будемо використовувати такі позначення: h – відстань від осі випромінювача до центра приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; β_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач *AB* безпосередньо від випромінювача.

Для позначення полярних координат поверхні перерізу рефлектора застосуємо символи R (м), φ, а для координат поверхні приймача – R_1 (м), β (R_1 = const).

Нехай один метр випромінювача продукує Q одиниць енергії, Вт/м. Баланс теплоти будемо підраховувати за одну секунду з одного метра випромінювача, а втратами на шляху до приймача нехтуватимемо.

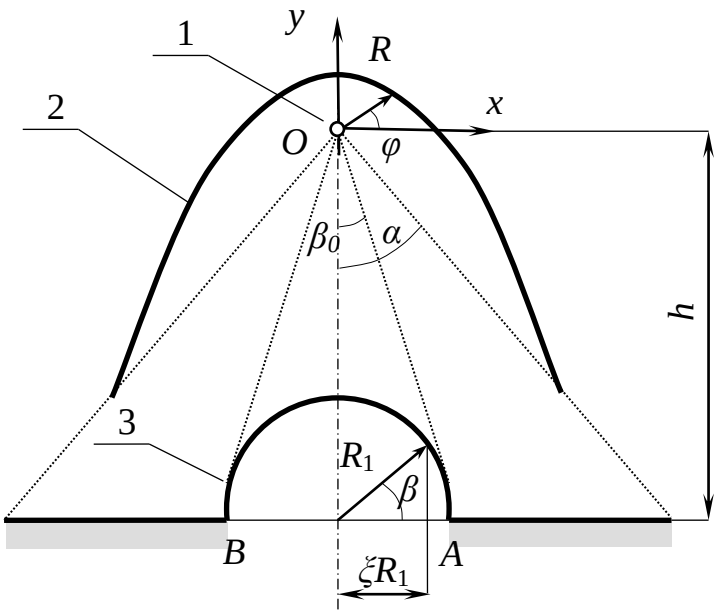


Рисунок 3.1 – Схема теплотехнічної системи

Отже, тепло, що не потрапляє на рефлектор, визначається наступним чином (Вт/м):

$$Q_1 = \frac{Q}{2\pi} 2\alpha. \qquad (3.1)$$

Його частина, що безпосередньо опромінює приймач, визначається за такою формулою:

$$Q_1^+ = \frac{Q}{2\pi} 2\beta_0. \tag{3.2}$$

Таким чином, тепло, що відразу не потрапляє на робочу поверхню, матиме такий вигляд:

$$Q_1^- = \frac{Q}{2\pi}(2\alpha - 2\beta_0). \tag{3.3}$$

Віддзеркалене від рефлектора тепло, що має прийти на робочу поверхню, визначається таким чином:

$$Q_2 = \frac{Q}{2\pi}(2\pi - 2\alpha). \tag{3.4}$$

Отже, все тепло, що потрапляє на один погонний метр приймача за 1 с, таке (Вт/м):

$$Q^+ = Q_1^+ + Q_2 = \frac{Q}{\pi}(\pi + \beta_0 - \alpha). \tag{3.5}$$

Це тепло має рівномірно розподілитися на циліндричній поверхні *AB*.

Щоб мінімізувати втрати енергії на шляху від випромінювача до приймача, відбивач проектуватимемо з урахуванням такої вимоги: промінь має лише один раз відбитися від поверхні рефлектора. Очевидно, таких відбивачів може бути дуже багато. Тому поставимо ще одну вимогу, яка дозволить знайти найпростішу форму перерізу відбивача. Будемо вважати, що в разі переміщення точки віддзеркалення *M* уздовж поверхні рефлектора від *N* до *P* у бік збільшення полярного кута φ, точка *K* робочого тіла, куди потрапляє відбитий промінь, монотонно рухатиметься його поверхнею від *A* до *B* у бік збільшення координати β (рис. 3.2).

Домовимося густину опромінювання, що припадає на 1 м робочої поверхні за 1 с, позначати символом $q(\beta)$ (у нашому випадку $q(\beta)$ = const). Вона складається з $q_1(\beta)$ і $q_2(\beta)$, тобто (Вт/м^2)

$$q(\beta) = q_1(\beta) + q_2(\beta), \tag{3.6}$$

де $q_1(\beta)$ – густина опромінювання, що зумовлена безпосереднім опромінюванням робочого тіла тепловими променями; $q_2(\beta)$ – густина опромінювання, яку забезпечують віддзеркалені від рефлектора промені.

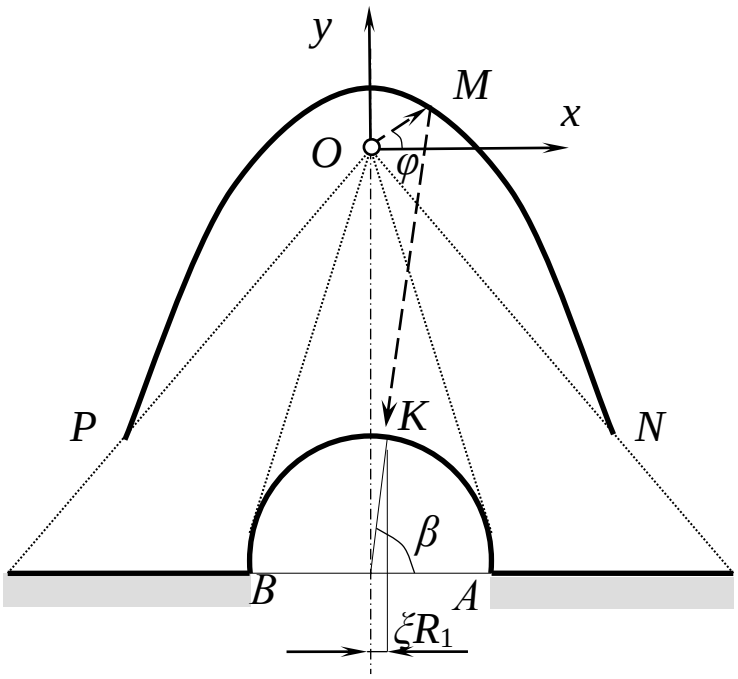


Рисунок 3.2 – Схема руху променю

Очевидно, що

$$q(\beta) = \frac{Q^+}{\pi R_1} = \frac{Q}{\pi^2 R_1}(\pi + \beta_0 - \alpha). \tag{3.7}$$

У подальшому будемо використовувати l замість R_1 (м).

Окрім того, перейдемо до відносних координат. Для цього за одиницю довжини візьмемо *l*. Тоді переріз поверхні робочого тіла, тобто половину кола, можна буде описати такою залежністю:

$$\eta = -\chi + \sqrt{1-\xi^2}\ , \tag{3.8}$$

де $\xi = x/R_1 = x/l$, $\eta = y/R_1 = y/l$, $\chi = h/R_1 = h/l$.

Розглянемо безрозмірні функції опромінювання

$$p_1(\xi) = \frac{2l}{Q} q_1(\beta),\ p_2(\xi) = \frac{2l}{Q} q_2(\beta),\ p(\xi) = \frac{2l}{Q} q(\beta). \tag{3.9}$$

Відповідно до [58] маємо

$$p_1(\xi) = -\frac{1}{\pi} \frac{\xi\eta' - \eta}{\left(\xi^2 + \eta^2\right)\sqrt{1+\eta'^2}}\ , \tag{3.10}$$

де штрихом позначена похідна від η за ξ.

Отже, маємо

$$p_1^*(\beta) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\chi^2 - 1}{\chi^2 - 2\chi \cdot \sin\beta + 1} - 1\right) \quad (\beta_0 \le \beta \le \pi - \beta_0). \tag{3.11}$$

Тут і нижче використовуються ще й такі позначення

$$p_1^*(\beta) = p_1(\xi),\ p_2^*(\beta) = p_2(\xi)\ . \tag{3.12}$$

Ділянки $\beta < \beta_0$ і $\beta > \pi - \beta_0$ не опромінюються променями, що йдуть без віддзеркалення від джерела енергії (рис. 3.3).

Із (3.6) визначимо

$$p_2^*(\beta) = p(\beta) - p_1^*(\beta). \tag{3.13}$$

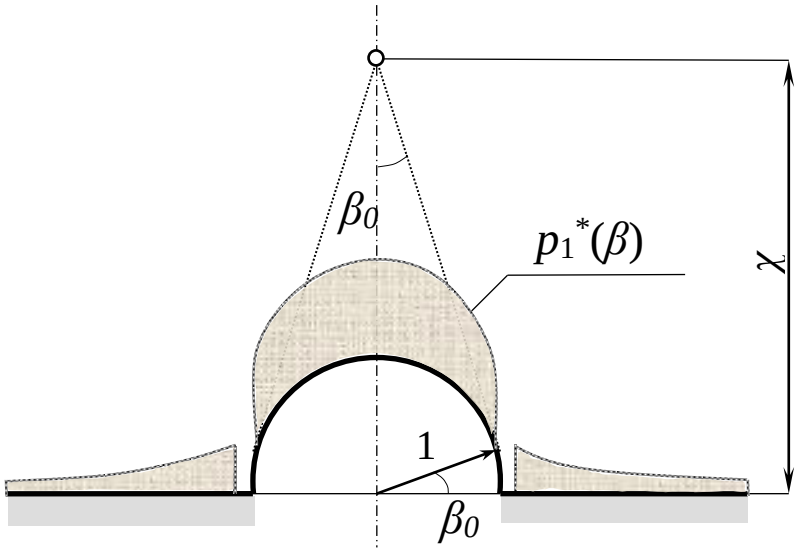


Рисунок 3.3 – Схема розподілу енергії за безпосереднього опромінювання

Але

$$p(\beta) = \frac{2l}{Q} \quad q(\beta) = \frac{2}{\pi^2}(\pi + \beta_0 - \alpha). \tag{3.14}$$

Із залежностей (3.11), (3.13), (3.14) отримуємо

$$p_2^*(\beta) = \begin{cases} \dfrac{2}{\pi^2}(\pi + \beta_0 - \alpha), & \beta < \beta_0; \\ \dfrac{2}{\pi^2}(\pi + \beta_0 - \alpha) - \dfrac{1}{2\pi}\left(\dfrac{\chi^2 - 1}{\chi^2 + 1 - 2\chi \cdot \sin\beta} - 1\right), & \beta_0 \le \beta \le \pi - \beta_0; \\ \dfrac{2}{\pi^2}(\pi + \beta_0 - \alpha), & \beta > \pi - \beta_0. \end{cases} \tag{3.15}$$

У куті β один метр робочого тіла за одну секунду отримує таку віддзеркалену кількість теплоти (Вт/м):

$$\int_0^{\beta} q_2(\beta) R_1 \, d\beta = \frac{Q}{2} \int_0^{\beta} p_2^*(\beta) \, d\beta. \tag{3.16}$$

Ця кількість енергії надходить після віддзеркалення в куті $\varphi + \frac{\pi}{2} - \alpha$ і має величину

$$\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \alpha\right). \tag{3.17}$$

Прирівнюючи залежності (3.16) і (3.17), маємо

$$\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2} + \pi \int_0^{\beta} p_2^*(\beta) \, d\beta. \tag{3.18}$$

Після підставлення залежності (3.15) та інтегрування отримуємо

$$\varphi = \begin{cases} 2\left(1 - \dfrac{\alpha - \beta_0}{\pi}\right)\beta + \alpha - \dfrac{\pi}{2}, & \beta < \beta_0; \\ 2\left(1 - \dfrac{\alpha - \beta_0}{\pi}\right)\beta + \dfrac{\beta - \beta_0}{2} + \Phi(\beta_0, \chi) - \Phi(\beta, \chi) + \alpha - \dfrac{\pi}{2}, & \beta_0 \le \beta \le \pi - \beta_0; \\ 2\left(1 - \dfrac{\alpha - \beta_0}{\pi}\right)\beta + \dfrac{\pi - 2\beta_0}{2} + \Phi(\beta_0, \chi) - \Phi(\pi - \beta_0, \chi) + \alpha - \dfrac{\pi}{2}, & \beta > \pi - \beta_0. \end{cases} \tag{3.19}$$

Тут позначено

$$\Phi(\beta,\chi)=\operatorname{arc\,tg}\left[\frac{\left(\chi^2+1\right)\operatorname{tg}\frac{\beta}{2}-2\chi}{\chi^2-1}\right]. \tag{3.20}$$

Формула (3.19) встановлює залежність між кутами φ та β.

Диференціальна залежність, що встановлює зв'язок між полярними координатами R і φ точок рефлектора, у відносних величинах може бути записана так:

$$\frac{d\rho}{d\varphi}=-\rho\frac{(\rho_1-\rho)\cos\varphi+\xi}{(\rho_1+\rho)\sin\varphi-\eta(\xi)}, \tag{3.21}$$

де $\rho=\dfrac{R}{l}$, $\xi=\cos\beta$, $\rho_1=\sqrt{(\rho\cos\varphi-\cos\beta)^2+(\rho\sin\varphi-\sin\beta+\chi)^2}$.

Але

$$\frac{d\rho}{d\varphi}=\frac{d\rho}{d\beta}\,\frac{d\beta}{d\varphi}=\frac{d\rho}{d\beta}\,\frac{1}{\Psi(\beta)}, \tag{3.22}$$

де

$$\Psi(\beta)=\frac{d\varphi}{d\beta}=\begin{cases}2\left(1+\dfrac{\beta_0-\alpha}{\pi}\right), & \beta<\beta_0;\\ 2\left(1+\dfrac{\beta_0-\alpha}{\pi}\right)-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\chi^2-1}{\chi^2+1-2\chi\cdot\sin\beta}-1\right), & \beta_0\le\beta\le\pi-\beta_0;\\ 2\left(1+\dfrac{\beta_0-\alpha}{\pi}\right), & \beta>\pi-\beta_0.\end{cases} \tag{3.23}$$

Залежність (3.21) переходить у диференціальне рівняння

$$\frac{d\rho}{d\beta} = -\rho \frac{(\rho_1 - \rho)\cos\varphi + \cos\beta}{(\rho_1 + \rho)\sin\varphi + \chi - \sin\beta} \Psi(\beta). \qquad (3.24)$$

Це рівняння розв'язувалося методом Рунге-Кутта за допомогою Mathcad для початкового $\rho_0 = 0.5\,\rho_{MAX}$ за $\chi = 4$, $\alpha = \text{arctg}\ 3/4$ (очевидно, що $\beta_0 = \arcsin 1 / \chi$), де ρ_{MAX} – відносна відстань від точки O до краю опроміненої поверхні. Відповідну цим величинам форму відбивача наведено на рисунку 3.4 (за осями координат відкладено відносні розміри теплотехнічної системи).

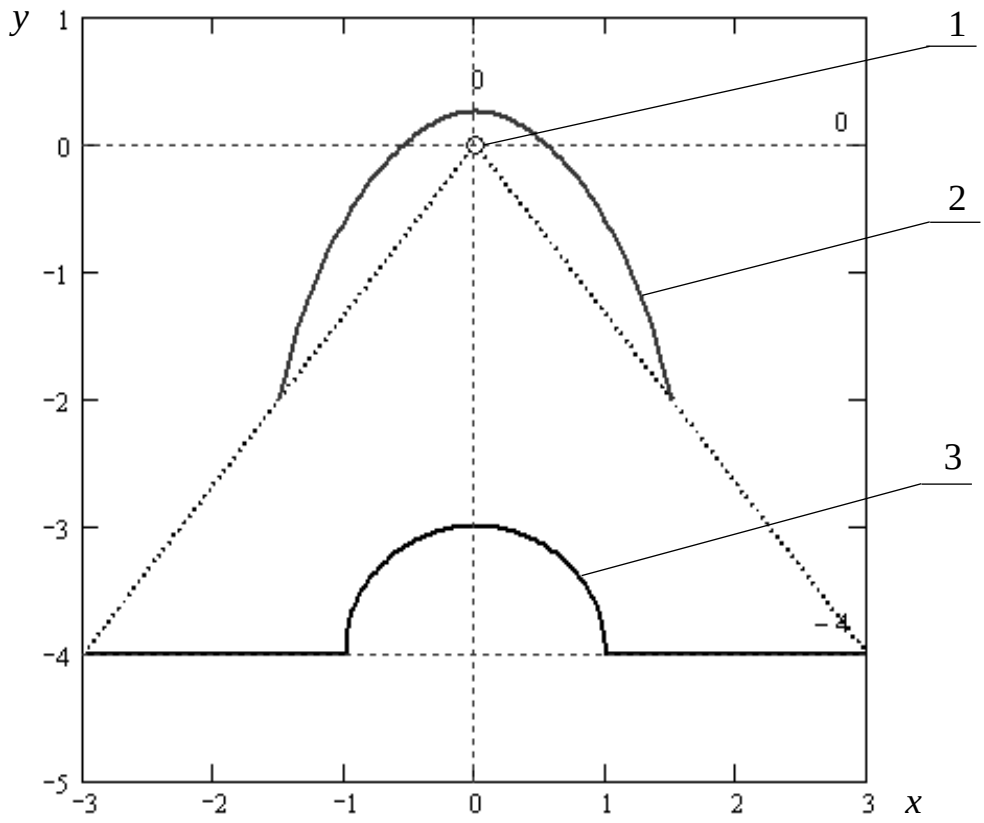


Рисунок 3.4 – Верхнє рівномірне опромінення півкола:
1 – випромінювач; 2 – відбивач; 3 – приймач

3.2 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймача півеліптичного профілю

Визначимо форму рефлектора теплотехнічної системи за умови, що густина розподілу теплової енергії на приймачі з півеліптичним перерізом є рівномірною [86].

Розглянемо теплотехнічну систему (рис. 3.5), яка складається з трубчастого випромінювача 1, циліндричного відбивача 2 і приймача тепла *AB* з півеліптичною формою перерізу 3. Із системою пов'яжемо декартову систему координат так, щоб вісь *Oz* пройшла вздовж випромінювача, а осі *Ox, Oy* розташувалися таким чином, як це показано на рисунку.

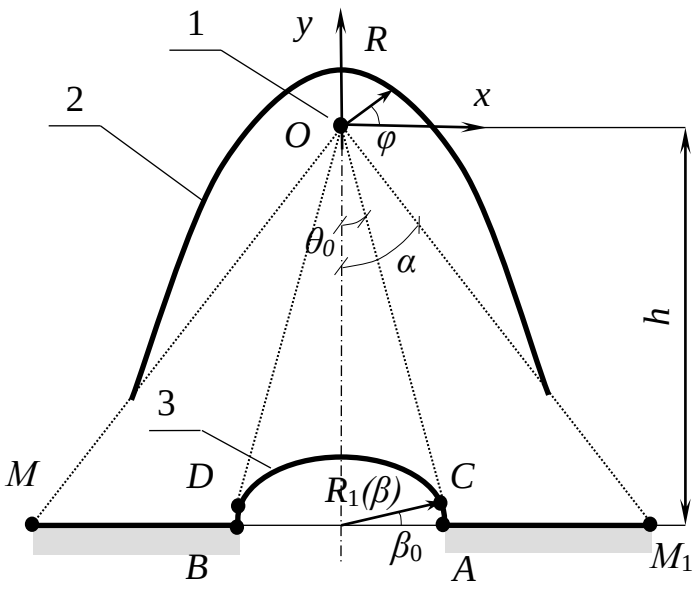


Рисунок 3.5 – Схема теплотехнічної системи

Будемо використовувати такі позначення: h – відстань від осі випромінювача до центра приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; θ_0 – половина кута,

в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач *AB* безпосередньо від випромінювача.

Для позначення полярних координат поверхні перерізу рефлектора застосуємо символи R (м) та φ, а для координат поверхні приймача – $R_1(\beta)$ (м) та β.

Рівняння еліпса у відтинках на осях має вигляд:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{(y+h)^2}{b^2}=1\ , \tag{3.25}$$

де a і b – довжини великої та малої півосі (м).

У подальших дослідженнях зручно користуватися відносними величинами

$$\xi=\frac{x}{l},\ \ \eta=\frac{y}{l},\quad \chi=\frac{h}{l},\quad m=\frac{b}{l}\ , \tag{3.26}$$

де $l = a$ (м), тобто за одиницю довжини взято довжину великої півосі еліпса.

Із (3.25) отримуємо рівняння робочої поверхні теплотехнічної установки

$$\eta=-\chi+m\ \sqrt{1-\xi^2}\,. \tag{3.27}$$

Позначимо символом $\rho_1(\beta)=\dfrac{R_1(\beta)}{l}$ відносну радіальну координату поверхні приймача.

Маємо

$$\xi=\rho_1(\beta)\cos\beta,\quad \eta=\rho_1(\beta)\sin\beta-\chi\ . \tag{3.28}$$

Після підставляння цих виразів у (3.27) й елементарних перетворень, отримуємо рівняння півеліпса у відносних полярних координатах:

$$\rho_1(\beta) = \frac{m}{\sqrt{1-(1-m^2)\,\cos^2\beta}}. \tag{3.29}$$

Таким чином:

$$\xi = \frac{m\,\cos\beta}{\sqrt{1-(1-m^2)\,\cos^2\beta}}, \quad \eta = \frac{m\,\sin\beta}{\sqrt{1-(1-m^2)\,\cos^2\beta}} - \chi\ . \tag{3.30}$$

Визначимо елемент дуги *ds*.

Як відомо,

$$ds = \sqrt{\left(\frac{dR_1}{d\beta}\right)^2 + R_1^2}\ d\beta\ , \tag{3.31}$$

або у відносних величинах

$$d\zeta = \frac{ds}{l} = \sqrt{\left(\rho_1{}'(\beta)\right)^2 + \rho_1^2}\ d\beta\ . \tag{3.32}$$

Тепер, ураховуючи залежність (3.29), знаходимо

$$d\zeta = Z(\beta)\, d\beta\ , \tag{3.33}$$

де $Z(\beta) = m\ \sqrt{\dfrac{1-\left(1-m^4\right)\cos^2\beta}{\left[1-\left(1-m^2\right)\cos^2\beta\right]^3}}$.

Прямий потік від випромінювача потрапляє лише на ділянку *CD*, що обмежена дотичними до еліпса (рис. 3.5). Густина безпосереднього опромінювання цієї ділянки робочого тіла *q(x)* пов'язана з так званою функцією безпосереднього опромінювання $p_1(\xi)$ такою залежністю:

$$p_1(\xi) = \frac{2\,l}{Q}\, q_1(x)\,. \tag{3.34}$$

Це безрозмірна величина, для визначення якої використовується така формула [58]:

$$p_1(\xi) = \pm\frac{l}{\pi}\left(\frac{x\;y' - y}{\left(x^2 + y^2\right)\sqrt{1 + y'^2}}\right), \tag{3.35}$$

яка після переходу до відносних координат набуває вигляду

$$p_1(\xi) = \pm\frac{1}{\pi}\left(\frac{\xi\;\eta' - \eta}{\left(\xi^2 + \eta^2\right)\sqrt{1 + \eta'^2}}\right). \tag{3.36}$$

Очевидно, у випадку, що вивчається, треба брати знак «+».

Остаточно отримуємо

$$p_1(\xi) = p_1^*(\beta) = \frac{1}{\pi}\,\frac{\left[\chi\,\sin\beta - m\;D(\beta)\right]D^2(\beta)}{\left[m^2 - 2\;\chi\;m\,\sin\beta\;D(\beta) + \chi^2\;D^2(\beta)\right]D_1(\beta)}\,, \tag{3.37}$$

де $D(\beta) = \sqrt{1 - \left(1 - m^2\right)\cos^2\beta}$; $D_1(\beta) = \sqrt{1 - \left(1 - m^4\right)\cos^2\beta}$.

Отже, ця функція пропорційна густині опромінювання ділянки приймача *CD* прямим потоком теплових променів, а ділянки *AC* і *BD* залишаються ним не прогрітими.

Нехай один метр джерела випромінює *Q* одиниць енергії (Вт/м). Баланс енергії будемо підраховувати з одного метра випромінювача, а втратами енергії шляхом до приймача знехтуємо.

Тепло, що не потрапляє на рефлектор (Вт/м):

$$Q_1 = \frac{Q}{2\pi}\, 2\alpha \,. \tag{3.38}$$

Його частина, що безпосередньо опромінює робоче тіло (Вт/м):

$$Q_1^+ = \frac{Q}{2\pi}\, 2\theta_0 \,. \tag{3.39}$$

Тепло, що віддзеркалюється від рефлектора (Вт/м):

$$Q_2 = \frac{Q}{2\pi}\left(2\pi - 2\alpha\right). \tag{3.40}$$

Отже, все тепло, що потрапляє на один погонний метр приймача за одну секунду (Вт/м):

$$Q^+ = Q_1^+ + Q_2 = \frac{Q}{\pi}\left(\pi + \theta_0 - \alpha\right). \tag{3.41}$$

Це тепло рівномірно розподіляється на еліптичній поверхні з густиною (Вт/м^2)

$$q(\beta)=\frac{Q^{+}}{L}=\frac{Q}{\pi\ L}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right), \tag{3.42}$$

де L – довжина половини еліпса, м.

Таким чином, відносна густина опромінювання

$$p^{*}(\beta)=\frac{q(\beta)\,2\,l}{Q}=\frac{2\,l}{\pi\ L}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right). \tag{3.43}$$

Позначимо відносну довжину половини еліпса символом $\lambda=\frac{L}{l}$.

Тоді відносна густина визначається наступним чином:

$$p^{*}(\beta)=\frac{2}{\pi\ \lambda}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right). \tag{3.44}$$

Отже, відносна густина опромінювання відбитими променями становить

$$p_2^{*}(\beta)=p^{*}(\beta)-p_1^{*}(\beta) \tag{3.45}$$

і для всіх трьох ділянок приймача має вигляд

$$p_2^{*}(\beta)=\begin{cases}\dfrac{2}{\pi\ \lambda}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right), & \beta<\beta_0\ ;\\ \dfrac{2}{\pi\ \lambda}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right)-p_1^{*}(\beta), & \beta_0\le\beta\le\pi-\beta_0\ ;\\ \dfrac{2}{\pi\ \lambda}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right), & \beta>\pi-\beta_0\ .\end{cases} \tag{3.46}$$

У куті β один метр робочого тіла отримує таку віддзеркалену енергію (Вт/м):

$$\int_0^{\beta} q_2(\beta)\, ds = \frac{Q}{2\,l}\int_0^{\beta} p_2^*(\beta)\; ds = \frac{Q}{2}\int_0^{\beta} p_2^*(\beta)\; d\zeta = \frac{Q}{2}\int_0^{\beta} p_2^*(\beta)\; Z(\beta)\, d\beta\,. \qquad (3.47)$$

Ця енергія надходить після віддзеркалення в куті $\varphi + \frac{\pi}{2} - \alpha$ і дорівнює $\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \alpha\right)$.

Прирівнюючи її до залежності (3.47), матимемо

$$\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{Q}{2}\int_0^{\beta} p_2^*(\beta)\; Z(\beta)\, d\beta, \qquad (3.48)$$

звідки знаходимо

$$\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2} + \pi \int_0^{\beta} p_2^*(\beta) Z(\beta) d\beta. \qquad (3.49)$$

Отже,

$$\Psi(\beta) = \frac{d\varphi}{d\beta} = \pi\;\; p_2^*(\beta)\; Z(\beta). \qquad (3.50)$$

Рівняння для визначення форми рефлектора:

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = -\rho\;\frac{(\rho_1 - \rho)\cos\varphi + \xi}{(\rho_1 + \rho)\sin\varphi - \eta}\;, \qquad (3.51)$$

де $\xi = \xi(\beta)$ і $\eta = \eta(\beta)$ мають вигляд (3.30), а $\varphi = \varphi(\beta)$ – вигляд (3.49);

$$\rho_1 = \rho_1(\beta) = \sqrt{(\rho\ \cos\varphi - \xi)^2 + (\rho\ \sin\varphi - \eta)^2}. \qquad (3.52)$$

Візьмемо до уваги, що

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = \frac{d\rho}{d\beta}\ \frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{d\rho}{d\beta}\ \frac{1}{\Psi(\beta)}, \qquad (3.53)$$

тоді рівняння для визначення форми рефлектора (3.51) набуде вигляду

$$\frac{d\rho}{d\beta} = -\rho\ \frac{(\rho_1 - \rho)\cos\varphi + \xi(\beta)}{(\rho_1 + \rho)\sin\varphi - \eta(\beta)}\ \Psi(\beta). \qquad (3.54)$$

Рівняння (3.54) розв’язувалося методом Адамса-BDF за допомогою Mathcad для еліпса з $m = 0.5$ і такими початковими значеннями ρ_0 радіальної координати ρ за $\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}$: $\rho_{01} = 0.5\,\rho_{MAX}$, $\rho_{02} = 0.75\,\rho_{MAX}$, $\rho_{03} = \rho_{MAX}$, де ρ_{MAX} – відносна відстань від точки O до точки M_1. Для інших змінних бралися наступні значення: $\chi = 4$, $M_1M_2 / l = 6$ (рис. 3.5).

Із формули (3.49) зрозуміло, що точка потрапляння на приймач відбитого променю ніяк не пов’язана з початковою відстанню ρ_0. Це дозволяє використовувати для побудови нового рефлектора елементи сім’ї рефлекторів (рис. 3.6 та 3.7, за осями координат відкладено відносні розміри теплотехнічної системи).

До використання у інфрачервоному обладнанні пропонуються фрагментовані відбивачі, які простіші у виготовленні та дозволяють враховувати технологічні особливості теплової обробки продукту: додаткову конвекцію, а також осьовий (рис. 3.6) або бічний (рис. 3.7) доступ до продукту.

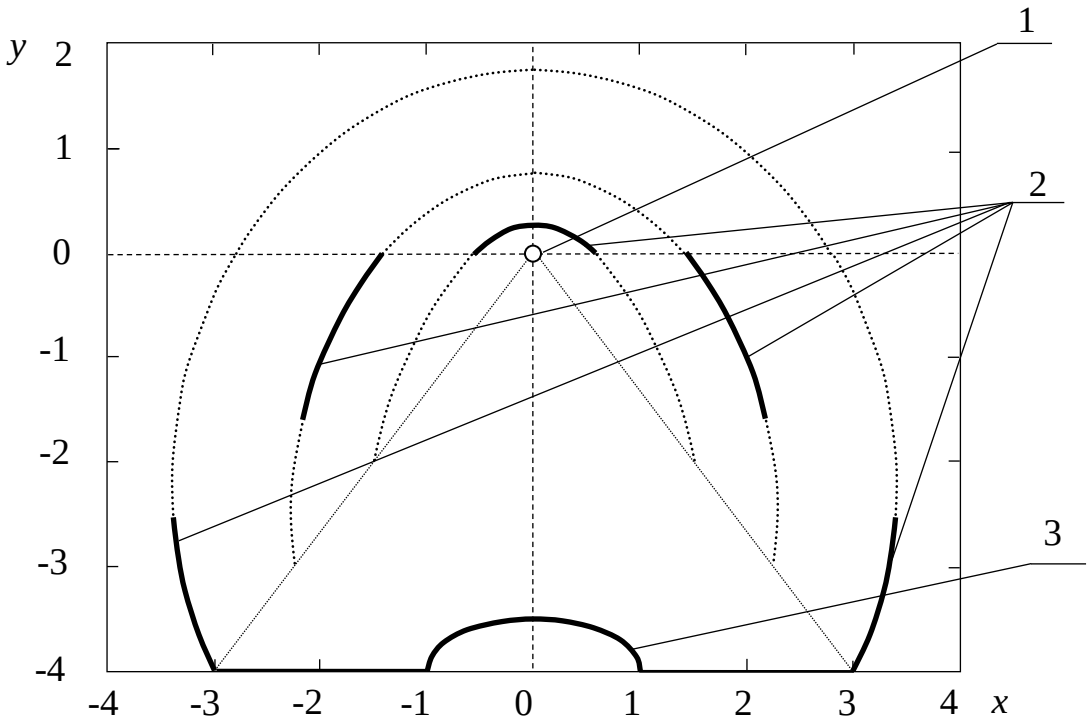


Рисунок 3.6 – Верхнє рівномірне опромінення півеліпсу:
1 – випромінювач; 2 – фрагментований відбивач
із осьовим доступом до продукту; 3 – приймач

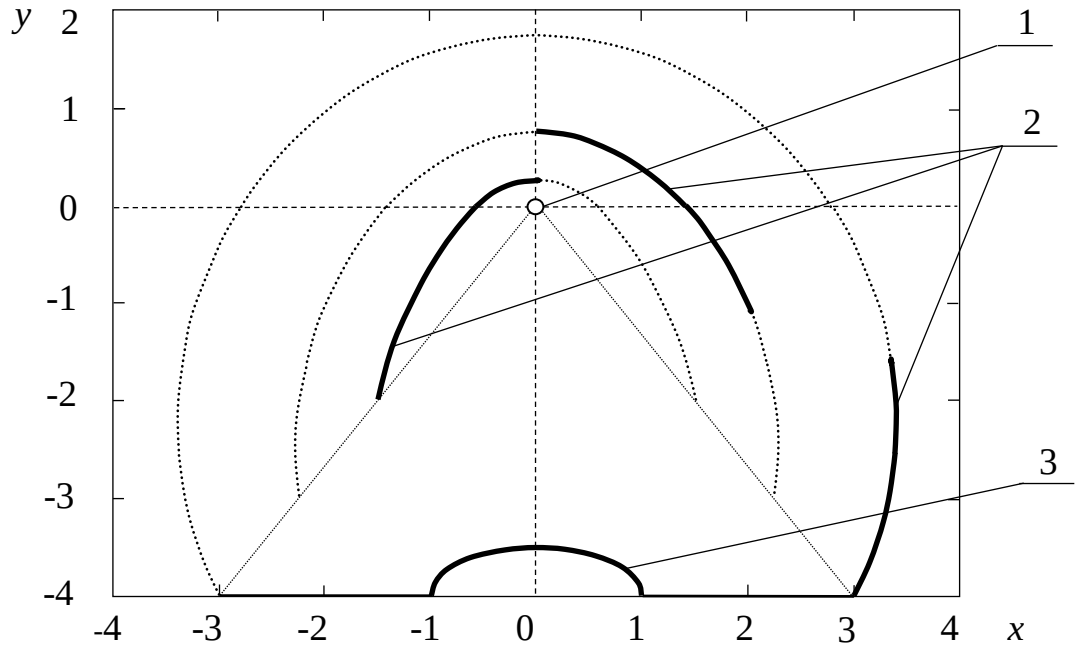


Рисунок 3.7 – Верхнє рівномірне опромінення півеліпсу:
1 – випромінювач; 2 – фрагментований відбивач
із бічним доступом до продукту; 3 – приймач

3.3 Моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймача півеліптичного профілю за врахування втрат теплоти

Усі попередні дослідження проводились для ідеального випадку, тобто за умови відсутності поглинання частини променевої енергії на відбивачах, що практично неможливо, оскільки їх поверхні неминуче забруднюються під час обробки харчової продукції.

Визначимо форму рефлектора теплотехнічної установки, якщо його поверхня під час віддзеркалення стане поглинати частину енергії, а густина теплового потоку на поверхні робочого тіла півеліптичного перерізу залишиться при цьому рівномірною [87].

Розглянемо теплотехнічну систему (відповідно до рис. 3.8), яка складається з трубчастого випромінювача 1, відбивача 2 та приймача тепла з півеліптичною формою перерізу 3. Із конструкцією пов’яжемо декартову систему координат таким чином, щоб вісь Oz пройшла вздовж випромінювача, а вісі Ox, Oy розташувалися так, як це показано на рисунку.

Будемо використовувати такі позначення: h – відстань від осі випромінювача до нижньої поверхні приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач AB безпосередньо від випромінювача; a – половина ширини робочого тіла.

Для позначення полярних координат поверхні рефлектора 2 застосуємо символи R (м) та φ, для координат поверхні робочого тіла 3 – R_1 (м) та β.

Нехай тепловий потік густиною $E_{\text{П}}$ (Вт/м^2) проходить через перпендикулярну до напряму потоку площинку dF_{N} (м^2) і потрапляє на відбивальну поверхню. Кут між напрямком потоку і нормаллю до відбивальної поверхні позначимо символом γ (відповідно до рис. 3.9).

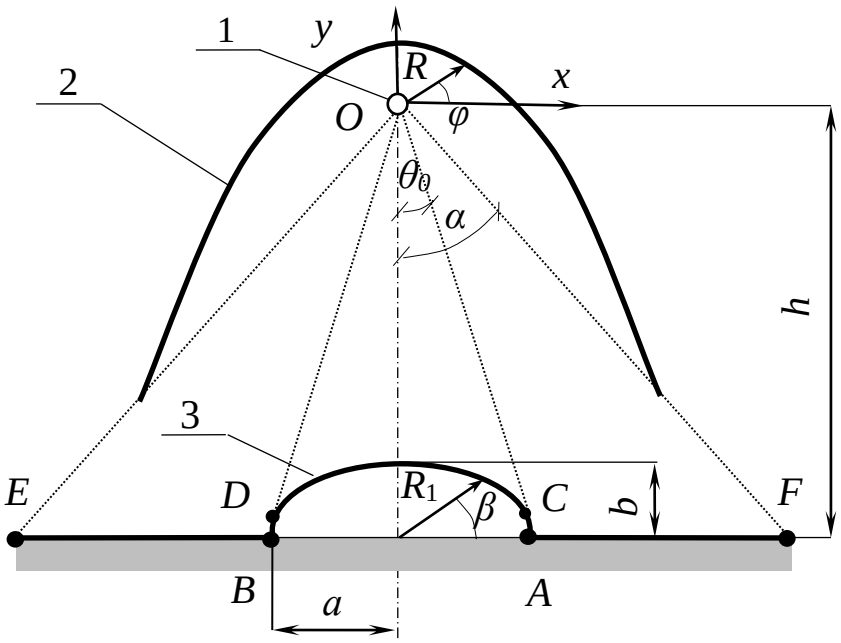


Рисунок 3.8 – Схема теплотехнічної системи

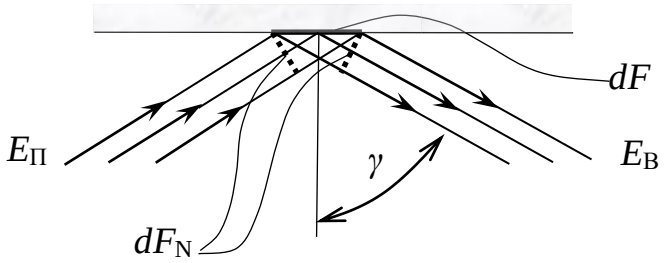


Рисунок 3.9 – Схема відбивання променевого потоку

Площа ділянки відбивача, на яку потрапляє потік, дорівнює (м^2)

$$dF = \frac{dF_{\text{N}}}{\cos\gamma}\,. \tag{3.55}$$

На цю ділянку потрапляє енергія

$$dQ_{\text{П}} = E_{\text{П}}\ dF_{\text{N}} = E_{\text{П}}\ \cos\gamma\ dF\ . \qquad (3.56)$$

Нехай v – коефіцієнт поглинання енергії відбивальною поверхнею. Тоді від неї буде віддзеркалений така кількість енергії:

$$dQ_{\text{В}} = (1-v)\ dQ_{\text{П}} = (1-v)\ E_{\text{П}}\ dF_{\text{N}} = (1-v)\ E_{\text{П}}\ \cos\gamma\ dF\ . \qquad (3.57)$$

Якщо позначити густину відбитого потоку $E_{\text{В}}$, то очевидно, що

$$E_{\text{В}} = (1-v)\ E_{\text{П}}\ . \qquad (3.58)$$

Нехай один метр джерела випромінює Q одиниць енергії. Тоді в куті $d\varphi$ буде випромінюватися такий потік (Вт/м):

$$dQ_{\text{П}} = \frac{Q}{2\ \pi}\ d\varphi\ . \qquad (3.59)$$

Отже, відбитий від рефлектора потік (його втратами, що йдуть на поглинання газовим середовищем, нехтуємо), яка спрямовується на робоче тіло 3, має енергію (Вт/м):

$$dQ_{\text{В}} = (1-v)\ dQ_{\text{П}} = (1-v)\ \frac{Q}{2\ \pi}\ d\varphi\ . \qquad (3.60)$$

Очевидно, що коефіцієнт поглинання може змінюватися під час переходу від однієї точки рефлектора до іншої, тобто $v = v(\varphi)$. Таким чином, уся енергія, що надійде від рефлектора до 1 метра робочого тіла, складатиме (Вт/м)

$$Q_{\text{В}}^{+} = \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}-\alpha} dQ_{\text{В}} = \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}-\alpha} \left[1-\nu(\varphi)\right] \frac{Q}{2\pi}\, d\varphi = \frac{Q}{2\pi} \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}-\alpha} \left[1-\nu(\varphi)\right] d\varphi\,. \qquad (3.61)$$

Окрім того, робоче тіло безпосередньо опромінюється джерелом, і до нього надходить така енергія (Вт/м):

$$Q_{\text{Б}}^{+} = \frac{Q}{2\pi}\, 2\,\theta_0\,. \qquad (3.62)$$

Отже, уся теплота, що потрапляє за секунду на один погонний метр приймача уздовж осі *Oz*, дорівнює (Вт/м):

$$Q^{+} = Q_{\text{Б}}^{+} + Q_{\text{В}}^{+} = \frac{Q}{2\pi} \left\{ 2\,\theta_0 + I\left(\frac{3\pi}{2} - \alpha\right) \right\}, \qquad (3.63)$$

де сумарні втрати можна визначити таким чином:

$$I\,(\varphi) = \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\varphi} \left[1-\nu(\varphi)\right] d\varphi\,. \qquad (3.64)$$

Позначимо символом ν_0 коефіцієнт поглинання теплоти у верхній точці відбивача ($\varphi = \frac{\pi}{2}$), а ν_1 – у найнижчих точках ($\varphi = -\frac{\pi}{2} + \alpha$, $\varphi = \frac{3\pi}{2} - \alpha$).

Указану закономірність зміни коефіцієнта поглинання можна наблизити наступною параболічною залежністю:

$$\nu(\varphi) = \nu_0 - \frac{\nu_0 - \nu_1}{(\pi - \alpha)^2} \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^2\,. \qquad (3.65)$$

У цьому разі інтеграл (3.64) легко береться.

Остаточно знаходимо

$$Q^{+} = \frac{Q}{3\,\pi}\,\left[\,3\,\theta_0 + (\pi - \alpha)\,(3 - 2\,\nu_0 - \nu_1)\,\right]. \qquad (3.66)$$

Ця енергія рівномірно розподіляється поверхнею робочого тіла з густиною (Вт/м^2)

$$q = \frac{Q^{+}}{L} = \frac{Q}{2\,a}\,p\,, \qquad (3.67)$$

де L – довжина дуги півеліпса з півосями a, b (м) (відповідно до рис. 3.8); p = const – відносна густина опромінювання поверхні робочого тіла, яка дорівнює

$$p = \frac{2}{3\,\pi\,\lambda}\,\left[\,3\,\theta_0 + (\pi - \alpha)\,(3 - 2\,\nu_0 - \nu_1)\,\right] \quad \left(\lambda = \frac{L}{a}\right). \qquad (3.68)$$

Густина опромінювання поверхні робочого тіла будемо записувати у вигляді суми

$$q = q_1(\beta) + q_2(\beta), \qquad (3.69)$$

де $q_1(\beta)$ – густина опромінювання тепловими променями, які безпосередньо потрапляють до неї від випромінювача; $q_2(\beta)$ – густина опромінювання променями, які відбиті від рефлектора.

Перейдемо в залежності (3.69) до відносних величин:

$$p_1(\beta)=\frac{2\,a}{Q}\,q_1(\beta),\quad p_2(\beta)=\frac{2\,a}{Q}\,q_2(\beta) \tag{3.70}$$

та знайдемо, що

$$p_2(\beta)=p-p_1(\beta). \tag{3.71}$$

На ділянці *CD* півеліпса ($\beta_0 \le \beta \le \pi-\beta_0$) функція $p_1(\beta)$ дорівнює

$$p_1(\beta)=\frac{1}{\pi}\,\frac{\left[\,\chi\,\sin\beta-m\,D(\beta)\,\right]D^2(\beta)}{\left[\,m^2-2\,\chi\,m\sin\beta\,D(\beta)+\chi^2\,D^2(\beta)\,\right]D_1(\beta)}, \tag{3.72}$$

де $m=\frac{a}{b}$, $\chi=\frac{h}{a}$, $D(\beta)=\sqrt{1-\left(1-m^2\right)\cos^2\beta}$, $D_1(\beta)=\sqrt{1-\left(1-m^4\right)\cos^2\beta}$.

Поза межами цієї ділянки ($\beta<\beta_0$ або $\beta>\pi-\beta_0$) теплові промені, які поширюються безпосередньо від випромінювача, на робоче тіло не потрапляють, тобто $p_1(\beta)\equiv 0$.

Отже, залежність (3.71) дозволяє визначити необхідну густину опромінювання робочої поверхні променями, що відбиті від рефлектора.

Вище було доведено, що координати точок поверхні рефлектора та робочого тіла пов’язані між собою диференціальною залежністю

$$\frac{d\rho}{d\beta}=-\rho\,\frac{(\rho_1-\rho)\cos\varphi+\xi(\beta)}{(\rho_1+\rho)\sin\varphi-\eta(\beta)}\,\Psi(\beta), \tag{3.73}$$

де

$$\Psi(\beta)=\frac{d\varphi}{d\beta},\quad \rho=\frac{R(\beta)}{a},\quad \xi(\beta)=\frac{m\cos(\beta)}{D(\beta)},\quad \eta(\beta)=\frac{m\sin\beta}{D_1(\beta)}-\chi,$$
$$\rho_1=\sqrt{(\rho\cos\varphi-\xi(\beta))^2+(\rho\sin\varphi-\eta(\beta))^2}\ . \tag{3.74}$$

Ця залежність перетвориться в диференціальне рівняння для визначення профілю відбивача, якщо буде задано зв'язок між координатою φ будь-якої точки M відбивача та координатою M_1 робочого тіла, в яку потрапляє віддзеркалений від M тепловий промінь (відповідно до рис. 3.10).

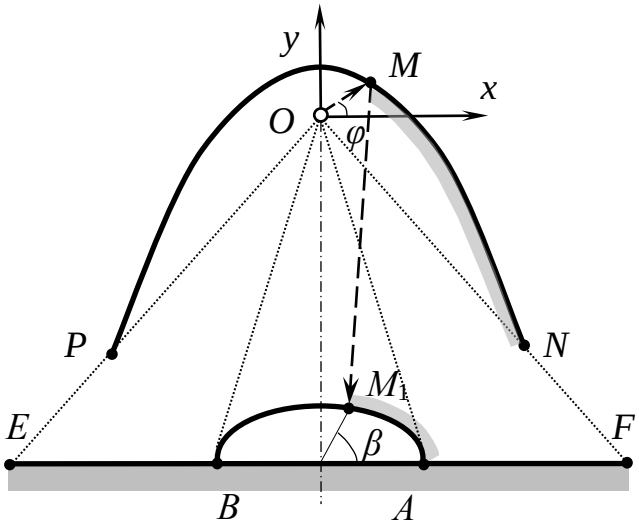


Рисунок 3.10 – Схема руху променю

Задати такий зв'язок можна багатьма способами. Скористаймося найпростішим. Для цього почнемо монотонно рухати точку M контуром рефлектора проти годинникової стрілки, починаючи від N. При цьому будемо вважати, що точка M_1 робочого тіла також буде монотонно рухатись у бік зростання кута β, починаючи від A ($\beta = 0$).

Теплота, яка за секунду віддзеркалиться від рефлектора в куті $NOM = \varphi+\frac{\pi}{2}-\alpha$, дорівнює (Вт/м)

$$Q_{\text{В}} = \frac{Q}{2\,\pi}\, I(\varphi) = \frac{Q}{2\,\pi} \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\varphi} \left[\, 1 - \nu(\varphi) \,\right] d\varphi \,. \tag{3.75}$$

Вона має розподілитися ділянкою AM_1 робочого тіла за законом

$$q_2(\beta) = \frac{Q}{2\,a}\, p_2(\beta). \tag{3.76}$$

Якщо знехтувати поглинанням енергії газовим середовищем, то

$$Q_{\text{В}} = \int\limits_{(A)}^{(M_1)} q_2(\beta)\, ds \;, \tag{3.77}$$

де ds – елемент дуги еліпса.

Раніше доведено, що

$$ds = a\; Z(\beta)\, d\beta \;, \quad Z(\beta) = m \sqrt{\frac{1 - \left(1 - m^4\right)\cos^2\beta}{\left[\, 1 - \left(1 - m^2\right)\cos^2\beta \,\right]^3}} \tag{3.78}$$

і вираз (3.77) набуває вигляду

$$Q_{\text{В}} = \frac{Q}{2\,\pi} \int\limits_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\varphi} \left[\, 1 - \nu(\varphi) \,\right] d\varphi = \frac{Q}{2} \int\limits_{0}^{\beta} p_2(\beta)\, Z(\beta)\, d\beta \,. \tag{3.79}$$

Тепер, після підставляння $\nu(\varphi)$, її вдається звести до зведеного кубічного рівняння

$$\Phi^3(\beta) + c\;\Phi(\beta) + d(\beta) = 0, \tag{3.80}$$

де

$$d(\beta)=\frac{3(\pi-\alpha)^2}{\nu_0-\nu_1}\left[(3-2\,\nu_0-\nu_1)(\pi-\alpha)-\pi\int_0^{\beta} p_2(\beta)\,Z(\beta)\,d\beta\right],$$
$$c=\frac{3(1-\nu_0)}{(\nu_0-\nu_1)}(\pi-\alpha)^2\ . \qquad (3.81)$$

Рівняння (3.80) встановлює зв'язок між змінними φ та β і легко розв'язується за допомогою відомих формул алгебри. Воно має один дійсний корінь.

Шляхом диференціювання рівняння (3.79) за змінною β знаходимо

$$\Psi(\beta)=\frac{d\varphi}{d\beta}=\frac{\pi\ \rho\ p_2(\beta)\,Z(\beta)}{(1-\nu_0)\left(3\,\Phi(\beta)^2+c\right)}, \qquad (3.82)$$

тоді залежність (3.73) перетворюється на диференціальне рівняння першого порядку.

Рівняння (3.73) розв'язувалося методом Адамса-BDF за допомогою Mathcad для півеліпса з $m = 0.5$. Бралися три початкові значення радіальної координати ρ_0 за $\varphi=\alpha-\frac{\pi}{2}$. Це, відповідно, $\rho=\rho_{MAX}=\frac{OF}{a}$, $\rho=0.8\ \rho_{MAX}$, $\rho=0.5\ \rho_{MAX}$. Для інших змінних бралися такі значення: $\chi = 4$, $EF/a = 6$ (рис. 3.8).

Розрахунки показали, що врахування втрат частини теплової енергії поверхнею рефлектора майже не відбивається на формі його перерізу, тобто його практично неможливо відрізнити від рефлектора, що на 100% віддзеркалює енергію. Щоб дослідити цей вплив, розглянуто випадок, коли $\nu_0 = 0.5$, а $\nu_1 = 0.05$.

На рисунку 3.11 наведено сім'ю таких відбивачів для різних початкових ρ_0 (суцільні криві). Координатна сітка відповідає відносним розмірам теплотехнічної системи.

Для порівняння з попередніми результатами на рисунку 3.11 пунктиром зображено профілі, що забезпечують рівномірне опромінювання цього приймача за відсутності втрат енергії на відбивачі. Очевидно, що зміна профілю є настільки незначною навіть за малоймовірних 50% втрат потоку в середині відбивача, що нею можна нехтувати (втрати потоку впливають на величину сумарної густини опромінення, але в обох випадках сумарний потік рівномірно розподіляється поверхнею півеліпсу).

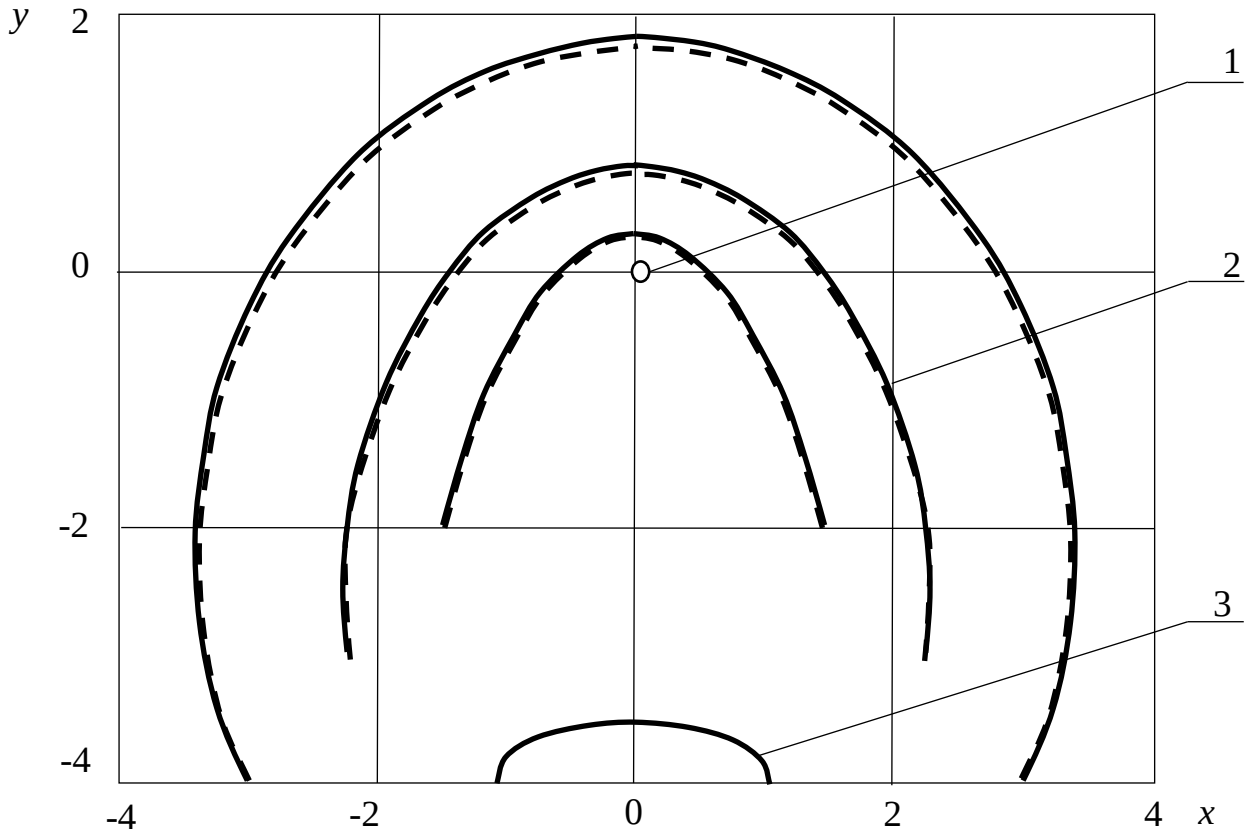


Рисунок 3.11 – Верхнє рівномірне опромінення півеліпсу:

1 – випромінювач; 2 – відбивач; 3 – приймач;

——— – з урахуванням втрат енергії; – – – ·– без урахування втрат енергії

3.4 Моделювання всебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного профілю

Визначимо форму фрагментованого відбивача теплотехнічної системи для всебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного перерізу (з різним значенням густини променевого потоку на верхній та нижній поверхнях), за використання теплового потоку, який у попередніх розрахункових схемах (підрозділи 3.1–3.3) не потрапляв на приймач [88].

Розглянемо теплотехнічну систему (рис. 3.12), яка складається з трубчастого випромінювача 1, циліндричного відбивача 2 та приймача тепла з півеліптичною формою верхньої поверхні та пласкою нижньою 3. Із системою пов’яжемо декартову систему координат так, щоб вісь *Oz* пройшла вздовж випромінювача, а осі *Ox*, *Oy* розташувалися так, як це показано на рисунку.

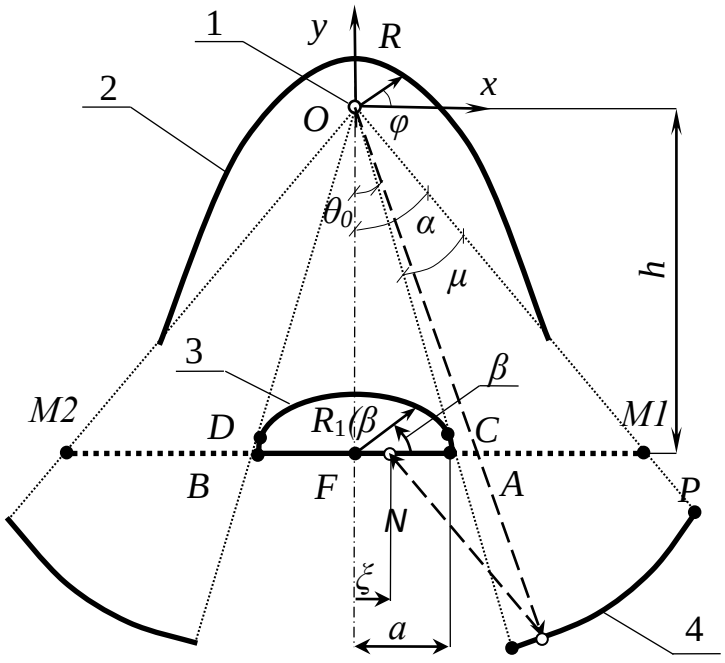


Рисунок 3.12 – Схема теплотехнічної системи

Будемо використовувати такі позначення: h – відстань від осі випромінювача до нижньої поверхні приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач AB безпосередньо від випромінювача.

Для позначення полярних координат поверхні перерізу рефлектора застосуємо символи R (м) та φ, для координат верхньої поверхні приймача – $R_1(\beta)$ (м) та β, а нижньої – декартові координати x та y.

Методику визначення профілю відбивача 2 було наведено в підрозділах 3.2 та 3.3. Тому зосередимо увагу на визначенні профілів відбивачів 4 (рис. 3.12), тобто саме тих, що забезпечуватимуть рівномірне нагрівання робочого тіла 3 знизу. Для цього використаємо тепловий потік, що не потрапляв на приймач ні безпосередньо, ні від рефлектора. Такий підхід до конструювання теплотехнічних установок уможливить обробку харчового продукту з усіх боків із одночасним зменшенням енерговитрат.

Очевидно, що густина теплового потоку на верхній поверхні буде в рази перевищувати густину на нижній, але це співвідношення можна регулювати зміною геометричних параметрів робочої камери (кути α, θ_0).

Вважаємо, що під час переміщення точки відбивання теплового променю вздовж поверхні відбивача від N до P у бік зростання полярного кута φ точка, куди потрапляє відбитий промінь, рухатиметься його нижньою поверхнею від F до A у напрямку збільшення координати ξ (рис. 3.12).

Будемо проектувати установку таким чином, щоб тепловий потік, що поширюється в будь-якому з кутів $\mu = \alpha - \theta_0$ (рис. 3.12), відбивався лише від одного з фрагментів відбивача й рівномірно опромінював ближчу половину нижньої площини приймача.

Позначимо літерою Q енергію від одного метра джерела (Вт/м). Уся теплота, що потрапляє на один погонний метр нижньої половини поверхні за одну секунду, дорівнює

$$Q_Z = \frac{Q}{2\pi}\,\mu\,. \tag{3.83}$$

Ця теплота рівномірно розподіляється з густиною (Вт/м^2)

$$q_Z(\xi) = \frac{Q_Z}{a} = \frac{Q}{2\,\pi\,a}\,\mu\,. \tag{3.84}$$

Таким чином, відносна густина опромінення за відсутності прямого опромінення забезпечується променями, відбитими знизу:

$$p_Z(\xi) = \frac{q_Z(\xi)\,a}{Q} = \frac{1}{2\,\pi}\,\mu\,. \tag{3.85}$$

Ділянка продукту завдовжки ξ отримує таку відбиту енергію (Вт/м):

$$\int_0^{\xi} q_Z(\xi)\,a\,d\xi = \int_0^{\xi} Q\;p_Z(\xi)\,d\xi = Q\int_0^{\xi} p_Z(\xi)\,d\xi\,. \tag{3.86}$$

Ця енергія надходить після відбивання в куті $\varphi + \frac{\pi}{2} - \theta_0$ і дорівнює $\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \theta_0\right)$. Прирівнюючи її до залежності (3.86), отримаємо

$$\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \theta_0\right) = Q\int_0^{\xi} p_Z(\xi)\,d\xi\,. \tag{3.87}$$

Беручи до уваги (3.85), отримуємо

$$\varphi = \theta_0 - \frac{\pi}{2} + 2\,\pi \int_0^{\xi} p_Z(\xi)\, d\xi = \theta_0 - \frac{\pi}{2} + \int_0^{\xi} \mu\, d\xi\ . \qquad (3.88)$$

Для визначення форми відбивача маємо таке диференціальне рівняння:

$$\frac{d\rho}{d\xi} = -\rho\, \frac{(\rho_1 - \rho)\cos\varphi + \xi}{(\rho_1 + \rho)\sin\varphi - \eta}\, \frac{d\varphi}{d\xi}\ , \qquad (3.89)$$

де $\eta = -\chi$, $\varphi = \varphi(\xi)$, $\rho_1 = \sqrt{(\rho\,\cos\varphi - \xi_Z)^2 + (\rho\,\sin\varphi - \eta)^2}$, $\rho = R/a$.

Для визначення форми нижньої частини відбивача рівняння (3.89) розв'язувалося за допомогою Mathcad універсальним гібридним методом Адамса-BDF для півеліпса зі співвідношенням малої осі до великої 0.5 та такими початковими значеннями ρ_0 відносної радіальної координати ρ за $\varphi = \theta_0 - \frac{\pi}{2}$: $\rho_{01} = 1.25\,\rho_{MAX}$, $\rho_{02} = 1.5\,\rho_{MAX}$, де ρ_{MAX} – відносна відстань від точки O до точки M_1. Для інших змінних бралися такі значення: $\chi = 4$, $M_1M_2 / a = 6$ (рис. 3.12).

Відповідно до цих результатів розроблено низку фрагментованих відбивачів, які показано на рисунку 3.13 (координатна сітка відповідає відносним розмірам теплотехнічної системи). Вони забезпечують рівномірний тепловий потік на нижній площині теплоприймача.

На рисунку 3.14 (координатна сітка відповідає відносним розмірам теплотехнічної системи) наведено фрагментований відбивач для всебічного рівномірного опромінення теплоприймача з півеліптичною верхньою та пласкою нижньою поверхнями. Для верхньої частини відбивача використано наведену раніше методику для півеліпса зі співвідношенням малої осі до великої 0.5 та такими початковими значеннями ρ_0 відносної радіальної координати ρ за $\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}$: $\rho_{01} = 0.5\,\rho_{MAX}$, $\rho_{02} = 0.75\,\rho_{MAX}$, $\rho_{03} = \rho_{MAX}$. Для нижньої частини взято ближчий фрагментований відбивач із рисунка 3.13.

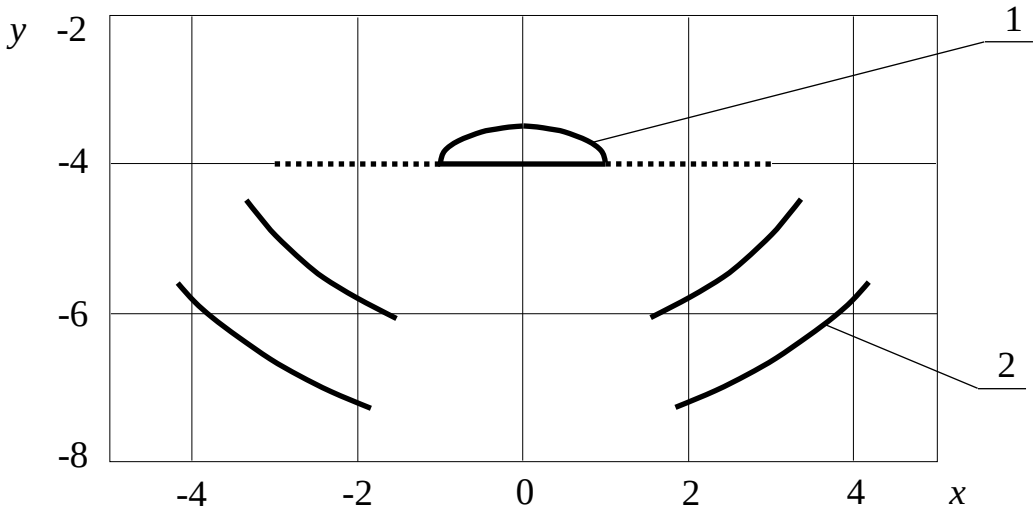


Рисунок 3.13 – Рівномірне опромінення нижньої площини півеліпса:
1 – приймач; 2 – відбивач

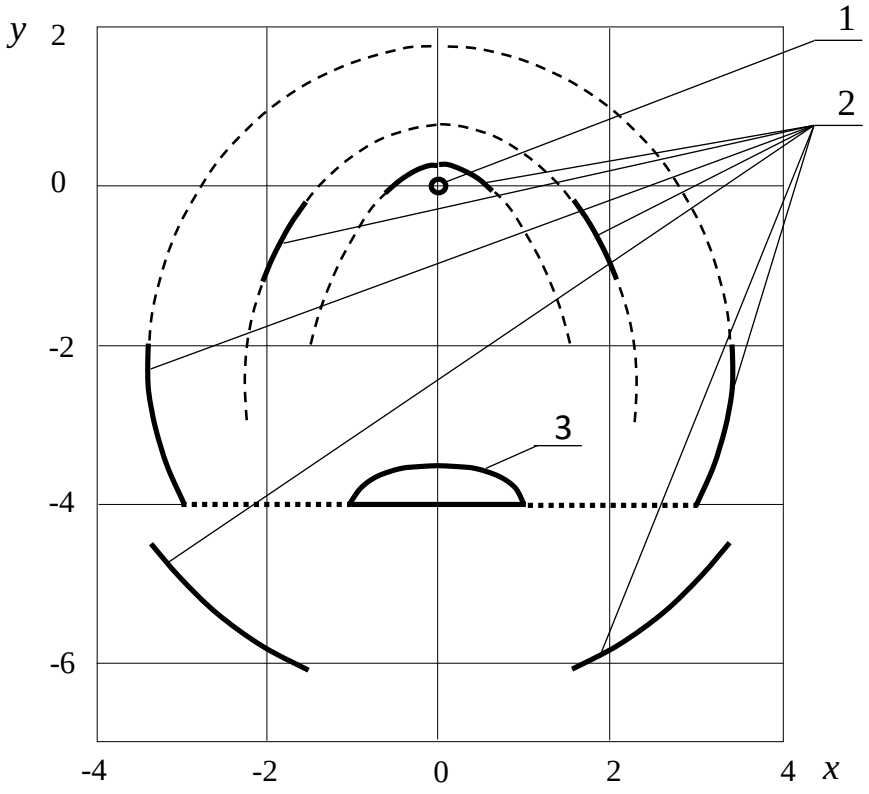


Рисунок 3.14 – Всебічне рівномірне опромінення півеліпса:
1 – випромінювач; 2 – фрагментований відбивач; 3 – приймач

3.5 Моделювання усебічного рівномірного опромінення приймача еліптичного профілю

Знайдемо форму фрагментованого відбивача, що забезпечить усебічне рівномірне обігрівання продукту еліптичного перерізу (з різними значеннями поверхневої густини опромінювання), за використання теплового потоку, який у попередніх розрахункових схемах (підрозділи 3.1–3.3) не потрапляв на приймач [89].

Розглянемо теплотехнічну систему (рис. 3.15), яка складається з трубчастого випромінювача 1, верхнього та нижнього відбивачів 2 і 4 та приймача тепла з еліптичною формою перерізу 3. Із конструкцією пов’яжемо декартову систему координат так, щоб вісь *Oz* пройшла вздовж випромінювача, а осі *Ox*, *Oy* розташувалися так, як це показано на рисунку 3.15.

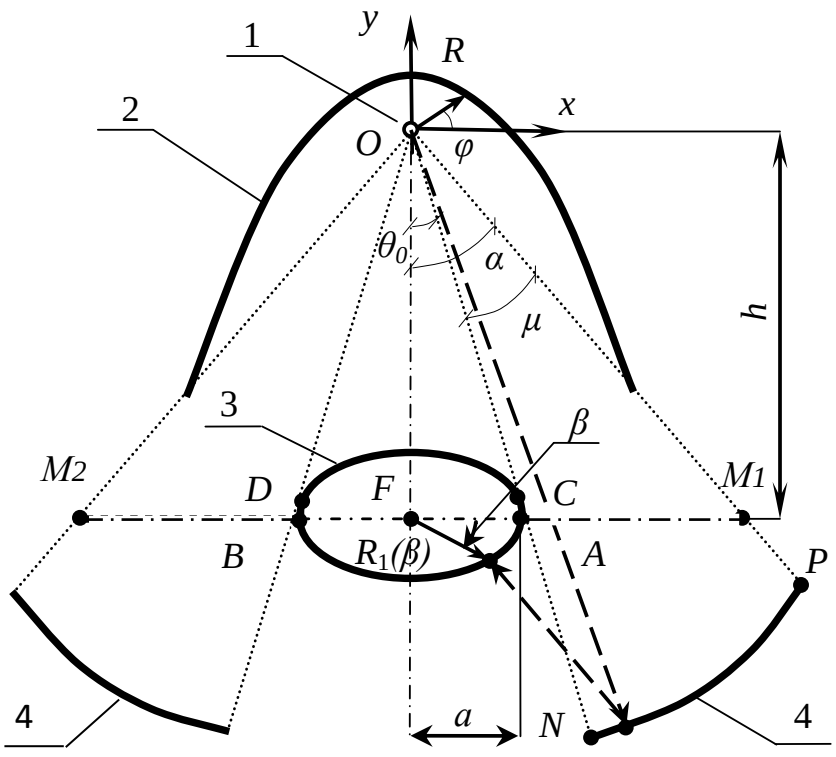


Рисунок 3.15 – Схема теплотехнічної системи

Будемо використовувати такі позначення: h – відстань від осі випромінювача до нижньої поверхні приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапили на відбивач; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапили на приймач AB безпосередньо від випромінювача.

Для позначення полярних координат поверхонь рефлекторів 2 і 4 будемо застосовувати символи R (м) та φ, для координат верхньої та нижньої поверхонь продукту 3 – $R_1(\beta)$ (м) та β.

Методику визначення профілю відбивача 2 для опромінення верхньої поверхні продукту було запропоновано в підрозділах 3.2 та 3.3. У цій розробці будемо використовувати тепловий потік, що в означених схемах не потрапляв на приймач, і визначимо профіль відбивача 4 (рис. 3.15). Як і в попередньому підрозділі 3.4, такий підхід дозволить одночасно обробляти харчовий продукт з усіх боків зі зменшенням енерговитрат, але продукт має еліптичний переріз.

Шляхом зміни значень кутів α, θ_0 можна регулювати відношення густини теплового потоку на верхній та нижній поверхнях приймача, це може стати предметом додаткових досліджень.

Для зменшення кількості змінних у подальших дослідженнях зручно перейти до відносних величин

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{y}{a}, \quad \chi = \frac{h}{a}, \tag{3.90}$$

де a – велика піввісь еліпса (м) (рис. 3.15).

Оскільки конструкція, що проектується, є симетричною, подальші дослідження вестимемо для правої частини відбивача 4.

Вважаємо, що під час переміщення точки відбивання теплового променю поверхнею рефлектора від P до N у бік зменшення полярного кута

φ, точка, куди потрапляє відбитий промінь, монотонно рухатиметься його нижньою поверхнею від A до F у напрямку зменшення кута β (рис. 3.15).

Установку проектуватимемо таким чином, щоб тепловий потік, що відбивається від правого відбивача 4 (рис. 3.15), рівномірно опромінював ближчу половину нижньої поверхні приймача.

Позначимо літерою Q енергію від одного метра джерела (Вт/м). Уся теплота, що потрапляє на половину нижньої поверхні продукту за одну секунду, дорівнює

$$Q_Z = \frac{Q}{2\,\pi}\,\mu\,. \tag{3.91}$$

Вона рівномірно розподіляється з питомою густиною (Вт/м^2)

$$q_Z(\beta) = \frac{2\,Q_Z}{L} = \frac{Q}{\pi\,L}\,\mu\,, \tag{3.92}$$

де L – довжина половини еліпса (м).

Таким чином, відносна густина опромінювання (як і в попередніх дослідженнях) обчислюється за формулою

$$p_Z(\beta) = \frac{q_Z(\beta)\,a}{Q} = \frac{a}{\pi\,L}\,\mu\,. \tag{3.93}$$

Як і в попередніх підрозділах 3.2–3.4, позначимо відносну довжину половини еліпса символом $\lambda = \frac{L}{a}$.

Таким чином, відносна густина опромінювання за відсутності прямого опромінювання забезпечується променями, відбитими від правого відбивача 4:

$$p_Z(\beta)=\frac{1}{\pi\ \lambda}\ \mu\ . \tag{3.94}$$

У куті β продукт отримає таку віддзеркалену енергію (Вт/м):

$$\int_0^{\beta} q_Z(\beta)\ ds=\frac{Q}{a}\int_0^{\beta} p_Z(\beta)\ ds=Q\int_0^{\beta} p_Z(\beta)\ d\zeta=Q\int_0^{\beta} p_Z(\beta)\ Z(\beta)\ d\beta\ , \tag{3.95}$$

де $Z(\beta)=m\sqrt{\frac{1-\left(1-m^4\right)\cos^2\beta}{\left[1-\left(1-m^2\right)\cos^2\beta\right]^3}}$, m – відношення малої осі еліпса до великої.

Ця енергія надходить після віддзеркалення в куті $\varphi+\frac{\pi}{2}-\alpha$ і дорівнює $\frac{Q}{2\pi}\left(\varphi+\frac{\pi}{2}-\alpha\right)$. Прирівнюючи її до залежності (3.95), отримуємо

$$\varphi=\alpha-\frac{\pi}{2}+2\ \pi\ \int_0^{\beta} p_Z(\beta)\ d\beta\ . \tag{3.96}$$

Форму відбивача можна визначити за диференціальним рівнянням, отриманим раніше:

$$\frac{d\rho}{d\beta}=-\rho\ \frac{(\rho_1-\rho)\cos\varphi+\xi(\beta)}{(\rho_1+\rho)\sin\ \varphi-\eta(\beta)}\ \Psi(\beta)\,, \tag{3.97}$$

де $\Psi(\beta)=\frac{d\varphi}{d\beta}=\pi\ \ p_Z(\beta)\ Z(\beta)$, $\rho_1=\sqrt{(\rho\ \cos\varphi-\xi(\beta))^2+(\rho\ \sin\varphi-\eta(\beta))^2}$, $\rho=R/a$,

$\xi(\beta)=\frac{m\cos\beta}{\sqrt{1-(1-m^2)\ \cos^2\beta}}$, $\eta(\beta)=\frac{m\sin\beta}{\sqrt{1-(1-m^2)\ \cos^2\beta}}-\chi\ .$

Для визначення форми нижньої частини відбивача рівняння (3.97) розв’язувалося за допомогою Mathcad універсальним гібридним методом Адамса-BDF для еліпса зі співвідношенням малої осі до великої m = 0.5, а також таким початковим значеннями ρ_0 відносної радіальної координати ρ за $\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}$: $\rho = 1.25\rho_{MAX}$, де ρ_{MAX} – відносна відстань від точки O до точки M_1. Для інших змінних бралися такі значення: χ = 4, M_1M_2/a = 6 (рис. 3.15).

На рисунку 3.16 (координатна сітка відповідає відносним розмірам теплотехнічної системи) наведено фрагментований відбивач для рівномірного опромінювання такого теплоприймача з еліптичними перерізом. Форму верхньої частини відбивача визначено за методикою, наведеною в підрозділі 3.2. Остаточну розрахункову програму визначення форми відбивача для рівномірного всебічного опромінювання еліпса за врахування втрат теплоти наведено у додатку В.

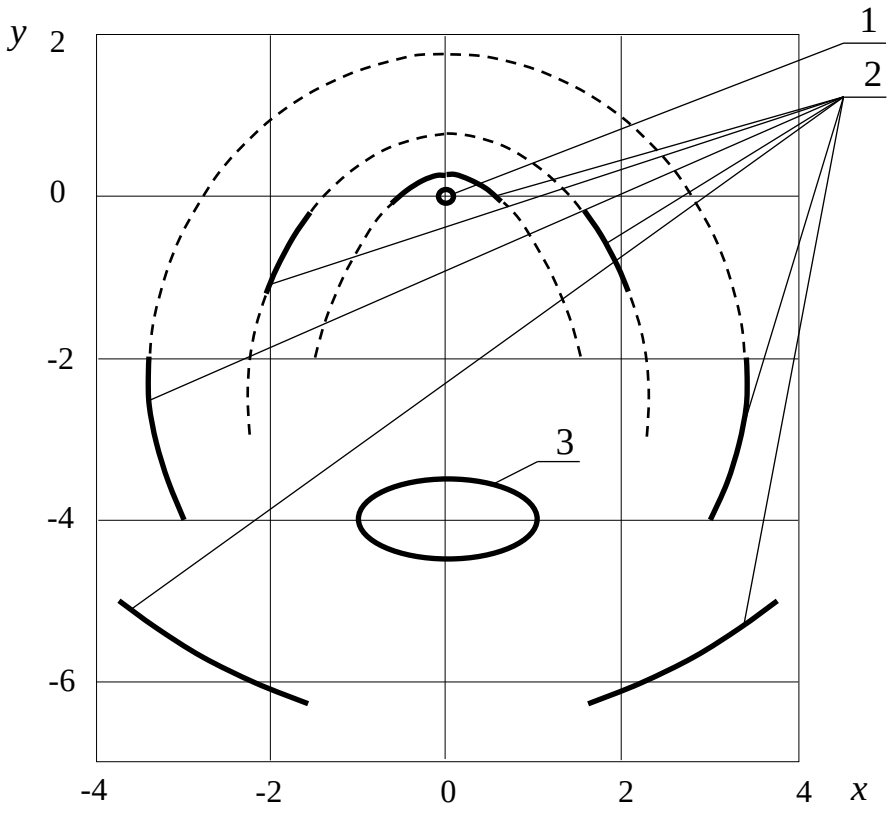


Рисунок 3.16 – Всебічне рівномірне опромінення еліпса:
1 – випромінювач; 2 – фрагментований відбивач; 3 – приймач

Висновки до розділу 3

1. Здійснено аналітичне моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймачів півкругового, півеліптичного профілю без урахування втрат теплоти на відбивачі та з ними. Проведено моделювання усебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного та еліптичного профілю, що дало розв’язок оберненої задачі теплообміну випромінюванням для визначення профілю відбивача з метою рівномірного опромінювання теплоприймача, який має опуклий переріз.

2. На основі проведеного аналітичного моделювання розроблено фрагментовані форми відбивачів, що уможливлюють як фронтальний, так і бічний доступ до продукту, беручи до уваги технологічні особливості обробки, що забезпечить під час інфрачервоної обробки рівномірний променевий потік на поверхні продукту.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОМЕНЕВОГО ТЕПЛООБМІНУ

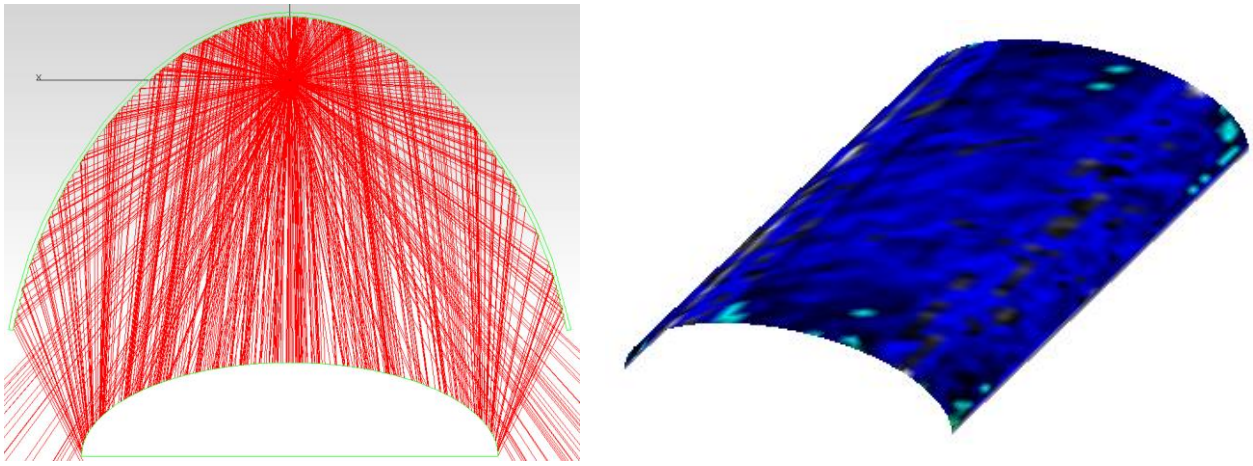
У попередньому розділі було отримано теоретичні розв’язки так званих «обернених задач» із визначення профілів відбивачів для обладнання з опуклими формами поверхонь приймачів без урахування втрат теплоти на рефлекторі та з їх урахуванням. Отже, необхідно перевірити створену методику та довести її прийнятність для проектування ІЧ-обладнання.

4.1 Верифікація створеної аналітичної моделі

Верифікація – це перевірка теоретичних розв’язків шляхом їх порівняння з дослідницькими даними, алгоритмами або програмами. Доведемо шляхом комп’ютерного моделювання доцільність використання обчислених профілів відбивачів, а також коректність отриманої раніше методики визначення таких профілів. У всіх дослідженнях використовувались приймачі тепла півеліптичного перерізу з рівномірним опромінюванням поверхні. Запропонована концепція шляхом розв’язку «оберненої задачі» за використання Mathcad надає потрібний профіль відбивача. Надалі втратами на відбивачі знехтуємо [90–92].

Для використання програмного комплексу Trace Pro візьмемо наступні параметри: випромінювач має потужність 720 Вт і довжину 1000 мм, продукт має переріз у вигляді половини еліпса завширшки 100 мм і заввишки 22.5 мм, довжина продукту 1000 мм, що відповідає перерізу півфабриката та умові розгляду пласкої задачі.

Форму рефлектора візьмемо з попередніх досліджень, виконаних у розділі 3. Спочатку бралося 500 променів. Розподіл променів у робочій камері, отриманий за таких умов, наведено на рисунку 4.1.



а *б*

Рисунок 4.1 – Розподіл променів у робочій камері:
***а* – осьова проекція; *б* – ізометрична проекція**

Очевидно, що геометрія руху променів збігається з теоретичною, але заданої кількості променів недостатньо для обчислення густини опромінювання робочої поверхні.

Для отримання реалістичної картини розподілу променевого потоку треба брати кількість променів не менше мільйона. Як виглядає опромінювання приймача, показано на рисунку 4.1 *б*. Зміна інтенсивності опромінювання подається як зміна кольорів поверхні, але навіть монохромне зображення дозволяє констатувати, що густина теплового потоку на поверхні робочого тіла є сталою величиною (наявність на рисунках місць із незначною зміною кольорів пояснюється похибками методу комп'ютерного обчислення). На рисунках 4.2 та 4.3 видно, що густина теплового потоку, який потрапляє на приймач, складає 5.5 кВт/м^2. За поземною віссю відкладаються поперечний та поздовжній перерізи теплоприймача у міліметрах, а за прямовисною – значення густини опромінювання у Вт/м^2.

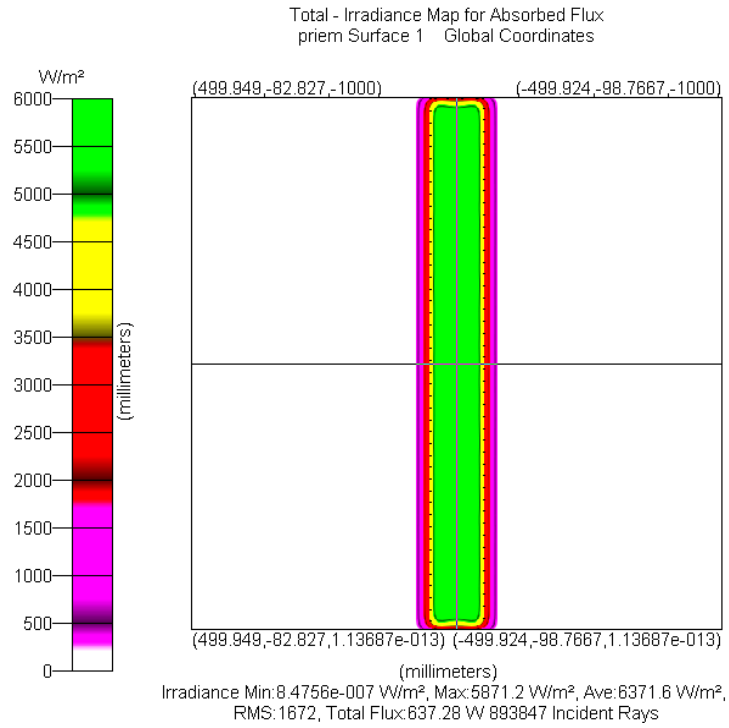


Рисунок 4.2 – Поле густини за випромінювача довжиною 1 м

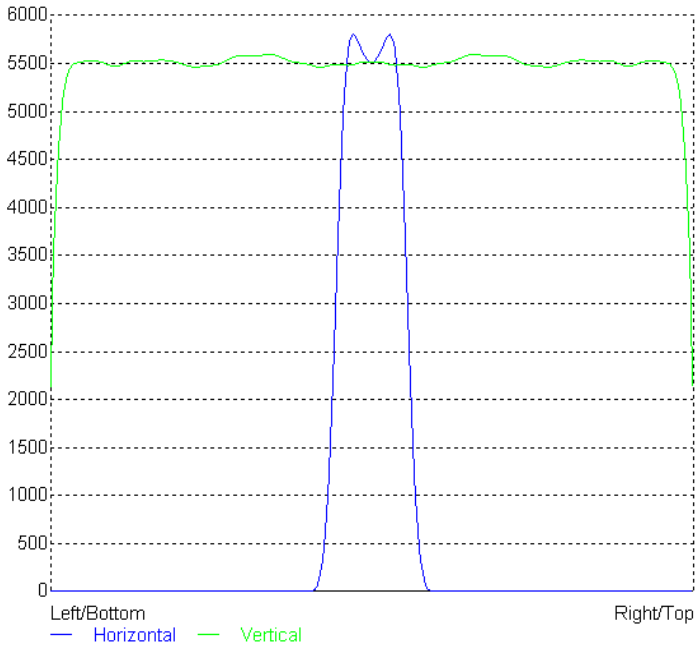


Рисунок 4.3 – Значення густини за випромінювача довжиною 1 м

Згідно з розробленою методикою (додаток Д), променевий потік має рівномірно розподілятися на еліптичній поверхні з такою густиною (Вт/м^2):

$$q(\beta) = \frac{Q}{\pi\ L}\left(\pi + \theta_0 - \alpha\right), \tag{4.1}$$

де α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на відбивач; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач; Q – потужність випромінювача, Вт; L – довжина половини еліпса, м.

Відповідно до характеристик експериментального апарату та обраного перерізу продукту (рис. 2.3) Q = 720 Вт; α = 0.838; θ_0 0.521; L = 0.118 м. Зауважимо, що відповідно до розв'язку плаского задачі у знаменнику присутня довжина 1 м. За цих умов густина променевого потоку складає

$$q(\beta) \approx \frac{720}{3.14 \cdot 0.118 \cdot 1}\left(3.14 + 0.521 - 0.838\right) = 5.49 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2, \tag{4.2}$$

що відповідає комп'ютерному розв'язку. Таким чином, теоретичні розв'язки, наведені в попередньому розділі, є правильними.

В реальному обладнанні не використовують випромінювач довжиною 1 метр. Визначимо для обраної робочої камери характер та значення променевого потоку за умови, що довжина випромінювача складає 250 мм. Довжина продукту того ж перерізу становить 200 мм.

Проекція розподілу променів на горизонтальну площину за таких умов показана на рисунках 4.4 та 4.5. Видно, що густина теплового потоку, який потрапляє на плаский приймач, складає 22 кВт/м^2, що є прийнятним для жарення м'ясних напівфабрикатів [7; 8]. Це чотирикратне зростання густини потоку зумовлено зменшенням у ті ж чотири рази довжини випромінювача (з 1000 мм у моделі до 250 мм у апараті).

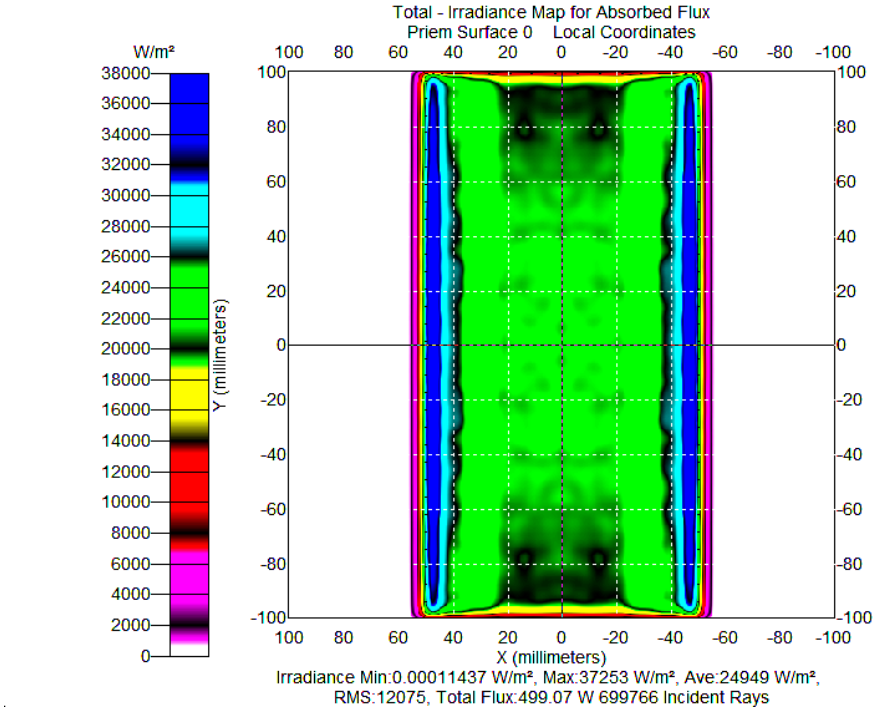


Рисунок 4.4 – Поле густини за випромінювача довжиною 0.25 м

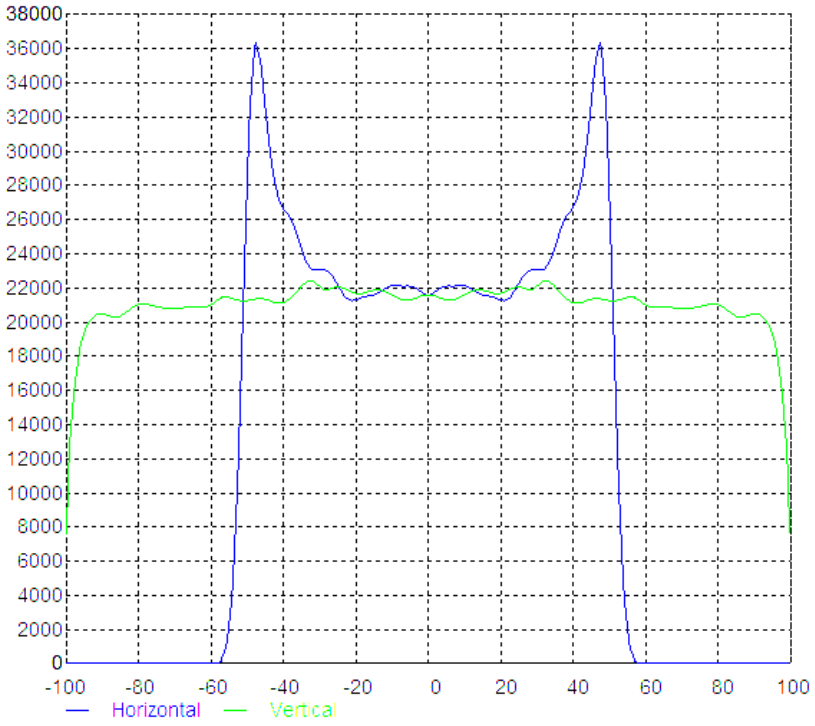


Рисунок 4.5 – Значення густини за випромінювача довжиною 0.25 м

Визначимо розподіл променевого потоку з тим же відбивачем за умови, що бічні стінки апарату не відбивають променевий потік. Це, вочевидь, стане причиною зменшення щільності опромінювання на консолях випромінювача, але, по-перше, реальний продукт зазвичай коротший за випромінювач, по-друге, конструкція апарату спрощується та дешевшає за відсутності дзеркальних бічних стінок.

Картину опромінення наведено на рисунках 4.6 та 4.7, з яких зрозуміло, що значення щільності променевого потоку становить 20 кВт/м^2 і спадає на краях продукту до 16 кВт/м^2. Використання потужнішого випромінювача дозволить, беручи до уваги неминучі за реального виробництва похибки виготовлення та монтажу, забезпечити значення та розподіл променевого потоку, що припустимі для жаріння м’ясних напівфабрикатів. Зокрема, використання випромінювача потужністю 1 кВт за формулою 4.1 уможливлює густину потоку значенням 29.8 кВт/м^2.

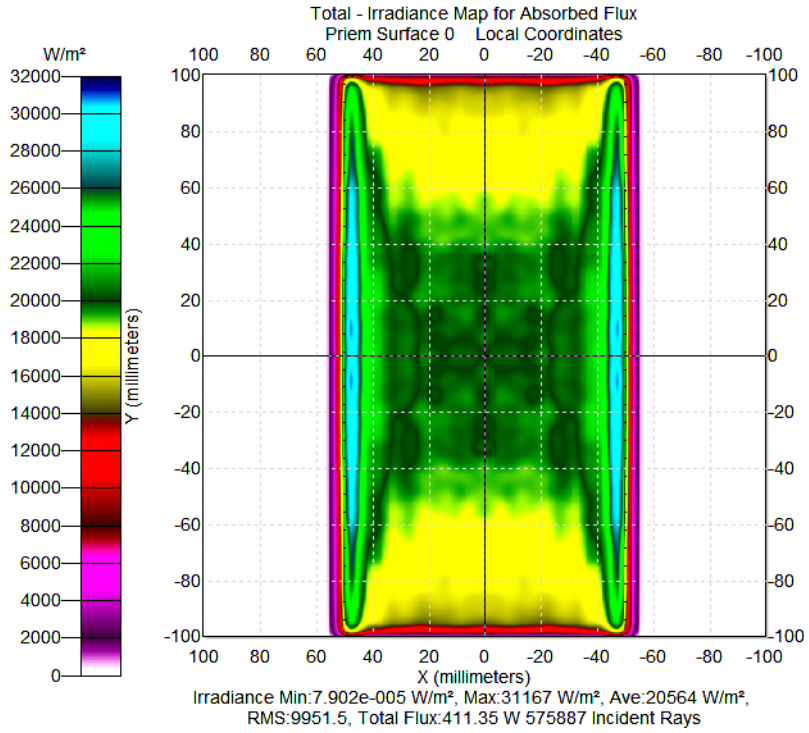


Рисунок 4.6 – Поле густини за випромінювача довжиною 0.25 м (без дзеркальних бічних стінок)

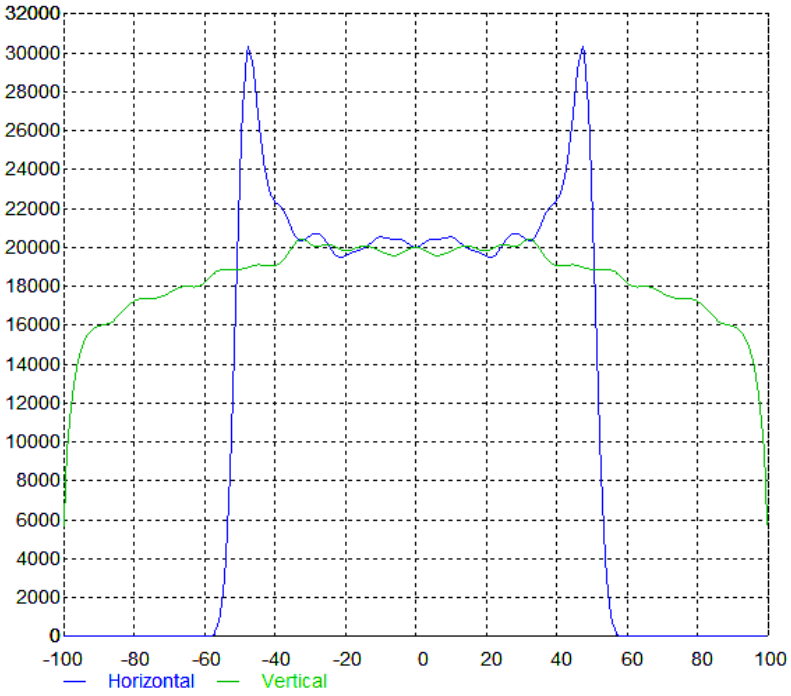


Рисунок 4.7 – Значення густини за випромінювача довжиною 0.25 м (без дзеркальних бічних стінок)

Вимірювання температури за допомогою експериментального апарату та обчислення за допомогою Mathcad надало середні значення температури з довірчим інтервалом $\pm 3°C$ (рис. 4.8), за якими відповідно до підрозділу 2.2 було отримано значення густини опромінювання (рис. 4.9). Програми оцінки результатів вимірювання температури та визначення густини опромінення наведено у додатках А та Б.

$$TC := \begin{pmatrix} 520 & 441 & 522 \\ 560 & 481 & 562 \\ 570 & 491 & 572 \\ 560 & 481 & 562 \\ 520 & 441 & 522 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.8 – Розподіл температури (°C) поземною дотичною до теплоприймача поверхнею за фізичного експерименту

$$qпр = \begin{pmatrix} 2.336 \times 10^4 & 1.535 \times 10^4 & 2.359 \times 10^4 \\ 2.844 \times 10^4 & 1.909 \times 10^4 & 2.871 \times 10^4 \\ 2.983 \times 10^4 & 2.012 \times 10^4 & 3.011 \times 10^4 \\ 2.844 \times 10^4 & 1.909 \times 10^4 & 2.871 \times 10^4 \\ 2.336 \times 10^4 & 1.535 \times 10^4 & 2.359 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.9 – Розподіл густини променевого потоку (Вт/м^2) поземною дотичною до теплоприймача поверхнею за фізичного експерименту

Відповідно до розробленої методики профілювання відбивачів променевого потоку, за цих параметрів теплотехнічної системи густина опромінювання на поверхні приймача півеліптичного перерізу становить 20 кВт/м^2.

Порівняння отриманих результатів фізичних (рис. 4.9) та комп'ютерних експериментів (рис. 4.6, 4.7) із попередніми теоретичними дослідженнями доводить прийнятність створеної методики профілювання відбивача променевого потоку. Очевидно, що для отримання більш виваженої інформації треба використовувати значно щільніше розташування термопар, що призведе до ускладнення експериментальної частини, і цього можна уникнути за використання комп'ютерного експерименту.

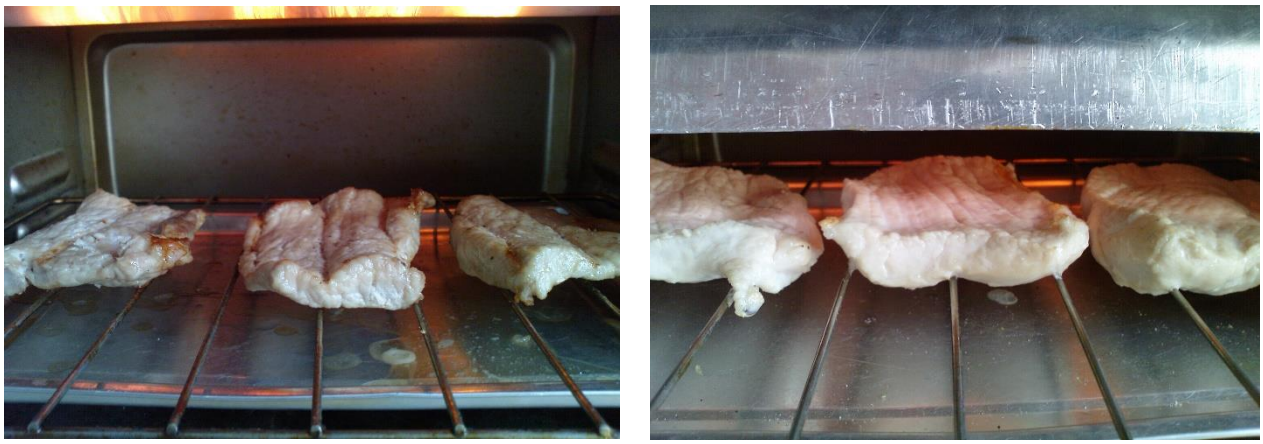
Отже, за використання комп'ютерного моделювання у TracePro та Mathcad доведено доцільність використання відбивача та виконано верифікацію теоретичної методики визначення його профілю.

4.2 Валідація створеної аналітичної моделі

Валідація – це об’єктивне підтвердження того, що вимоги конкретного використання виконані вірно та в повному обсязі, а мета досягнута. Перевіримо отриману методику, використовуючи експериментальний апарат для жарення м’ясних напівфабрикатів [93].

Мікробіологічні показники відібраних напівфабрикатів відповідали вимогам, наведеним у ДСТУ 4437:2005 [69].

Для жарення натуральних порційних напівфабрикатів відібрано яловичину з вирізки, нарізано шматками завширшки 100 мм і завтовшки 20…25 мм, злегка відбито. Посолені та поперчені напівфабрикати (біфштекси) викладено на ґрати під випромінювачем, під ґрати встановлено піддон для збирання жиру (рис. 4.10). Великий порційний шматок (лангет) посолено, поперчено і підсмажено в піддоні (рис. 4.11) [94].



а *б*

Рисунок 4.10 – Жарення на ґратах: *а* – без відбивача; *б* – із відбивачем

а *б*

Рисунок 4.11 – Жарення у піддоні: *а* – без відбивача; *б* – із відбивачем

Якість готових виробів із м’яса яловичини знежиленої визначалася після ІЧ-жарення в експериментальному апараті з відбивачем та без нього до температури в центрі продукту 75 °С та темперування тривалістю 2 хвилини.

Результати визначення вмісту патогенної мікрофлори (бактерії групи кишкової палички (БГКП), Proteus, Staphylococcus aureus, Salmonella, Listeria monocytogenes) та кількості колонієутворюючих одиниць (КУО) мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФАМ) у готовому продукті наведені в таблиці 4.1. Встановлено, що у готовому продукті патогенні та хвороботворні організми відсутні. Кількість КУО МАФАМ у готовому продукті не перевищує допустимої.

Продукти, приготовані в експериментальному апараті без відбивача та з відбивачем, показано на рисунках 4.12 та 4.13. Випромінювач вимикався за досягання температури 75 °С всередині продукту, що визначалася за допомогою термопари хромель-копель, після чого відбувалося темперування протягом 2 хвилин. Готовність визначалася проколюванням кухарською голкою, яка легко входила в продукт. Із готових виробів виділявся прозорий сік без кольору.

Таблиця 4.1

Результати дослідження якості готових виробів за мікробіологічними показниками

Санітарно-бактеріологічна характеристика	Назва зразка			
	ІЧ-жарення без відбивача		ІЧ-жарення з відбивачем	
	норматив	фактично	норматив	фактично
БГКП в 1.0 г	не допускаються	не виявлено	не допускаються	не виявлено
Бактерії роду Proteus в 0.1 г	не допускаються	не виявлено	не допускаються	не виявлено
Staphylococcus aureus в 1.0 г	не допускаються	не виявлено	не допускаються	не виявлено
Патогенні м.о., в т.ч. Salmonella в 25 г	не допускаються	не виявлено	не допускаються	не виявлено
Listeria monocytogenes в 25 г	не допускаються	не виявлено	не допускаються	не виявлено
МАФАМ, КУО в 1 г	не більше $1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	не більше $1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$

а *б*

Рисунок 4.12 – Продукт, отриманий жаренням на ґратах:
***а* – без відбивача; *б* – із відбивачем**

а *б*

Рисунок 4.13 – Продукт, отриманий жаренням у піддоні:
***а* – без відбивача; *б* – із відбивачем**

В експериментальному апараті без відбивача продукт смажився до готовності 15 хвилин. Продукт отримував світло-брунатну нерівномірну скоринку, колір на розрізі – сірий. Консистенція – неоднорідна, м’ясо надмірно пружне (наче не пропечене), соковитість значна. Запах приємний та натуральний. Смак приємний, помірно солонуватий. Сторонніх присмаків та запахів нема.

В експериментальному апараті з відбивачем продукт смажився до готовності 10 хвилин. Продукт отримував золотаво-брунатну рівномірну скоринку, колір на розрізі – сірий. Консистенція – ніжна, однорідна, м’ясо рівномірно пропечене, соковитість помірна. Запах приємний та натуральний. Смак приємний, помірно солонуватий. Сторонніх присмаків та запахів нема.

Якість отриманого продукту з яловичини, жареного в експериментальному 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 з урахуванням коефіцієнту вагомості [71] (табл. 4.2). За результатами органолептичної оцінки побудовано профілограму (рис. 4.14).

Таблиця 4.2

Результати органолептичної оцінки якості готових виробів

Органолептичні показники	Коефіцієнт вагомості	Спосіб ІЧ-жарення	
		без відбивача	з відбивачем
Зовнішній вигляд	0.2	3	4
Колір на поверхні	0.2	3	4
Колір на розрізі	0.2	4	5
Консистенція	0.2	4	5
Запах	0.1	5	5
Смак	0.1	5	5
Середній бал із урахуванням коефіцієнту вагомості	1	3.8	4.6

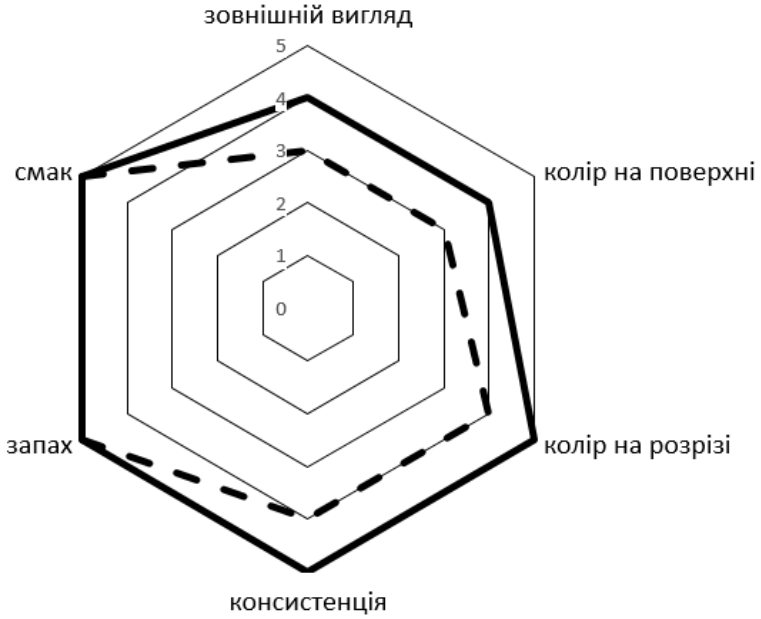


Рисунок 4.14 – Профілограма органолептичної оцінки якості готових виробів:
——— – жарення з відбивачем; – – – · – жарення без відбивача

Отже, використання в експериментальному апараті спрофільованого відбивача скорочує тривалість жарення натуральних порційних напівфабрикатів з яловичини на 1 – 10 / 15 = 1 – 0.67 = 0.33, тобто на 33 %, додатково покращуючи зовнішній вигляд, консистенцію та колір виробу на поверхні та розрізі.

Вихід готового продукту за жарення без відбивача променевого потоку становив:

$$z = \frac{m_{ГП}}{m_{ПФ}} = \frac{0.27}{0.4} = 0.675 \ , \qquad (4.3)$$

де $m_{ГП} = 0.27$ кг – маса готового продукту; $m_{НФ} = 0.4$ кг – маса напівфабрикату.

Втрати маси продукту під час інфрачервоного жарення без відбивача променевого потоку склали $1 – z = 1 – 0.675 = 0.325$, тобто 33 %.

Таким чином, реальне жарення біфштексів та лангетів у експериментальному апараті з відбивачем доводить прийнятність створеної методики для проектування ІЧ-обладнання харчових виробництв.

4.3 Розробка апарата з рефлектором для інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів

Апарат для жаріння харчової продукції має відповідати наступним головним вимогам:

– технологічні вимоги, тобто можливість реалізації раціональних процесів жаріння за мінімальних витрат сировини та високої якості продукту;

– енергетичні вимоги, тобто зниження питомих витрат електроенергії на реалізацію технологічного процесу жаріння.

Конструкційною реалізацією створеної методики з використанням програмного продукту в Mathcad став апарат для ІЧ-жарення м’ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1 [95–97] (додаток Ж), призначений для жарення м’ясних порційних напівфабрикатів шляхом ІЧ-нагрівання із застосуванням випромінювача та відбивача променевого потоку (рис. 4.15).

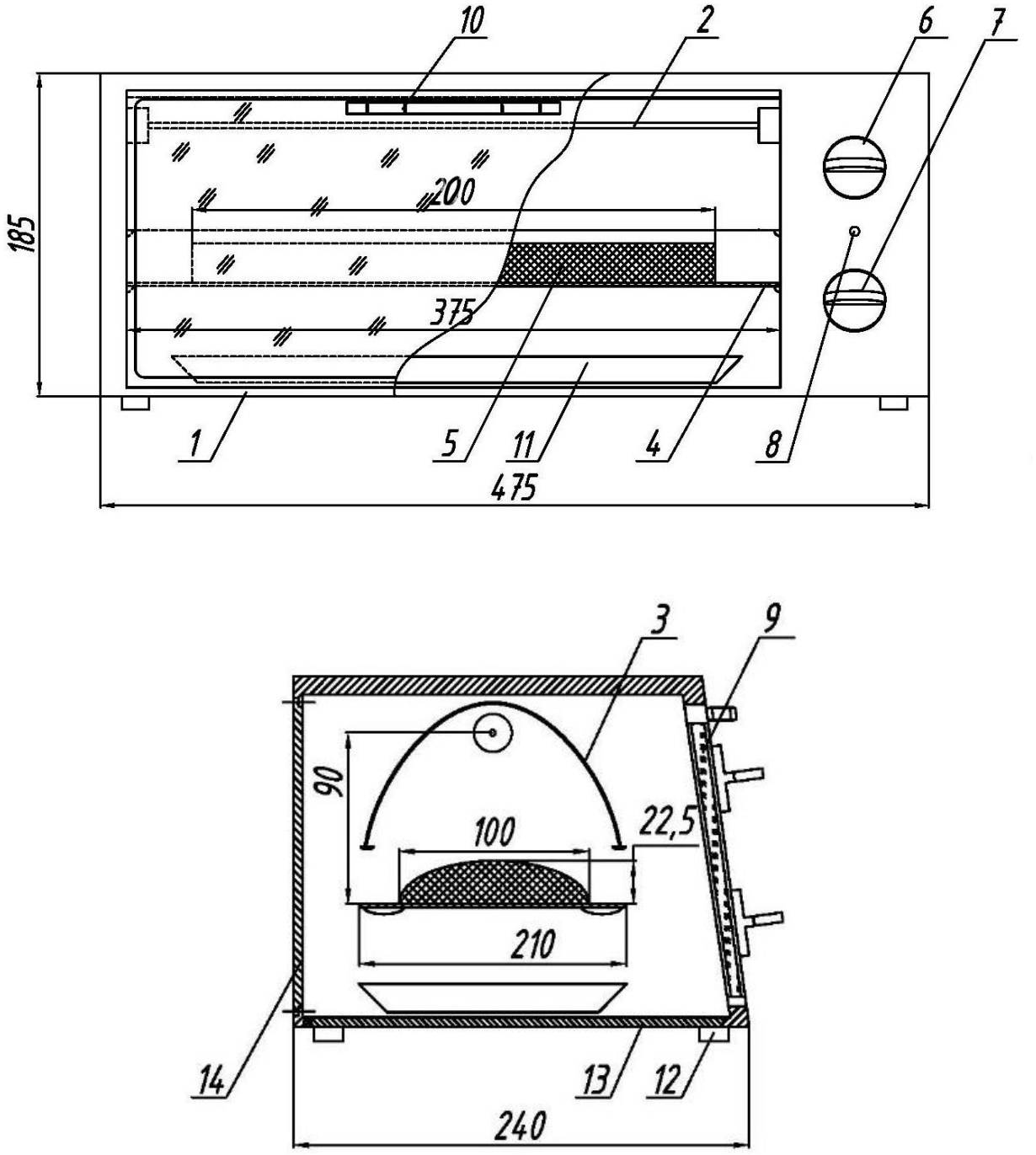


Рисунок 4.15 – Загальний вигляд апарата АРЖМ-0.07-1:

***1* – корпус; *2* – випромінювач; *3* – рефлектор; *4* – грати;**

***5* – продукт; *6* – регулятор потужності; *7* – таймер;**

***8* – індикаторна лампа; *9* – скляні дверцята; *10* – ручка дверцят;**

***11* – деко; *12* – ніжки; *13* – відкидний піддон; *14* – знімна кришка**

Апарат є робочою камерою *1* із неіржавіючої сталі у вигляді прямокутного паралелепіпеда з незначним ухилом на передньому торці, з термостійкими скляними дверцятами *9* із ручкою *10*, відкидним піддоном *13* на нижньому торці та знімною кришкою *14* на задньому. Дверцята призначені для завантаження та вивантаження продукції, а також її огляду під час жарення. Відкидний піддон призначається для полегшення доступу в робочу камеру з метою монтажу та сервісу пристрою. Задня стінка робочої камери знімна на гвинтах. На зовнішньому нижньому периметрі корпусу встановлено чотири ніжки *12*, щоб убезпечити апарат від безпосереднього контакту з опорною поверхнею.

Усередині корпусу на бічних поверхнях 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. Сталеві ґрати (вміст хрому не менше 13%, що робить матеріал інертним до впливу харчових продуктів) розміром 375х210 мм установлюються на відстані 90 мм від осі випромінювача *2*. Деко з нержавіючої сталі має розміри 340х180 мм, висота бортів – 5 мм.

Як ІЧ-нагрівач *2* використано випромінювач КИ 220-1000-1, у якого напруга живлення 220 В, потужність 1000 Вт, довжина спіральної ділянки тіла розжарювання 260 мм, діаметр скляної трубки 10.75 мм, довжина трубчастої частини 295 мм.

Рефлектор *3* виготовлено з листа сталі неіржавіючої 12Х18Н10Т (AISI 304) ГОСТ 5632-72 розмірами 275х214 мм завтовшки 1 мм, що відповідає довжині випромінювача та ширині робочої камери, а також визначається розв’язанням оберненої задачі опромінювання для цієї теплової системи. Поверхня рефлектора шліфована та полірована. За визначених розмірів та товщини маса відбивача зі сталі густиною 7920 кг/м^3 становить 0.5 кг.

На панелі керування розташовано регулятор потужності *6*, таймер *7* та індикаторну лампу *8*. Регулятор потужності призначений для встановлення теплового режиму. Реле таймера з функцією ввімкнення та вимкнення апарата дозволяє встановлювати тривалість процесу жарення фіксовано до 15 хвилин або безперервно. Індикаторна лампа вказує на роботоздатність пристрою і процес, що відбувається.

Рівномірне сумарне опромінення продукту забезпечує рефлектор, профіль якого, визначений за розробленою методикою і обчислений з використанням створеного програмного продукту в комплексі Mathcad (додаток Д), показано на рисунку 4.16 (координатну сітку наведено в мм).

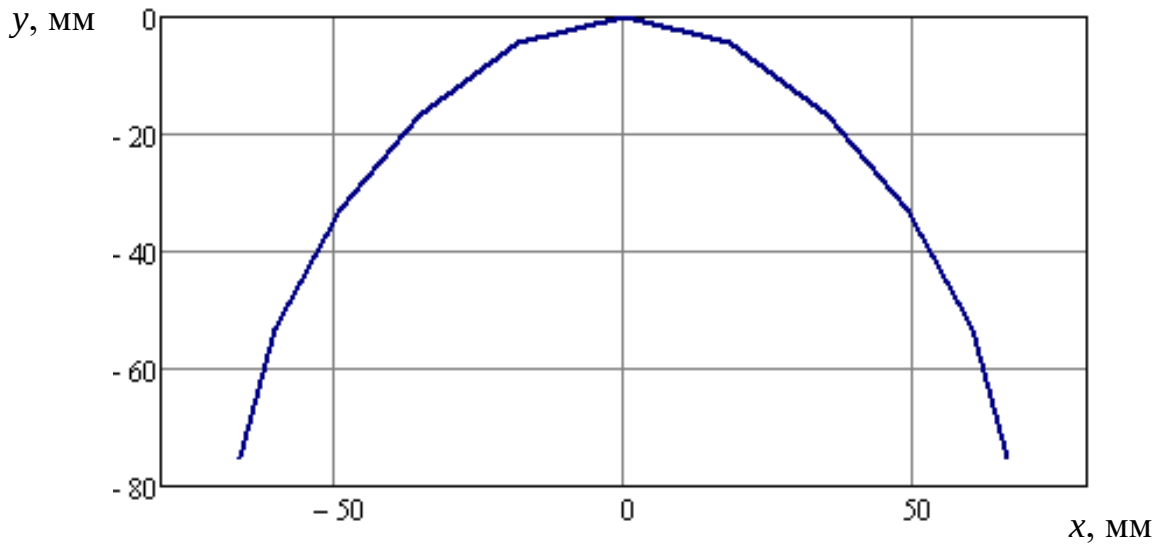


Рисунок 4.16 – Профіль рефлектора

Відповідно до розмірів робочої камери та обраного перерізу продукту (рис. 2.3) $\alpha = 0.838;\ \theta = 0.521;\ L = 118.017$ мм. Для випромінювача потужністю 1 кВт і довжиною 0.25 м, густина променевого потоку складає

$$q = \frac{1000}{3.14 \cdot 118.017 \cdot 10^{-3} \cdot 1} \left(3.14 + 0.521 - 0.838\right) \times \frac{1}{0.25} \approx 30.48 \text{ кВт/м}^2. \qquad (4.3)$$

Характер та значення у Вт/м^2 густини опромінення прямого $q1$, відбитого $q2$ та сумарного q потоків залежно від безрозмірної відносної координати приймача ξ наведено на рисунках 4.17, 4.18 та 4.19.

Порівняння значень сумарної густини опромінення, отриманих шляхом аналітичного та фізичного моделювання, наведено на рисунку 4.20. За поземною віссю відкладено абсолютний розмір приймача x (мм), за прямовисною – абсолютний розмір приймача y (мм) та значення сумарної густини опромінення q (кВт/м^2).

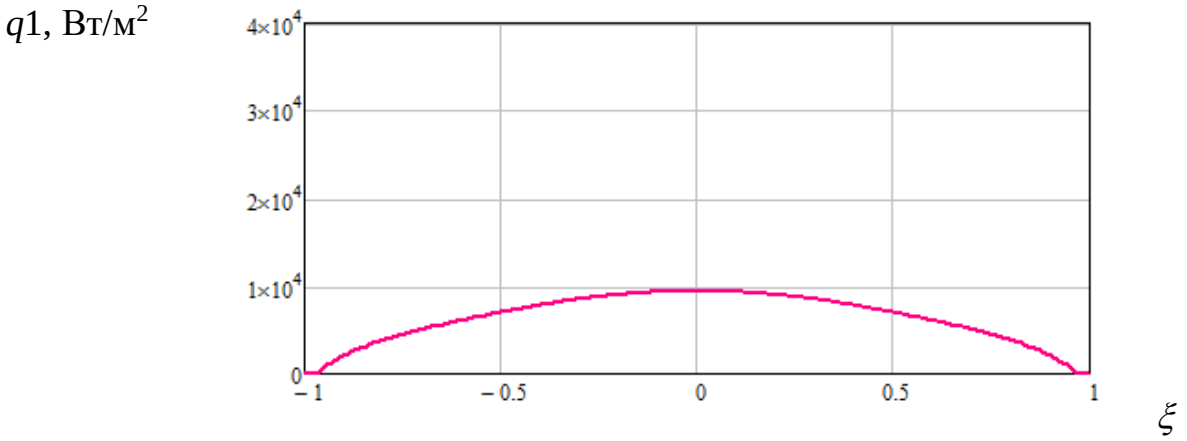


Рисунок 4.17 – Значення прямого потоку ІЧ-опромінювання

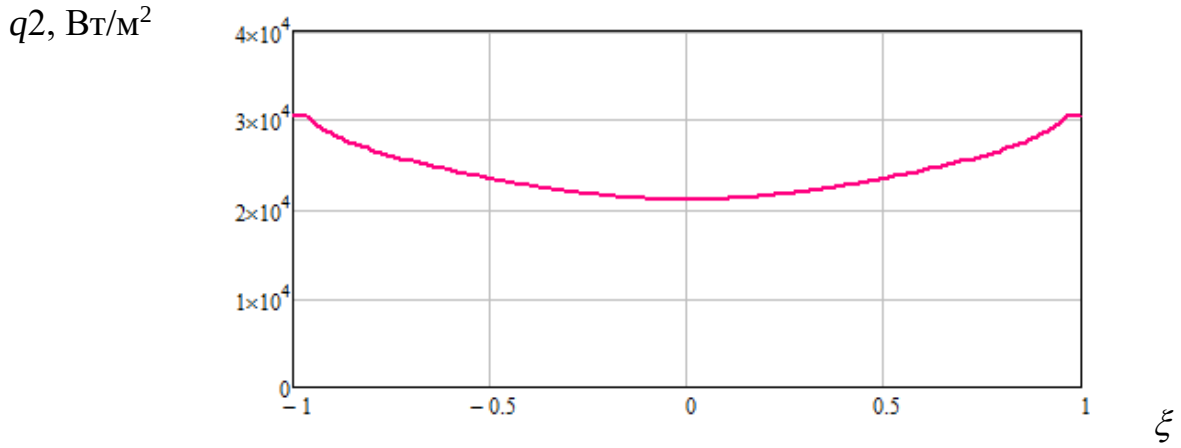


Рисунок 4.18 – Значення відбитого потоку ІЧ-опромінювання

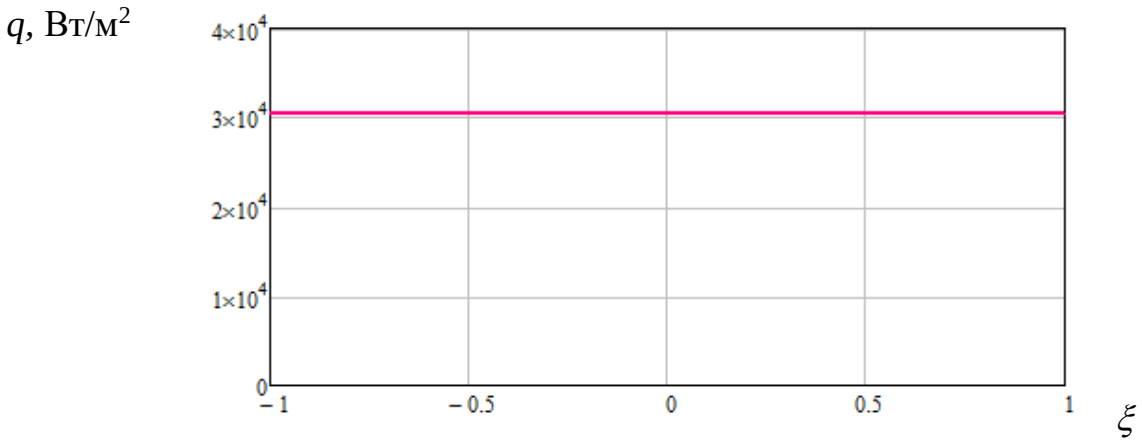


Рисунок 4.19 – Значення сумарного потоку ІЧ-опромінювання

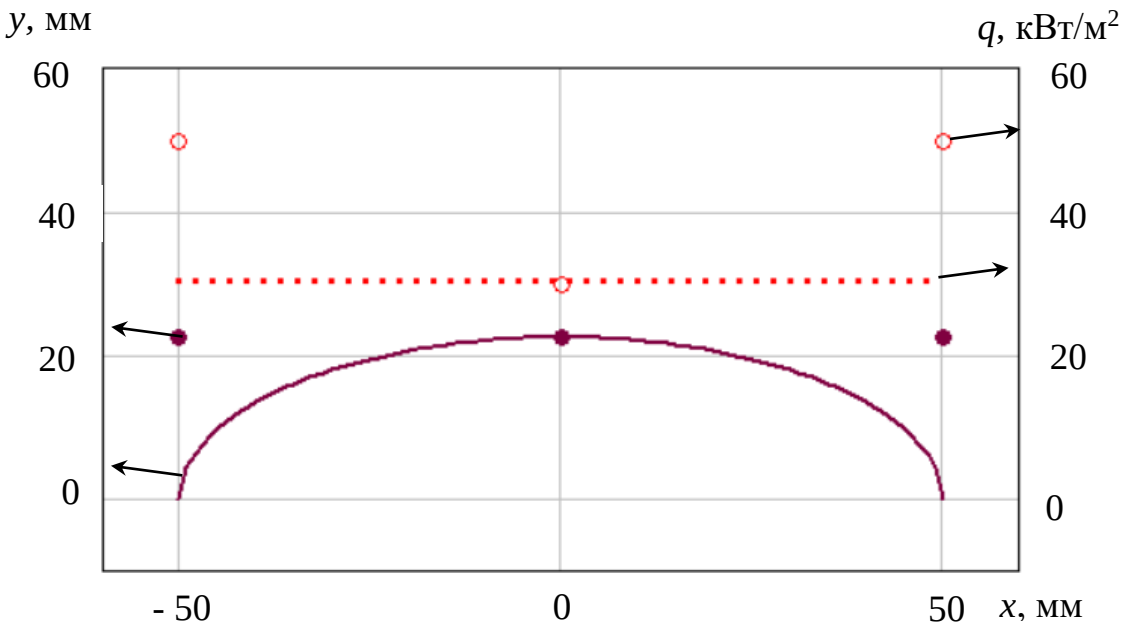


Рисунок 4.20 – Порівняння фізичного та аналітичного моделювання:
——— – профіль приймача; ····· – аналітична густина;
• – розташування термопар; o – експериментальна густина

Суцільною лінією вказано півеліптичний профіль приймача, пунктирною – рівномірну аналітичну густину опромінення. Круги надають розташування термопар, кола – значення густини опромінення у цих точках (центральний переріз продукту).

Аналітичний розв’язок було отримано для продукту півеліптичного перерізу з більшою піввіссю 50 мм, а меншою – 22.5 мм, що визначалося рекомендованим значенням завтовшки м’ясного напівфабрикату 20…25 мм. Тобто, співвідношення осей півеліпса приймача становить 22.5 / 50 = 0.45.

Експериментальний розподіл густини опромінення за плаского розташування термопар має угнутий півеліптичний характер зі значенням у середині 29.83 кВт/м^2, а на краях 49.75 кВт/м^2. Таким чином, співвідношення осей півеліптичного розподілу густини опромінення становить (49.75 – 29.83) / 50 = 19.92 / 50 = 0.4. Беручи до уваги похибки виготовлення та монтажу відбивача, цей результат можна вважати прийнятним.

Таким чином, порівняння отриманих результатів фізичного та аналітичного моделювання ІЧ-опромінення опуклого продукту доводить ефективність створеної методики визначення профілю відбивача променевого потоку. Апарат із рефлектором для жарення м’ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1 забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку значенням близько 30 кВт/м^2.

Висновки до розділу 4

1. Комп’ютерне моделювання розповсюдження теплових променів у робочих камерах теплотехнічних систем за допомогою програмного комплексу TracePro доводить, що отримана методика профілювання рефлекторів теплотехнічних систем є коректною.

2. Кількісна оцінка ефективності використання спрофільованого рефлектора шляхом визначення температури всередині робочої камери за допомогою термопар хромель-алюмель підтверджує комп’ютерну верифікацією моделі променевого теплообміну.

3. Використання експериментального апарату з відбивачем променевого потоку для жарення м’ясних напівфабрикатів доводить, що отримана методика профілювання рефлекторів теплотехнічних систем є

прийнятною для проектування ІЧ-обладнання харчових виробництв та ресторанного господарства. Отримана профілограма органолептичної оцінки доводить покращення зовнішнього вигляду, консистенції, кольору на поверхні та розрізі продукту з яловичини, отриманого за жарення з відбивачем.

4. Використання в апараті спрофільованого відбивача скорочує термін жарення натуральних порційних напівфабрикатів з яловичини на 33 %. Розроблено промисловий зразок апарата із рефлектором для ІЧ-жарення м’ясних напівфабрикатів. який забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку значенням близько 30 кВт/м^2.

РОЗДІЛ 5

СИСТЕМНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТА АПАРАТУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Для вирішення проблеми погіршення якості готових виробів за високої густини випромінювання було проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, що є аналітичним та фізичним підґрунтям імітаційного моделювання, яке дозволить провести комплексне моделювання якісної та економічної теплової ІЧ-обробки за рівномірної густини променевого потоку на поверхні опуклого продукту зі зменшенням питомої витратності обладнання.

5.1 Імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення

Розглянемо головні припущення моделі. У випадку ІЧ-нагрівання електромагнітна енергія поглинається нескінченно малим поверхневим шаром продукту, що відповідає випадку теплообміну з заданим потоком теплоти (граничні умови II роду). Втрати теплоти з поверхні продукту спричинені конвекційним теплообміном із довкіллям незмінної температури (граничні умови III роду) [98; 99].

Внаслідок взаємодії цих двох потоків та малої інертності ІЧ-нагрівання температура поверхні продукту зростає швидше, ніж внутрішніх шарів, які нагріваються лише завдяки теплопровідності.

Втрати маси продукту під час нагрівання будемо вважати малими порівняно з енергією, витраченою на нагрівання, та не будемо їх враховувати.

Підведення теплоти здійснюється з одного боку (верхня поверхня продукту), втратами теплоти з нижньої поверхні продукту нехтуємо.

Густину потоку ІЧ-опромінення на поверхні продукту вважаємо рівномірно розподіленою завдяки використанню відбивача.

Складемо рівняння теплового балансу для внутрішніх шарів продукту, які нагріваються завдяки теплопровідності, тому диференційне рівняння теплового балансу ІЧ-нагрівання з урахуванням геометрії продукту має наступний вигляд:

$$c\ \rho V\ \frac{dT}{d\tau} = \frac{2\ K_F\ \lambda}{R_x}\ S\ (T_S\ - T)\,. \tag{5.1}$$

У рівнянні (5.1) c – питома теплоємність продукту, Дж/(кг К); ρ - густина продукту, кг/м^3; λ - коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м·К); V – об’єм продукту, м^3; S – площина верхньої поверхні продукту, м^2; T_S – середня температура поверхні, К; T – середня температура внутрішніх шарів, К; τ - час, с.

Коефіцієнт форми K_F враховує геометрію теплоприймача [100]:

$$K_F\ = 1 + \frac{R_x}{R_y} + \frac{R_x}{R_z}\,, \tag{5.2}$$

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

Рівняння теплового балансу на поверхні продукту з урахуванням граничних умов, які враховують потік ІЧ-опромінення та конвективні втрати тепла, отримує наступний вигляд:

$$\frac{2\ K_F\ \lambda}{R_x}\ S\ (T_S\ - T) = -\alpha\ S\ (T_S - T_A) + \eta\ P_E\,, \tag{5.3}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2·К); S – площина верхньої поверхні продукту, м^2; T_S – середня температура поверхні, К; T_A – температура повітря всередині апарату, К; η - коефіцієнт поглинання випроміненої потужності; P_E – потужність ІЧ-випромінювача, Вт.

З рівняння (5.3) знаходимо середню температуру поверхні продукту

$$T_S = \frac{T + \dfrac{\eta\ P_E\ R_x}{2\ K_F\ S\ \lambda} + \mathrm{Bi}_F\ T_A}{\mathrm{Bi}_F + 1}. \qquad (5.4)$$

Підставляємо вираз (5.4) у рівняння (5.1), отримуємо диференціальне рівняння кінетики температури

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{2\ K_F\ \lambda}{c\ \rho\ R_V\ R_x}\ \frac{\mathrm{Bi}_F}{\mathrm{Bi}_F + 1}\left(\frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S} + T_A - T\right), \qquad (5.5)$$

де R_V – відношення об’єму продукту до площини його поверхні, м; $\mathrm{Bi_F} = \alpha\ R_x / (2\ K_F\ \lambda)$ – модифіковане число Біо.

Розв’язок цього рівняння з початковою умовою $T(0) = T_0$ має вигляд

$$T = \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S} + T_A + \left(T_0 - \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S} - T_A\right)\cdot \exp\left(-\frac{2\ K_F\ \lambda}{c\ \rho\ R_x\ R_V}\ \frac{\mathrm{Bi}_F}{\mathrm{Bi}_F + 1}\ \tau\right). \qquad (5.6)$$

Рівняння (5.6) описує кінетику середньої температури внутрішніх шарів продукту з плином часу.

Якщо задати середню потрібну температуру всередині продукту (температура готовності), то з рівняння (5.6) можна знайти потрібний час жарення

$$\tau_R = -\frac{c\ \rho\ R_x\ R_V}{2\ K_F\ \lambda}\cdot\left(\frac{\mathrm{Bi}_F+1}{\mathrm{Bi}_F}\right)\cdot\ln\left(\frac{T_A - T_R + \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S}}{T_A - T_0 + \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S}}\right), \qquad (5.7)$$

де τ_R – час жарення, с; T_R – середня температура готовності внутрішніх шарів продукту, К.

Зауважимо, що в цій моделі ми вважаємо, що продукт не перегортається під час жарення, тобто теплообмін здійснюється з одного боку.

Використаємо апарат АРЖМ-0.07-1, де приймачем тепла є м’ясний напівфабрикат із нормальним перерізом у вигляді напівеліпсу (рис. 4.13 *б*). Половини осей напівеліпса a = 0.05 м и b = 0.0225 м. Довжина напівфабриката $L_\text{р}$ = 0.2 м.

Довжина півеліпсу

$$L_\text{h} = \pi\ (a+b)\ /\ 2 = 3.14\ (0.05+0.0225)\ /\ 2 = 0.114\ \text{м}. \qquad (5.8)$$

Площина півеліпсу

$$A = \pi\ a\ b\ /\ 2 = 3.14{\cdot}0.05{\cdot}0.0225\ /\ 2 = 1.767{\cdot}10^{-3}\ \text{м}^2. \qquad (5.9)$$

Площина верхньої поверхні напівфабрикату

$$S = L_\text{h}\ L_\text{р} = 0.114{\cdot}0.2 = 0.023\ \text{м}^2. \qquad (5.10)$$

Об’єм напівфабрикату

$$V = A\ L_\text{р} = 1.767{\cdot}10^{-3}{\cdot}0.2 = 0.35{\cdot}10^{-3}\ \text{м}^3. \qquad (5.11)$$

Приймаємо $R_x = b/2 = 0.011$ м, $R_y = a = 0.05$ м, $R_z = L_p / 2 = 0.2 / 2 = 0.1$ м. Коефіцієнт форми (5.2) отримує значення

$$K_F = 1 + \frac{0.011}{0.05} + \frac{0.011}{0.1} = 1.338 . \qquad (5.12)$$

У рівнянні (5.1) питома теплоємність яловичини $c = 3.5 \cdot 10^3$ Дж/(кг К), густина яловичини $\rho = 1100$ кг/м^3, коефіцієнт теплопровідності яловичини $\lambda = 0.5$ Вт/(м К) [72]. За цих параметрів маса півфабрикату становить 0.4 кг.

У рівнянні (5.3) коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 20$ Вт/(м^2 К), температура повітря всередині апарату $T_A = 293$ К (20 °С), коефіцієнт поглинання випроміненої потужності $\eta = 0.2$, потужність ІЧ-випромінювача $P_E = 1000$ Вт.

У рівнянні (5.5) коефіцієнт розмірів продукту

$$R_V = V / S = 0.35 \cdot 10^{-3} / 0.023 = 0.016 \text{ м}. \qquad (5.13)$$

У рівнянні (5.5) модифіковане число Біо

$$\text{Bi}_F = \alpha R_x / (2 K_F \lambda) = 20 \cdot 0.011 / (2 \cdot 1.338 \cdot 0.5) = 0.168. \qquad (5.14)$$

Наявність відбивача променевого потоку беремо до уваги за допомогою коефіцієнта відбивача $k_B = 10$ хв/ 15 хв, тобто відношення тривалості жарення напівфабрикату з яловичини в експериментальному апараті з відбивачем до тривалості жарення без відбивача.

Отримуємо рівняння кінетики температури (5.6) у вигляді

$$T = \frac{\eta P_E}{\alpha S} + T_A + \left(T_0 - \frac{\eta P_E}{\alpha S} - T_A \right) \cdot \exp\left(- \frac{2 K_F \lambda}{c \rho R_x R_V} \frac{\text{Bi}_F}{\text{Bi}_F + 1} \tau \frac{1}{k_B} \right). \qquad (5.15)$$

Отримаємо потрібний час жарення (5.7) у вигляді

$$\tau_R = -\frac{c\ \rho\ R_x\ R_V}{2\ K_F\ \lambda}\cdot\left(\frac{\mathrm{Bi}_F+1}{\mathrm{Bi}_F}\right)\cdot\ln\left(\frac{T_A - T_R + \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S}}{T_A - T_0 + \frac{\eta\ P_E}{\alpha\ S}}\right)\cdot k_B . \qquad (5.16)$$

На рисунку 5.1 наведено розраховану в програмному комплексі Mathcad кінетику середньої температури внутрішніх шарів продукту T за заданої початкової температури внутрішніх шарів продукту T_0 = 278 К (5 °С) та температури готовності внутрішніх шарів продукту T_R = 348 К (75 °С). Розрахункову програму кінетики інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів без відбивача променевого потоку та з відбивачем наведено у додатку З.

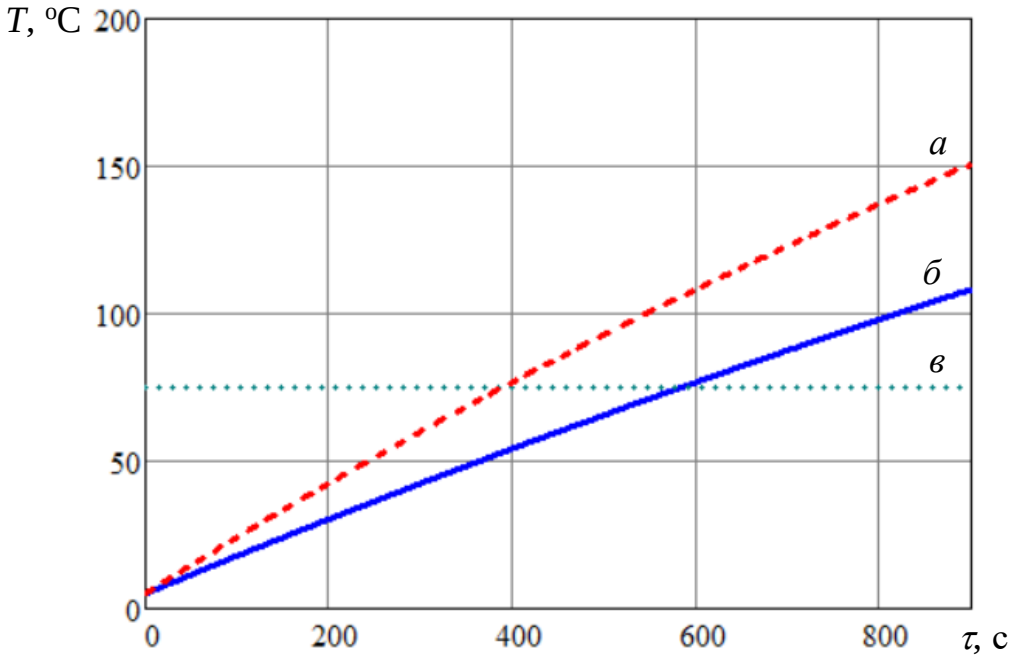


Рисунок 5.1 – Кінетика температури:
***а* – внутрішніх шарів продукту з відбивачем;**
***б* – внутрішніх шарів продукту без відбивача; *в* – готовність продукту**

За жарення напівфабриката з яловичини без відбивача променевого потоку час готовності продукту (5.16) становив τ_R = 584 с, тобто 9.8 хвилин. В апараті АРЖМ-0.07-1 без відбивача готовність продукту наставала через 10 хвилин після жарення.

За жарення напівфабриката з яловичини з відбивачем променевого потоку час готовності продукту (5.16) становить τ_R = 390 с, тобто 6.5 хвилин. В апараті АРЖМ-0.07-1 з відбивачем готовність продукту наставала через 7 хвилин після жарення.

Неоднакові результати стали наслідком теплових втрат з нижньої поверхні продукту та втрат маси під час реального жарення.

За використання програмного комплексу Vensim було створено імітаційну модель кінетики температури м’ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення (рис. 5.2). Одиницею виміру часу в моделі була секунда, що відповідало терміну найменшої затримки. Термін моделювання складав 900 секунд. Для верифікації результатів реальне жарення здійснювалося в апараті АРЖМ-0.07-1.

Рисунок 5.2 – Імітаційна модель кінетики температури

Екзогенні змінні (рис. 5.3):

– геометричні компоненти продукту (півширина продукту, товщина продукту, довжина продукту);

– теплофізичні компоненти продукту (густина продукту, питома теплоємність продукту, коефіцієнт теплопровідності продукту, коефіцієнт тепловіддачі);

– енергетичні компоненти (початкова температура внутрішніх шарів продукту, температура повітря в апараті, потужність випромінювача, коефіцієнт поглинання потужності, коефіцієнт відбивача).

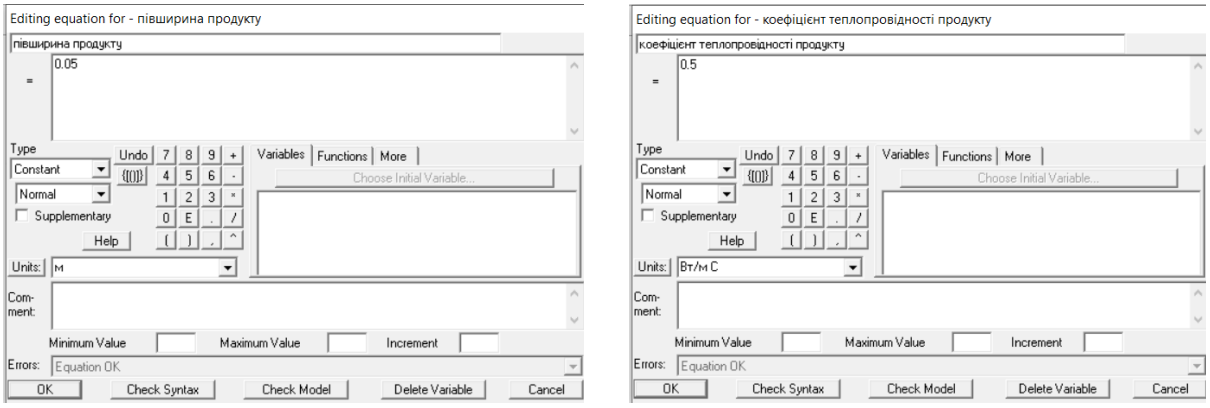


Рисунок 5.3 – Екзогенні змінні «півширина продукту»
та «коефіцієнт теплопровідності продукту»

Ендогенні змінні (рис. 5.4):

– геометричні компоненти продукту (довжина півеліпса (5.8), площина півеліпса (5.9), площина верхньої поверхні продукту (5.10), об’єм продукту (5.11), коефіцієнт розмірів продукту (5.13), коефіцієнт форми продукту (5.12));

– теплофізичний компонент продукту (модифіковане число Біо (5.14)).

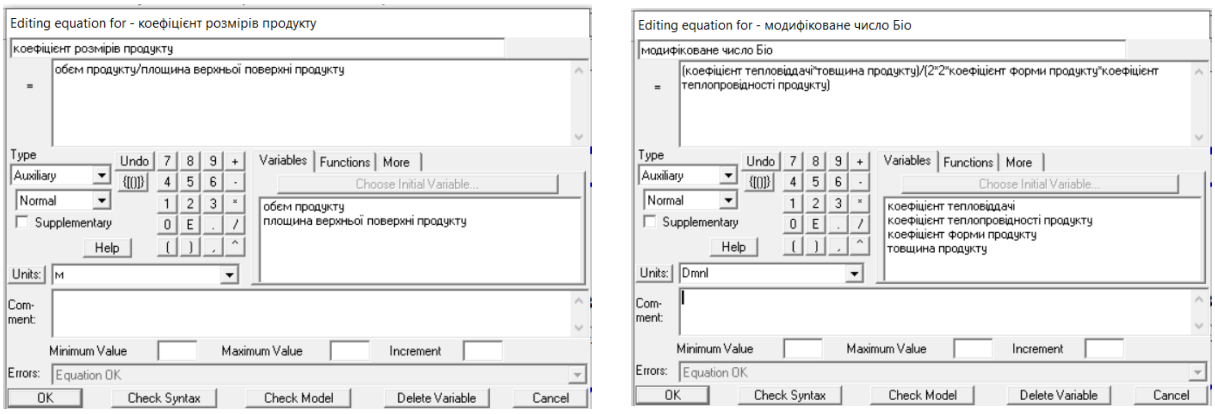


Рисунок 5.4 – Ендогенні змінні «коефіцієнт розмірів продукту» та «модифіковане число Біо»

Модельним відгуком, або реакцією моделі була середня температура внутрішніх шарів продукту (5.15), наведена на рисунках 5.5 та 5.6.

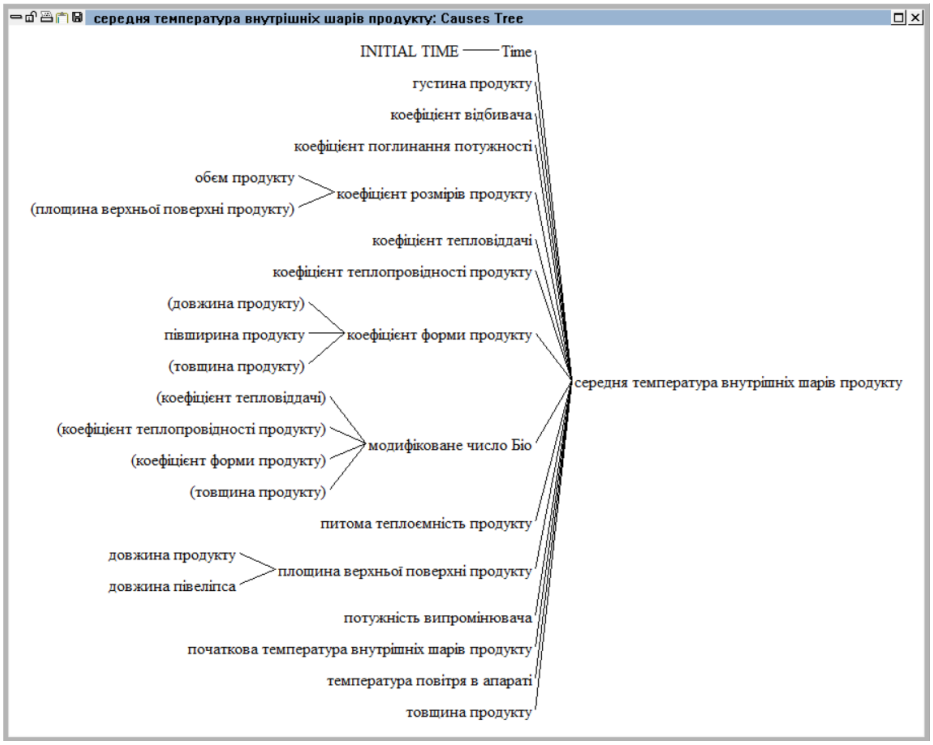


Рисунок 5.5 – Дерево причин реакції моделі «середня температура внутрішніх шарів продукту»

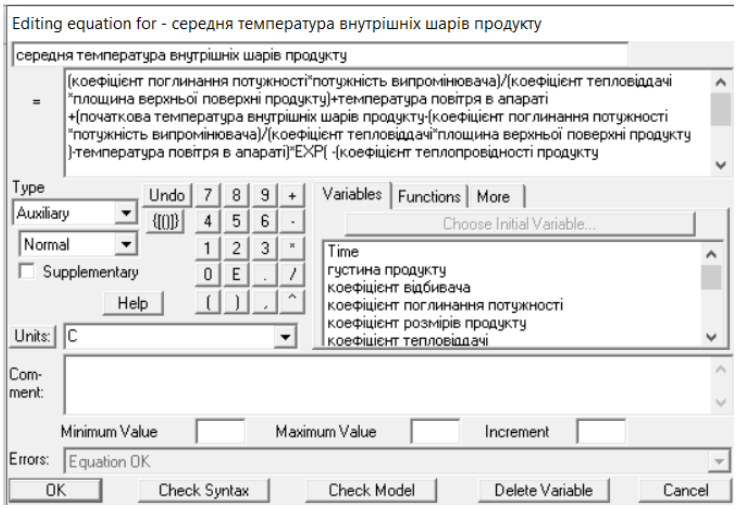


Рисунок 5.6 – Рівняння реакції моделі «середня температура внутрішніх шарів продукту»

Всі фактори комбіновано впливають на реакцію моделі. Було використано наступні рівні факторів:

– півширина продукту 0.05 м;

– товщина продукту 0.0225 м;

– довжина продукту 0.2 м;

– густина продукту 1100 кг/м^3;

– питома теплоємність яловичини 3500 Дж/(кг К);

– коефіцієнт теплопровідності яловичини 0.5 Вт/(м^2 К);

– коефіцієнт тепловіддачі 20 Вт/(м^2 К);

– коефіцієнт відбивача становив 10/15, тобто відношення терміну жарення м’ясного напівфабрикату в експериментальному апараті з відбивачем (10 хв) до терміну жарення без відбивача (15 хв);

– початкова температура внутрішніх шарів продукту 5 ^{o}C;

– температура повітря в апараті 20 ^{o}C;

– потужність випромінювача 720 Вт та 1000 Вт;

– коефіцієнт поглинання потужності 0.2.

Експерименти проводилися для жарення яловичини за потужності випромінювача 1000 Вт без відбивача та з відбивачем, а також для яловичини за потужності випромінювача 720 Вт та 1000 Вт з відбивачем.

Потужність випромінювача P_E становила 1000 Вт, коефіцієнт відбивача становив 1 (жарення без відбивача) або 10/15 (жарення з відбивачем). За температури готовності 75 ºС жарена без відбивача яловичина готова через 584 с (9.8 хв), жарена з відбивачем готова через 390 с (6.5 хв) (рис. 5.7, 5.8), що відповідає реальному жаренню.

Потужність випромінювача P_E становила 720 Вт та 1000 Вт, коефіцієнт відбивача становив 10/15 (жарення з відбивачем). За температури готовності 75 ºС яловичина за потужності випромінювача 720 Вт готова через 553 с (9.2 хв), за потужності 1000 Вт готова через 390 с (6.5 хв) (рис. 5.9, 5.10), що відповідає реальному жаренню.

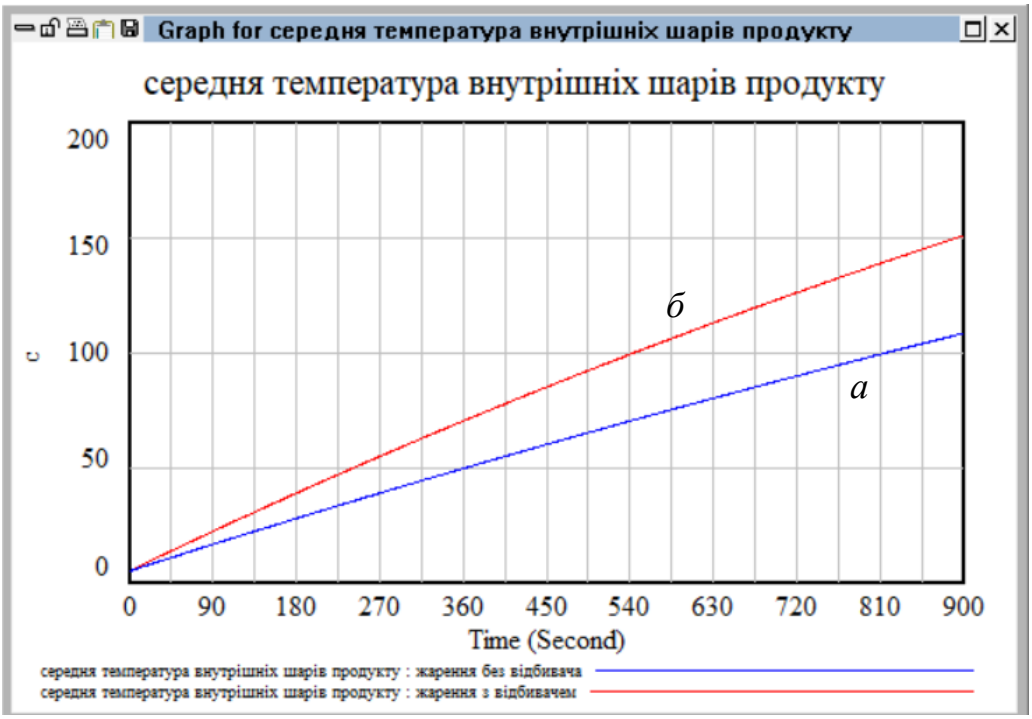


Рисунок 5.7 – Зростання середньої температури внутрішніх шарів: *а* – жарення без відбивача; *б* – жарення з відбивачем

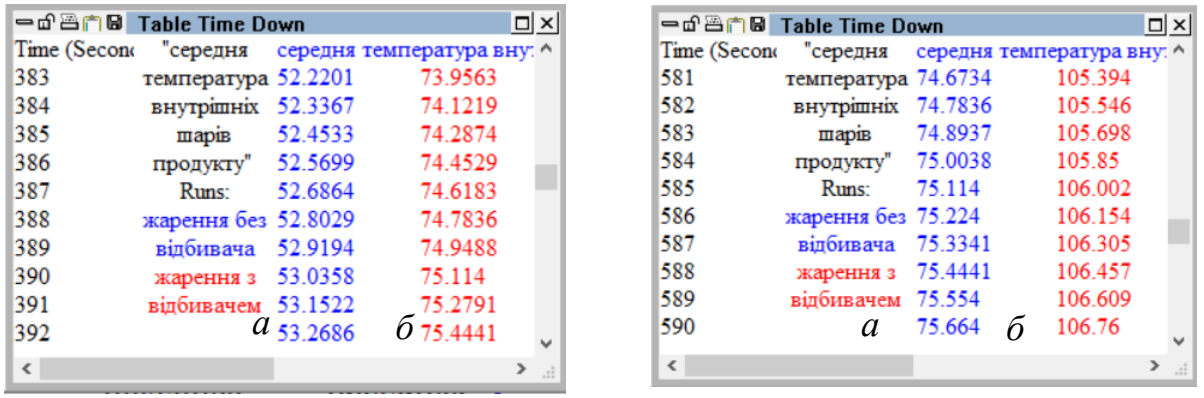


Рисунок 5.8 – Готовність м’ясного продукту:

***а* – жарення без відбивача; *б* – жарення з відбивачем**

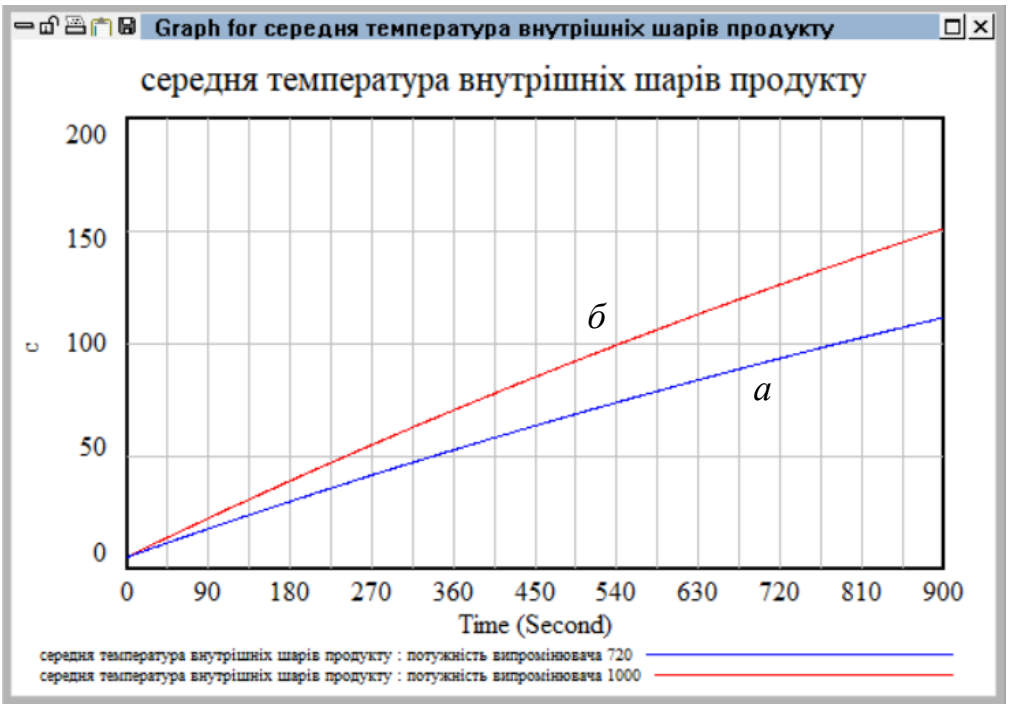


Рисунок 5.9 – Зростання середньої температури внутрішніх шарів:

***а* – потужність випромінювача 720 Вт;**

***б* – потужність випромінювача 1000 Вт**

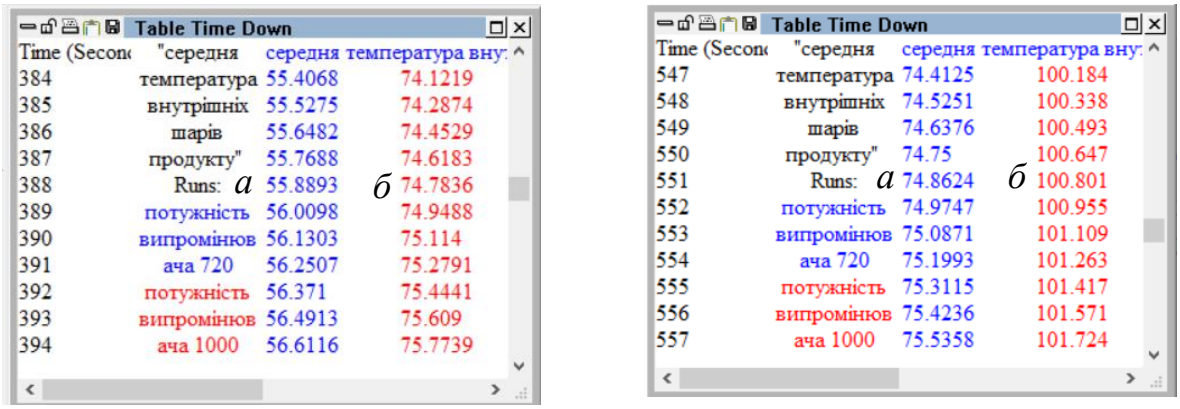


Рисунок 5.10 – Готовність м’ясного продукту:
***а* – потужність випромінювача 720 Вт;**
***б* – потужність випромінювача 1000 Вт**

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

5.2 Системно-динамічне оцінювання економічної ефективності апарата АРЖМ-0.07-1

Шляхом імітаційного моделювання було виконано комплексну оцінку апарата АРЖМ-0.07-1 та порівняно його з пристроєм без рефлектора [101–103].

Одиницею виміру часу в моделі була хвилина, що відповідало терміну найменшої затримки. Термін моделювання складав 15 хвилин. Загальний вигляд моделі наведено на рисунку 5.11.

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.

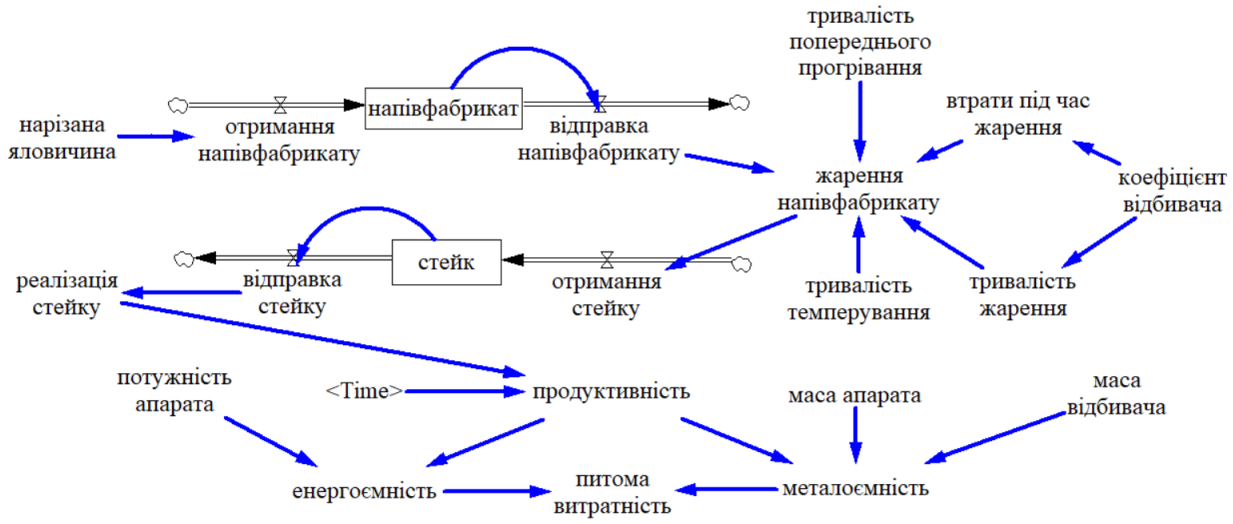


Рисунок 5.11 – Імітаційна модель оцінки апарату

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 (рис. 5.12):

– масові компоненти (нарізана яловичина, маса апарата, маса відбивача);

– енергетичні компоненти (потужність апарата, коефіцієнт відбивача, тривалість попереднього прогрівання, тривалість темперування).

Ендогенні змінні (рис. 5.13):

– втрати під час жарення визначалися добутком 0.33 (33 %) (розділ 4.2) 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;

– питома енергоємність визначалася відношенням потужності апарата до продуктивності;

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

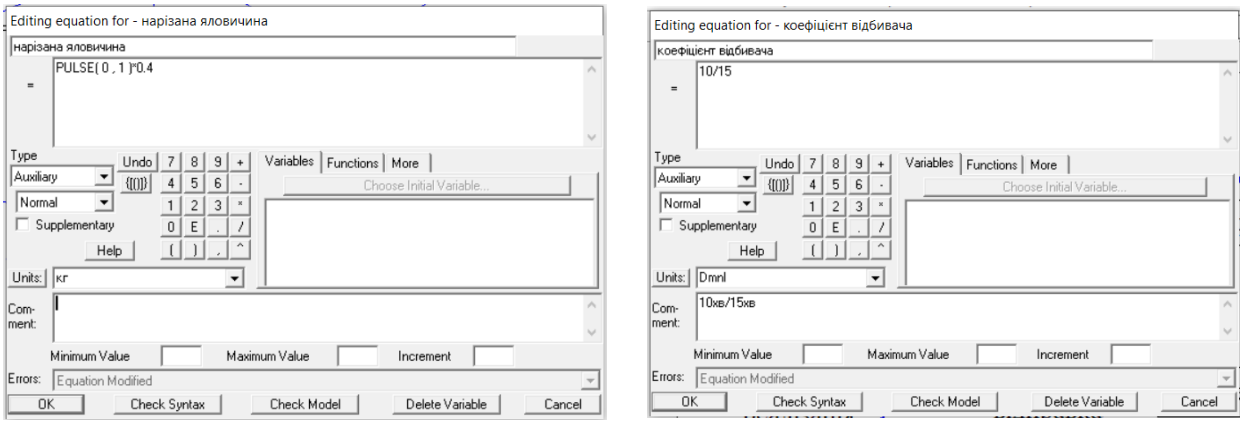


Рисунок 5.12 – Екзогенні змінні «нарізана яловичина» та «коефіцієнт відбивача»

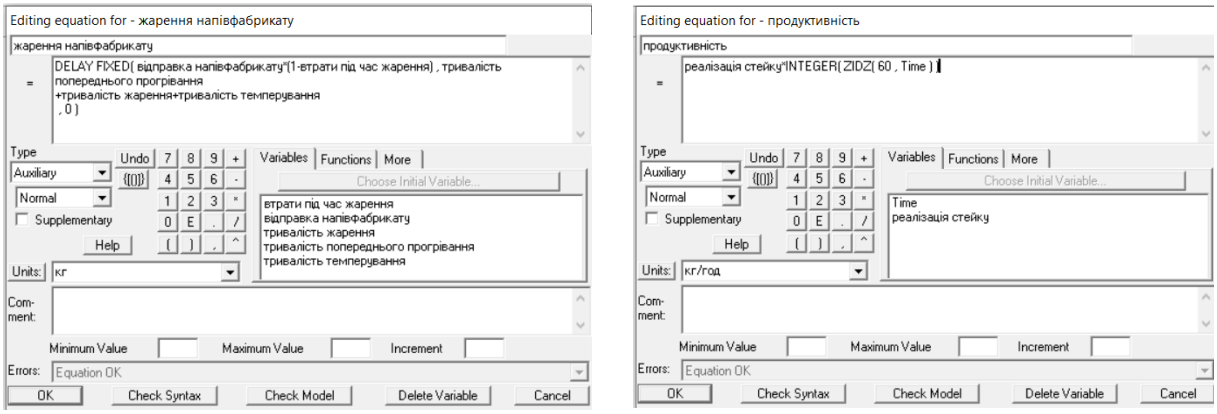


Рисунок 5.13 – Ендогенні змінні «жарення напівфабрикату» та «продуктивність»

Реакцією моделі була питома витратність [27; 28], яка визначалася множенням питомої енергоємності та питомої металоємності (рис. 5.14, 5.15).

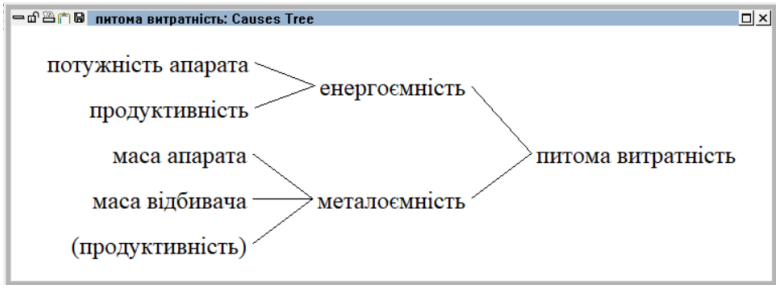


Рисунок 5.14 – Дерево причин реакції моделі «питома витратність»

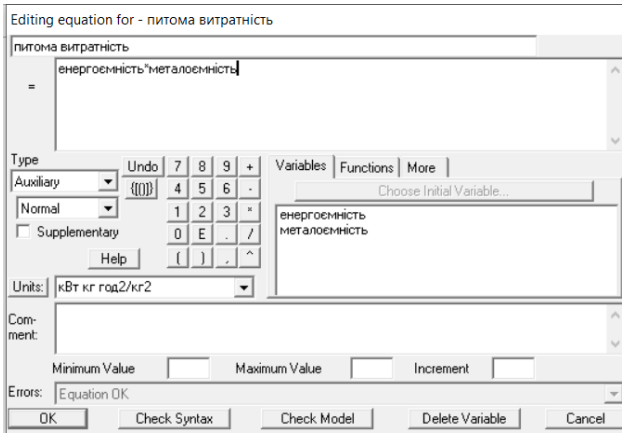


Рисунок 5.15 – Рівняння реакції моделі «питома витратність»

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 апарату становила 2 хв;

– тривалість темперування становила 2 хв;

– потужність випромінювача становила 1000 Вт;

– коефіцієнт відбивача становив 10/15, тобто відношення тривалості жарення м’ясного 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. 5.16–5.25);

– збільшення реалізації стейку на 0.31 / 0.27 – 1 = = 1.15 – 1 = 0.15, тобто 15 % (рис. 5.16, 5.17);

– збільшення продуктивності на 1.56 / 1.07 – 1 = 1.46 – 1 = = 0.46, тобто 46 % (рис. 5.18, 5.19);

– зменшення питомої енергоємності на 0.94 / 0.64 – 1 = 1.47 – 1 = = 0.47, тобто 47 % (рис. 5.20, 5.21);

– зменшення питомої металоємності на 3.28 / 2.57 – 1 = 1.28 – 1 = = 0.28, тобто 28 % (рис. 5.22, 5.23);

– зменшення питомої витратності на 3.08 / 1.65 – 1 = = 1.87 – 1 = 0.87, тобто 87 % (рис. 5.24, 5.25).

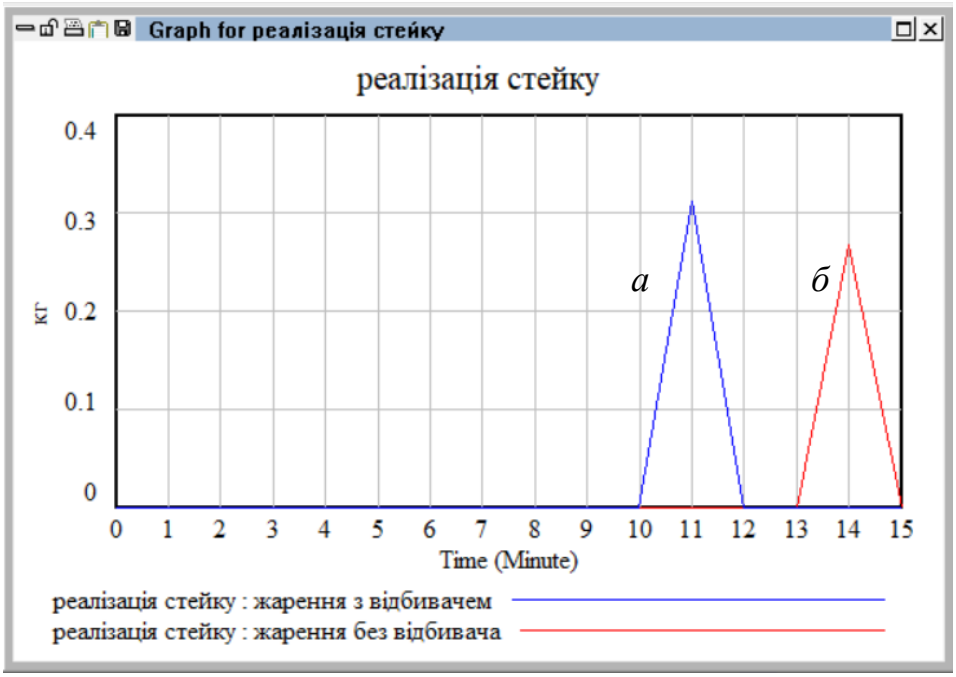


Рисунок 5.16 – Характер реалізації стейку (кг):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

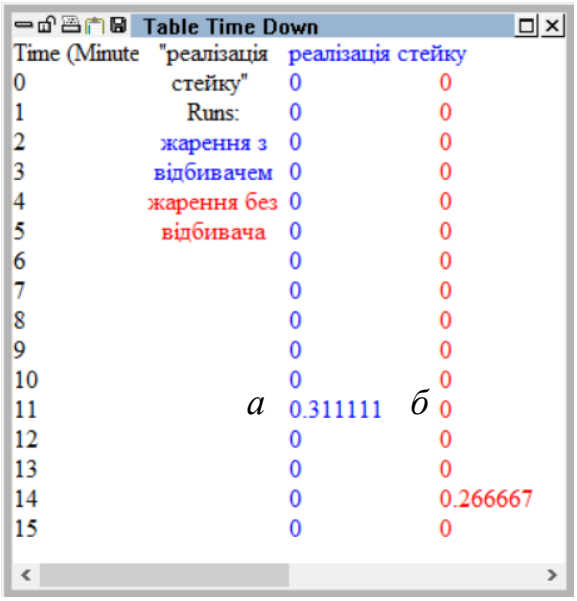


Рисунок 5.17 – Значення реалізації стейку (кг):

***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

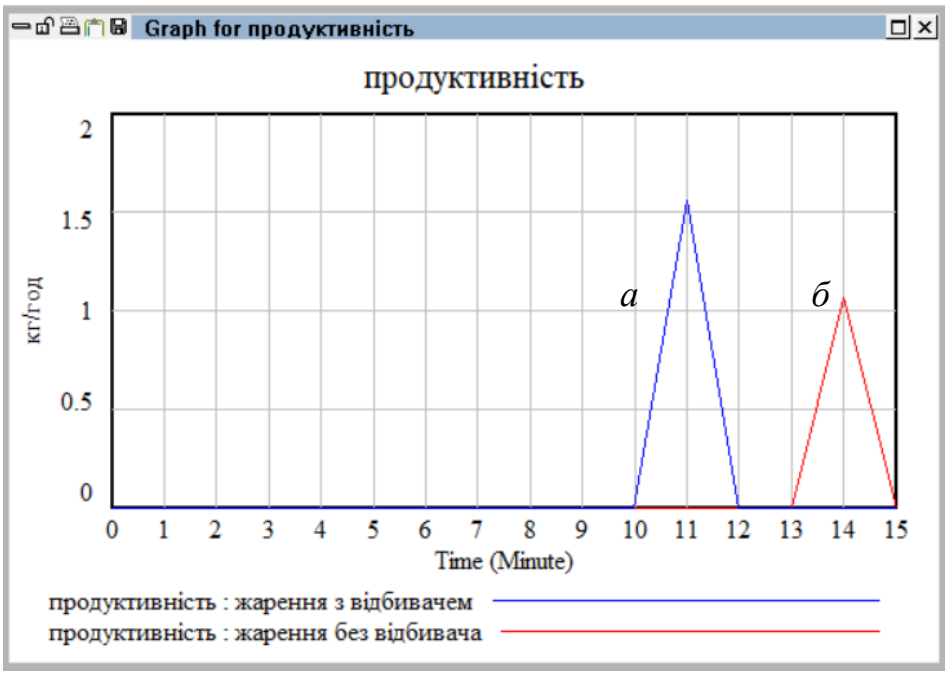


Рисунок 5.18 – Характер продуктивності (кг / год):

***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

Table Time Down

Time (Minute	"продуктивні сть" Runs: жарення з відбивачем жарення без відбивача	продуктивність	
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	*а*	1.55556	*б* 0
12		0	0
13		0	0
14		0	1.06667
15		0	0

Рисунок 5.19 – Значення продуктивності (кг / год):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

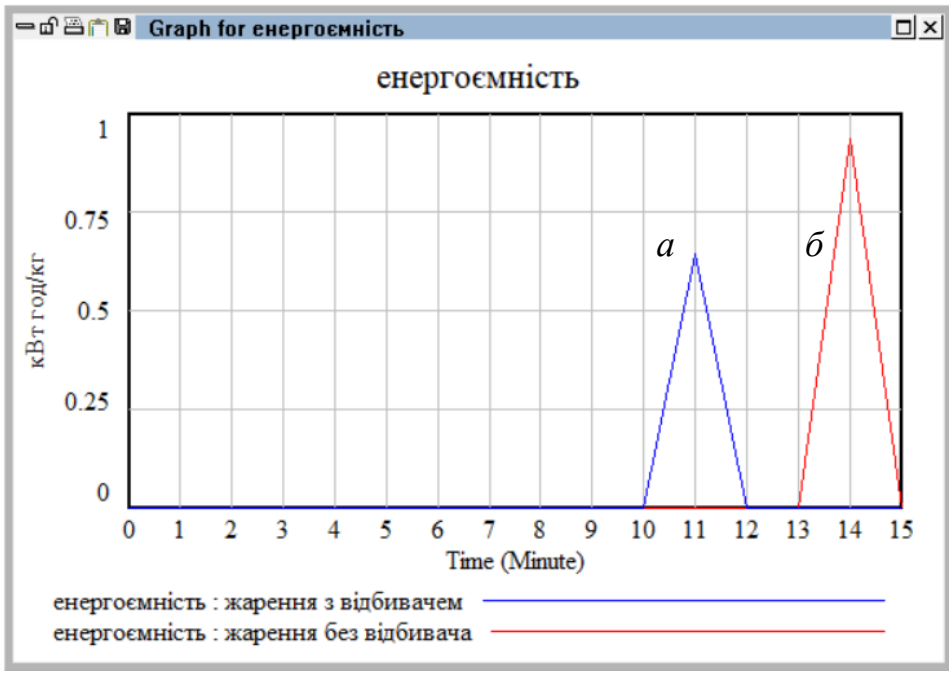


Рисунок 5.20 – Характер питомої енергоємності (кВт год / кг):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

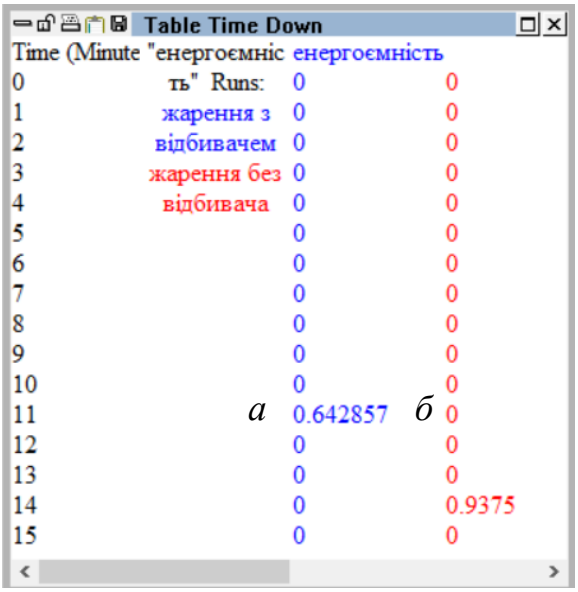


Рисунок 5.21 – Значення питомої енергоємності (кВт год / кг):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

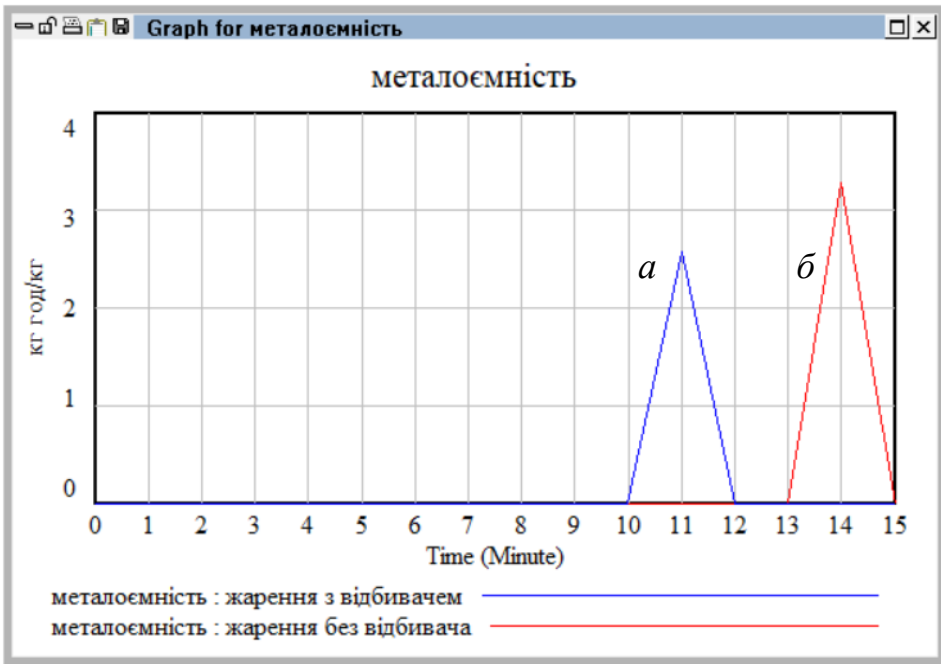
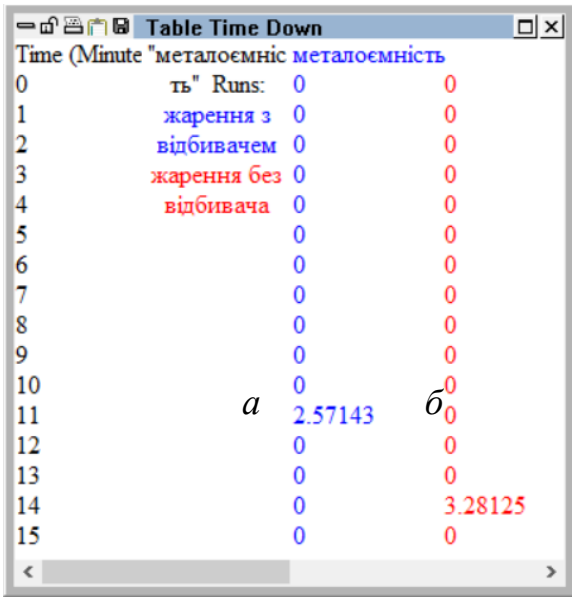


Рисунок 5.22 – Характер питомої металоємності (кг год / кг):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**



Time (Minute	"металоємність" Runs:	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	3.28125
15	0	0

Рисунок 5.23 – Значення питомої металоємності (кг год / кг):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

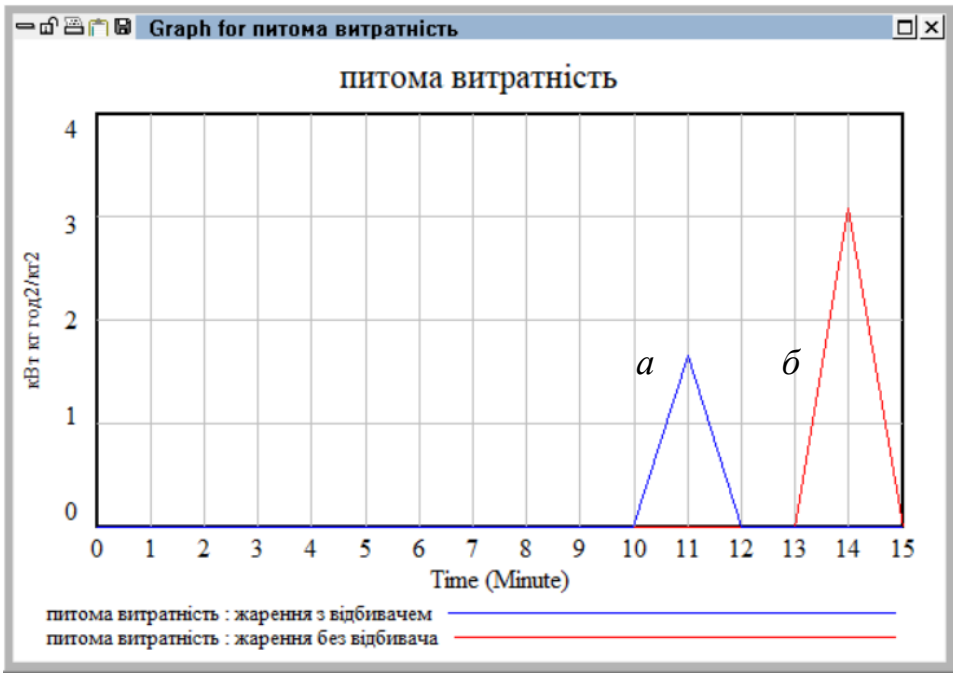
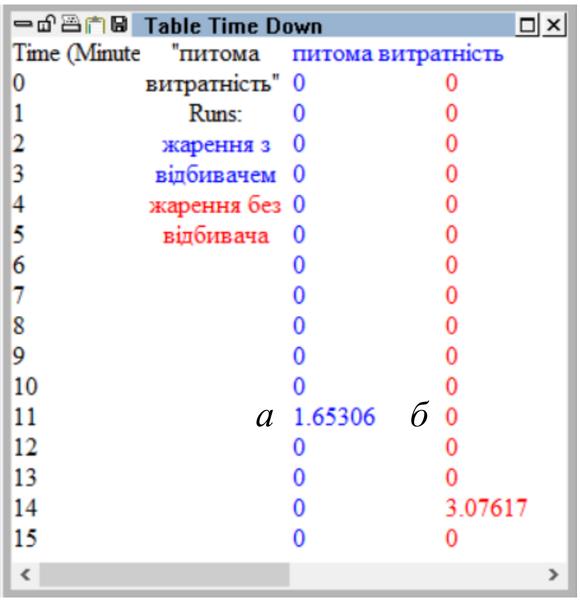


Рисунок 5.24 – Характер питомої витратності (кВт кг год^2 / кг^2):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**



Time (Minute	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

Рисунок 5.25 – Значення питомої витратності (кВт кг год^2 / кг^2):
***а* – жарення з відбивачем, *б* – жарення без відбивача**

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 %.

5.3 Впровадження результатів роботи

Методика та програмний продукт для визначення профілів рефлекторів, а також проект нормативно-технічної документації на апарат із рефлектором для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1 впроваджені на ТОВ «А-1», ПП «Містраль», ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар» (м. Харків) (додаток К).

На апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів отримано патент на корисну модель № 121298 від 27.11.2017 р. (додаток Л).

Висновки до розділу 5

1. У результаті аналітичного моделювання процесу інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів отримані рівняння кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту та потрібної тривалості процесу жарення в розробленому апараті ІЧ-жарення зі спрофільованим відбивачем. На основі аналітичного та імітаційного моделювання встановлено, що в апараті АРЖМ-0.07-1 за температури готовності 75 ºС жарена без відбивача яловичина готова через 10 хв, жарена з відбивачем готова через 7 хв. Порівняння отриманих результатів імітаційної моделі кінетики температури та реального жарення доводить адекватність створеної імітаційної моделі.

2. Шляхом імітаційного моделювання проведено комплексне оцінювання економічної 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 ІЧ-жарення на 46 %, зменшує питому енергоємність ІЧ-жарення на 47 %, питому металоємність на 28 %, питому витратність на 87 %.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В розділі наведено результати розрахунків, які здійснені для обґрунтування доцільності впровадження розробленого апарата інфрачервоного жарення з відбивачем променевого потоку (АРЖМ-0.07-1) у практику діяльності. Розрахунки здійснено з дотриманням принципу багатокритеріальної оцінки, відповідно до якого оцінювання наукової розробки здійснено з урахуванням критеріїв його вартості, економії ресурсів, підвищенні продуктивності праці під час під час експлуатації та економічного ефекту від його впровадження у практику діяльності. Послідовність і методи розрахунків для обґрунтування доцільності впровадження розробленого апарата у практику діяльності наведено на рис. 6.1.

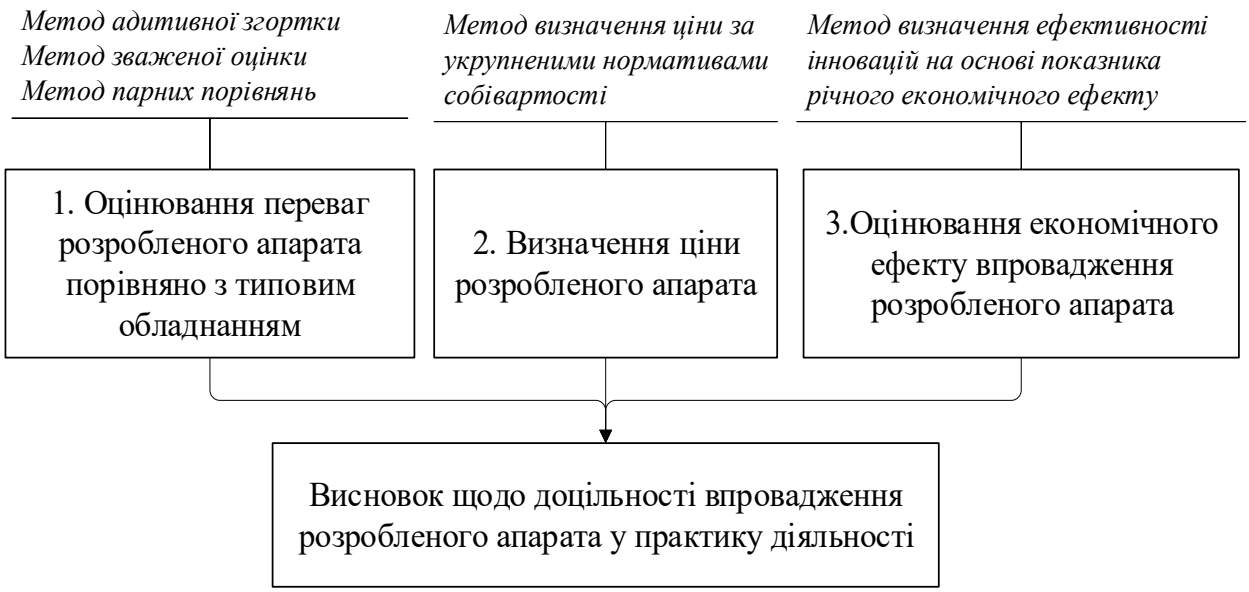


Рисунок 6.1 – Послідовність і методи розрахунків для обґрунтування доцільності впровадження розробленого апарата у практику діяльності (розроблено автором)

6.1. Оцінювання переваг розробленого апарата порівняно з типовим обладнанням

Для обґрунтування доцільності впровадження розробленого апарата інфрачервоного жарення з відбивачем променевого потоку (АРЖМ-0.07-1) у практику діяльності використано метод порівняння. Як типовий (аналоговий) апарат обрано апарат КИЙ-В ГК-6М [108]. Технічні характеристики типового та розробленого апаратів наведені у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Інформація для порівняння типового та розробленого обладнання

Характеристика	КИЙ-В ГК- 6М	АРЖМ-0.07-1
Потужність, кВт	3,4	1
Вага, кг	39	4
Габаритні розміри, мм: довжина	800	475
ширина	500	240
висота	500	195
Продуктивність, кг/рік	17010	20012

Складено самостійно на основі [108]

Продуктивність типового та нового апаратів визначено за урахування їх продуктивності за основним часом. Результати розрахунку продуктивності за апаратами наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Продуктивність за типовим і розробленим апаратами

Показник	КИЙ-В ГК- 6М	АРЖМ-0.07-1
1	2	3
Кількість днів роботи, дні	300	300
Тривалість роботи, год/день	7	7
Фонд робочого часу, год/рік	2100	2100
Допоміжні операції, хв	10	10
Тривалість жаріння, хв	10	7
Загальний час на виготовлення продукції, хв	20	17
Продуктивність, кг/хв	0,15	0,18

1	2	3
Коефіцієнт завантаження	0,9	0,9
Продуктивність, кг/рік	17010	20012

Складено самостійно

Для оцінювання переваг розробленого апарата порівняно з типовим обладнанням використано інтегральний показник відносних переваг (K_i), розрахований на основі адитивної згортки сукупності одиничних показників, представлених коефіцієнтами переваги характеристик нового апарата порівняно з типовим, до комплексного, з врахуванням значущості вказаних характеристик. Формули для розрахунків:

$$K_i = \sum_{i=1}^{n} k_i \times w_i, \tag{6.1}$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1,0 \tag{6.2}$$

або

$$k_i = \frac{P_{ін}}{P_{іб}}, \tag{6.3}$$

$$k_i = \frac{P_{іб}}{P_{ін}}, \tag{6.4}$$

де K_i – інтегральний показник відносних переваг розробленого апарата порівняно з типовим, коефіцієнт; k_i – одиничний показник відносних переваг розробленого апарата порівняно з типовим, коефіцієнт; $P_{іб}$ та $P_{ін}$ – значення i-го показника типового та розробленого апарата відповідно; w_i – вагомість i-го одиничного показника, коефіцієнт; n – кількість одиничних показників, які застосовуються для оцінювання апарата.

Умови для оцінювання такі: якщо $K_i > 1,0$ діагностується перевага розробленого апарата порівняно з типовим обладнанням; якщо $K_i = 1,0$ діагностується відповідність розробленого апарата типовому обладнанню; якщо $K_i < 1,0$ діагностується, що розроблений апарат поступається типовому обладнанню.

Під час розрахунків одиничних показників відносних переваг враховано розподіл показників та стимулятори та дестимулятори. Якщо показник, що відображає характеристику, належить до групи показників-стимуляторів розрахунок коефіцієнта здійснюється за формулою (6.3), якщо показник належить до групи показників-дестимуляторів – за формулою (6.4).

Для визначення коефіцієнтів вагомості застосовано метод парних порівнянь, в основу якого покладено матрицю I_{kj}, сформовану за таких умов:

$$\begin{Bmatrix} I_{kj} = 1, \text{якщо } X_k = X_j \\ I_{kj} = 0, \text{якщо } X_k \langle X_j \\ I_{kj} = 2, \text{якщо } X_k \rangle X_j \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$

Знаки рівності, менше або більше відповідають рівнозначності характеристик, меншій або більшій їх значущості порівняно з іншими. Результати парних порівнянь за характеристиками наведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Матриця парних порівнянь за основними характеристиками типового та розробленого обладнання

Характеристика	Продуктивність	Потужність	Вага	Сума	Ранг
Продуктивність	1	2	2	5	1
Потужність	0	1	2	3	2
Вага	0	0	1	1	3

Складено самостійно

Вагові коефіцієнти визначено за формулою:

$$\omega_i = \frac{2 \times (N - i + 1)}{N \times (N + 1)}, \quad (6.6)$$

де N – кількість характеристик;

i – ранг за N-ю характеристикою.

У результаті розрахунків вагові коефіцієнти за характеристиками продуктивність, потужність, вага становили відповідно 0,50, 0,33 та 0,17.

$$\omega = \frac{2 \times (3 - 1 + 1)}{3 \times (3 + 1)} = 0,50,$$

$$\omega = \frac{2 \times (3-2+1)}{3 \times (3+1)} = 0,33,$$

$$\omega = \frac{2 \times (3-3+1)}{3 \times (3+1)} = 0,17.$$

Результати розрахунку інтегрального показника відносних переваг нового апарату порівняно з типовим обладнанням наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Інтегральна оцінка розробленого апарата порівняно з типовим

Показники	КИЙ-В ГК-6М	АРЖМ-0.07-1	Коефіцієнт, k_i	Коефіцієнт вагомості, w_i	Відносний одиничний показник з урахуванням коефіцієнта вагомості, K_i
Продуктивність, кг/рік	10584	12452	1,18	0,50	0,59
Потужність, кВт	3	1	3,40	0,33	1,13
Вага, кг	39	20	1,95	0,17	1,64
Разом	–	–	–	1,00	2,76

Складено самостійно

У результати порівняння сукупності характеристик (продуктивність, потужність, вага, площа) зроблено висновок про переваги розробленого апарата порівняно з типовим. Інтегральний показник переваг (K_i) розробленого апарата порівняно з типовим обладнанням значно перевищує 1,0.

6.2. Визначення ціни розробленого апарата

З метою визначення доцільності упровадження у виробництва розробленого апарата визначено його ціну. Розрахунки здійснено за укрупненими нормативами. Ціна нового апарату визначена з урахуванням

таких її складових, як собівартість, прибуток, податок на додану вартість [109].

Розрахунок собівартості нового апарата здійснено з урахуванням структури витрат операційної діяльності. У складі собівартості нового апарата основні витрати пов’язані з придбанням матеріалів для виготовлення апарата. Результат розрахунку витрат на матеріали для виробництва нового апарата наведено у табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Витрати на матеріали для виробництва нового апарата

Матеріал	Од. вимір	Значення	Ціна, грн	Витрати, грн
Основні матеріали	кв. м	0,51	5200	2652,00
Інші матеріали	–	–	–	1326,00
Разом	–	–	–	3978,00

Інші витрати визначено враховуючи їх склад на підприємствах основним видом економічної діяльності яких, згідно КВЕД є виробництво машин і устаткування для виготовлення харчових продуктів (код за КВЕД 28.93). За даними Державної служби статистики України (2019 р.) у складі операційних витрат машинобудівних підприємств (код за КВЕД 28.93) частка матеріальних витрат становила 76,6%, амортизація – 4,3%, витрат на оплату праці – 18,1%, відрахування на соціальні заходи – 3,9%, інші витрати – 1,0%, рентабельність операційної діяльності – 6,0% [110]. Спираючись на структуру витрат і показник рентабельності виробництва, наведені вище, собівартість нового апарата визначена на рівні 5193 грн. (табл. 6.5), ціна – 6606 грн (з ПДВ) (табл. 6.6).

Таблиця 6.5

Собівартість нового апарата

Показник	Питома вага, %	Сума, грн.
Матеріальні витрати	76,60	3978
Амортизація	4,30	223
Заробітна плата та відрахування на соціальні заходи	18,10	940
Інші операційні витрати	1,00	52
Разом	100,00	5193

Складено самостійно

Таблиця 6.6

Ціна нового апарата

Показник	Од. виміру	Значення
Собівартість	грн	5193
Рентабельність	%	6,0
Прибуток	грн	312
Ціна без ПДВ	грн	5505
ПДВ	грн	1101
Ціна з ПДВ	грн	6606

Складено самостійно

6.3. Оцінювання економічного ефекту впровадження розробленого апарата

Для обґрунтування доцільності впровадження у виробництво розробленого апарата використано показники, що відображають ефективність використання цього апарата у практичній діяльності. Під час розрахунків використано такі показники: ціна апарату, інтегральний показник технічного рівня, продуктивність, термін служби, річні експлуатаційні витрати [113].

Щодо ціни апарату, то у розрахунках ці показники прийнято без ПДВ. Таким чином ціна базового обладнання прийнята на рівні 14408 грн, нового апарата – 5505 грн. Інтегральний показник технічного рівня становить за

базовим апаратом 1,0, за новим – 2,76. Річна продуктивність прийнята на рівні 17010 та 20012 кг продукції відповідно в разі використання типового та нового апарата відповідно. Термін служби типового та нового апаратів прийнято на рівні 5 років, що відповідає практиці діяльності. Під час визначення витрат, пов'язаних з експлуатацією обладнання враховано амортизаційні витрати, витрати на поточний ремонт, витрати на електроенергію. За попередніми оцінками експлуатаційні витрати для типового апарата визначено на рівні 230290 грн на рік, для нового – 82799 грн на рік (табл. 6.7).

Таблиця 6.7

Поточні витрати для типового та нового апаратів

Показник	Типовий апарат	Новий апарат
Ціна (без ПДВ), грн	14408	5505
Норма амортизації, %	20,0	20,0
Сума амортизаційних відрахувань на рік, грн	2882	1101
Витрати на поточний ремонт, %	10,0	10,0
Витрати на поточний ремонт, грн	1441	1441
Витрати електроенергії	10996	3234
Інші витрати	216125	78353
Разом річні експлуатаційні витрати, грн	231443	84129

Враховуючи витрати та продуктивність визначено питомі витрати на 1 кг продукції в разі використання типового та нового обладнання. Розрахунок питомих витрат на 1 кг продукції за базового та нового апарата здійснено за формулою:

$$ПВитр = \frac{K + T \cdot C}{T \cdot N}, \quad (6.7)$$

де *ПВитр* – питомі витрати на одиницю продукції, грн/кг;

K − ціна апарата, грн;

T− термін служби, роки;

C − річні експлуатаційні витрати, грн/рік;

N − річний обсяг випуску продукції, кг/рік.

За вихідних умов цей показник складатиме для типового апарата 13,78 для нового – 4,26 грн/кг продукції. Економічний ефект складатиме 9520 грн на 1000 кг, на весь випуск – 190,5 тис. грн на рік на один апарат.

$$(14408+5\times231443)/(5\times17010)=13,78 \text{ грн/кг},$$

$$(5505+5\times84129)/(5\times20012)=4,26 \text{ грн/кг}.$$

$$(13,78 - 4,26)\times1000 = 9520 \text{ грн/1000 кг}.$$

$$9,52\times20012\div1000=190,5 \text{ тис. грн}.$$

Результати розрахунків наведені у табл. 6.8.

Таблиця 6.8

Основні техніко-економічні показники базового та нового апарата

Показник	Од. виміру	Типовий апарат	Новий апарат
Інтегральний показник технічного рівня	коефіцієнт	1,0	2,76
Термін служби	роки	5,0	5,0
Ціна апарата (без ПДВ)	грн	14408	5505
Питомі експлуатаційні витрати	грн/кг	13,78	4,26
Додатковий прибуток	грн/кг	–	9,52
Річний економічний ефект	тис. грн/рік	–	190,5

Висновки до розділу 6

1. Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок щодо доцільності виробництва та впровадження у практичну діяльність розробленого апарата. Новий апарат порівняно з базовим має значні переваги, а саме більш високий показник технічного рівня та меншу ціну. Це свідчить про високий рівень конкурентоспроможності розробленого апарата для підприємств, які займаються виробництвом устаткування для виготовлення харчових продуктів.

2. Розрахунки свідчать про доцільність впровадження апарата у закладах ресторанного господарства. Економічний ефект від впровадження розробленого апарата складатиме 190,5 тис. грн на рік на один апарат.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сучасного досвіду використання інфрачервоного жарення харчової продукції та апаратів для його реалізації визначено проблему створення рівномірності густини променевого потоку від одного випромінювача на поверхні опуклого продукту, що визначило напрям подальших наукових досліджень.

2. Здійснено аналітичне моделювання рівномірного опромінення верхньої поверхні приймачів півкруглого, півеліптичного профілю без урахування втрат теплоти на відбивачі та з ними. Проведено моделювання всебічного рівномірного опромінення приймача півеліптичного та еліптичного профілів, що дало розв'язок оберненої задачі теплообміну випромінюванням для визначення профілю відбивача з метою рівномірного опромінювання теплоприймача, який має опуклий переріз. На основі проведеного аналітичного моделювання розроблено фрагментовані форми відбивачів, які уможливлюють фронтальний та бічний доступи до продукту, беручи до уваги технологічні особливості його обробки.

3. Комп'ютерним моделюванням розповсюдження теплових променів у робочих камерах теплотехнічних систем за допомогою програмного комплексу TracePro доведено, що отримана методика профілювання відбивачів теплотехнічних систем є коректною. Кількісна оцінка ефективності використання спрофільованого відбивача шляхом визначення температури всередині робочої камери підтвердила верифікацію створеної моделі променевого теплообміну.

4. Розроблено експериментальний апарат із рефлектором для ІЧ-жарення м'ясних напівфабрикатів, який забезпечує рівномірну густину променевого потоку на поверхні продукту. Використання в апараті спрофільованого відбивача скорочує термін жарення натуральних порційних м'ясних напівфабрикатів опуклої форми на 33 %, додатково покращуючи зовнішній вигляд, консистенцію та колір на поверхні й розрізі виробу.

5. Шляхом органолептичного оцінювання визначено якість отриманого продукту з яловичини, жареного в апараті з відбивачем променевого потоку та без нього. Отримані профілограми доводять переваги застосування відбивача в апараті інфрачервоного жарення.

6. Розроблено промисловий зразок апарата з рефлектором для жарення м’ясних напівфабрикатів АРЖМ-0.07-1, який завдяки спрофільованому відповідно до розв’язку оберненої задачі рефлектору забезпечує на поверхні продукту рівномірну густину променевого потоку зі значенням близько 30 кВт/м2.

7. У результаті аналітичного моделювання процесу інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів отримано рівняння для розрахунку кінетики середньої температури внутрішніх шарів продукту та тривалості жарення в розробленому апараті. Створено імітаційну модель кінетики температури м’ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення, яка доводить адекватність системно-динамічного моделювання як інструменту комплексної оцінки та оптимізації ІЧ-обладнання харчових виробництв.

8. Шляхом імітаційного моделювання проведено комплексне оцінювання економічної ефективності новоствореного апарата АРЖМ-0.07-1 порівняно з пристроєм без рефлектора. Визначено, що використання відбивача променевого потоку в апараті АРЖМ-0.07-1 скорочує час отримання продукції на 27 %, збільшує продуктивність жарення на 46 %, зменшує його питому енергоємність на 47 %, питому металоємність на 28 %, питому витратність на 87 %.

9. Економічні розрахунки свідчать про доцільність упровадження апарата в закладах ресторанного господарства. Економічний ефект від упровадження розробленого апарата становитиме 190,5 тис. грн на рік на один апарат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. – Л.: Энергия, 1971. – 294 с.

2. Андрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / Андрианов В.Н. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.

3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 934 с.

4. Технология производства продукции общественного питания: Учебник для студентов, обуч. по спец. 1011 «Технология и орг. общественного питания» / В.С. Баранов, А.И. Мглинец, Л.М, Алешина и др. – М.: Экономика, 1986. – 400 с.

5. Домарецький В.А., Остапчук М.В., Українець А.І. Технологія харчових продуктів: Підручник / За ред. д-ра техн. наук, проф. А.І. Українця. – К.: НУХТ, 2003. – 572 с.

6. Перцевий Ф.В. та ін. Технологія продукції харчових виробництв: Навч. посібник / Ф.В. Перцевий, Н.В. Камсуліна, М.Б. Колеснікова, М.О. Янчева, П.В. Гурський, Л.М. Тіщенко / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2006. – 318 с.: табл.

7. Черевко О.І. та ін. Процеси та апарати жаріння харчових продуктів: Навч. посібник / О.І. Черевко, В.М. Михайлов, І.В. Бабкіна / Харк. держ. акад. технол. та орг. харчування. – Харків, 2000. – 332 с.: іл.; табл. Бібліогр.: 153 назви.

8. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / Харк. держ. акад. технол. та орг. харчування. – Харків, 2002. – 420 с., українською.

9. Дейниченко Г.В., Єфімова В.О., Постнов Г.М. Обладнання підприємств харчування: Довідник. В 3-х ч. Ч. 2 – Харків: ДП Редакція «Мир техники и технологий», 2003. – 380 с.: іл.

10. Устаткування підприємств харчування. Практикум : навч. посіб. Ч. 2: Теплове устаткування / Г.В. Дейниченко, Н.О. Афукова, Г.М. Постнов та ін. – К. : Фірма «Інкос», 2016. – 384 с.

11. Рогов А.И. Применение инфракрасного излучения в отраслях пищевой промышленности (Обзор) / А.И. Рогов, Н.Н. Жуков. – М. : ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. – 78 с.

12. Ильясов С.Г., Красников В.В. Физические основы ИК-облучения пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 359 с.

13. Левитин И.Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 264 с., ил.

14. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.

15. Гинзбург А.С. Источники ИК излучения (Обзор) / А.С. Гинзбург, Б.М. Ляховицкий. М. : ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. – 70 с.

16. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

17. Блох А.Г. и др. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.: ил.

18. Электротермическое оборудование. Справочник под общ. ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980.

19. Арендарчук А.В., Слободской А.П. Электротермическое оборудование направленного излучения // Библиотека электротермиста. Вып. 78. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 80 с.

20. А.с. 1717095 СССР, МКИ А 47 J 37/06. Устройство для тепловой обработки пищевых продуктов / А.Н. Кимьягаров, О.А. Худайбердиев (СССР). – № 4735915/13; Заявл. 11.09.89; Опубл. 07.03.92, Бюл. № 9. – 4 с.

21. А.с. 603163 СССР, МКИ А 47 J 37/00. Устройство для тепловой обработки пищевых продуктов / В.П. Кирпичников, С.В. Некрутман (СССР). – № 2340263/28-13; Заявлено 25.03.76; Опубл. 15.09.79, Бюл. № 18. – 4 с.

22. А.с. 914029 СССР, МКИ А 47 J37/04. Устройство для тепловой обработки пищевых продуктов / Л.В. Островский, Ю.Р. Муратов, Е.В. Муратова, В.З. Порцев (СССР). – № 2893265/28-13; Заявл. 04.01.80; Опубл. 23.03.82, Бюл. № 11. – 4 с.

23. Пат. 4317441 США, МКИ А 47 J 37/00. Broiler apparatus. Устройство для жарения мяса / Roger M. Berg (США). – № 67368 ; заявл. 17.08.79; опубл. 02.03.82, НКИ 126/41. – 12 с.

24. Пат. 4664923 США, МКИ А 23 L 1/01.Method of infrared tunnel oven cooking of food products. ИК-аппарат для приготовления пищи/ Wagner Dennis, Wells Harold D. (США). – № 778350; Заявл. 24.10.85; Опубл. 12.05.87; НКИ 426/233. – 14 с.

25. Инфракрасный против обычного: отличия в работе грилей. – Режим доступу: https://whogrill.ru/stati/infrakrasnyy-protiv-obychnogo-otlichiya-v-rabote-griley.html. – Назва з екрану.

26. Плита инфракрасная Bertos E7P2M/VTR. Режим доступу: http://pmltd.com.ua/products/plita_infrakrasnaya_bertos_e7p2mvtr. – Назва з екрану.

27. Топольник В.Г. Количественная оценка качества оборудования общественного питания / В.Г. Топольник. – Донецк : Кассиопея, 1998. – 196 с.

28. Топольник В.Г. Количественная оценка качества оборудования общественного питания : дисс. … д-ра техн. наук : 05.18.12 / В.Г. Топольник. – Донецк, 2001. – 544 с. – Научный консультант – А.С. Ратушный.

29. 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.

30. Тормосов Ю.М. Геометричне моделювання та оптимізація процесу теплової променевої обробки харчових продуктів: дис. док-ра техн. наук /Тормосов Ю.М. – Київ: (КНУБА), 2004 – 270 с.

31. Саєнко С. Ю. Визначення раціональних форм рефлекторів сушарок / С. Ю. Саєнко, В. П. Плевако, І. П. Педорич // Прикладна геометрія та інженерна графіка / Таврійський держ. агротехнол. ун-т. – Мелітополь., 2012. – Т. 54. – №4. – С. 117–125.

32. Геометричне моделювання рефлекторів інфрачервоних апаратів харчової промисловості: монографія / Ю.М. Тормосов, С. Ю. Саєнко; Харківський держ. Ун-т харч.та торгівлі. – Х., 2018. – 123 с.

33. Salam A., Ammar B.Altemimi, Asaad R. S. Al-Hilphy, Lee Yi-Chen, Francesco Cacciola Comprehensiv Review on Infrared Heating Applications in Food Processing Published online 2019 Nov 15/ doi: 10/3390/molecules24224125.

34. Компьютерне моделювання температурного поля в процесі спікання карбідних композитів при використанні індукційного та променевого нагрівання / В.А. Дутка// Сверхтвердые материалы. – 2013. - №1. – с.40-55.

35. Zahorulko, A., Zagorulko, A., Yancheva, M., Serik, M., Sabadash, S., Savchenko-Pererva, M. Development of the plant for low-temperature treatment of meat products using ir-radiation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, Vol 1, No 11 (97), Pp. 17-22. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154950.

36. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В. Разработка новой технологии мясных рубленых изделий для жарки в поле ИК-излучения // Прогресивні технології для удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. праць: – Харків: ХДАТОХ, 1999. – С. 58–64.

37. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В. Відносна ефективність використання променистої енергії середовища з підвищеним вмістом двоокису вуглецю // Прогресивні технології для удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. праць: У 2 ч. – Харків: ХДАТОХ, 2000. – Ч. 1. – С. 371–378.

38. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В., Лебединець І.В. Про можливості практичного використання закономірностей молекулярної

спектроскопії у теплових процесах харчових виробництв // Прогресивні технології для удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. праць: У 2 ч. – Харків: ХДАТОХ, 2000. – Ч. 2. – С. 169–174.

39. Черевко О.І., Михайлов В.М., Лебединець І.В. Застосування спектральних властивостей водяної пари у теплових процесах харчових виробництв // Обладнання та технології харчових виробництв: Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2001. – Вип. 6. – С. 166–171.

40. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В. Дослідження інтенсифікації ІЧ-жаріння виробів з котлетного фаршу // Науковий вісник ПУСКУ. – 2001. – Вип. 1. – №3(3). – С. 53–56.

41. Черевко О.І., Михайлов В.М., Ляшенко Б.В. Вплив способу смаження на структурно-механічні властивості виробів із котлетного фаршу // Вісник ДонДУЕТ. – 2001. – № 1(9). – С. 61–66.

42. Черевко О.І., Михайлов В.М., Лебединець І.В. Експериментальні дослідження теплової обробки харчових продуктів інфрачервоним випромінювання у пароповітряному середовищі // Обладнання та технології харчових виробництв: Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, 2002. – Вип. 7. – С. 365–372.

43. Черевко О.І., Михайлов В.М., Бабкіна І.В. Дослідження динаміки тепло- та масоперенесення за комбінованого процесу теплової обробки харчових продуктів // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі: Зб. наук. пр. – Харків: ХДУХТ, 2002. – Ч. 1. – С. 206–211.

44. Черевко А.И., Михайлов В.М., Лебединец И.В. Разработка и исследование высокоэффективного комбинированного процесса тепловой обработки пищевых продуктов // Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технолгических процессов пищевых производств: Сб. науч. тр. – М: МГУПБ, 2002. – С. 316–318.

45. Подгорный А.Л. Отражения от косых поверхностей при разных источниках излучения / Подгорный А.Л. // Вопросы прикладной геометрии. – К: КИСИ. – 1969 .– С. 25–27.

46. Подгорный А.Л. Поверхности отраженных лучей / Подгорный А.Л. // Прикл. геометрия и инж. графика. – 1975. – № 20. – С. 17–24.

47. Подгорный А.Л. Геометрическое моделирование поступления солнечной радиации на разные поверхности / Подгорный А.Л. // Прикладная геометрия и инженерная графика. – 1993. – № 34. – С. 10–11.

48. Подгорный А.Л. О множествах отраженных лучей при точечном и линейном освещении / А.Л. Подгорный, Н.И. Снисаренко // Прикладная геометрия и инженерная графика. – 1969.– № 8. – С. 128–135.

49. Снисаренко Н.И. Построение лучей, отраженных от поверхностей вращения / Снисаренко Н.И. // Прикладная геометрия и инженерная графика. – 1969. – № 13. – С. 135–141.

50. Дворецкий А.Т. Формообразование отражающей кривой по заданной её ортотомике / Дворецкий А.Т. // Прикладна геометрия та інженерна графіка. – 1997. – № 62. – С.94–96.

51. Дворецкий А.Т. Распределение прямой солнечной энергии на цилиндрическом приемнике / Дворецкий А.Т. // Прикладна геометрия та інженерна графіка. – 2001. – № 68.– С. 89–90.

52. Козак Ю.В. Компьютерное моделирование некоторых поверхностей отражённых лучей / Козак Ю.В. // Зб. праць Міжнародної науково – практичної конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання”. Частина 3. – Харків: ХІПБ ВМС України, 1998. – С. 112–115.

53. Куценко Л.Н. Теоретические основы и геометрические приложения метода А-отображений: дис. д-ра техн. наук / Куценко Л.Н. – 1992. – 628 с.

54. Мазуренко О.Д. Геометричне моделювання катакаустик та відбивальних кривих на площині: дис. канд. техн. наук / Мазуренко О.Д. – Харків: ХДПУ, 1996.– 244 с.

55. Середа Н.І. Геометричне моделювання перебігу променів в еліптичних та параболічних відбивальних системах: дис. канд. техн. наук/ Середа Н.І. – Київ: КНУБА, 1999 – 174 с.

56. Тормосов Ю. М. Моделювання втрат енергії в інфрачервоних апаратах харчової промисловості / Ю. М. Тормосов, С. Ю. Саєнко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. - 2019. - Вип. 1. - С. 114-124. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2019_1_13.

57. Тормосов Ю.М. Дослідження диференціального рівняння для опису форми профілю рефлектора, що забезпечує заданий закон розподілу відбитих променів [Текст] / Тормосов Ю.М. // Прикладна геометрія та інженерна графіка: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2003. – №73. – С. 110–115.

58. Тормосов Ю.М. Комп'ютерне моделювання відбивальної системи сушильної камери / Тормосов Ю.М., Саенко С.Ю. // Modern problems of modeling No. 12 (2018). – С. 144–153. **DOI:** https://doi.org/10.33842/2313-125X-2018-12

59. Плевако В.П. Визначення форми рефлектора для рівномірного обігріву плоскої поверхні [Текст] / Плевако В.П., Саєнко С.Ю. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні проблеми геометричного моделювання", Україна, Львів, 20 жовтня – 23 жовтня. –Львів, 2003. – С.191–194.

60. Плевако В.П. Визначення форми рефлектора ІЧ установки зі сторчовими боковими стінками [Текст] / Плевако В.П., Саєнко С.Ю. // Праці Таврійського державної агротехнічної академії. – №4, т.26. – Мелітополь: ТДАТА – 2004. – С. 55–59.

61. Плевако В.П. Визначення форм рефлекторів теплотехнічних установок, які забезпечують заданий розподіл тепла на приймачах довільних перерізів [Текст] / Плевако В.П., Саєнко С.Ю. // Геометричне та

комп’ютерне моделювання : Збірник наукових праць / Редкол.; Відп. ред. Ю.М. Тормосов та ін.; Харк. держ. університет харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2007 – Вип. 17. – С. 75–90.

62. Плевако В.П. Доведення доцільності розрахунку теплотехнічних систем у пласкій постановці [Текст] / Плевако В.П., Саєнко С.Ю. // Геометричне та комп’ютерне моделювання : Збірник наукових праць / Редкол.; Відп. ред. Ю.М. Тормосов та ін.; Харк. держ. університет харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2008 – Вип. 21. – С.20–29.

63. Саєнко С.Ю. Моделювання розповсюдження теплових променів у ІЧ-апаратах харчової промисловості засобами TracePro [Текст] / С.Ю. Саєнко, В.П. Плевако // Геометричне та комп’ютерне моделювання : Збірник наукових праць / Редкол.; Відп. ред. Ю.М. Тормосов та ін.; Харк. держ. університет харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2009. – Вип. 25. – С. 57–62.

64. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.: ил.

65. Тимощук І.І. Загальна технологія м’яса та м’ясопродуктів. – Київ: Урожай, 1992. – 159 с.

66. Богомолов А.В., Перцевой Ф.В., Сафонова О.Н. и др. Технология переработки продукции животноводства. – С-Пб: Гиорд, 2001. – 356 с.

67. COSMOSWorks Online User’s Guide. – Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.

68. TracePro. User’s Manual Supplement. Release 3.2. – Lambda Research Corporation, USA, 2004.

69. Алямовский А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб. : БХВ – Петербург, 2005. – 800 с.

70. Напівфабрикати м’ясні та м’ясорослинні посічені [Текст]: ДСТУ ISO 4437:2005. – Чинний від 2006-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 24 с. – (Національні стандарти України).

71. ДСП 4.4.5.078-2001 «Мікробіологічні нормативи та методи контролю продукції громадського харчування» [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : http://uazakon.com/documents/date_b2/pg_gxcvoe/index.htm. – Назва з екрану.

72. Продукти м`ясні. Органолептичне оцінювання показників якості. Частина 2. Загальні вимоги. З поправкою [Текст]: ДСТУ ISO 4823.2:2007. – Чинний від 2009-01-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 14 с. – (Національні стандарти України).

73. Теплофизические характеристики пищевых продуктов : Справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1990. – 287 с. : ил.

74. Скрипник В.О. Наукове обгрунтування енергоефективних процесів і обладнання кондуктивного жарення натуральних м’ясних виробів : дис. … д-ра техн. наук : 05.18.12 / В.О. Скрипник. – Харків, 2016. – 458 с. – Науковий консультант – О.І. Черевко.

75. Шевченко А.О. Використання електроконтактного нагрівання в процесах жарення кулінарної продукції : дис. … канд. техн. наук : 05.18.12 / А.О. Шевченко. – Харків, 2012. – 333 с. – Науковий керівник – В.М. Михайлов.

76. Дослідження сенсорне. Методологія. Загальні настанови [Текст]: ДСТУ ISO 6658:2005. – Чинний від 2006-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 17 с. – (Національні стандарти України).

77. Системные исследования технологий переработки продуктов питания / О.Н. Сафонова, Ф.В. Перцевой, О.А. Гринченко, А.Л. Фощан, П.П. Пивоваров, А.В. Богомолов, Л.Н. Тищенко, Б.Ч. Гарнцарек. – Харьков: 2000. – 200 с.

78. Антонов А.В. Системный анализ: Учебник для вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2006. – 452 с.

79. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. 3-е изд. – СПб.: ПИТЕР; Киев: Изд. группа BHV, 2004. – 847 с.

80. Томашевський В.М. Моделювання систем. – К.: Видавнича група BHV, 2005 – 349 с.

81. Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку / О.І. Черевко, О.А. Маяк, С.М. Костенко, А.М. Сардаров // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2019. – Вип. 1(29). – С. 75–85.

82. Оцінка тепломасообмінного обладнання шляхом імітаційного моделювання / Черевко О.І., Маяк О.А., Костенко С.Н., Сардаров А.М. // Наукові праці НУХТ 2019. Том 25. № 5. – Київ, НУХТ, 2019. – С. 64-73.

83. Биткова Т.В. Построение системно-динамических моделей в среде Vensim. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Имитационное моделирование» для студентов специальностей «Экономическая кибернетика» и «Прикладная экономика». – Х.: ХНУ, 2004 – 52 с.

84. Меркулова Т.В. Экономико-математическое моделирование: учебное пособие / Т.В. Меркулова, Т.В. Биткова, Е.Ю. Кононова. – [2-е изд., дораб.] – Х.: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2011. – 276 с.

85. Плевако В.П. Визначення форми рефлектора для рівномірного опромінювання приймача з круговою формою перерізу [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Педорич І.П. // Геометричне та комп'ютерне моделювання : Збірник наукових праць / Редкол.; Відп. ред. Ю.М. Тормосов та ін.; Харк. держ. університет харчування та торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2008. – Вип. 21. – С. 83–90.

86. Плевако В.П. Рефлектори фрагментованих форм для теплової обробки продукції [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Педорич І.П. // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Прикладна геометрія та інженерна графіка». Випуск 80. Відповідальний редактор В.Є. Михайленко. – К.: КНУБА, 2008. – С. 259–263.

87. Плевако В.П. Фрагментований рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з напівеліптичною формою перерізу [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Педорич І.П. // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / відп. ред. О.І. Черевко; Харківський державний університет харчування і торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2008. – Вип. 2 (8). – С. 266–274.

88. Плевако В.П. Геометричне моделювання поверхні рефлектора з урахуванням втрат теплоти [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Педорич І.П. // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет – Вип. 24, т. 47. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010.– С. 51–60.

89. Костенко С.М. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінення приймача напівеліптичного перерізу [Текст] // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / відп. ред. О.І. Черевко; Харківський державний університет харчування і торгівлі. – Харків: ХДУХТ, 2009. – Вип. 1 (9). – С. 261–267.

90. Плевако В.П. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінювання приймача еліптичного перерізу [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Педорич І.П. // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Голов. ред. О.О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського – Донецьк, ДонДУЕТ, 2009. – Вип. 21. – С. 256–260.

91. Плевако В.П. Комп’ютерне моделювання процесу опромінювання приймача напівеліптичного перерізу [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М. // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / Голов. ред. О.О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського – Донецьк, ДонДУЕТ, 2009. – Вип. 22. – С. 269–273.

92. Плевако В.П. Верифікація методики профілювання відбивача [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Саєнко С.Ю. // Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки / Голов. ред. Б.В. Єгоров; Одеський національний університет харчових технологій – 2012. – Вип. 41. Т. 1. – С. 157–159.

93. Плевако В.П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку [Текст] / В.П. Плевако, С.М. Костенко, І.П. Педорич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2013. – Том 6, № 5 (66) – С. 42–45.

94. Плевако В.П. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача [Текст] / Плевако В.П., Костенко С.М., Лобов С.О. // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / Голов. ред. О.О. Шубін; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського – Донецьк, ДонДУЕТ, 2012. – Вип. 29. – С. 48–52.

95. Кулинария: Справочное пособие / Н.И. Губа, Б.Г. Лазарев. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 263 с.

96. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 3. Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням / В.П. Плевако, С.М. Костенко, І.П. Педорич ; за заг. ред. О.І. Черевка, В.М. Михайлова. – Х. : ХДУХТ, 2012. – 130 с.

97. Костенко С.М. Комплексна оцінка якості апарата АРЖМ-0.07-1 [Текст] // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. Харків : ХДУХТ, 2014. – Вип. 2 (20). – С. 168–173.

98. 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.

99. Potapov, V., Kostenko, S., Lobov, S. (2016), “Kinetics of Meat Semi-finished Products Temperature at Infrared Frying”, III International Conference “Industrial Technologies and Engineering” ICITE - 2016 will be held at the M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan, October 28-29, 2016, – pp. 366–370.

100. Потапов В.О. Імітаційне моделювання температурної кінетики інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів / В.О. Потапов,

С.М. Костенко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / відпов. ред. О.І. Черевко. – Харків: ХДУХТ, 2018. – Вип. 1(27). – С. 197–204.

101. Потапов В.А. Кинетика явлений переноса в процессе сушки : монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland / Германия. 2013. – 319 с.

102. Potapov, V., Kostenko, S. System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2016. – Вип. 2(24). – С. 218–225.

103. ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. М.І. Радченко, проф. Н.Л. Савицької. – Х. : Світ книг, 2016. – 550 с.

104. Потапов В.О. Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів / В.О. Потапов, С.М. Костенко, І.П. Педорич // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 35 (1311) 2018. – С. 71–77.

105. Черевко О.І., Маяк О.А., Костенко С.М., Сардаров А.М. Використання системного аналізу для оптимізації тепломасообмінного обладнання // «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» ІІІ Міжнар. науково-практ. конф., 4-6 вересня 2019 р. – С. 87–88.

106. Потапов В.О. Комплексне моделювання інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів / В.О. Потапов, Н.В. Федак, С.М. Костенко // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. пр. – Мелітополь, 2020. – Вип. 17 – С. 92–100.

107. Kostenko S., Fedak N., Mayak O. Simulation of the radiant heat transfer process in the elements of roasting equipment // Science Rise № 5, 2020. – P. 80-88.

108. Теплове обладнання. КИЙ-В Електронний ресурс. Режим доступа: https://www.kiy-v.ua/ru/gril-dlja-kur-jelektricheskij-kij-v-gk-6m.html https://technofood.com.ua/ua/shop/category/teplovoe-oborudovanie/grili-dlia-kur

109. Методичні рекомендації з формування собівартості продукції (робіт, послуг) у промисловості: [затв. наказом Міністерства промислової політики України від 09.07.2007 р. № 373]. – К. : ДІКЕД, 2007. – 321 с.

110. Державна служба статистики України – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/

111. Універсальний словник економічних термінів. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://epi.cc.ua/ekspluatatsionnyie-rashodyi-34738.html

112. Податковий Кодекс України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text

113. Методичні рекомендації до виконання економічної частини дипломних проектів, робіт для студентів денної та заочної форми навчання усіх спеціальностей / Упорядник Л.В.Соколова, О.І. Горбач, С.В. Гришко, Є.В. Діденко, Л.В. Левченко, Г.М. Путятіна, В.Г. Харченко. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 55

114. Saravacos G., Kostaropoulos A.E. Handbook of Food Processing Equipment. Springer; Berlin, Germany: 2016.

115. Lee S.C., Jeong S.M., Kim S.Y., Park H.R., Nam K.C., Ahn D.U. Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. Food Chem. 2006; 94:489–493. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.001.

116. Sakai N., Hanazawa T. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. Trends Food Sci. Technol. 1994;5:357–362. doi: 10.1016/0924-2244(94)90213-5.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

кількість експериментів $n := 6$

довірча вірогідність $\beta := 0.9$

критерій Стьюдента $t := 2.015$

значення температури №1, С $T1 := (564 \quad 569 \quad 567 \quad 572 \quad 574 \quad 572)$

середнє значення $mean(T1) = 569.667$

стандартне відхилення $Stdev(T1) = 3.724$

вибіркова дисперсія $Var(T1) = 13.867$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 1 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T1)}{n}} = 3.063$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T1) = -0.812$

коефіцієнт асиметрії $skew(T1) = -0.549$

значення температури №2, С $T2 := (486 \quad 491 \quad 488 \quad 493 \quad 496 \quad 492)$

середнє значення $mean(T2) = 491$

стандартне відхилення $Stdev(T2) = 3.578$

вибіркова дисперсія $Var(T2) = 12.8$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 2 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T2)}{n}} = 2.943$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T2) = -0.491$

коефіцієнт асиметрії $skew(T2) = -0.118$

значення температури №3, С $T3 := (566 \quad 571 \quad 570 \quad 574 \quad 576 \quad 575)$

середнє значення $mean(T3) = 572$

стандартне відхилення $Stdev(T3) = 3.742$

вибіркова дисперсія $Var(T3) = 14$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 3 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T3)}{n}} = 3.078$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T3) = -0.3$

коефіцієнт асиметрії $skew(T3) = -0.722$

значення температури №4, С $T4 := (555 \quad 559 \quad 558 \quad 562 \quad 565 \quad 562)$

середнє значення $mean(T4) = 560.167$

стандартне відхилення $Stdev(T4) = 3.545$

вибіркова дисперсія $Var(T4) = 12.567$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 4 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T4)}{n}} = 2.916$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T4) = -0.466$

коефіцієнт асиметрії $skew(T4) = -0.165$

значення температури №5, С $T5 := (476 \quad 480 \quad 477 \quad 484 \quad 485 \quad 482)$

середнє значення $mean(T5) = 480.667$

стандартне відхилення $Stdev(T5) = 3.67$

вибіркова дисперсія $Var(T5) = 13.467$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 5 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T5)}{n}} = 3.019$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T5) = -1.871$

коефіцієнт асиметрії $skew(T5) = -0.185$

значення температури №6, С $T6 := (557 \quad 562 \quad 559 \quad 564 \quad 567 \quad 564)$

середнє значення $mean(T6) = 562.167$

стандартне відхилення $Stdev(T6) = 3.656$

вибіркова дисперсія $Var(T6) = 13.367$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 6 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T6)}{n}} = 3.008$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T6) = -0.837$

коефіцієнт асиметрії $skew(T6) = -0.273$

значення температури №7, С $T7 := (515 \quad 519 \quad 517 \quad 523 \quad 525 \quad 522)$

середнє значення $mean(T7) = 520.167$

стандартне відхилення $Stdev(T7) = 3.817$

вибіркова дисперсія $Var(T7) = 14.567$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 7 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T7)}{n}} = 3.14$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T7) = -1.511$

коефіцієнт асиметрії $skew(T7) = -0.159$

значення температури №8, С $T8 := (436 \quad 440 \quad 437 \quad 443 \quad 445 \quad 443)$

середнє значення $mean(T8) = 440.667$

стандартне відхилення $Stdev(T8) = 3.615$

вибіркова дисперсія $Var(T8) = 13.067$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 8 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T8)}{n}} = 2.974$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T8) = -1.875$

коефіцієнт асиметрії $skew(T8) = -0.282$

значення температури №9, С $T9 := (517 \quad 521 \quad 519 \quad 524 \quad 527 \quad 525)$

середнє значення $mean(T9) = 522.167$

стандартне відхилення $Stdev(T9) = 3.817$

вибіркова дисперсія $Var(T9) = 14.567$

довірчий інтервал $\varepsilon\beta 9 := t \cdot \sqrt{\frac{Var(T9)}{n}} = 3.14$

коефіцієнт ексцесу $kurt(T9) = -1.511$

коефіцієнт асиметрії $skew(T9) = -0.159$

середній довірчий інтервал, С

$$\varepsilon\beta ср := \frac{\varepsilon\beta 1 + \varepsilon\beta 2 + \varepsilon\beta 3 + \varepsilon\beta 4 + \varepsilon\beta 5 + \varepsilon\beta 6 + \varepsilon\beta 7 + \varepsilon\beta 8 + \varepsilon\beta 9}{9} = 3.031$$

Додаток Б

ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ ОПРОМІНЕННЯ ПІВЕЛІПСА

Температура датчика, С $TC := \begin{pmatrix} 520 & 441 & 522 \\ 560 & 481 & 562 \\ 570 & 491 & 572 \\ 560 & 481 & 562 \\ 520 & 441 & 522 \end{pmatrix}$

Температура датчика, К $TK := TC + 273 = \begin{pmatrix} 793 & 714 & 795 \\ 833 & 754 & 835 \\ 843 & 764 & 845 \\ 833 & 754 & 835 \\ 793 & 714 & 795 \end{pmatrix}$

Коефіцієнт чорноти $\varepsilon_д := 0.96$

Стала Стефана-Больцмана, Вт/м2К4 $C0 := 5.67$

$i := 0..4 \qquad j := 0..2 \qquad qпр_{i,j} := \frac{C0}{\varepsilon_д} \cdot \left(\frac{TK_{i,j}}{100} \right)^4$

Густина опромінювання, Вт/м2

$$qпр = \begin{pmatrix} 2.336 \times 10^4 & 1.535 \times 10^4 & 2.359 \times 10^4 \\ 2.844 \times 10^4 & 1.909 \times 10^4 & 2.871 \times 10^4 \\ 2.983 \times 10^4 & 2.012 \times 10^4 & 3.011 \times 10^4 \\ 2.844 \times 10^4 & 1.909 \times 10^4 & 2.871 \times 10^4 \\ 2.336 \times 10^4 & 1.535 \times 10^4 & 2.359 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Додаток В

Програма визначення форми відбивача для рівномірного опромінювання півеліпса за врахування втрат теплоти

Велика піввісь приймача $a := 1$ Мала піввісь приймача $b := 0.5$

Коефіцієнт півеліпса $m := \frac{b}{a} = 0.5$

Відстань між випромінювачем та центром приймача $h := 4$

Відносна відстань між випромінювачем та центром приймача $\kappa := \frac{h}{a} = 4$

Відстань між центром приймача та консоллю опроміненої поверхні $s := 3$

Відстань між випромінювачем та консоллю опроміненої поверхні $r_{0max} := \sqrt{h^2 + s^2} = 5$

Половина кута прямого опромінювання $\theta_0 := \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\sqrt{\kappa^2 - m^2}}\right) = 0.247$

Половина кута непотрапляння на відбивач $\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{3}{4}\right) = 0.644$

Кут затінку $\beta_0 := \operatorname{atan}\left(\frac{m^2}{\sqrt{\kappa^2 - m^2}}\right) = 0.063$

Кутова координата поверхні приймача $\beta := 0, \frac{\pi}{180} .. \pi$

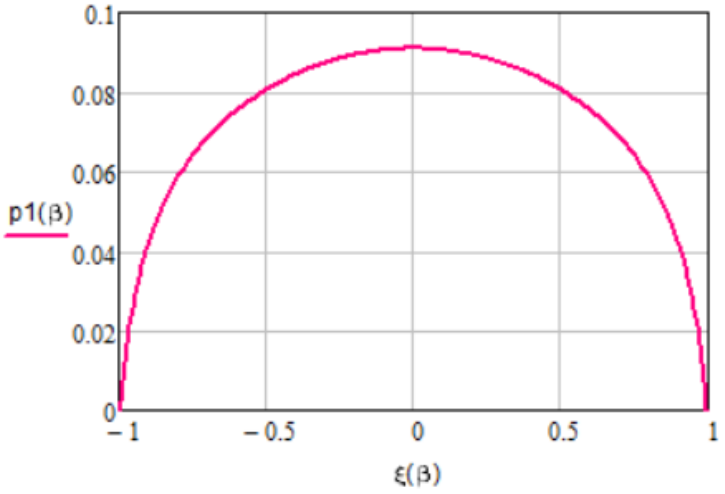
$$D(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^2\right)\cdot\cos(\beta)^2} \qquad D1(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^4\right)\cdot\cos(\beta)^2} \qquad Z(\beta) := m\cdot\frac{D1(\beta)}{D(\beta)^3}$$

$$\xi(\beta) := \frac{m\cdot\cos(\beta)}{D(\beta)} \qquad \eta(\beta) := \frac{m\cdot\sin(\beta)}{D(\beta)} - \kappa$$

Довжина півеліпса $\lambda := \int_0^{\pi} Z(\beta)\, d\beta = 2.422$

$$B(\beta) := \beta - \frac{\pi}{2} \qquad B0 := \frac{\pi}{2} - \beta_0 \qquad u(\beta) := \frac{(\kappa \cdot \sin(\beta) - m \cdot D(\beta)) \cdot D(\beta)^2}{\pi \cdot \left(m^2 - 2 \cdot \kappa \cdot m \cdot \sin(\beta) \cdot D(\beta) + \kappa^2 \cdot D(\beta)^2\right) \cdot D1(\beta)}$$

Прямий потік $p1(\beta) := if(|B(\beta)| > B0, 0, u(\beta))$



$p1(\beta) =$

0
0
0
0
$2.035 \cdot 10^{-3}$
$7.095 \cdot 10^{-3}$
0.012
0.017
0.021
...

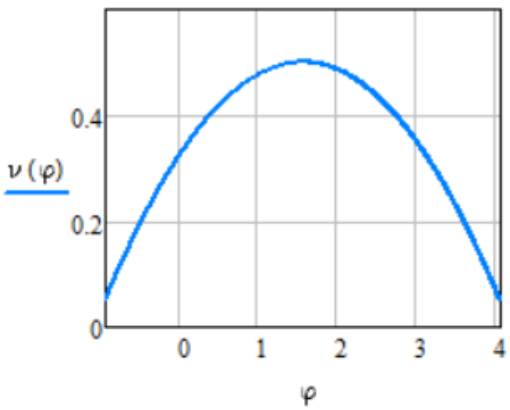
Функція втрат енергії на відбивачі

втрати за φ=0,5π $v0 := 0.5$

втрати за φ=-0,5π+α $v1 := 0.05$

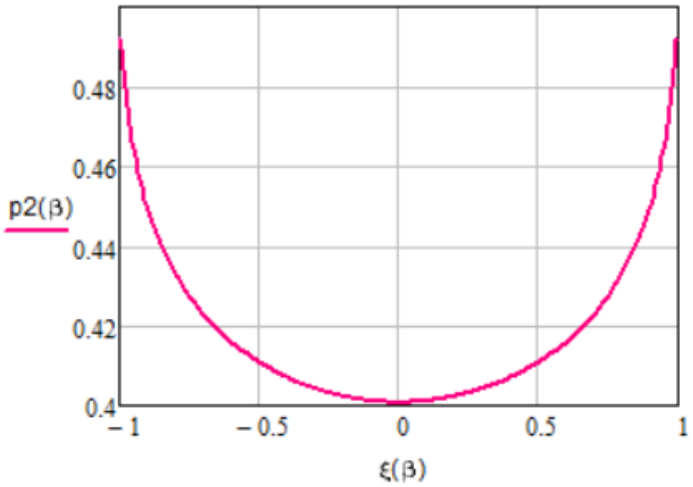
$$\nu(\varphi) := v0 - \frac{v0 - v1}{(\pi - \alpha)^2} \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^2 \text{ float , 6 } \rightarrow -0.0721101 \cdot (\varphi - 1.5708)^2 + 0.5$$

перевірка $\nu\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = 0.05$ $\nu\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.5$ $\nu\left(\frac{3}{2} \cdot \pi - \alpha\right) = 0.05$



Сумарні втрати енергії на відбивачі $I := \int_{\frac{-\pi}{2}+\alpha}^{3\cdot\frac{\pi}{2}-\alpha} (1 - \nu(\varphi))\, d\varphi = 3.248$

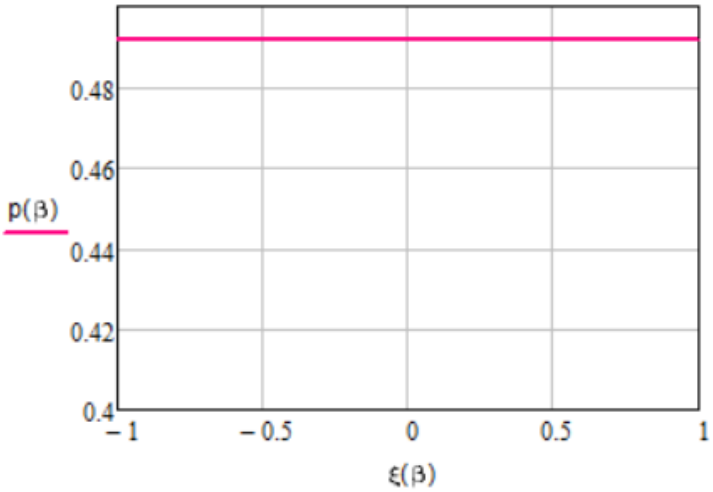
Відбитий потік $p2(\beta) := \frac{1}{\pi\cdot\lambda}\cdot(2\theta_0 + I) - p1(\beta)$



p2(β) =

0.492
0.492
0.492
0.492
0.49
0.485
0.48
0.475
0.47
0.466
...

Сумарний потік $p(\beta) := \frac{1}{\pi\cdot\lambda}\cdot(2\theta_0 + I)$



p(β) =

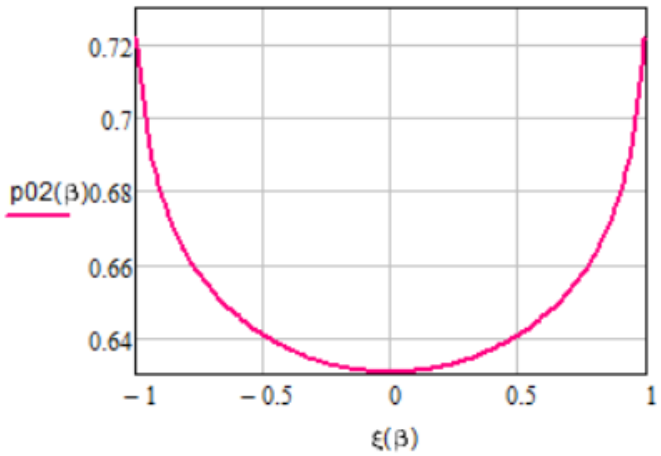
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
0.492
...

без втрат на відбивачі - індекс 0

Відбитий потік $p02(\beta) := \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot (\pi + \theta_0 - \alpha) - p1(\beta)$

$p02(\beta) =$

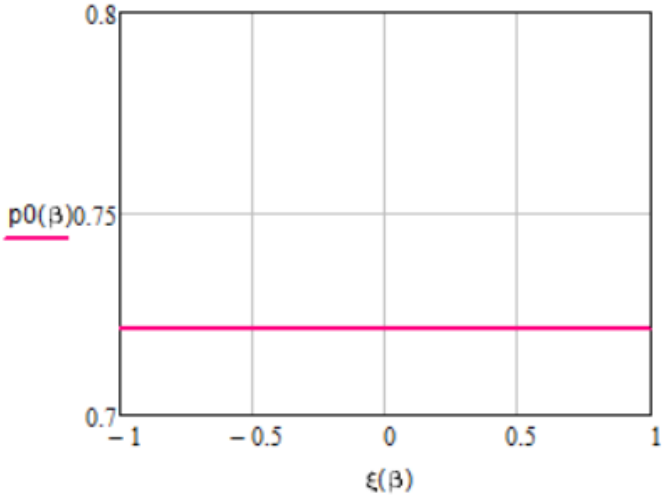
0.721
0.721
0.721
0.721
0.719
0.714
0.709
0.705
0.7
0.696
...



Сумарний потік $p0(\beta) := \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot (\pi + \theta_0 - \alpha)$

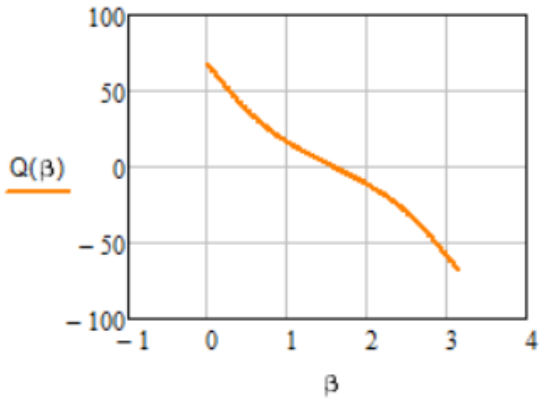
$p0(\beta) =$

0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
0.721
...



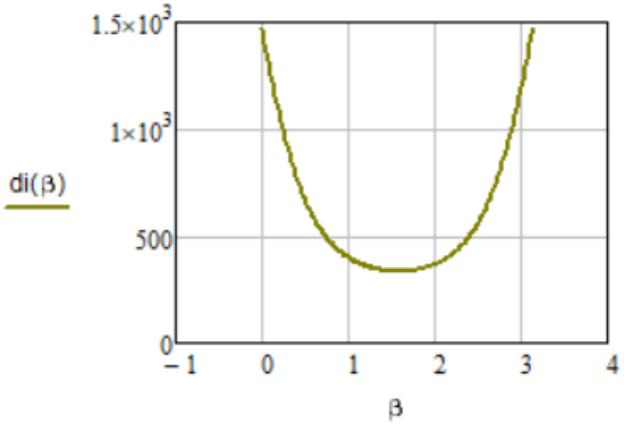
$$P := \frac{3 \cdot (1 - v0)}{v0 - v1} \cdot (\pi - \alpha)^2 = 20.802$$

$$Q(\beta) := P \cdot \left[\left[\frac{v0 - v1}{3 \cdot (1 - v0)} + 1 \right] \cdot (\pi - \alpha) - \frac{\pi}{1 - v0} \cdot \int_0^{\beta} p2(\beta) \cdot Z(\beta)\, d\beta \right]$$



Коефіцієнти кубічного рівняння $kp := \frac{P}{3} = 6.934$ $kq(\beta) := \frac{Q(\beta)}{2}$

$di(\beta) := kq(\beta)^2 + kp^3$



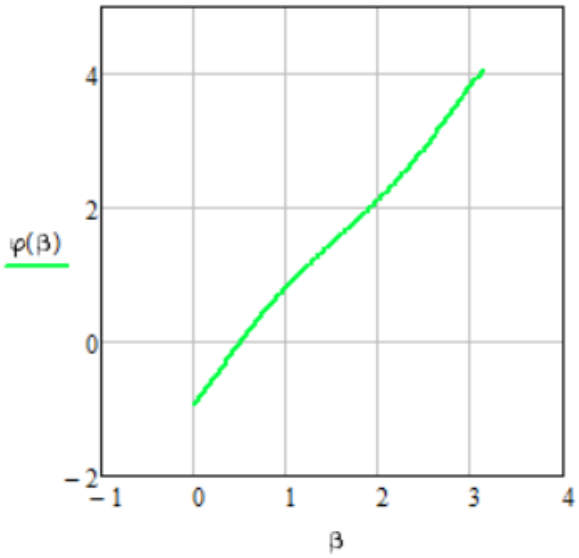
Коефіцієнти Кардана $ku(\beta) := \sqrt[3]{-kq(\beta) + \sqrt{kq(\beta)^2 + kp^3}}$

$kv(\beta) := \sqrt[3]{-kq(\beta) - \sqrt{kq(\beta)^2 + kp^3}}$

Дійсний корінь кубічного рівняння $\Phi(\beta) := ku(\beta) + kv(\beta)$

Кутова координата поверхні відбивача φ

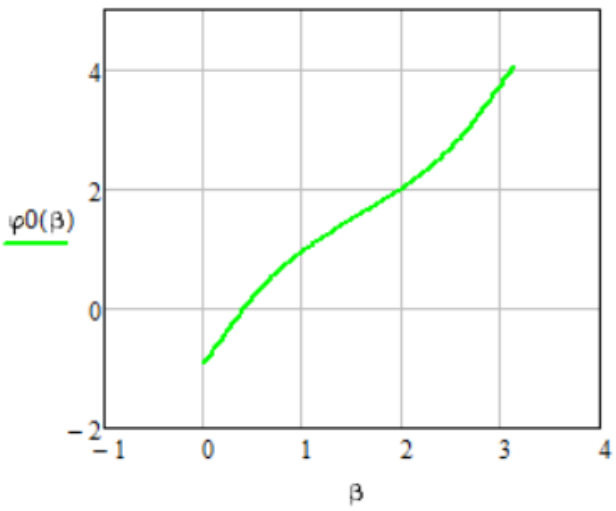
$$\varphi(\beta) := \Phi(\beta) + \frac{\pi}{2}$$



φ(β) =

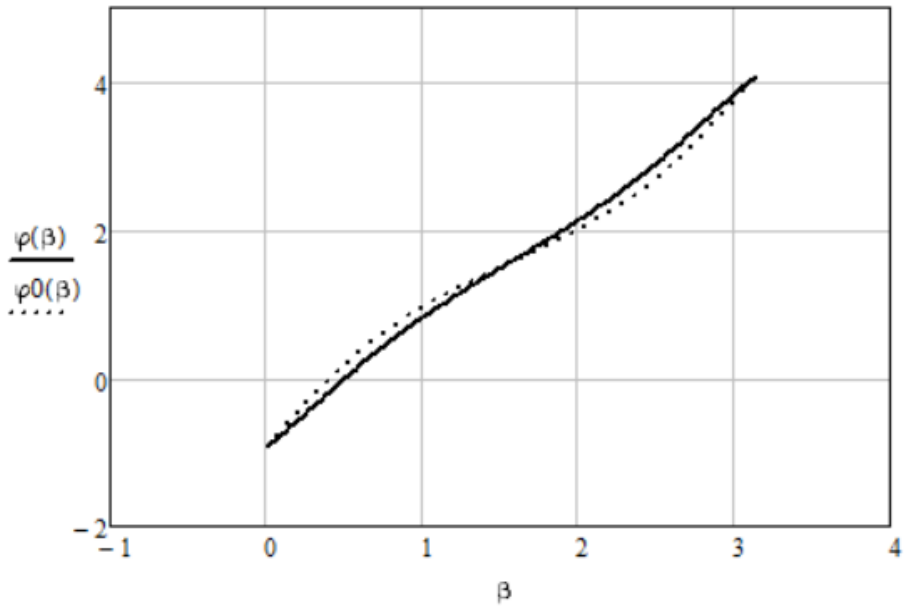
-0.927
-0.899
-0.87
-0.841
-0.811
-0.781
-0.75
-0.72
-0.689
-0.658
...

$$\varphi 0(\beta) := \alpha - \frac{\pi}{2} + \int_0^{\beta} \pi \cdot p02(\beta) \cdot Z(\beta)\, d\beta$$



φ0(β) =

-0.927
-0.888
-0.848
-0.808
-0.768
-0.728
-0.688
-0.648
-0.608
-0.568
...



$$\rho_1(\beta,\rho) := \sqrt{(\rho\cdot\cos(\varphi(\beta)) - \xi(\beta))^2 + (\rho\cdot\sin(\varphi(\beta)) - \eta(\beta))^2}$$

$$\Psi(\beta) := \frac{\pi\cdot P\cdot p2(\beta)\cdot Z(\beta)}{(1-\nu 0)\cdot\left(3\cdot\Phi(\beta)^2 + P\right)}$$

Права частина рівняння форми відбивача

$$f(\beta,\rho) := -\rho\cdot\frac{\left(\rho_1(\beta,\rho) - \rho\right)\cdot\cos(\varphi(\beta)) + \xi(\beta)}{\left(\rho_1(\beta,\rho) + \rho\right)\cdot\sin(\varphi(\beta)) - \eta(\beta)}\cdot\Psi(\beta)$$

Рівняння форми відбивача

$$\frac{d}{d\beta}\rho(\beta) = f(\beta,\rho)$$

Відстань між випромінювачем та консоллю відбивача

$$r_{01} := 2.5 \qquad \rho 01 := \frac{r_{01}}{a} = 2.5$$

$$w1 := \text{AdamsBDF}(\rho 01, 0, \pi, 180, f)$$

Відстань між випромінювачем та консоллю відбивача

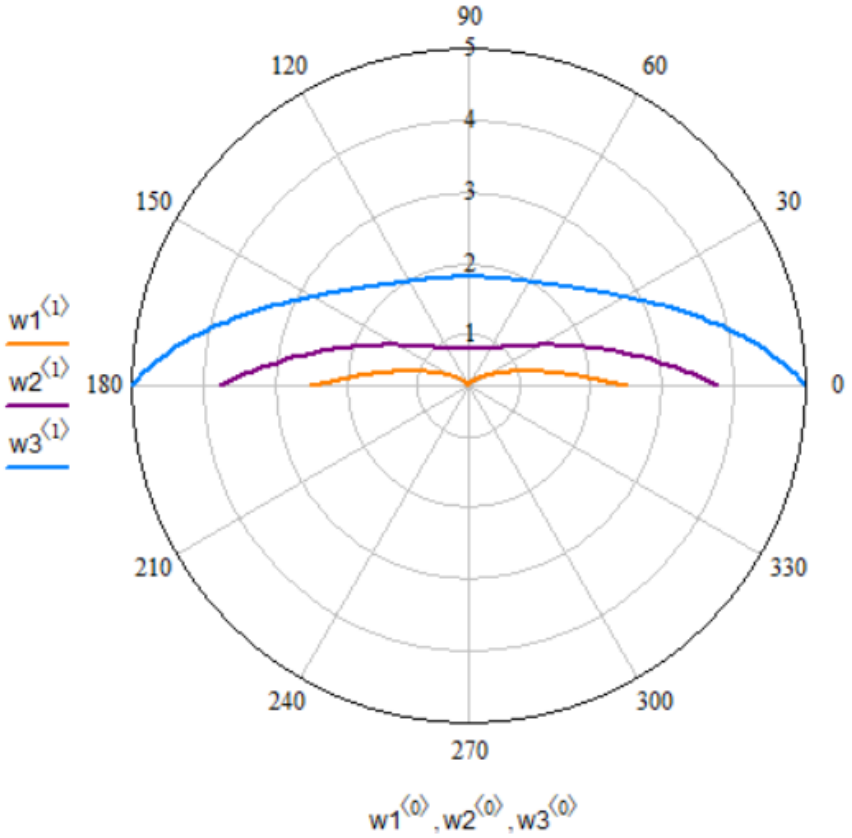
$$r_{02} := 3.75 \qquad \rho 02 := \frac{r_{02}}{a} = 3.75$$

$$w2 := \text{AdamsBDF}(\rho 02, 0, \pi, 180, f)$$

Відстань між випромінювачем та консоллю відбивача

$r_{03} := 5$ $\quad \rho 03 := \frac{r_{03}}{a} = 5$

$w3 := \text{AdamsBDF}(\rho 03, 0, \pi, 180, f)$



$w1^{\langle 0 \rangle}, w2^{\langle 0 \rangle}, w3^{\langle 0 \rangle}$

$$\rho 0_1(\beta, \rho 0) := \sqrt{(\rho 0 \cdot \cos(\varphi 0(\beta)) - \xi(\beta))^2 + (\rho 0 \cdot \sin(\varphi 0(\beta)) - \eta(\beta))^2}$$

$$\Psi 0(\beta) := \pi \cdot \rho 02(\beta) \cdot Z(\beta)$$

Права частина рівняння форми відбивача

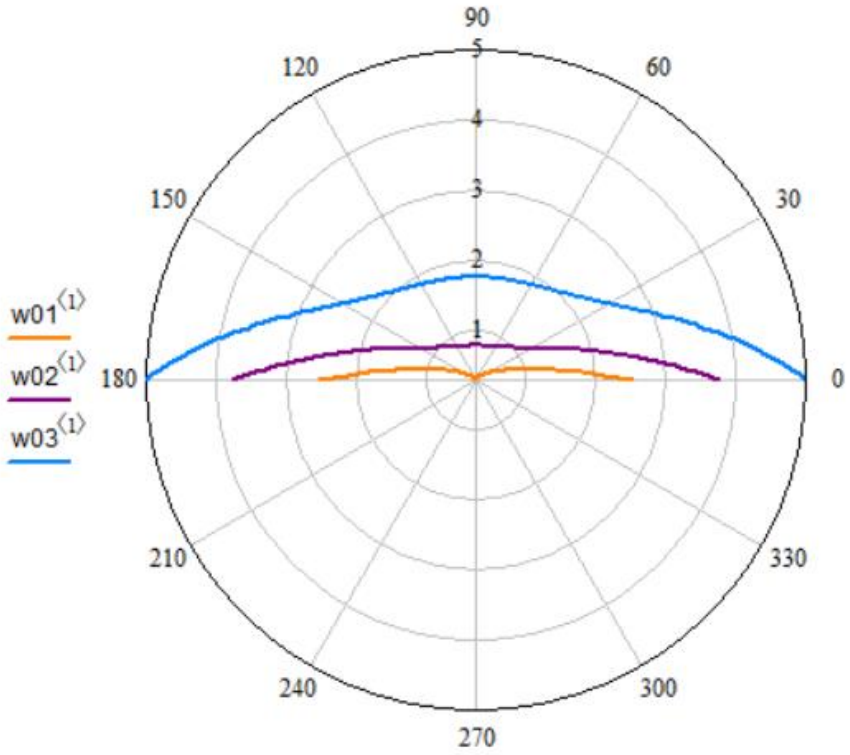
$$f0(\beta, \rho 0) := -\rho 0 \cdot \frac{(\rho 0_1(\beta, \rho 0) - \rho 0) \cdot \cos(\varphi 0(\beta)) + \xi(\beta)}{(\rho 0_1(\beta, \rho 0) + \rho 0) \cdot \sin(\varphi 0(\beta)) - \eta(\beta)} \cdot \Psi 0(\beta)$$

Рівняння форми відбивача $\frac{d}{d\beta}\rho 0(\beta) = f0(\beta, \rho 0)$

$w01 := AdamsBDF(\rho 01, 0, \pi, 180, f0)$

$w02 := AdamsBDF(\rho 02, 0, \pi, 180, f0)$

$w03 := AdamsBDF(\rho 03, 0, \pi, 180, f0)$



$w01^{\langle 0 \rangle}, w02^{\langle 0 \rangle}, w03^{\langle 0 \rangle}$

$i := 0 .. 180$ $\qquad \beta 1_i := i \cdot \frac{\pi}{180}$

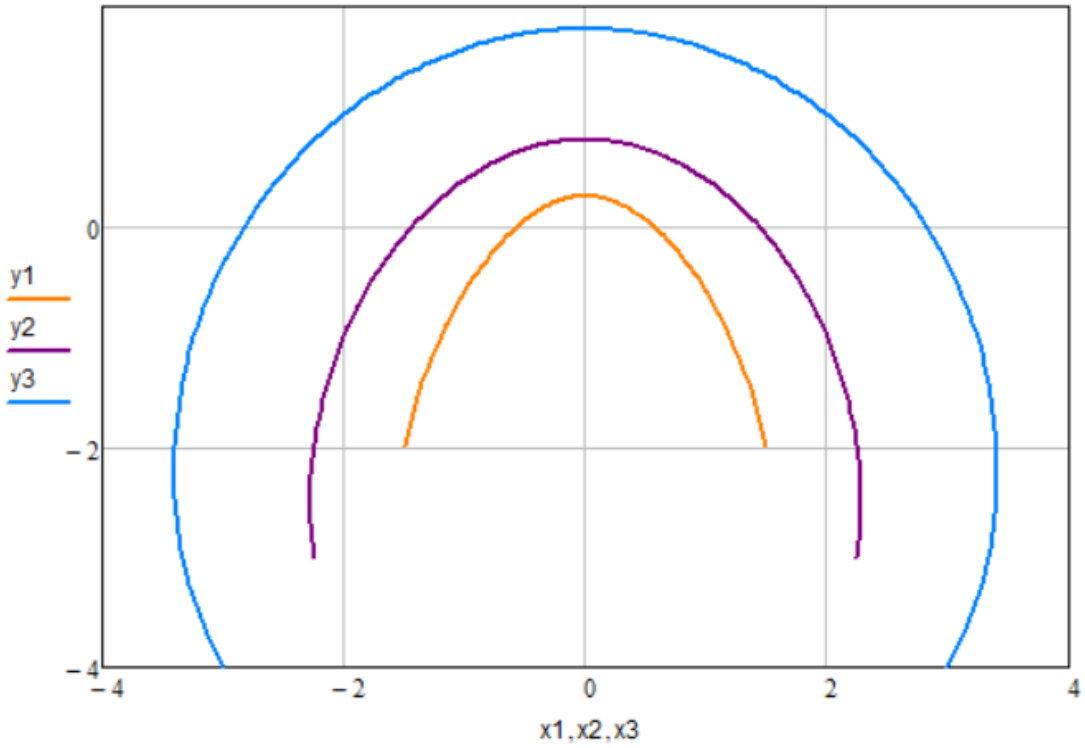
$\rho 1 := w1^{\langle 1 \rangle}$ $\qquad x1_i := \rho 1_i \cdot \cos(\varphi(\beta 1_i))$ $\qquad y1_i := \rho 1_i \cdot \sin(\varphi(\beta 1_i))$

$\beta 2_i := i \cdot \frac{\pi}{180}$

$\rho 2 := w2^{\langle 1 \rangle}$ $\qquad x2_i := \rho 2_i \cdot \cos(\varphi(\beta 2_i))$ $\qquad y2_i := \rho 2_i \cdot \sin(\varphi(\beta 2_i))$

$$\beta 3_i := i \cdot \frac{\pi}{180}$$

$\rho 3 := w3^{\langle 1 \rangle}$ $\quad x3_i := \rho 3_i \cdot \cos(\varphi(\beta 3_i))$ $\quad y3_i := \rho 3_i \cdot \sin(\varphi(\beta 3_i))$



x3 =

	0
0	3
1	3.068
2	3.13
3	3.185
4	3.235
5	3.278
6	3.315
7	3.345
8	3.369
9	3.387
10	3.399
11	...

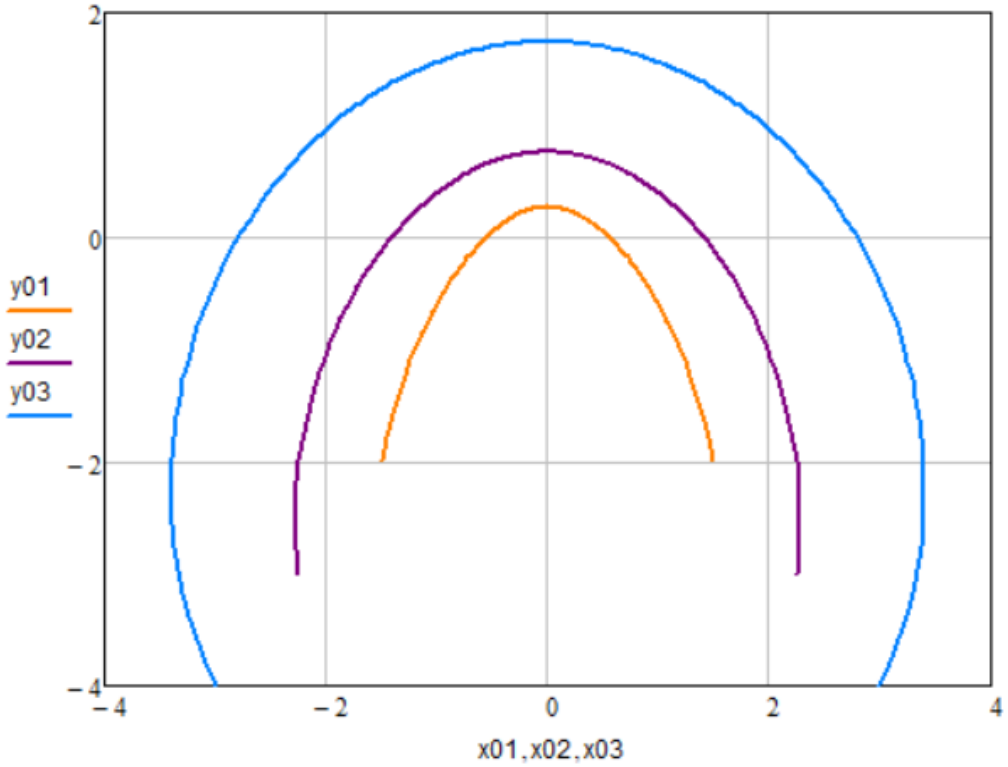
y3 =

	0
0	-4
1	-3.856
2	-3.709
3	-3.558
4	-3.403
5	-3.247
6	-3.09
7	-2.933
8	-2.775
9	-2.617
10	-2.459
11	...

$\rho 10 := w01^{\langle 1 \rangle}$ $x01_i := \rho 10_i \cdot \cos(\varphi 0(\beta 1_i))$ $y01_i := \rho 10_i \cdot \sin(\varphi 0(\beta 1_i))$

$\rho 20 := w02^{\langle 1 \rangle}$ $x02_i := \rho 20_i \cdot \cos(\varphi 0(\beta 2_i))$ $y02_i := \rho 20_i \cdot \sin(\varphi 0(\beta 2_i))$

$\rho 30 := w03^{\langle 1 \rangle}$ $x03_i := \rho 30_i \cdot \cos(\varphi 0(\beta 3_i))$ $y03_i := \rho 30_i \cdot \sin(\varphi 0(\beta 3_i))$

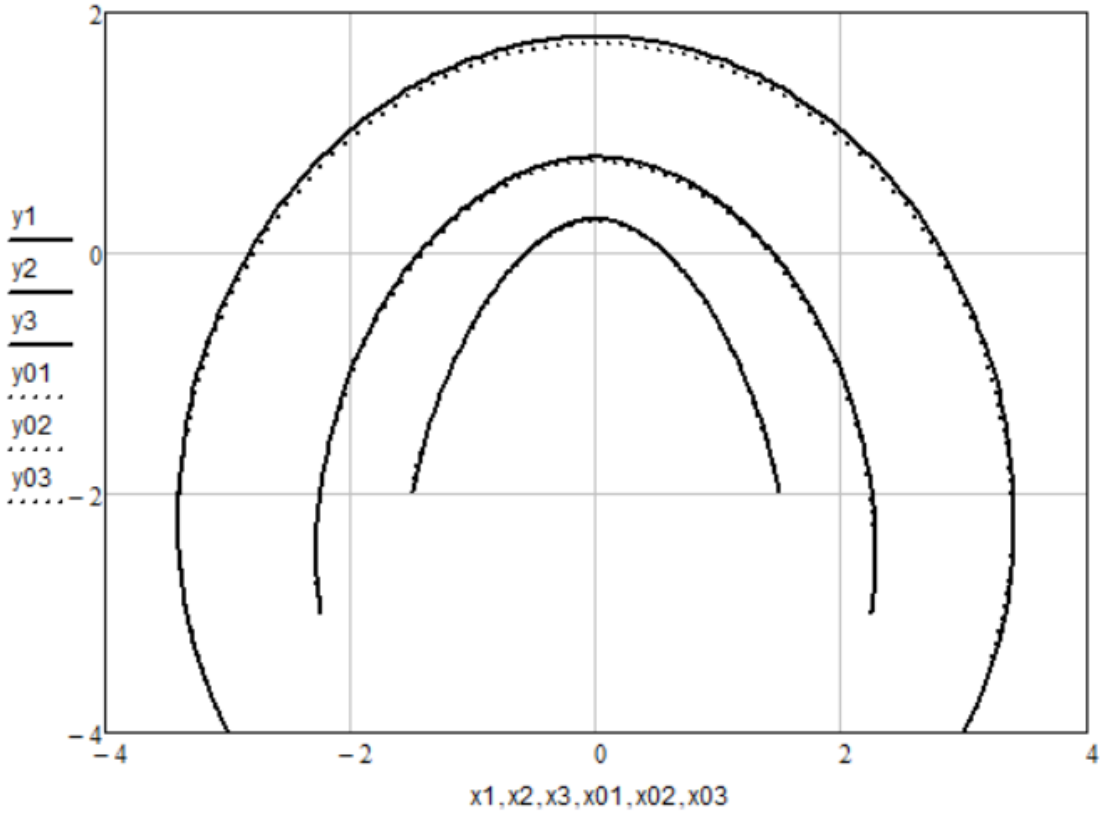


x03 =

	0
0	3
1	3.092
2	3.171
3	3.238
4	3.292
5	3.334
6	3.365
7	3.385
8	3.395
9	3.396
10	3.389
11	...

y03 =

	0
0	-4
1	-3.8
2	-3.596
3	-3.389
4	-3.181
5	-2.974
6	-2.768
7	-2.565
8	-2.364
9	-2.168
10	-1.977
11	...



Рівномірне опромінювання нижнього напівеліпсу

Половина кута збереженого потоку $\mu := \alpha - \theta_0 = 0.397$

Кутова координата поверхні приймача $\beta := \frac{-\pi}{2}, \frac{-\pi}{2} + \frac{\pi}{180} .. 0$

$D(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^2\right) \cdot \cos(\beta)^2}$ $D1(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^4\right) \cdot \cos(\beta)^2}$ $Z(\beta) := m \cdot \frac{D1(\beta)}{D(\beta)^3}$

$\xi(\beta) := \frac{m \cdot \cos(\beta)}{D(\beta)}$ $\eta(\beta) := \frac{m \cdot \sin(\beta)}{D(\beta)} - \kappa$

Довжина половини півеліпсу $\lambda := \int_0^{\pi} Z(\beta)\, d\beta = 2.422$

$\gamma := \theta_0 - \frac{\pi}{2} = -1.324$ $\delta := \alpha - \frac{\pi}{2} = -0.927$

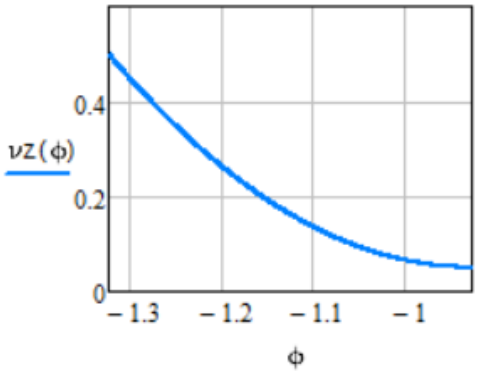
Функція втрат енергії на відбивачі

втрати за φ=γ $vz0 := 0.5$

втрати за φ=δ $vz1 := v1 = 0.05$

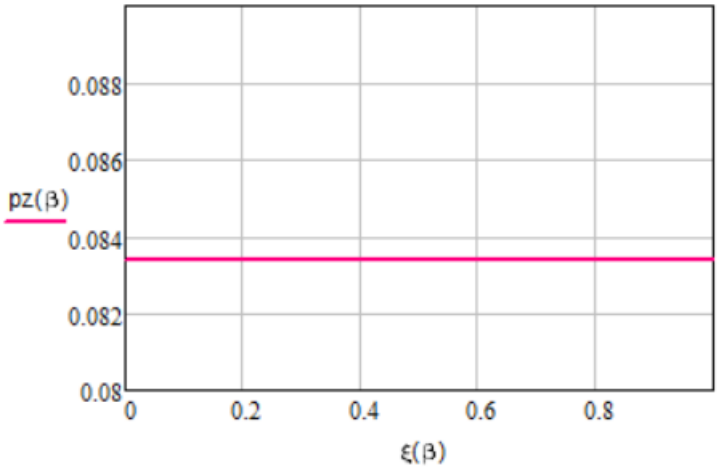
$$\nu z(\phi) := vz1 + \frac{vz0 - vz1}{(\alpha - \theta_0)^2}\cdot\left(\phi + \frac{\pi}{2} - \alpha\right)^2 \text{ float , 6 } \rightarrow 2.86002\cdot(\phi + 0.927295)^2 + 0.05$$

перевірка $\nu z\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = 0.05$ $\nu z\left(\theta_0 - \frac{\pi}{2}\right) = 0.5$



Сумарні втрати енергії на відбивачі $Iz := \int_{\frac{-\pi}{2}+\theta_0}^{\frac{-\pi}{2}+\alpha} (1 - \nu z(\phi))\, d\phi = 0.317$

Сумарний потік $pz(\beta) := \frac{2}{\pi\cdot\lambda}\cdot Iz$



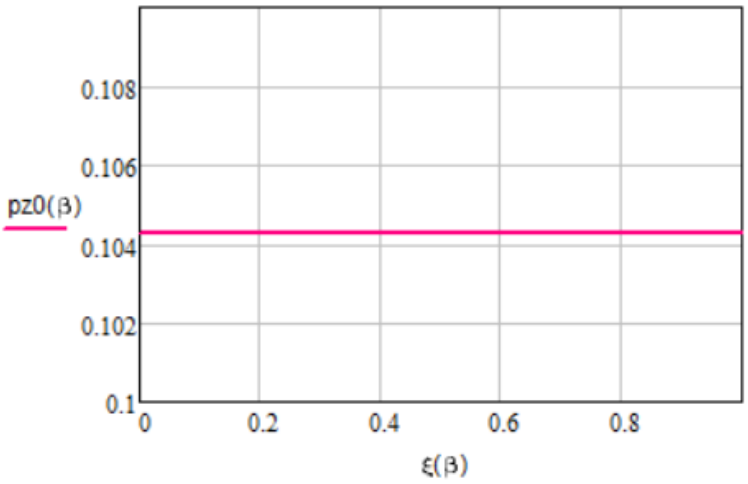
pz(β) =

0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
0.083
...

Сумарний потік $pz0(\beta) := \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \mu$

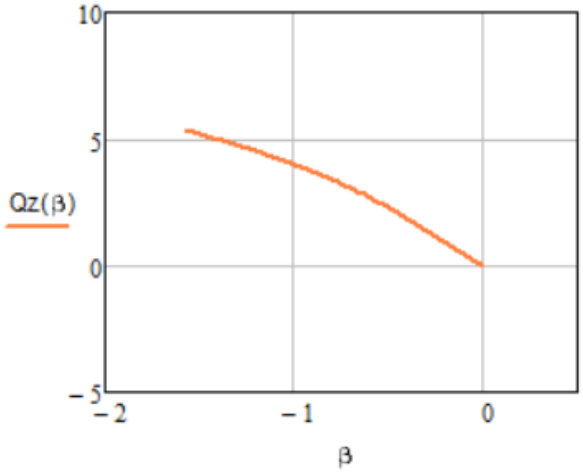
$pz0(\beta) =$

0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
0.104
...



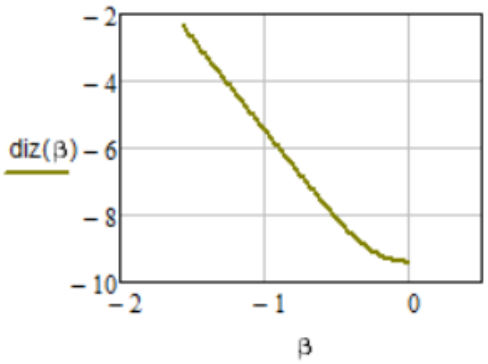
$$Pz := \frac{-3 \cdot (1 - vz1)}{vz0 - vz1} = -6.333$$

$$Qz(\beta) := \frac{3 - vz0 - 2 \cdot vz1}{vz0 - vz1} \cdot \left(1 - \frac{2}{\lambda} \cdot \int_{\frac{-\pi}{2}}^{\beta} Z(\beta)\, d\beta \right)$$



коефіцієнти кубічного рівняння $kpz := \frac{Pz}{3} = -2.111$ $kqz(\beta) := \frac{Qz(\beta)}{2}$

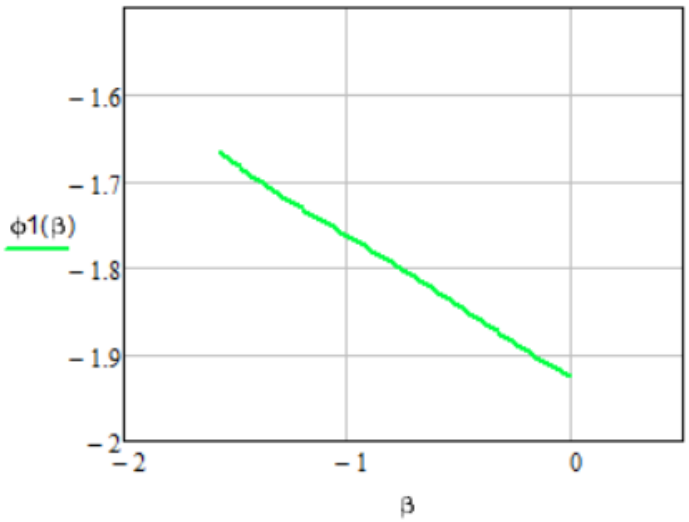
$$diz(\beta) := kqz(\beta)^2 + kpz^3$$



$$kr := -\sqrt{-kpz} = -1.453 \qquad \psi(\beta) := \operatorname{acos}\left(\frac{kqz(\beta)}{kr^3}\right)$$

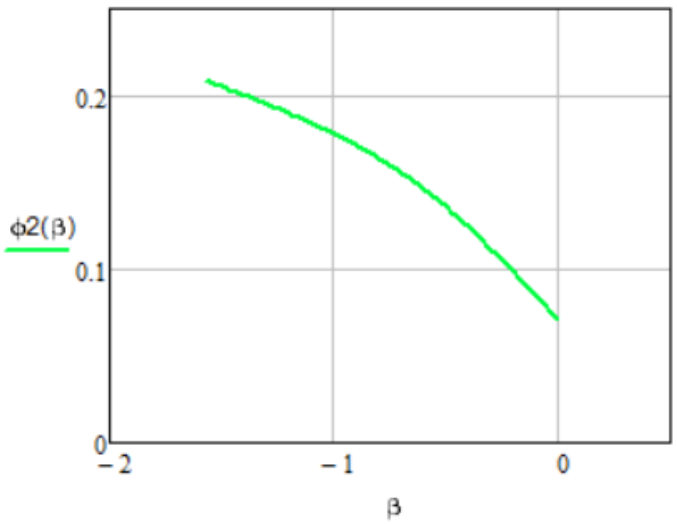
дійсні корні кубічного рівняння

$$\Phi 1z(\beta) := -2 \cdot kr \cdot \cos\left(\frac{\psi(\beta)}{3}\right) \qquad \phi 1(\beta) := -(\alpha - \theta_0) \cdot \Phi 1z(\beta) - \frac{\pi}{2} + \alpha$$



ϕ1(β) =
-1.666
-1.67
-1.674
-1.677
-1.681
-1.684
-1.687
-1.69
-1.694
-1.697
...

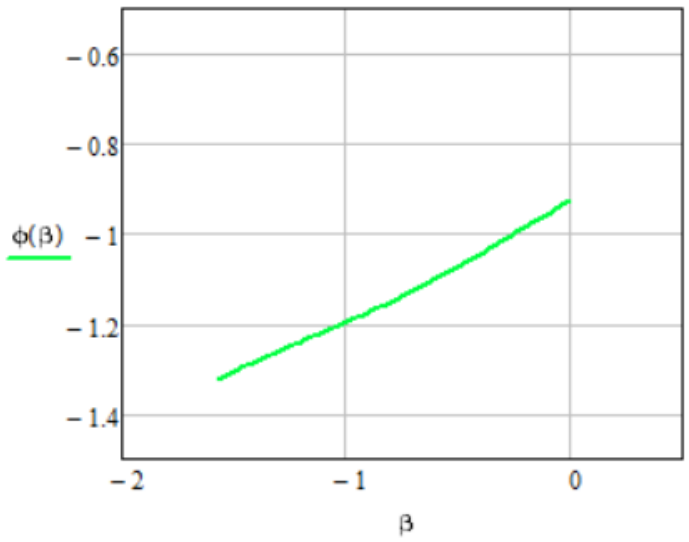
$$\Phi 2z(\beta) := 2 \cdot kr \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\psi(\beta)}{3}\right) \qquad \phi 2(\beta) := -(\alpha - \theta_0) \cdot \Phi 2z(\beta) - \frac{\pi}{2} + \alpha$$



$\phi 2(\beta) =$

0.208
0.207
0.207
0.206
0.205
0.204
0.203
0.202
0.202
0.201
...

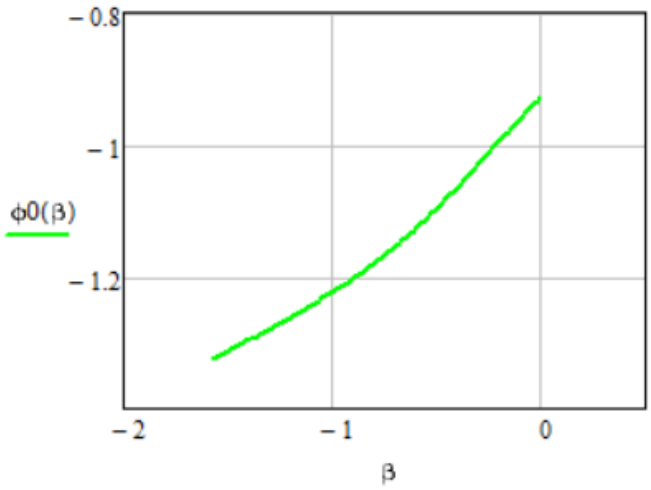
$$\Phi z(\beta) := 2 \cdot kr \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\psi(\beta)}{3}\right) \qquad \phi(\beta) := -(\alpha - \theta_0) \cdot \Phi z(\beta) - \frac{\pi}{2} + \alpha$$



$\phi(\beta) =$

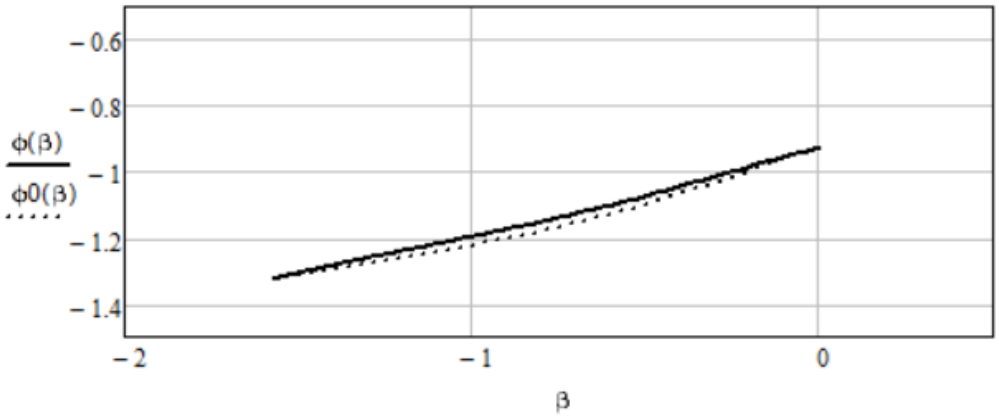
-1.324
-1.319
-1.315
-1.311
-1.306
-1.302
-1.298
-1.294
-1.29
-1.286
...

Кутова координата поверхні відбивача $\phi 0(\beta) := \frac{-\pi}{2} + \theta_0 + 2\cdot\frac{\mu}{\lambda}\cdot\int_{\frac{-\pi}{2}}^{\beta} Z(\beta)\, d\beta$



$\phi 0(\beta) =$

-1.324
-1.321
-1.318
-1.315
-1.313
-1.31
-1.307
-1.304
-1.301
-1.298
...



$\rho_1(\beta, \rho) := \sqrt{(\rho\cdot\cos(\phi(\beta)) - \xi(\beta))^2 + (\rho\cdot\sin(\phi(\beta)) - \eta(\beta))^2}$

$\Psi z(\beta) := \frac{-2\cdot(3 - vz0 - 2\cdot vz1)\cdot(\alpha - \theta_0)}{3\cdot\lambda\cdot[(vz0 - vz1)\cdot\Phi z(\beta) - 1 + vz1]}\cdot Z(\beta)$

Права частина рівняння форми відбивача

$$fz(\beta,\rho) := -\rho\cdot\frac{\left(\rho_1(\beta,\rho)-\rho\right)\cdot\cos(\phi(\beta))+\xi(\beta)}{\left(\rho_1(\beta,\rho)+\rho\right)\cdot\sin(\phi(\beta))-\eta(\beta)}\cdot\Psi z(\beta)$$

Рівняння форми відбивача

$$\frac{d}{d\beta}\rho(\beta) = fz(\beta,\rho)$$

Розвязок рівняння

Віддаль між випромінювачем та консоллю відбивача

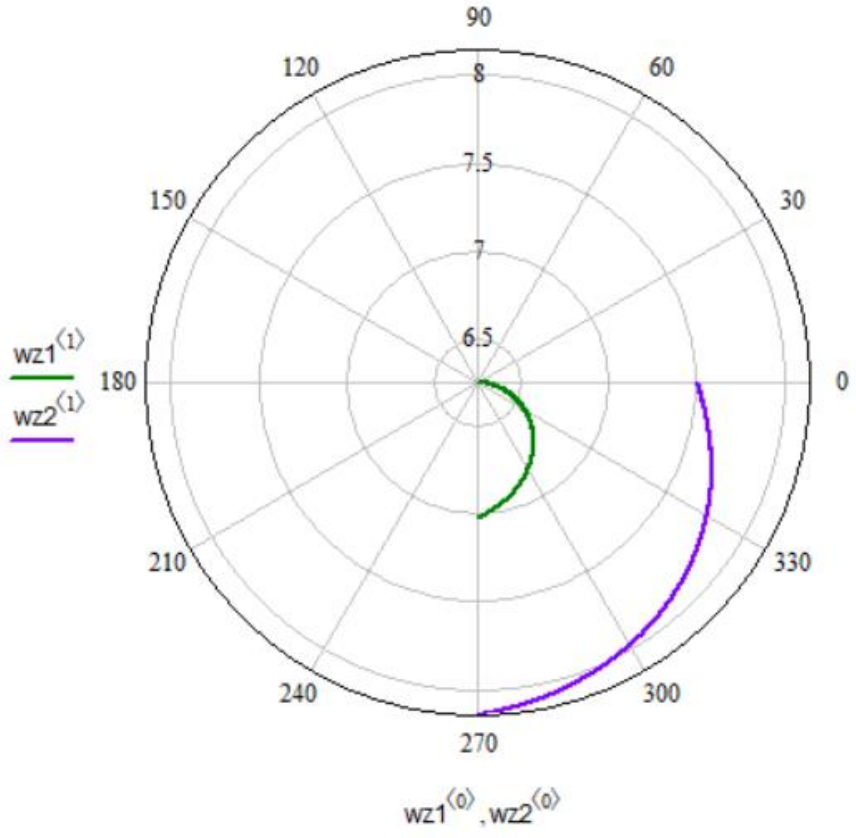
$$rz_{01} := 6.25 \qquad \rho z01 := \frac{rz_{01}}{a} = 6.25$$

$$wz1 := \text{AdamsBDF}\left(\rho z01, 0, \frac{-\pi}{2}, 360, fz\right)$$

Віддаль між випромінювачем та консоллю відбивача

$$rz_{02} := 7.5 \qquad \rho z02 := \frac{rz_{02}}{a} = 7.5$$

$$wz2 := \text{AdamsBDF}\left(\rho z02, 0, \frac{-\pi}{2}, 360, fz\right)$$



$$\rho 0_1(\beta, \rho 0) := \sqrt{(\rho 0 \cdot \cos(\phi 0(\beta)) - \xi(\beta))^2 + (\rho 0 \cdot \sin(\phi 0(\beta)) - \eta(\beta))^2}$$

$$\Psi 0z(\beta) := \pi \cdot pz0(\beta) \cdot Z(\beta)$$

Права частина рівняння форми відбивача

$$fz0(\beta, \rho 0) := -\rho 0 \cdot \frac{(\rho 0_1(\beta, \rho 0) - \rho 0) \cdot \cos(\phi 0(\beta)) + \xi(\beta)}{(\rho 0_1(\beta, \rho 0) + \rho 0) \cdot \sin(\phi 0(\beta)) - \eta(\beta)} \cdot \Psi 0z(\beta)$$

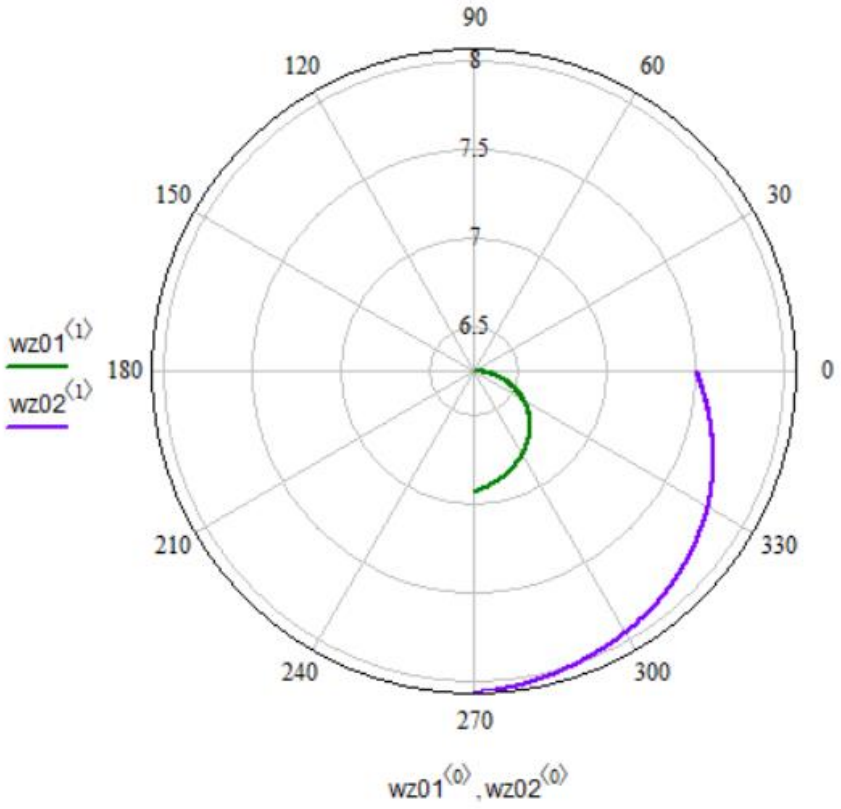
Рівняння форми відбивача

$$\frac{d}{d\beta} \rho 0(\beta) = fz0(\beta, \rho 0)$$

Розвязок рівняння

$$wz01 := \text{AdamsBDF}\left(\rho z01, 0, \frac{-\pi}{2}, 360, fz0\right)$$

$$wz02 := \text{AdamsBDF}\left(\rho z02, 0, \frac{-\pi}{2}, 360, fz0\right)$$



$j := 0 .. 180 \qquad \beta_j := j \cdot \frac{-\pi}{360}$

$\rho z1 := wz1^{\langle 1 \rangle} \qquad xz1_j := \rho z1_j \cdot \cos(\phi(\beta_j)) \qquad yz1_j := \rho z1_j \cdot \sin(\phi(\beta_j))$

$\rho z2 := wz2^{\langle 1 \rangle} \qquad xz2_j := \rho z2_j \cdot \cos(\phi(\beta_j)) \qquad yz2_j := \rho z2_j \cdot \sin(\phi(\beta_j))$

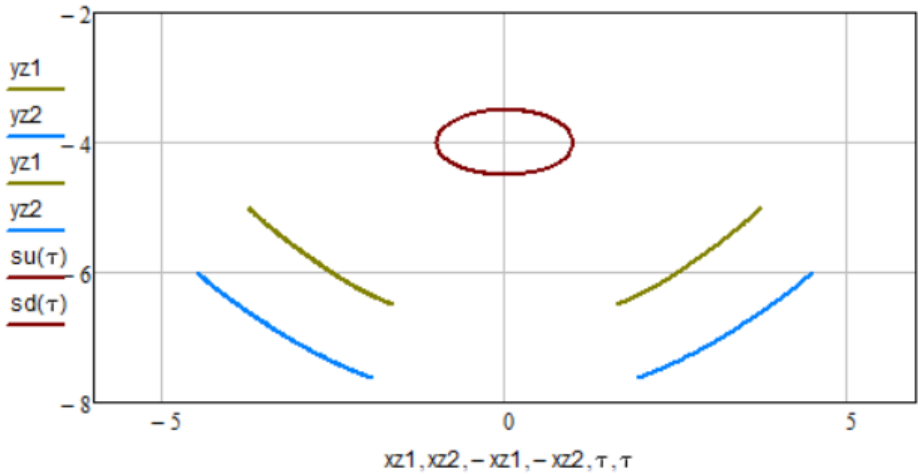
$\rho z10 := wz01^{\langle 1 \rangle} \qquad xz01_j := \rho z10_j \cdot \cos(\phi 0(\beta_j)) \qquad yz01_j := \rho z10_j \cdot \sin(\phi 0(\beta_j))$

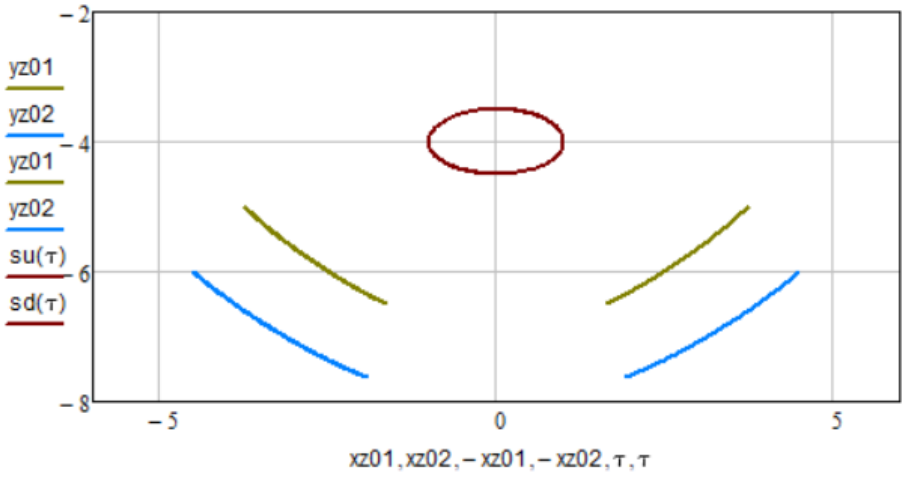
$\rho z20 := wz02^{\langle 1 \rangle} \qquad xz02_j := \rho z20_j \cdot \cos(\phi 0(\beta_j)) \qquad yz02_j := \rho z20_j \cdot \sin(\phi 0(\beta_j))$

$\tau := -1, -0.98 .. 1$

$su(\tau) := \text{if}\left(|\tau| < 1, \frac{\sqrt{1-\tau^2}}{2} - 4, -4\right)$

$sd(\tau) := \text{if}\left(|\tau| < 1, \frac{-\sqrt{1-\tau^2}}{2} - 4, -4\right)$





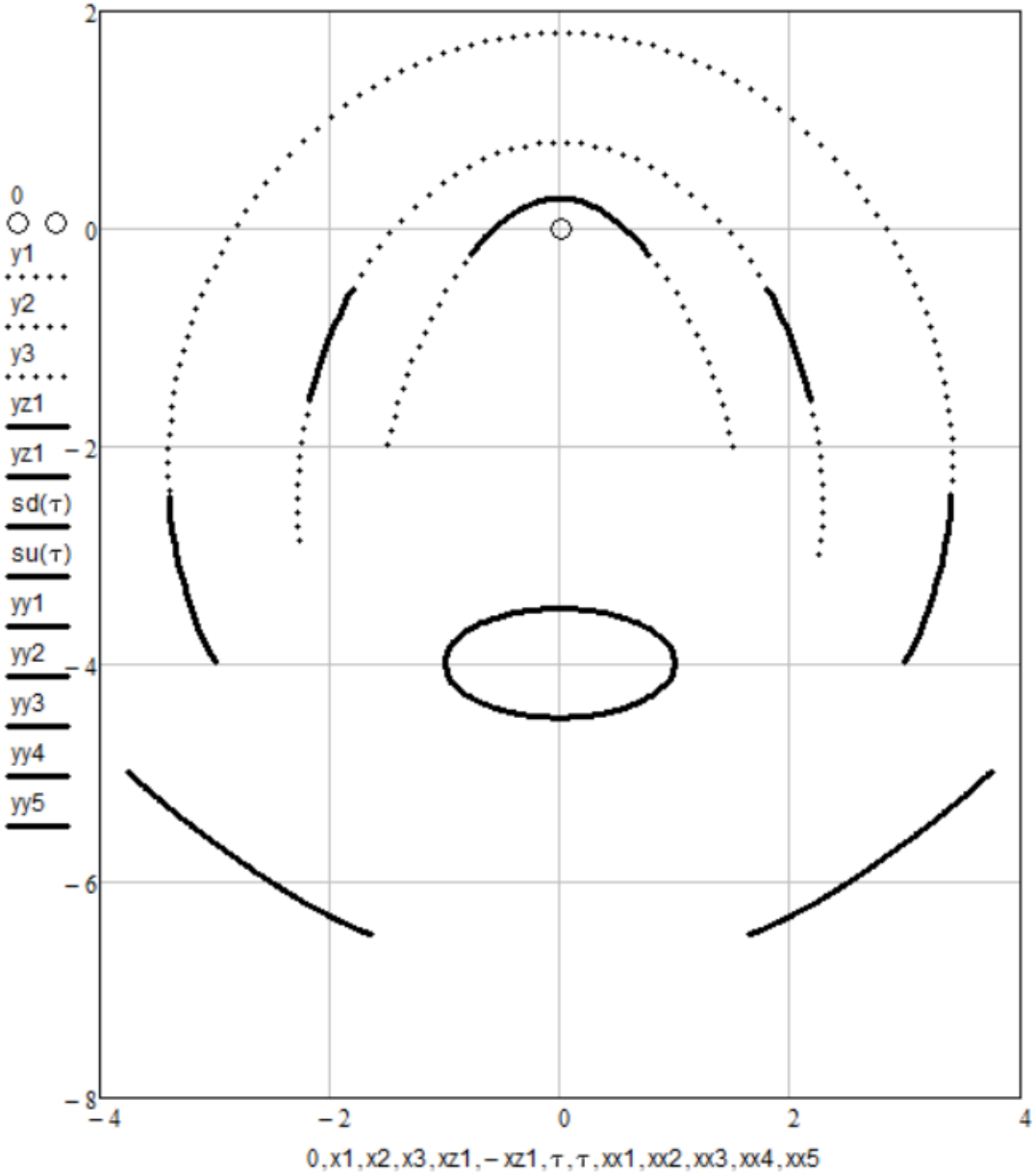
xx1 := submatrix(x3, 0, 10, 0, 0) yy1 := submatrix(y3, 0, 10, 0, 0)

xx2 := submatrix(x2, 10, 20, 0, 0) yy2 := submatrix(y2, 10, 20, 0, 0)

xx3 := submatrix(x1, 20, 160, 0, 0) yy3 := submatrix(y1, 20, 160, 0, 0)

xx4 := submatrix(x2, 160, 170, 0, 0) yy4 := submatrix(y2, 160, 170, 0, 0)

xx5 := submatrix(x3, 170, 180, 0, 0) yy5 := submatrix(y3, 170, 180, 0, 0)



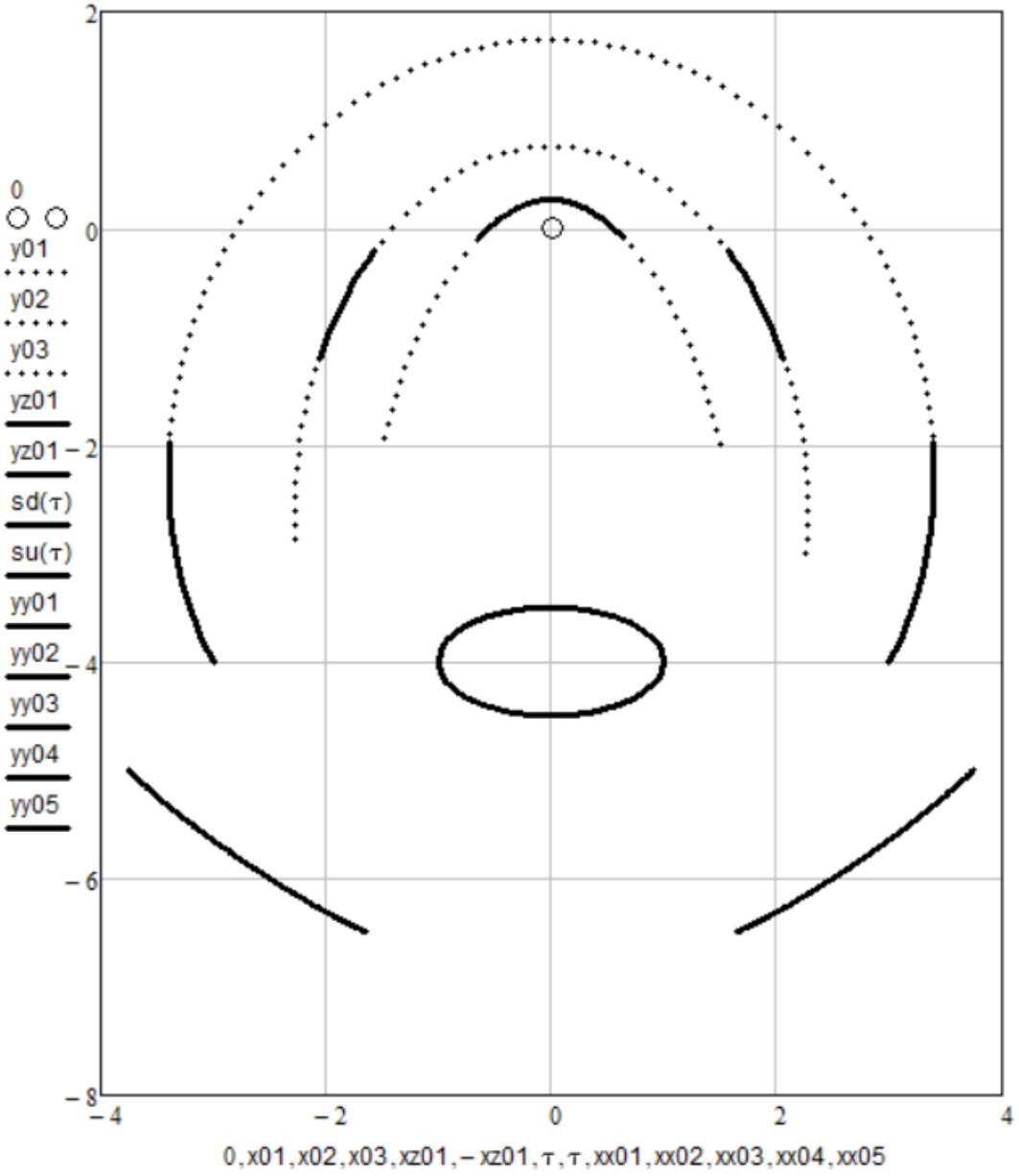
xx01 := submatrix(x03, 0, 10, 0, 0) yy01 := submatrix(y03, 0, 10, 0, 0)

xx02 := submatrix(x02, 10, 20, 0, 0) yy02 := submatrix(y02, 10, 20, 0, 0)

xx03 := submatrix(x01, 20, 160, 0, 0) yy03 := submatrix(y01, 20, 160, 0, 0)

xx04 := submatrix(x02, 160, 170, 0, 0) yy04 := submatrix(y02, 160, 170, 0, 0)

xx05 := submatrix(x03, 170, 180, 0, 0) yy05 := submatrix(y03, 170, 180, 0, 0)

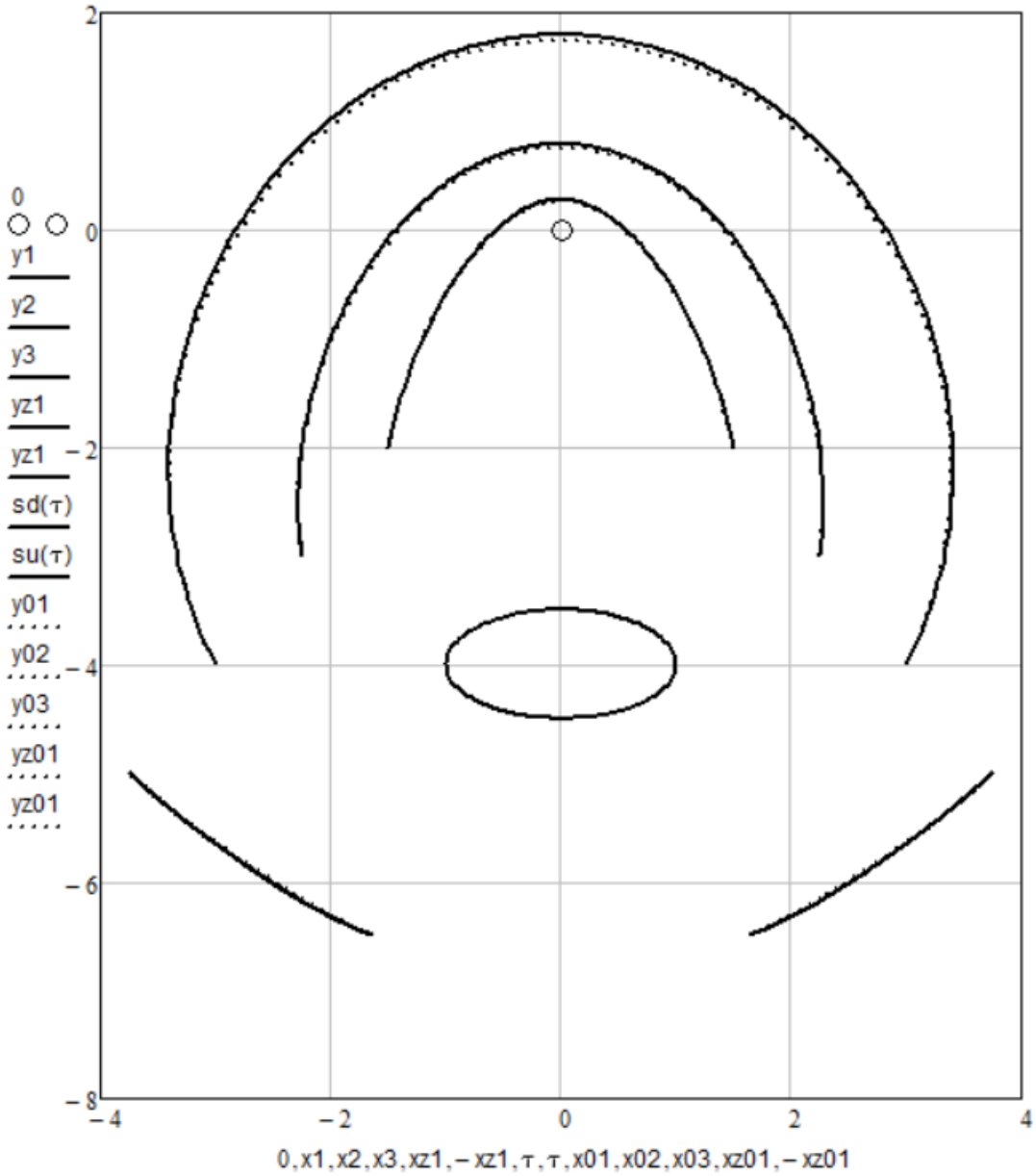


xz01 =

	0
0	3.75
1	3.737
2	3.725
3	3.712
4	3.699
5	3.686
6	3.673
7	3.66
8	...

yz01 =

	0
0	-5
1	-5.013
2	-5.026
3	-5.038
4	-5.051
5	-5.064
6	-5.077
7	-5.089
8	...



Додаток Д

ПОГОДЖЕНО
Директор ТОВ «А-1»
_____ С.Б. Семененко
_____ 2012 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор
з наукової роботи ХДУХТ
_____ В.М. Михайлов
_____ 2012 р.

ПОГОДЖЕНО
Директор ПП «Містраль»
_____ Ю.Ю. Гущіна
_____ 2012 р.

ПОГОДЖЕНО
Директор ТОВ «Науково-виробниче
підприємство Пластар»
_____ О.Б. Ківіренко
_____ 2012 р.

МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛІВ РЕФЛЕКТОРІВ ДЛЯ РІВНОМІРНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ НАПІВЕЛІПТИЧНОГО ПРИЙМАЧА

РОЗРОБЛЕНО

Професор кафедри
механіки та графіки ХДУХТ,
д.т.н._____ В.П. Плевако
_____ 2012 р.

Ст. викладач кафедри
механіки та графіки ХДУХТ,
_____ С.М. Костенко
_____ 2012 р.

ЗМІСТ

ВСТУП…….
1. МЕТОДИКА……
1.1 Теплотехнічна система…….
1.2 Рух променя……...
1.3 Функції опромінювання……
1.4 Густина опромінювання……...
1.5 Рівняння форми рефлектора……
2. ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ……

ВСТУП

Методика дозволяє аналітично отримати диференціальне рівняння профілю рефлектора, що створює рівномірний сумарний променевий потік на опуклій поверхні продукту.

Програмний продукт дає змогу обчислити профіль рефлектора для рівномірного опромінювання приймача півеліптичного перерізу шляхом розв'язку диференціального рівняння за використання програмного комплексу Mathcad.

1. МЕТОДИКА

1.1 Теплотехнічна система

Теплотехнічна система (рис. 1) складається з трубчастого випромінювача 1, циліндричного відбивача 2 і приймача тепла AB з півеліптичною формою перерізу 3. Із системою пов'язана декартова система координат так, щоб вісь Oz пройшла вздовж випромінювача, а осі Ox, Oy розташувалися таким чином, як це показано на рисунку.

Використовуються наступні позначення: h – віддаль від осі випромінювача до центра приймача, м; α – половина кута, в якому поширюються промені, що не потрапляють на рефлектор,; θ_0 – половина кута, в якому поширюються промені, що потрапляють на приймач AB безпосередньо від випромінювача; a і b – довжини великої та малої півосі напівеліпса, м.

Для позначення полярних координат поверхні перерізу рефлектора застосовуються символи $R(\varphi)$ (м) та φ, а координат поверхні приймача – $R_1(\beta)$ (м) та β.

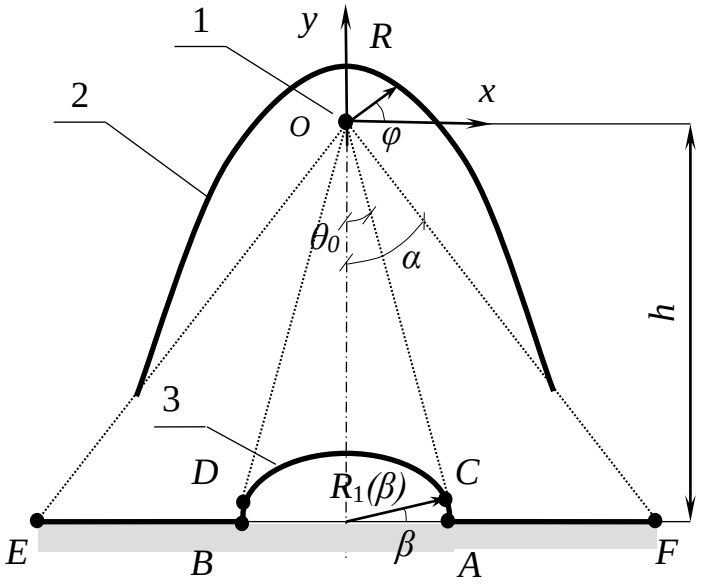


Рисунок 1 – Схема теплотехнічної системи

Рівняння півеліпса у відносних полярних координатах:

$$\rho_1(\beta) = \frac{m}{\sqrt{1-(1-m^2)\cos^2\beta}},$$

де використано відносні величини:

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{y}{a}, \quad \chi = \frac{h}{a}, \quad m = \frac{b}{a}.$$

1.2 Рух променя

Промінь має лише один раз відбитися від поверхні рефлектора.

Під час переміщення точки віддзеркалення M вздовж поверхні рефлектора від N до P в бік збільшення полярного кута φ, точка K робочого тіла, куди потрапляє відбитий промінь, монотонно рухатиметься його поверхнею від A до B у бік збільшення координати β (рис. 2).

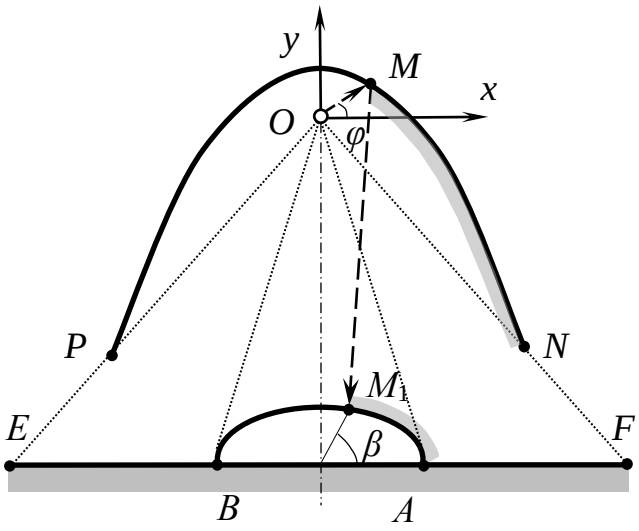


Рисунок 2 – Схема руху променя

1.3 Функції опромінювання

Відносна густина опромінювання верхньої поверхні приймача

$$p^*(\beta)=\frac{2}{\pi\ \lambda}\left(\pi+\theta_0-\alpha\right),$$

де відносну довжину половини еліпса позначено символом $\lambda=\frac{\pi}{2}\left[1.5(1+m)-\sqrt{m}\right]$.

Прямі *OC* та *OD* є дотичними до поверхні еліпсу (рис. 1).

Відносна густина безпосереднього опромінювання ділянки *CD*

$$p_1^*(\beta)=\frac{1}{\pi}\ \frac{\left[\chi\ \sin\beta-m\ D(\beta)\right]D^2(\beta)}{\left[m^2-2\ \chi\ m\ \sin\beta\ D(\beta)+\chi^2\ D^2(\beta)\right]D_1(\beta)},$$

де $D(\beta)=\sqrt{1-\left(1-m^2\right)\cos^2\beta}$; $D_1(\beta)=\sqrt{1-\left(1-m^4\right)\cos^2\beta}$.

Відносна густина опромінювання відбитими променями становить

$$p_2^*(\beta)=p^*(\beta)-p_1^*(\beta),$$

і для всіх трьох ділянок приймача (*AC*, *CD* та *BD*) має вигляд

$$p_2^*(\beta)=\begin{cases}\dfrac{2}{\pi\ \lambda}\ (\pi+\theta_0-\alpha), & \beta<\beta_0\ ;\\ \dfrac{2}{\pi\ \lambda}\ (\pi+\theta_0-\alpha)-p_1^*(\beta), & \beta_0\le\beta\le\pi-\beta_0\ ;\\ \dfrac{2}{\pi\ \lambda}\ (\pi+\theta_0-\alpha), & \beta>\pi-\beta_0\ .\end{cases}$$

1.4 Густина опромінювання

Рівномірна густина променевого потоку на поверхні напівеліптичного продукту з 1 метра теоретичного випромінювача та 0.25 метра довжини тіла накалювання реального випромінювача становить відповідно

$$q(\beta)=\frac{Q}{\pi\ \lambda\ a}\ (\pi+\theta_0-\alpha)\ ,\ \ q1(\beta)=4\ q(\beta)\ ,$$

де Q – потужність випромінювача.

1.5 Рівняння форми рефлектора

Рівняння для визначення форми рефлектора:

$$\frac{d\rho}{d\beta}=-\rho\ \frac{(\rho_1-\rho)\cos\varphi+\xi}{(\rho_1+\rho)\sin\varphi-\eta}\ \Psi(\beta)\ ,$$

де $\rho=\rho(\beta)=\dfrac{R(\beta)}{a}$, $\rho_1=\rho_1(\beta)=\dfrac{R_1(\beta)}{a}=\sqrt{(\rho\cos\varphi-\xi)^2+(\rho\sin\varphi-\eta)^2}$,

$$\Psi(\beta)=\frac{d\varphi}{d\beta}=\pi\ p_2^*(\beta)\ Z(\beta)\ ,\ Z(\beta)=m\ \sqrt{\frac{1-\left(1-m^4\right)\cos^2\beta}{\left[1-\left(1-m^2\right)\cos^2\beta\right]^3}}\ .$$

Програмний продукт, наведений далі, розв’язує це диференціальне рівняння за допомогою Mathcad універсальним гібридним методом Адамса-BDF, а також обчислює та будує сім’ю профілів рефлекторів, один з яких підлягає конструкційній реалізації відповідно до обраного процесу ІЧ-жаріння м’ясних порційних напівфабрикатів.

2. ПРОГРАМНИЙ ПРОДУКТ

Програма визначення форми відбивача для рівномірного опромінювання півеліпса

Велика піввісь приймача $a := 50$ Мала піввісь приймача $b := 25$

Коефіцієнт півеліпса $m := \frac{b}{a}$ $m = 0.5$

Відстань між випромінювачем та центром приймача $h := 100$

Відносна відстань між випромінювачем та центром приймача $\kappa := \frac{h}{a}$ $\kappa = 2$

Відстань між центром приймача та консоллю опроміненої поверхні $s := 100$

Відстань між випромінювачем та консоллю опроміненої поверхні $r_{0max} := \sqrt{h^2 + s^2}$ $r_{0max} = 141.421$

Половина кута прямого опромінювання $\theta_0 := \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\sqrt{\kappa^2 - m^2}}\right)$ $\theta_0 = 0.477$

Половина кута непотрапляння на відбивач $\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{s}{h}\right)$ $\alpha = 0.785$

Кут затінку $\beta_0 := \operatorname{atan}\left(\frac{m^2}{\sqrt{\kappa^2 - m^2}}\right)$ $\beta_0 = 0.128$

Кутова координата поверхні приймача $\beta := 0, \frac{\pi}{180} .. \pi$

$$D(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^2\right) \cdot \cos(\beta)^2} \qquad D1(\beta) := \sqrt{1 - \left(1 - m^4\right) \cdot \cos(\beta)^2} \qquad Z(\beta) := m \cdot \frac{D1(\beta)}{D(\beta)^3}$$

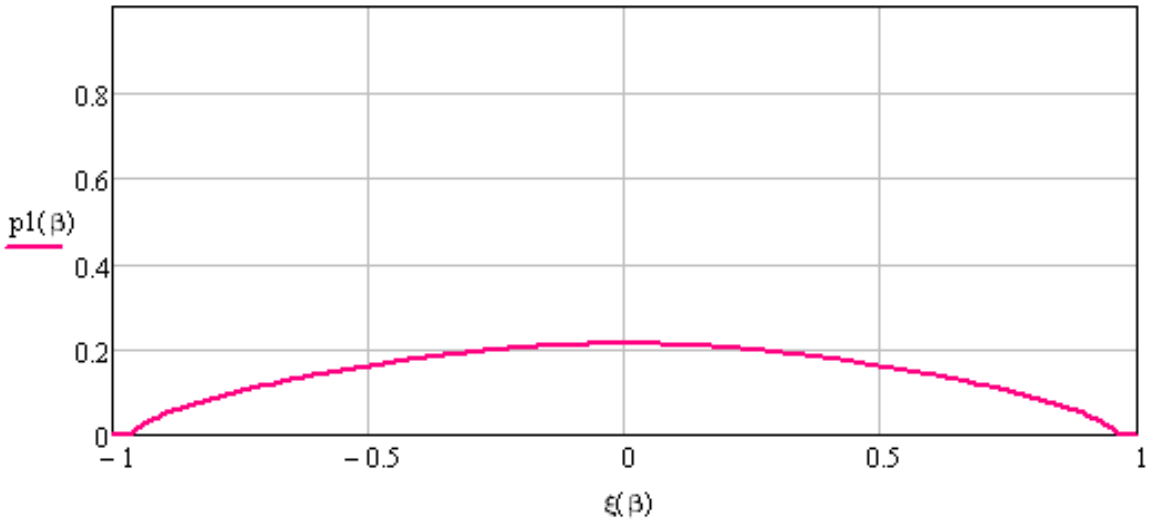
$$\xi(\beta) := \frac{m \cdot \cos(\beta)}{D(\beta)} \qquad \eta(\beta) := \frac{m \cdot \sin(\beta)}{D(\beta)} - \kappa$$

Довжина півеліпса $\lambda := \int_0^{\pi} Z(\beta)\, d\beta$ $\lambda = 2.422$

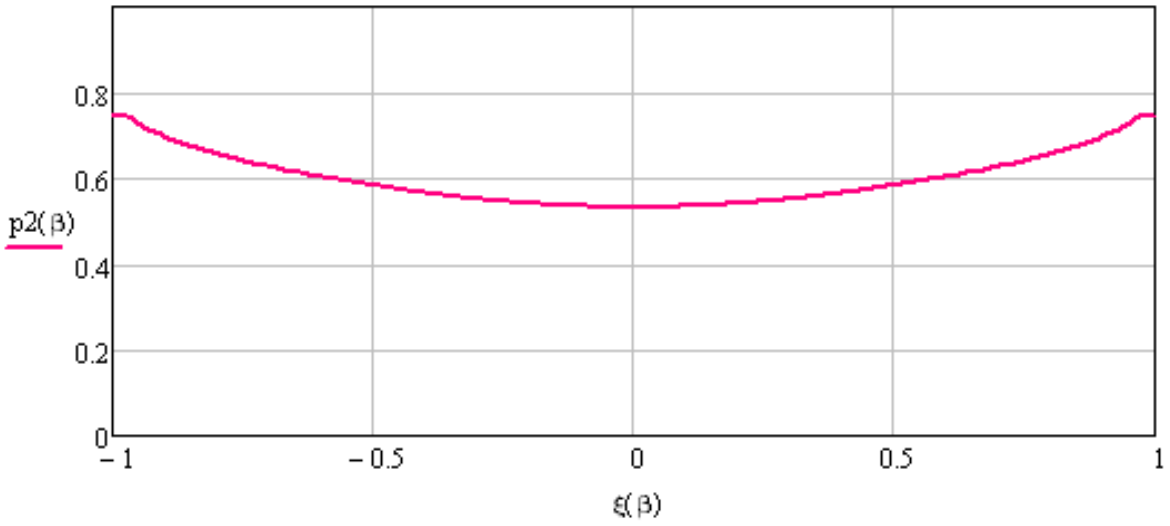
$$B(\beta) := \beta - \frac{\pi}{2} \qquad B0 := \frac{\pi}{2} - \beta_0 \qquad u(\beta) := \frac{(\kappa \cdot \sin(\beta) - m \cdot D(\beta)) \cdot D(\beta)^2}{\pi \cdot \left(m^2 - 2 \cdot \kappa \cdot m \cdot \sin(\beta) \cdot D(\beta) + \kappa^2 \cdot D(\beta)^2\right) \cdot D1(\beta)}$$

$$Q := 1000 \qquad q := \frac{Q}{\pi \cdot \lambda \cdot a} \cdot (\pi + \theta_0 - \alpha) = 7.446 \qquad q1 := 4q = 29.783$$

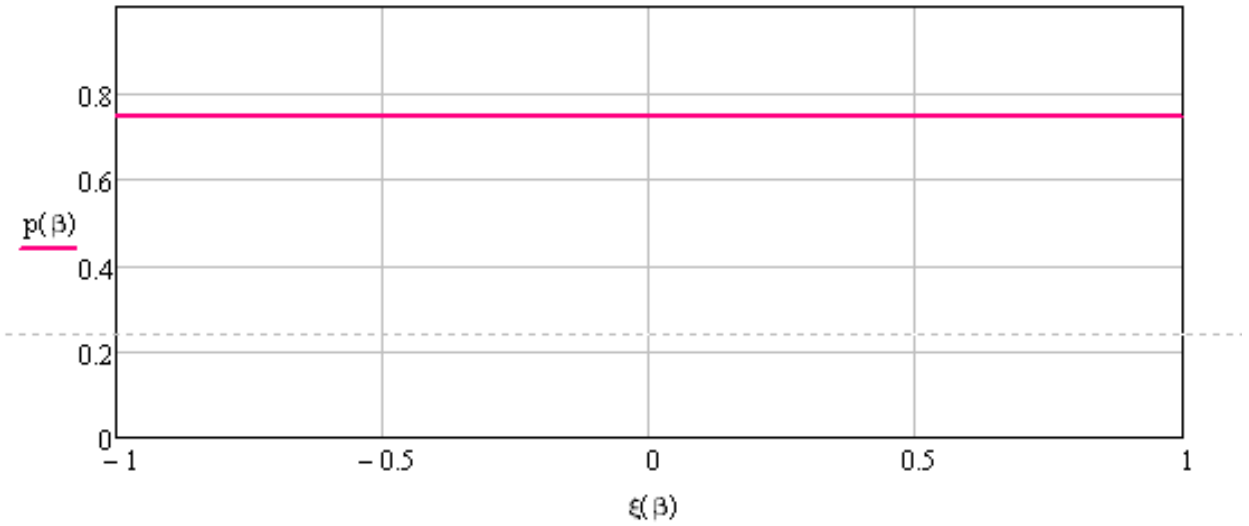
Прямий потік $\qquad p1(\beta) := \text{if}(|B(\beta)| > B0, 0, u(\beta))$



Відбитий потік $\qquad p2(\beta) := \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot (\pi + \theta_0 - \alpha) - p1(\beta)$

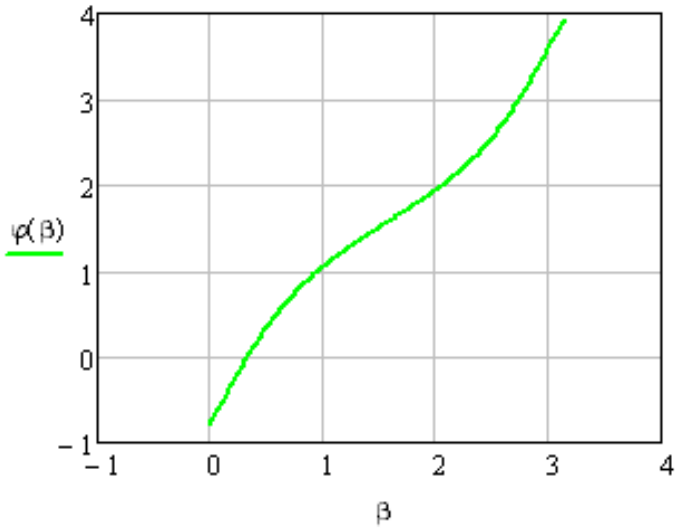


Сумарний потік $p(\beta) := \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot (\pi + \theta_0 - \alpha)$



$$\Psi(\beta) := \pi \cdot p2(\beta) \cdot Z(\beta)$$

Кутова координата поверхні відбивача φ $\varphi(\beta) := \alpha - \frac{\pi}{2} + \int_0^{\beta} \Psi(\beta)\, d\beta$



$$\rho_1(\beta, \rho) := \sqrt{(\rho \cdot \cos(\varphi(\beta)) - \xi(\beta))^2 + (\rho \cdot \sin(\varphi(\beta)) - \eta(\beta))^2}$$

Права частина рівняння форми відбивача

$$f(\beta,\rho) := -\rho\cdot\frac{(\rho_1(\beta,\rho)-\rho)\cdot\cos(\varphi(\beta))+\xi(\beta)}{(\rho_1(\beta,\rho)+\rho)\cdot\sin(\varphi(\beta))-\eta(\beta)}\cdot\Psi(\beta)$$

Рівняння форми відбивача

$$\frac{d}{d\beta}\rho(\beta) = f(\beta,\rho)$$

Відстань між випромінювачем та консоллю відбивача

$$r_{01} := 0.5r_{0max} \qquad \rho01 := \frac{r_{01}}{a} \qquad \rho01 = 1.414$$

$$w1 := \text{AdamsBDF}(\rho01, 0, \pi, 180, f)$$

Відстаньь між випромінювачем та консоллю відбивача

$$r_{02} := 0.74r_{0max} \qquad \rho02 := \frac{r_{02}}{a} \qquad \rho02 = 2.093$$

$$w2 := \text{AdamsBDF}(\rho02, 0, \pi, 180, f)$$

Відстань між випромінювачем та консоллю відбивача

$$r_{03} := r_{0max} \qquad \rho03 := \frac{r_{03}}{a} \qquad \rho03 = 2.828$$

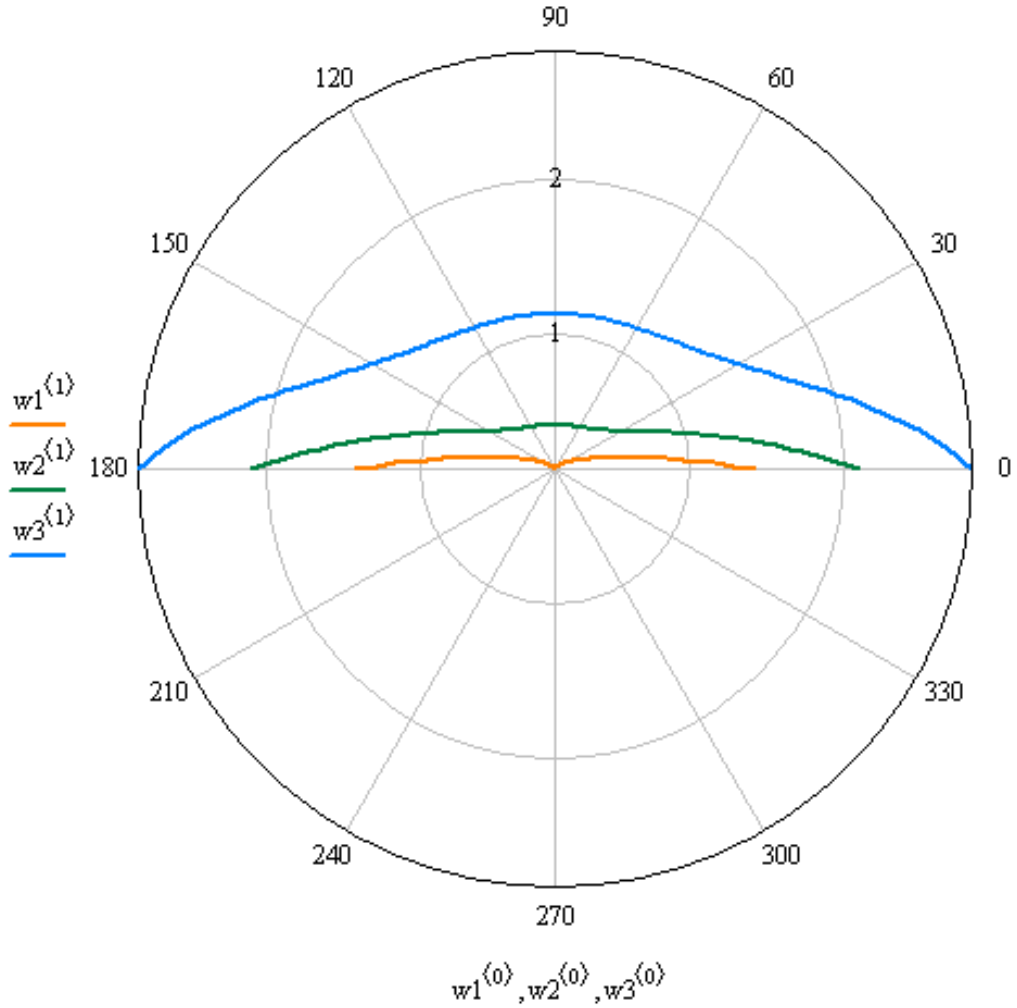
$$w3 := \text{AdamsBDF}(\rho03, 0, \pi, 180, f)$$

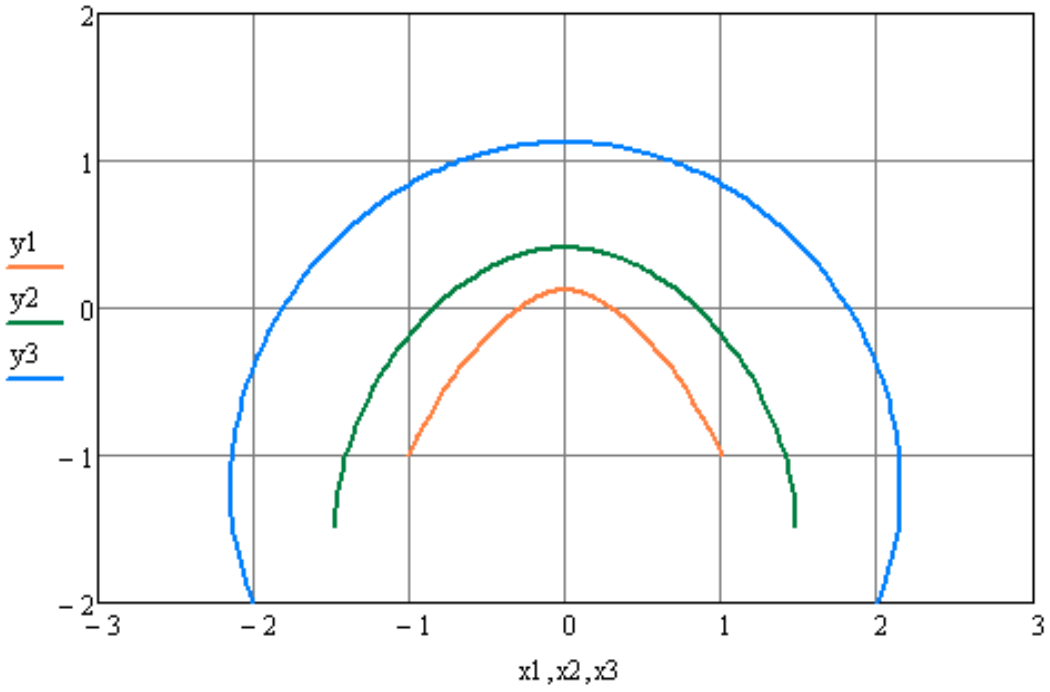
$$i := 0..180 \qquad \beta_i := i\cdot\frac{\pi}{180}$$

$$\rho1 := w1^{\langle 1\rangle} \qquad x1_i := \rho1_i\cdot\cos(\varphi(\beta_i)) \qquad y1_i := \rho1_i\cdot\sin(\varphi(\beta_i))$$

$$\rho2 := w2^{\langle 1\rangle} \qquad x2_i := \rho2_i\cdot\cos(\varphi(\beta_i)) \qquad y2_i := \rho2_i\cdot\sin(\varphi(\beta_i))$$

$$\rho3 := w3^{\langle 1\rangle} \qquad x3_i := \rho3_i\cdot\cos(\varphi(\beta_i)) \qquad y3_i := \rho3_i\cdot\sin(\varphi(\beta_i))$$


90
120
60
2
150
30
1
w1(1)
w2(1)
w3(1)
180
0
210
330
240
300
270
w1(0), w2(0), w3(0)



$$x10_i := x1_i \cdot a \qquad y10_i := y1_i \cdot a$$

$$x20_i := x2_i \cdot a \qquad y20_i := y2_i \cdot a$$

$$x30_i := x3_i \cdot a \qquad y30_i := y3_i \cdot a$$

$$\tau := -75, -74.98 .. 75$$

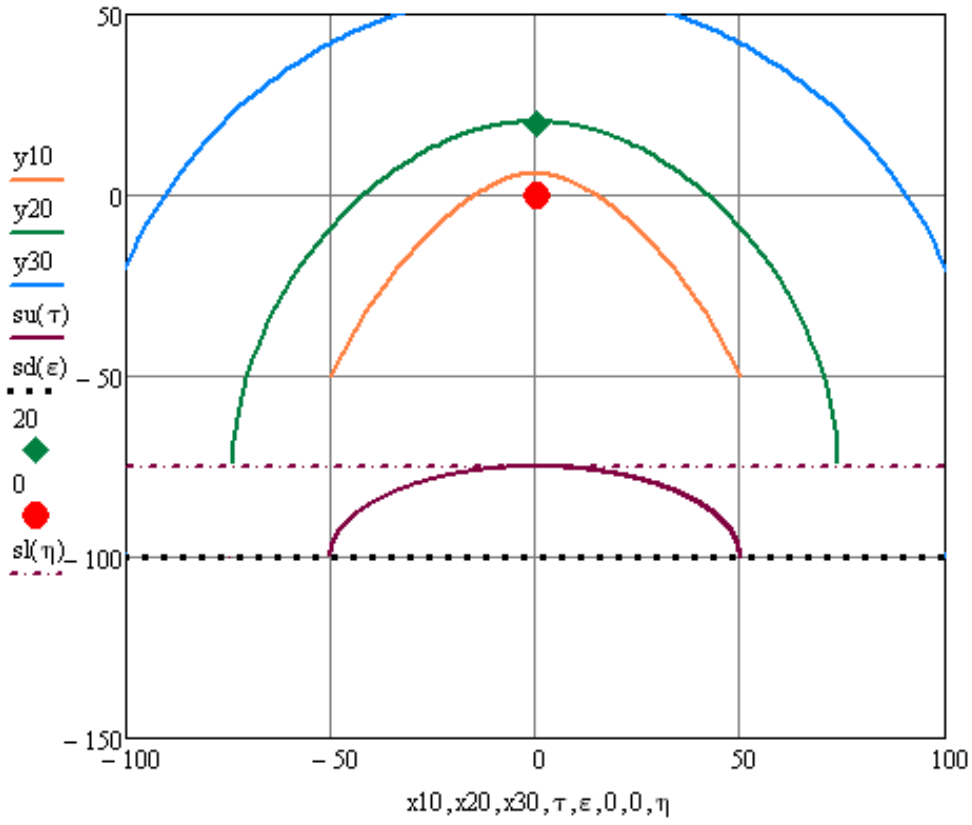
$$su(\tau) := \text{if}\left(|\tau| < 75, \frac{\sqrt{a^2 - \tau^2} \cdot 2m}{2} - 100, -100 \right)$$

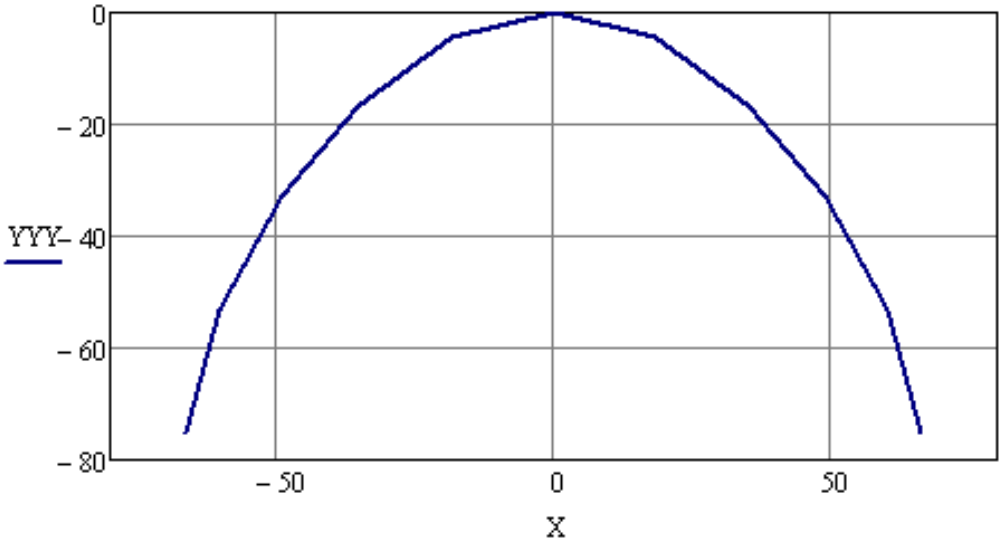
$$\varepsilon := -100, -99.98 .. 100$$

$$sd(\varepsilon) := \text{if}(|\varepsilon| > 100, -100, -100)$$

$$\eta := -100, -99.98 .. 100$$

$$sl(\eta) := \text{if}(|\eta| > 100, -75, -75)$$


y10
y20
y30
su(τ)
sd(ε)
20
0
sl(η)
50
0
– 50
– 100
– 150
– 100
– 50
0
50
100
x10, x20, x30, τ, ε, 0, 0, η


YYY
0
– 20
– 40
– 60
– 80
– 50
0
50
X

Додаток Ж

ПОГОДЖЕНО
Директор ТОВ «А-1»
_____ С.Б. Семененко
_____ 2012 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор
з наукової роботи ХДУХТ
_____ В.М. Михайлов
_____ 2012 р.

ПОГОДЖЕНО
Директор ПП «Містраль»
_____ Ю.Ю. Гущина
_____ 2012 р.

ПОГОДЖЕНО
Директор ТОВ «Науково-виробниче
підприємство Пластар»
_____ О.Б. Ківіренко
_____ 2012 р.

ІНСТРУКЦІЯ
З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
АПАРАТУ З РЕФЛЕКТОРОМ ДЛЯ ІЧ-ЖАРІННЯ
М'ЯСНИХ ПОРЦІЙНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ АРЖМ-0,07-1

РОЗРОБЛЕНО

Професор кафедри
механіки та графіки ХДУХТ,
д.т.н. _____ В.П. Плевако
_____ 2012 р.

Ст. викладач кафедри
механіки та графіки ХДУХТ,
_____ С.М. Костенко
_____ 2012 р.

ЗМІСТ

ВСТУП……

1. ТЕХНІЧНИЙ ОПИС……...

1.1 Загальні вказівки……...

1.2 Призначення апарата……

1.3 Технічна характеристика…….

1.4 Комплект поставки……...

1.5 Будова апарату……..

1.6 Принцип дії……...

1.7 Органи керування та індикації……

1.8 Маркування та пакування……

2. ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ…….

2.1 Загальні вказівки……...

2.2 Вимоги безпеки…….

2.3 Підготовка до роботи……

2.4 Робота апарату……..

2.5 Санітарна обробка……

2.6 Характерні несправності та засоби усунення……

2.7 Правила зберігання……...

2.8 Транспортування……...

2.9 Утилізація……..

3. ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ……...

3.1 Загальні вказівки……...

3.2 Вказівки вимог безпеки……

3.3 Технічне обслуговування…….

4. ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА……...

ВСТУП

Інструкція має метою ознайомлення користувачів з будовою, принципом дії, правилами встановлення, експлуатації та технічного обслуговування апарата з рефлектором для інфрачервоного (надалі ІЧ) жаріння м’ясних порційних напівфабрикатів. Для забезпечення надійної роботи та тривалого терміну експлуатації необхідно уважно вивчити інструкцію до введення апарата в експлуатацію.

1. ТЕХНІЧНИЙ ОПИС

1.1 Загальні вказівки

Виготовлення, експлуатація та постачання апарата відповідають вимогам ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартів безпеки праці. Обладнання виробниче. Загальні вимоги безпеки», ГОСТ 17446-86 «Електроприлади побутові. Надійність. Номенклатура показників та правила приймання», та ГОСТ 21621-83 «Електрогрилі, електрошашличниці, електротостери, електроростери побутові. Загальні технічні умови».

Апарат відповідає кліматичному виконанню УХЛ категорії 4 (за ГОСТ 15150) і призначений для експлуатації у наступних кліматичних умовах:

- температура навколишнього повітря від 10 до 35 °С;
- відносна вологість повітря – не вище 60 % за температури 20 °С;
- атмосферний тиск від 86 до 106 кПа.

Приміщення, де розташовано апарат, має відповідати умовам санітарних норм для харчових виробництв, а також закладів ресторанного господарства, відповідно до Закону України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» від 8.04.1994 р.

1.2 Призначення апарата

Апарат призначений для жаріння м’ясних порційних напівфабрикатів шляхом ІЧ-нагрівання, і може бути використаний на підприємствах харчових виробництв та у закладах ресторанного господарства.

1.3 Технічна характеристика

Потужність електричного нагрівача, кВт	1
Кількість електричних нагрівачів	1
Напруга живлення, В	220±10%
Частота струму, Гц	50±1
Регулювання потужності електричного нагрівача	плавне
Площа поверхні жаріння, $м^2$	0.07
Внутрішній об’єм, л	12
Габаритні розміри:	
довжина, мм	475
ширина, мм	240
висота, мм	195
Маса, кг, не більше	4
Тривалість розігрівання, хв	2

1.4 Комплект поставки

Апарат, шт.	1
Ґрати, шт.	1
Деко, шт.	1
Відбивач, шт	1
Інструкція з експлуатації, шт.	1
Індивідуальна упаковка, шт.	1

1.5 Будова апарата

Головні частини апарата наведено на рисунку 1.

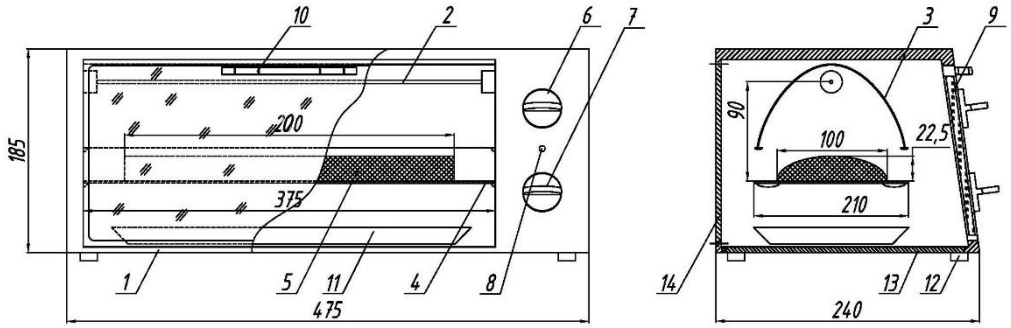


Рисунок 1 – Загальний вигляд апарата:
***1* – корпус; *2* – випромінювач; *3* – рефлектор; *4* – ґрати; *5* – продукт;**
***6* – регулятор потужності; *7* – таймер; *8* – індикаторна лампа;**
***9* – скляні дверцята; *10* – ручка дверцят; *11* – деко; *12* – ніжки;**
***13* – відкидний піддон; *14* –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

Апарат є робочою камерою *1* із неіржавіючої сталі у вигляді прямокутного паралелепіпеда з незначним ухилом на передньому торці, з термостійкими скляними дверцятами *9* із ручкою *10*, відкидним піддоном *13* на нижньому торці та знімною кришкою *14* на задньому. Дверцята призначені для завантаження та вивантаження продукції, а також її огляду під час жарення. Відкидний піддон призначається для полегшення доступу в робочу камеру з метою монтажу та сервісу пристрою. Задня стінка робочої камери знімна на гвинтах. На зовнішньому нижньому периметрі корпусу встановлено чотири ніжки *12*, щоб убезпечити апарат від безпосереднього контакту з опорною поверхнею.

Усередині корпусу на бічних поверхнях 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. Сталеві ґрати (вміст хрому не менше 13%, що робить матеріал інертним до впливу харчових продуктів) розміром 375х210 мм установлюються на відстані 90 мм від осі випромінювача *2*. Деко з нержавіючої сталі має розміри 340х180 мм, висота бортів – 5 мм.

Як ІЧ-нагрівач *2* використано випромінювач КИ 220-1000-1, у якого напруга живлення 220 В, потужність 1000 Вт, температура тіла розжарювання 2540...2580 К, термін роботи – 5000 годин, довжина тіла розжарювання 300 мм (разом зі спіральною ділянкою), діаметр спіральної ділянки тіла розжарювання 1.3 мм, довжина спіральної ділянки тіла розжарювання 260 мм, діаметр скляної трубки 10.75 мм, довжина трубчастої частини 295 мм.

Рефлектор *3* виготовлено з листа сталі неіржавіючої 12Х18Н10Т (AISI 304) ГОСТ 5632-72 розмірами 275х214 мм завтовшки 1 мм. Поверхня рефлектора шліфована та полірована.

1.6 Принцип дії

Рівномірне опромінення продукту забезпечує рефлектор, профіль якого, визначений за розробленою методикою і обчислений за використання створеного програмного продукту у комплексі Mathcad, наведено на рисунку 2 (координатну сітку наведено в мм). За обраних розмірів робочої камери, а також параметрів випромінювача та рефлектора м’ясний напівфабрикат завширшки 100 мм і завтовшки 20…25 мм буде рівномірно опромінюватися з густиною променевого потоку близько 30 кВт/м^2.

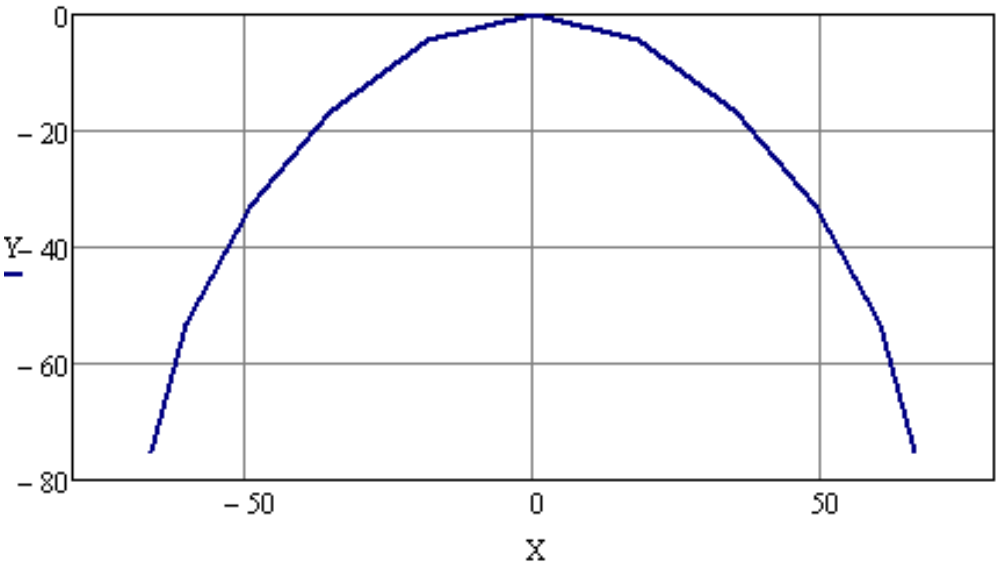


Рисунок 2 – Профіль рефлектора

1.7 Органи керування та індикації

На панелі керування розташовано регулятор потужності *6*, таймер *7* та індикаторну лампу *8*. Регулятор потужності призначений для встановлення теплового режиму. Реле таймера з функцією ввімкнення та вимкнення апарата дозволяє встановлювати тривалість процесу жарення фіксовано до 15 хвилин або безперервно. Індикаторна лампа вказує на працездатність пристрою і процес, що відбувається.

1.8 Маркування та пакування

Маркування та пакування апарата здійснюється за порядком, встановленим заводом-виробником. Табличка, яку кріплять до задньої стінки апарату, інформує про таке: товарний знак підприємства-виробника, заводський номер апарата та його умовне позначення, номінальна напруга та частота електромережі. Під час пакування апарата в тару вкладають експлуатаційні документи – паспорт, інструкцію з експлуатації та технічного обслуговування, пакувальний лист.

2. ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Загальні вказівки

- Узятий до експлуатації апарат має бути закріплений за відповідальною особою, яка забезпечує обслуговування відповідно до інструкції.
- Апарат має підтримуватись у належній чистоті та бути повністю укомплектованим. Експлуатація апарату без будь-яких складових частин неприпустима.
- За виявлення несправностей в роботі апарата необхідно негайно вимкнути його з електромережі.

2.2 Вимоги безпеки

- Перед увімкненням пристрою треба перевірити відсутність ушкоджень на основному пристрої та шнурі живлення. Якщо ви впустили пристрій на тверду поверхню, не варто його використовувати без технічного сервісу – навіть неочевидні ушкодження можуть вплинути на експлуатаційну безпеку.
- Вмикайте апарат лише в заземлену розетку, яку встановлено відповідно до діючих норм. Напруга у мережі повинна відповідати напрузі, вказаній на апараті. Не підключайте інші прилади високої потужності до розетки з цим апаратом, щоб не перевантажувати мережу.
- Під час роботи пристрій повинен стояти на поверхні, що стійка до теплоти та забруднення. Не встановлюйте пристрій на гарячі поверхні та поруч із ними. Не накривайте прилад під час експлуатації. Не використовуйте його біля відкритого полум’я або легкозаймистих матеріалів.
- Не використовуйте пристрій поза приміщенням.
- Не знімайте ніжки, встановлені на нижній частині апарата.

- Не кладіть на апарат ніяких предметів. Пильнуйте, щоб апарат знаходився на такій мінімальній відстані від стіни або іншого пристрою: збоку на 10 см, ззаду на 10 см, згори на 30 см. Не встановлюйте прилад під навісні шафи, полиці та подібні речі.
- Не припускайте контакту шнура живлення з гарячою поверхнею. Розташовуйте прилад та шнур таким чином, щоб випадково не зачепити шнур і не перекинути апарат.
- Завжди вимикайте апарат та виймайте вилку з розетки після використання, за будь-якої відмови або для чищення. Під час виймання вилки зі стінної розетки ніколи не тягніть за шнур, лише за вилку.
- Не торкайтеся нагрівального елементу.
- Не залишайте увімкнений апарат без нагляду.
- Обережно! За роботи апарату його дверцята та поверхня дуже нагріваються! Під час експлуатації користуйтеся спеціальними ручками.
- Відповідно до вимог правил техніки безпеки та для запобігання травматизму ремонт електричних приладів, включно з заміною шнура живлення, має виконувати кваліфікований персонал.

2.3 Підготовка до роботи

- Уважно прочитайте **Вимоги безпеки**.
- Повністю зніміть усі пакувальні матеріали та очистіть пристрій (див. **Санітарна обробка**). Не дозволяйте дітям гратися з пакувальним матеріалом!
- Переконайтеся, що навкруги апарата вистачає простору для вільної циркуляції повітря.
- Переконайтеся, що прилад абсолютно сухий.

- Перед використанням апарату прогрійте його протягом 15 хвилин. Під час першого вмикання може з’явитися незначний запах, який згодом зникне. Забезпечте достатню вентиляцію.

2.4 Робота апарату

- Встановіть регулятор потужності на потрібне значення.
- Нагрівальний елемент увімкнеться тільки після встановлення таймера на потрібний термін роботи.
- Таймер використовується як для визначеного терміну готування, так і для безперервного режиму.
- Для попереднього програмування часу приготування поверніть таймер за годинниковою стрілкою на позначку потрібного часу. Для часу менше 5 хвилин спочатку встановіть таймер на більш тривалий час, а потім повертайте його проти годинникової стрілки на позначку потрібного часу.
- Для вимикання пристрою поверніть таймер проти годинникової стрілки максимально.
- Після закінчення встановленого часу або за примусового вимикання пролунає сигнал, і пристрій вимкнеться.
- Індикаторна лампа вмикається за увімкнення апарату за допомогою таймера.
- Індикаторна лампа вимикається, якщо встановлений час закінчився, або жарення припинено.
- Перед приготуванням зніміть усю пластикову та паперову упаковку з напівфабрикатів.
- Встановіть деку та ґрати відповідно до обраного продукту. Для жаріння біфштексів деко встановіть у напрямні під ґрати, для жаріння лангетів деко з жиром встановіть на ґрати.
- Розігрійте апарат протягом 2 хвилин із закритими дверцятами.

- Під час жарення виділяється м’ясний сік, який містить велику кількість екстрактивних речовин. Для його подальшого використання жир збирайте у деку та зливайте, а в подальшому використовуйте для поливання м’яса або заправляння соусів. Перегріті олія та жир можуть спалахнути, тому переповнення деки є неприпустимим.
- Шматки м’яса укладайте таким чином, щоб вони не торкалися один одного, оскільки за щільного укладання продукт нагрівається нерівномірно, скоринка утворюється довше, м’ясний сік витікає і виріб стає жорсткішим.
- Закрийте скляні дверцята і встановіть потрібні потужність та час жарення. Не користуйтеся приладом із відкритими дверцятами.
- Ступінь готовності та консистенцію м’ясопродуктів визначайте проколюванням кухарської голки, яка повинна легко входити у продукт. За проколювання кухарською голкою із виробу повинен виділятися прозорий сік без кольору.
- Виріб вважається готовим, якщо температура всередині продукту сягає 75 °С. Якщо температура буде вище за вказану, то соковитість м’яса буде меншою, а втрати маси – більшими.
- Вироби, смажені великим шматком, зберігайте у гарячому стані не більше 3 годин, для тривалішого зберігання охолоджуйте їх та зберігайте у холодильнику не більше 48 годин.
- Після заданого часу жарення реле таймера автоматично вимикає нагрівальний елемент.
- Після встановленої тривалості жарення (7 хвилин з кожного боку для біфштексів та лангетів) витримати продукт 2 хвилини у робочій камері для його темперування.
- Для припинення процесу нагрівання поверніть таймер проти годинникової стрілки максимально.
- Обов’язково користуйтеся ручкою для відкривання гарячих скляних дверцят під час приготування. Для витягання дека або ґрат використовуйте

цупку тканину. Завжди ставте деко та ґрати на теплостійку поверхню. Обережно пересувайте деко з гарячим жиром.

- Після користування апаратом вимкніть регулятор температури та дістаньте вилку з розетки.

2.5 Санітарна обробка

- Обов’язково дістаньте вилку з розетки та дайте приладу вистигнути перед оглядом або чисткою.
- Регулярно вичищайте апарат, оскільки жир, що залишається на внутрішніх поверхнях, знижує ефективність використання рефлектора, а також може призвести до загоряння.
- Для уникнення ураження електричним струмом не мийте апарат та не занурюйте його у рідину.
- Ззовні та зсередини протирайте апарат вологою тканиною без ворсу.
- Обережно дістаньте деко. Відкрийте дверцята, трохи підніміть ґрати і потягніть їх на себе. Деко та ґрати можна мити м’яким засобом для миття.
- Покладіть прилад на задню стінку, натисніть на клямку на піддоні та потягніть уперед. Видаліть забруднення. Відкидний піддон можна чистити м’яким засобом для миття. Встановіть піддон на місце, діючи зворотним чином.
- Знявши гвинти на задній поверхні робочої камери, зніміть задню стінку. Зніміть рефлектор та здійсніть його чистку м’яким засобом для миття. Встановіть рефлектор на місце, діючи зворотним чином.
- Скляні дверцята протирайте тканиною, змоченою у мильній воді. Не користуйтеся гострими предметами, щоб не ушкодити або не розбити дверцята.

2.6 Характерні несправності та засоби усунення

Проблема	Усунення
Апарат не вмикається	• Перевірити та замінити електричний шнур (або електричну вилку).
Індикаторна лампа не працює	• Замінити індикаторну лампу.
Прилад димить під час роботи	• Нагрівальний елемент вкритий незначною кількістю захисного мастила, яка за першого увімкнення апарата може утворювати дим. Відкрийте дверцята і увімкніть апарат на 15 хвилин, дим має зникнути. • Дим, який супроводжує процес жарення, є нормальним явищем. Попереднє видалення надмірного жиру з напівфабрикатів зменшить утворення диму. • Жир, який потрапив на випромінювач, може утворювати дим. За деякий час це припиниться. • Часта поява диму свідчить про забруднення внутрішньої поверхні робочої камери та відкидного піддону. Дивіться **Санітарна обробка**. • Якщо джерелом диму є електричний шнур, негайно припиніть експлуатацію приладу та вимкніть з мережі.
Ґрати застрягли, дверцята не закриваються	• Вийміть ґрати та почистіть напрямні всередині корпусу. Почистіть відкидний піддон. Переконайтеся, що навіси дверцят не перекошені у корпусі.

2.7 Правила зберігання

- Зберігати апарат потрібно в упакованому вигляді, у горизонтальному положенні, в сухому приміщенні, яке провітрюється, за температури від –40 °С до +40 °С та відносної вологості повітря не більше за 60 % за температури +20 °С.
- У повітрі не повинно бути кислотних, лужних та інших парів, які шкідливо діють на матеріали апарата.

2.8 Транспортування

- Транспортування упакованого апарата може здійснюватись усіма видами транспорту відповідно до діючих правил перевезення вантажів, затверджених Кабінетом міністрів України.
- Під час завантажувально-розвантажувальних робіт та транспортування не припускати ударів апаратів один об інший або об будь-які предмети.
- Апарат потрібно переміщувати обережно, без ударів і кидків.

2.9 Утилізація

Не викидайте старі та несправні електричні пристрої разом з побутовим сміттям. Відправляйте їх на пункти збирання спеціального сміття.

3. ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

3.1 Загальні вказівки

До технічного обслуговування допускаються особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та мають посвідчення на право обслуговування електричного обладнання.

3.2 Вказівки вимог безпеки

- Вимоги безпеки під час монтажу, експлуатації та ремонту мають відповідати діючим нормам і вимогам безпеки.
- Загальні вимоги безпеки за ГОСТ 12.2.003-74, ГОСТ 12.2.007.0-75 та ГОСТ 12.2.092-83.
- Апарат має бути заземлений відповідно до ГОСТ 12.2.007.0-75.
- Електричний опір між заземленими елементами та будь-якою доступною доторкуванню металевою частиною апарата, що може опинитися під напругою, не повинен перевищувати 0.1 Ом.
- Опір ізоляції струмопровідних частин апарата повинен бути не менше 2 МОм.
- Струм витоку від будь-якого полюса джерела напруги до доступних металевих частин апарата не повинен перевищувати 7 мА.
- Якість монтажу електрообладнання має відповідати ГОСТ 12.2.007.0-75.

3.3 Технічне обслуговування

Технічне обслуговування апарата періодичне, не менше одного разу на тиждень і складається з перевірки:

– стану електричного нагрівача;

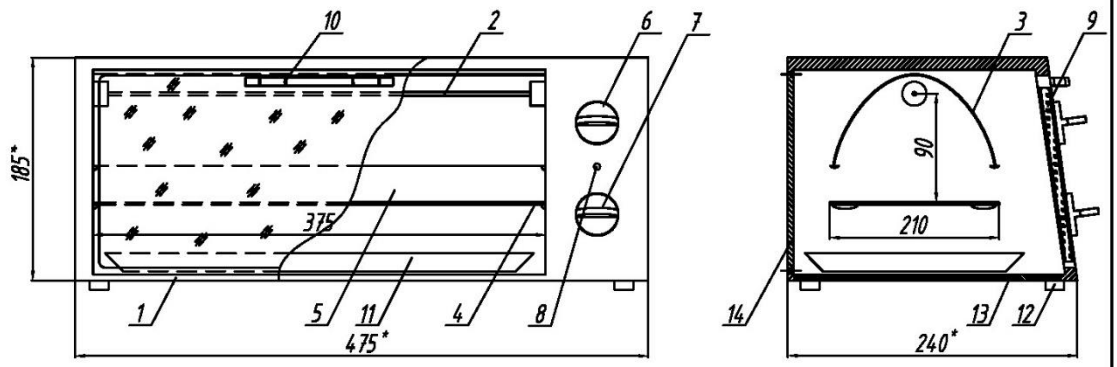
– якості заземлення;

– відсутності підгоряння контактів у системі автоматичного управління.

4. ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА

- Підприємство-виробник гарантує відповідність апарата вимогам ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 17446-86 та ГОСТ 21621-83 за дотримування умов експлуатації, транспортування та зберігання.
- Гарантійний термін експлуатації апарата становить 12 місяців з дня продажу, але не більше 18 місяців з моменту відвантаження виробу з підприємства-виробника.
- Гарантійний термін зберігання становить 12 місяців з доби його випуску до продажу через роздрібну торгову мережу.
- В разі виходу апарату з ладу протягом вказаного терміну підприємство-виробник за гарантійним талоном виконує його ремонт або заміну.
- Із закінченням гарантійного терміну підприємство–виробник виконує ремонт апарата за рахунок користувача.

АРЖМ-0.07-1. ВЗ



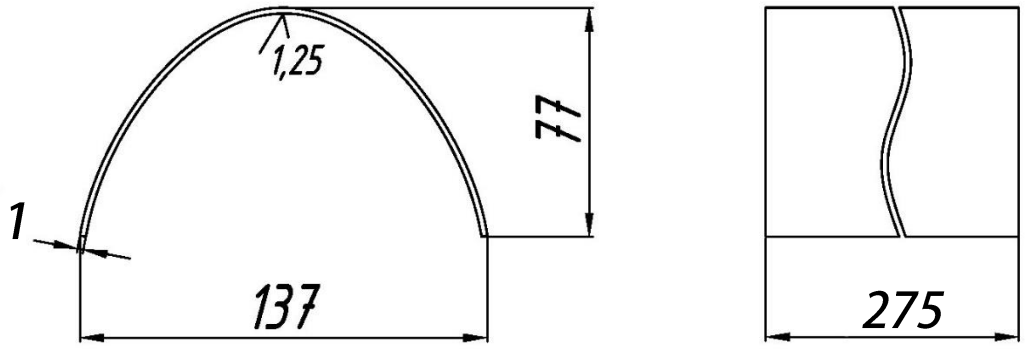
Технічні характеристики
Потужність випромінювача 1 кВт

*Розміри для справок

					АРЖМ-0.07-1. ВЗ		
Изм.	Лист	N Документа	Подпись	Дата	Апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів Вид загальний	Лит	Масса / Масштаб 1:5
Разраб.		Костенко С.М.					
Проверил						Лист	Листов 1
Н. Контр						ХДУХТ	
Утв.							

АРЖМ-0.07-1.03

5,0



Технічні вимоги:
Внутрішню поверхню полірувати
Невказані граничні відхилення розмірів H14/h14

					АРЖМ-0.07-1.03	
Изм.	Лист	N Документа	Подпись	Дата	Рефлектор	Лит / Масса / Масштаб: 1:2
Разраб.		Костенко С.М.				Лист / Листов 1
Проверил						
Н. Контр					12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72	ХДУХТ
Утв.						

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
	Документація		
	Вид загальний		
	Деталі		
1	Корпус	1	
3	Рефлектор	1	12Х18Н10ТГОСТ5632-72
4	Грати	1	
6	Регулятор потужності	1	
7	Таймер	1	
9	Скляні дверцята	1	
10	Ручка дверцят	1	
11	Дека	1	
12	Ніжка	4	
13	Відкидний піддон	1	
14	Знімна кришка	1	
	Стандартні деталі		
2	Випромінювач	1	КИ 220-1000-1

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АРЖМ-0,07-1.ВЗ		
Розроб.		Костенко С.М.			Апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів Вид загальний	Літ.	Арк. 232 / Аркушів 252
Перевір.							
Реценз.						ХДУХТ	
Н. Контр.							
Затверд.							

Додаток З

КІНЕТИКА ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ МЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Велика напіввісь еліпса, м	$a := 0.05$
Мала напіввісь еліпса, м	$b := 0.0225$
Довжина півеліпса, м	$Lh := \pi \cdot \frac{(a + b)}{2} = 0.114$
Площина півеліпса, м^2	$A := \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2} = 1.767 \times 10^{-3}$
Довжина продукту, м	$Lp := 0.2$
Площина верхньої поверхні продукту, м^2	$S := Lh \cdot Lp = 0.023$
Об·єм продукту, м^3	$V := A \cdot Lp = 3.534 \times 10^{-4}$
Півтовщина продукту, м	$Rx := \frac{b}{2} = 0.011$
Півширина продукту, м	$Ry := a = 0.05$
Півдовжина продукту, м	$Rz := \frac{Lp}{2} = 0.1$
Коефіцієнт форми продукту	$KF := 1 + \frac{Rx}{Ry} + \frac{Rx}{Rz} = 1.338$
Коефіцієнт розмірів продукту, м	$RV := \frac{V}{S} = 0.016$
Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2 К)	$\alpha := 20$

Коефіцієнт поглинання потужності $\eta := 0.2$

Потужність випромінювача, Вт $PE := 1000$

Температура повітря в апараті, К $TA := 293$

Початкова температура внутрішніх шарів продукту, К $T0 := 278$

Питома теплоємність продукту, Дж/(кг К) $c := 3.5 \cdot 10^3$

Густина продукту, кг/м^3 $\rho := 1100$

$m := \rho \cdot V = 0.389$

Коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м К) $\lambda := 0.5$

Модифіковане число Біо $BiF := \frac{\alpha \cdot Rx}{2 \cdot KF \cdot \lambda} = 0.168$

Термін жарення, с $\tau := 0 .. 900$

Коефіцієнт відбивача, хв/хв $kв := \frac{10}{15}$

Середня температура внутрішніх шарів продукту, К:

$$T(\tau) := \left[\frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S} + TA + \left[T0 - \left(\frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S} + TA \right) \right] \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot 2 \cdot KF \cdot BiF}{c \cdot \rho \cdot RV \cdot Rx \cdot (BiF+1)} \cdot \tau} \right]$$

$$Tв(\tau) := \left[\frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S} + TA + \left[T0 - \left(\frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S} + TA \right) \right] \cdot e^{-\frac{\lambda \cdot 2 \cdot KF \cdot BiF}{c \cdot \rho \cdot RV \cdot Rx \cdot (BiF+1)} \cdot \tau \cdot \frac{1}{kв}} \right]$$

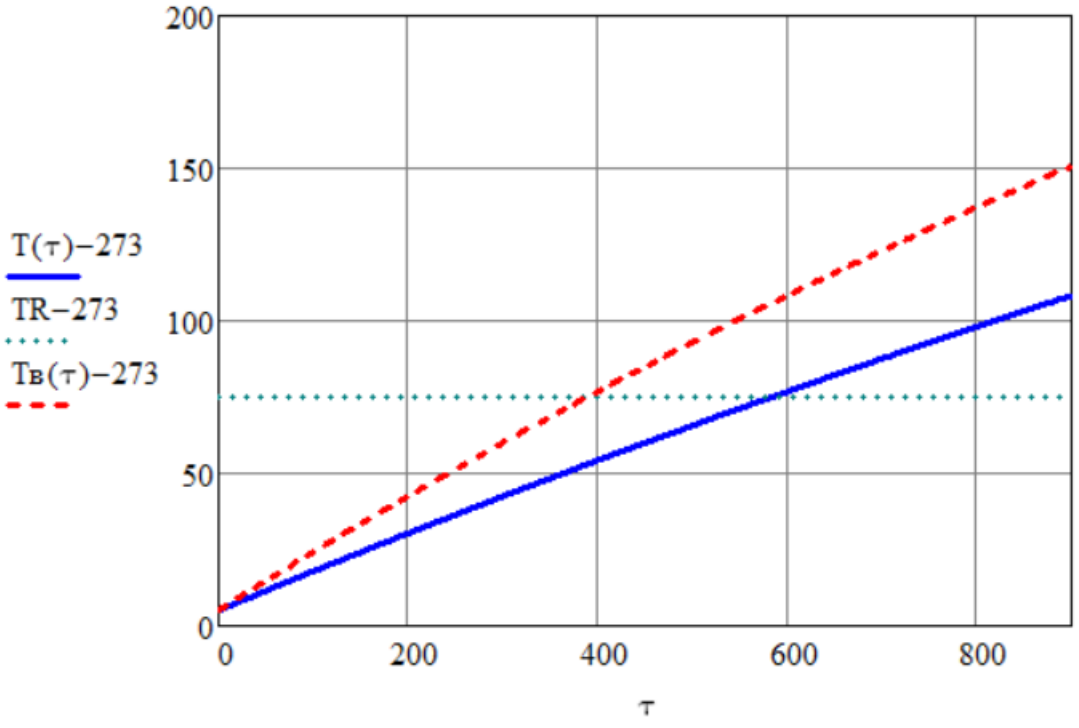
Середня температура поверхні, К:

$$TS(\tau) := \frac{T(\tau) + \frac{\eta \cdot PE \cdot Rx}{S \cdot \lambda \cdot 2 \cdot KF} + BiF \cdot TA}{BiF + 1}$$

$$TSв(\tau) := \frac{Tв(\tau) + \frac{\eta \cdot PE \cdot Rx}{S \cdot \lambda \cdot 2 \cdot KF} + BiF \cdot TA}{BiF + 1}$$

Температура готовності внутрішніх шарів продукту, К $TR := 348$

Кінетика температури, С:



Потрібний час жарення, с

$$\tau R := \frac{-RV \cdot Rx \cdot \rho \cdot c \cdot \ln\left(\frac{TA - TR + \frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S}}{TA - T0 + \frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S}}\right) \cdot (BiF + 1)}{2 \cdot BiF \cdot KF \cdot \lambda} = 584.277$$

$$\frac{\tau R}{60} = 9.738$$

$$\tau Rв := \frac{-RV \cdot Rx \cdot \rho \cdot c \cdot \ln\left(\frac{TA - TR + \frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S}}{TA - T0 + \frac{\eta \cdot PE}{\alpha \cdot S}}\right) \cdot (BiF + 1)}{2 \cdot BiF \cdot KF \cdot \lambda} \cdot kв = 389.518$$

$$\frac{\tau Rв}{60} = 6.492$$

Додаток К

ПОГОДЖЕНО

Проректор
з наукової роботи ХДУХТ
_____ В.М. Михайлов
_____ 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «А-1»
_____ С.Б. Семененко
_____ 2017 р.

АКТ
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи «Моделювання процесу променевого теплообміну в елементах жарильного обладнання», яку виконано Костенком Станіславом Миколайовичем, впроваджені ТОВ «А-1».

1. Вид впроваджених результатів:

- Методика визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання приймача напівеліптичного перерізу.
- Програмний продукт для визначення форм відбивачів, що забезпечать заданий розподіл променевого потоку на поверхні приймача
- Технічна документація на ІЧ-апарат з рефлектором для рівномірного опромінювання приймача опуклої форми.

2. Форма впровадження:

- Методика визначення профілю рефлектора для рівномірного опромінювання напівеліптичного приймача із потрібною щільністю шляхом аналітичного розв'язання оберненої задачі та комп'ютерного обчислення профілю.
- Проект нормативно-технічної документації на апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1.

3. Новизна результатів науково-дослідної роботи:

- Створена методика дозволяє аналітично отримати диференціальне рівняння профілю рефлектора, що створює рівномірний сумарний променевий потік на опуклій поверхні продукту, і визначити профіль шляхом розв'язку диференційного рівняння за використання програми у MathCad.
- Новий апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1 забезпечує покращені органолептичні характеристики продукту та знижує питомі витрати електричної енергії на 50 %.

Пошукач
_____ С.М. Костенко

Директор ТОВ «А-1»
_____ С.Б. Семененко

ПОГОДЖЕНО

Проректор
з наукової роботи ХДУХТ
_____ В.М. Михайлов
_____ 201_ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ПП «Містраль»
_____ Ю.Ю. Гущіна
_____ 201_ р.

АКТ
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи «Моделювання процесу променевого теплообміну в елементах жарильного обладнання», яку виконано Костенком Станіславом Миколайовичем, впроваджені ПП «Містраль».

1. Вид впроваджених результатів:

- Методика визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання приймача напівеліптичного перерізу.
- Програмний продукт для визначення форм відбивачів, що забезпечать заданий розподіл променевого потоку на поверхні приймача
- Технічна документація на ІЧ-апарат з рефлектором для рівномірного опромінювання приймача опуклої форми.

2. Форма впровадження:

- Методика визначення профілю рефлектора для рівномірного опромінювання напівеліптичного приймача із потрібною щільністю шляхом аналітичного розв'язання оберненої задачі та комп'ютерного обчислення профілю.
- Проект нормативно-технічної документації на апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1.

3. Новизна результатів науково-дослідної роботи:

- Створена методика дозволяє аналітично отримати диференціальне рівняння профілю рефлектора, що створює рівномірний сумарний променевий потік на опуклій поверхні продукту, і визначити профіль шляхом розв'язку диференційного рівняння за використання програми у MathCad.
- Новий апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1 забезпечує покращені органолептичні характеристики продукту та знижує питомі витрати електричної енергії на 50 %.

Пошукач
_____ С.М. Костенко

Директор ПП «Містраль»
_____ Ю.Ю. Гущіна

ПОГОДЖЕНО

Проректор
з наукової роботи ХДУХТ
_____ В.М. Михайлов
_____ 201_ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар»
_____ О.Б. Кіріенко
_____ 201_ р.

АКТ
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи «Моделювання процесу променевого теплообміну в елементах жарильного обладнання», яку виконано Костенком Станіславом Миколайовичем, впроваджені ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар».

1. Вид впроваджених результатів:

- Методика визначення профілів рефлекторів для рівномірного опромінювання приймача напівеліптичного перерізу.
- Програмний продукт для визначення форм відбивачів, що забезпечать заданий розподіл променевого потоку на поверхні приймача
- Технічна документація на ІЧ-апарат з рефлектором для рівномірного опромінювання приймача опуклої форми.

2. Форма впровадження:

- Методика визначення профілю рефлектора для рівномірного опромінювання напівеліптичного приймача із потрібною щільністю шляхом аналітичного розв'язання оберненої задачі та комп'ютерного обчислення профілю.
- Проект нормативно-технічної документації на апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1.

3. Новизна результатів науково-дослідної роботи:

- Створена методика дозволяє аналітично отримати диференціальне рівняння профілю рефлектора, що створює рівномірний сумарний променевий потік на опуклій поверхні продукту, і визначити профіль шляхом розв'язку диференційного рівняння за використання програми у MathCad.
- Новий апарат із рефлектором для ІЧ-жаріння м'ясних порційних напівфабрикатів АРЖМ-0,07-1 забезпечує покращені органолептичні характеристики продукту та знижує питомі витрати електричної енергії на 50 %.

Пошукач
_____С.М. Костенко

Директор ТОВ «Науково-виробниче підприємство Пластар»
_____ О.Б. Кіріенко

Додаток Л

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 121298

АПАРАТ ІЗ ВІДБИВАЧЕМ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 27.11.2017.

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України М.І. Тітарчук

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

(11) 121298

(19) UA

(51) МПК
A47J 37/06 (2006.01)

(21) Номер заявки: u 2017 06805

(22) Дата подання заявки: 30.06.2017

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.11.2017

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 27.11.2017, **Бюл. № 22**

(72) Винахідники:
Костенко Станіслав Миколайович, UA,
Потапов Володимир Олексійович, UA,
Педорич Ірина Петрівна, UA

(73) Власник:
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ,
вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051, UA

(54) Назва корисної моделі:

АПАРАТ ІЗ ВІДБИВАЧЕМ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

(57) Формула корисної моделі:

Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів, що складається з робочої камери з дверцятами, носія для продукції та дека, який **відрізняється** тим, що у робочу камеру встановлено один кварцовий випромінювач уздовж осі робочої камери та відбивач променевого потоку, профіль та розташування якого визначаються розв'язком зворотної задачі опромінювання півеліпсу.

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

УКРАЇНА (19) **UA** (11) **121298** (13) **U**

(51) МПК
A47J 37/06 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

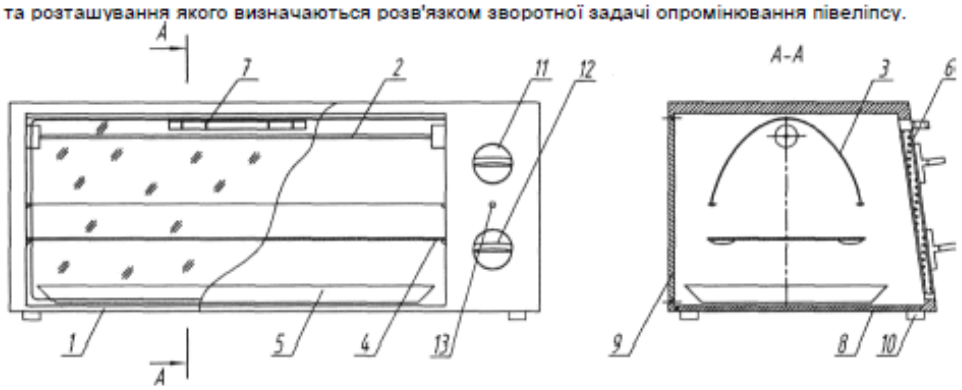
(21) Номер заявки: **u 2017 06805**
(22) Дата подання заявки: **30.06.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **27.11.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **27.11.2017, Бюл.№ 22**

(72) Винахідник(и):
Костенко Станіслав Миколайович (UA),
Потапов Володимир Олексійович (UA),
Педорич Ірина Петрівна (UA)
(73) Власник(и):
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ,
вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051 (UA)

(54) АПАРАТ ІЗ ВІДБИВАЧЕМ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

(57) Реферат:

Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів складається з робочої камери з дверцятами, носія для продукції та дека. У робочу камеру встановлено один кварцовий випромінювач уздовж осі робочої камери та відбивач променевого потоку, профіль та розташування якого визначаються розв'язком зворотної задачі опромінювання півеліпсу.



UA 121298 U

Корисна модель належить до конструкцій апаратів для інфрачервоної обробки харчових продуктів і може бути використана на підприємствах харчування, у закладах ресторанного господарства та у побуті.

Відомий пристрій для обжарювання харчових продуктів [1], що містить корпус, на який надягаються поєднані відбивачі, нагрівачі всередині утвореного об'єму та шампури у прорізях кришки. Відомий пристрій для теплової обробки харчових продуктів [2], що має корпус із дверцятами, відбивач у формі еліптичного циліндра, знімні випромінювачі зі змінним розташуванням та носій для продукту.

Недоліками зазначених конструкцій є нерівномірність променевого потоку на поверхні продукту, що призводить не лише до надмірних витрат енергії, але й до втрати органолептичних якостей продукції.

Найбільш близьким до корисної моделі є пристрій для теплової обробки харчових продуктів [3], що складається з робочої камери з дверцятами, носія для продукції, кварцових випромінювачів та пласких відбивачів променевого потоку.

Недоліками цього пристрою є складність конструкції та висока енергоємність.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення апарату з відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів шляхом використання одного випромінювача та спрофільованого відбивача, що забезпечить рівномірний розподіл сумарного променевого потоку на поверхні продукту, підвищену продуктивність, зменшену енергоємність, покращені органолептичні характеристики отриманої продукції.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому пристрої, який складається з робочої камери з дверцятами, носія для продукції, кварцових випромінювачів та пласких відбивачів променевого потоку, згідно з корисною моделлю, у робочу камеру встановлено один кварцовий випромінювач уздовж осі робочої камери та відбивач променевого потоку, профіль та розташування якого визначаються розв'язком зворотної задачі опромінювання півеліпсу.

Відмінність даного апарату полягає в тому, що у робочу камеру встановлено один кварцовий випромінювач уздовж осі робочої камери та відбивач променевого потоку, профіль та розташування якого визначаються розв'язком зворотної задачі опромінювання півеліпсу, що забезпечує ефективний та рівномірний розподіл теплового потоку на поверхні харчової продукції, зменшуючи термін інфрачервоного жарення до готовності.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, на якому показаний апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів.

Запропонований апарат у своєму складі має корпус 1, кварцовий випромінювач 2, відбивач 3, носій для продукції 4 у вигляді ґрат, деко 5 для збирання жиру, термостійкі скляні дверцята 6 із ручкою 7, відкидний піддон 8, знімну задню кришку 9, чотири ніжки 10, регулятор потужності 11, таймер 12 та індикаторну лампу 13.

Реалізація інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів у запропонованому апараті здійснюється наступним чином: для отримання біфштексів два порційних напівфабрикати викладаємо на ґрати вздовж випромінювача і смажимо по 8…10 хвилин із кожного боку, під ґрати встановлюємо деко для збирання жиру; для отримання лангету один порційний напівфабрикат укладаємо у деко, яке встановлюємо на ґрати вздовж випромінювача, і смажимо по 8…10 хвилин із кожного боку.

Жарення харчової продукції відбувається за рахунок інфрачервоного випромінювання від кварцового випромінювача, спрофільований відбивач спрямовує на опуклий продукт променевий потік, який не потрапляє на нього напряму, та забезпечує підвищену рівномірну густину теплового потоку на поверхні м'ясного напівфабрикату, скорочуючи термін теплової обробки.

Технічним результатом, що досягається при використанні корисної моделі, є: рівномірний розподіл сумарного променевого потоку на поверхні продукту значенням 30+0.3 кВт/м^2; зростання продуктивності на 60 %; зменшення енергоємності на 60 %; відсутність опіків та більша соковитість отриманої продукції.

Джерела інформації:

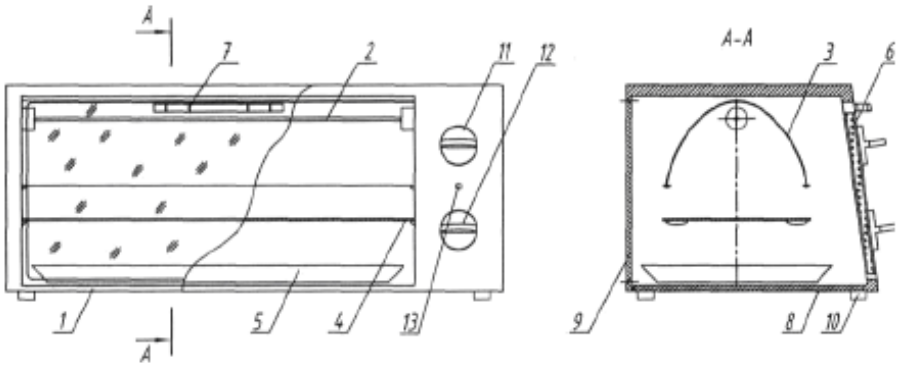
1. А.с. 1517932 СССР, МКИ А47J 37/04. Устройство для обжарки пищевых продуктов /С.Ф. Квятковский, А.И. Фоминцев (СССР). - № 4338301/30-13; Заявл. 16.10.87; Опубл. 30.10.89, Бюл. № 40. - 4 с.

2. Пат. 1829926 СССР, МКИ А 47 J 37/04. Устройство для тепловой обработки продуктов /В.А. Николаев, С.Н. Храмов, В.А. Стерков, А.И. Глушков (СССР). - № 4855990/13; Заявл. 01.08.90; Опубл. 23.07.93, Бюл. № 27. - 4 с.

3. Устройство для тепловой обработки пищевых продуктов: А.с. 914029 СССР, МКИ А 47 J37/04. /Л.В. Островский, Ю.Р. Муратов, Е.В. Муратова, В.З. Порцев (СССР). - № 2893265/28-13; Заявл. 04.01.80; Опубл. 23.03.82, Бюл. № 11. - 4 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів, що складається з робочої камери з дверцятами, носія для продукції та дека, який **відрізняється тим**, що у робочу камеру встановлено один кварцовий випромінювач уздовж осі робочої камери та відбивач променевого потоку, профіль та розташування якого визначаються розв'язком зворотної задачі опромінювання півеліпсу.



Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток М

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини: монографія в 3 ч. Ч. 3. Підвищення ефективності теплового обладнання з інфрачервоним нагріванням / за заг. ред. О. І. Черевка, В. М. Михайлова. Х.: ХДУХТ, 2012. 130 с. *Здобувачем розроблено та запропоновано низку технічних рішень для підвищення ефективності обладнання з інфрачервоним нагріванням.*

2. Потапов В. О., Костенко С. М. Системно-динамічне моделювання процесу інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів // Повноцінне харчування: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В. В. Євлаш, проф. В. О. Потапова, проф. М. І. Радченко, проф. Н. Л. Савицької. Х.: Світ книг, 2016. С. 252–275. *Здобувачем оброблено та проаналізовано отримані дані щодо енергоефективного виробництва м’ясних напівфабрикатів на основі створених системно-динамічних моделей.*

3. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Фрагментований рефлектор для рівномірного опромінювання приймача з напівеліптичною формою перерізу // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2008. Вип. 2 (8). С. 266–274. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розроблено методику обчислення форм рефлекторів теплотехнічних систем.*

4. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Визначення форми рефлектора для рівномірного опромінювання приймача з круговою формою перерізу // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2008. Вип. 21. С. 83–90. *Здобувачем проведено аналітичні досліди з вибору форм рефлекторів.*

5. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Рефлектори фрагментованих форм для теплової обробки продукції // Прикладна геометрія та інженерна графіка: міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 80. К.: КНУБА, 2008. С. 259–263. *Здобувачем розроблено нові схеми теплотехнічних установок з рефлекторами різних структур.*

6. Костенко С. М. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінення приймача напівеліптичного перерізу // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 1 (9). С. 261–267. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.**

7. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Рефлектор для всебічного рівномірного опромінювання приймача еліптичного перерізу // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2009. Вип. 21. С. 256–260. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розглянутий процес всебічного опромінення еліптичного приймача з розробленим рефлектором.*

8. Плевако В. П., Костенко С. М. Комп'ютерне моделювання процесу опромінювання приймача напівеліптичного перерізу // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2009. Вип. 22. С. 269–273. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено комп'ютерне експериментування.*

9. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Геометричне моделювання поверхні рефлектора з урахуванням втрат теплоти // Прикладна геометрія та інженерна графіка // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. пр. / ТДАТУ. Вип. 24, т. 47. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. С. 51–60. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем розглянуто двовимірну задачу геометричного моделювання поверхні рефлектора.*

10. Плевако В. П., Костенко С. М., Саєнко С. Ю. Верифікація методики профілювання відбивача // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки / Одеська національна академія харчових технологій. 2012. Вип. 41. Т. 1. С. 157–159. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено комп'ютерну верифікацію аналітичної методики.*

11. Плевако В. П., Костенко С. М., Лобов С. О. Експериментальне доведення методики визначення профілю відбивача // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. / Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 29. С. 48–52. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем заплановано та проведено експериментальні досліди з апробації аналітичної методики.*

12. Плевако В. П., Костенко С. М., Педорич І. П. Перевірка методики для визначення профілю відбивача променевого потоку // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/5 (66). С. 42–45. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем проведено валідацію запропонованої аналітичної методики.*

13. Костенко С. М. Комплексна оцінка якості апарата АРЖМ-0.07-1 // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2014. Вип. 2 (20). С. 168–173. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.**

14. Potapov, V., Kostenko, S. System-dynamic Modeling of Complex Assessment of ARJM-0.07-1 Apparatus // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 218–225. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем створено імітаційну модель апарата ІЧ-жарення.*

15. Potapov V., Plevako V., Kostenko S., Pedorich I., Arkhipova V. Physical and Analytical Modeling of Infrared Frying in ARJM-0.07-1 Apparatus // Industrial Technology and Engineering. 2016. Vol. 3 (20). P. 54-61. **Стаття у періодичному науковому виданні Республіки Казахстан з наукового напряму, за яким підготовлено дисертацію.** *Здобувачем заплановано та проведено аналітичні та експериментальні дослідження ефективності розробленого апарату.*

16. Потапов В. О., Костенко С. М. Імітаційне моделювання температурної кінетики інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2018. Вип. 1 (27). С. 197–204. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем створено імітаційну модель температурної кінетики ІЧ-жарення.*

17. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Імітаційне моделювання процесів та апаратів інфрачервоного жарення м'ясних напівфабрикатів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2018. № 35 (1311). С. 71–77. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем заплановано та проведено імітаційне експериментування.*

18. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2019. Вип. 1 (29). С. 75–85. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем запропоновано системний аналіз для імітаційної моделі процесу теплообміну.*

19. 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. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України, яке входить до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus та ін.).** *Здобувачем запропоновано використання імітаційного моделювання для оцінки тепломасообмінного обладнання.*

20. Kostenko S., Fedak N., Mayak O. Simulation of the radiant heat transfer process in the elements of roasting equipment // ScienceRise. 2020. No. 5 (70). P. 80-88. **Стаття у періодичному науковому виданні Естонської Республіки, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, з наукового напряму, за яким підготовлено дисертацію.** *Здобувачем запропоновано те реалізовано методику розрахунку профілю відбивача.*

21. Потапов В. О., Федак Н. В., Костенко С. М. Комплексне моделювання інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. пр. / Мелітопольський державний педагогічний університет ім. Б. Хмельницького. Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2020. Вип. 17. С. 92–100. **Стаття у науковому виданні, включеному до Переліку наукових фахових видань України.** *Здобувачем проведено низку експериментів та отримано дані для комплексного моделювання інфрачервоного жарення м’ясних порційних напівфабрикатів.*

22. Пат. на корисну модель 121298 Україна, МПК A 47 J 37/06 (2006.01). Апарат із відбивачем для інфрачервоного жарення м’ясних напівфабрикатів / Костенко С. М., Потапов В. О., Педорич І. П.; заявник і патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. № u201706805; заявл. 30.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Здобувачем запропоновано методику розрахунку профілю відбивача.*

23. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Моделювання інфрачервоного жарення в апараті АРЖМ-0.07-1 // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2016 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2016. Ч. 1. С. 316–317. *Здобувачем проведено порівняння аналітичного та фізичного моделювання ІЧ опромінювання.*

24. Potapov V., Kostenko S., Lobov S. Kinetics of Meat Semi-finished Products Temperature at Infrared Frying // Industrial Technologies and Engineering ICITE – 2016: III International Conference, October 28-29, 2016: proceeding. Shymkent: M. Auezov South Kazakhstan State University, 2016. P. 366-370. *Здобувачем досліджено кінетику температури м’ясного напівфабрикату під час ІЧ-жарення.*

25. Потапов В. О., Костенко С. М., Педорич І. П. Системно-динамічна оцінка апарата АРЖМ-0.07-1 // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 50-річчю заснування ХДУХТ, 18 травня 2017 р.: тези у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 276–277. *Здобувачем створено імітаційну модель апарату за визначених припущень.*

26. Потапов В. О., Костенко С. М. Кінетика температури м’ясних напівфабрикатів під час інфрачервоного жарення // Хімічна технологія та інженерія: міжнар. наук.-практ. конф., 26–30 червня 2017 р.: тези доп. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2017. С. 170–171. *Здобувачем отримано диференціальне рівняння кінетики температури.*

27. Потапов В. О., Маяк О. А., Костенко С. М. та ін. Системно-динамічне моделювання процесів харчових виробництв // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: друга міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 85-річчю Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р.: матеріали. Х.: ХДУХТ, 2017. С. 89–90. *Здобувачем доведено ефективність використання відбивача променевого потоку в апараті ІЧ- жарення.*

28. Костенко С. М., Потапов В. О. Імітаційне моделювання кінетики температури під час інфрачервоного жарення // Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі: міжнар. форум молоді, 5–6 квітня 2018 р.: матеріали. Х.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенка, 2018. С. 94. *Здобувачем створено системно-динамічну імітаційну модель кінетики температури м’ясних напівфабрикатів під час ІЧ жарення.*

29. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Використання системного аналізу для оптимізації тепломасообмінного обладнання // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: третя міжнар. наук.-практ. конф., 4–6 вересня 2019 р.: матеріали. Х.: ХДУХТ, 2019. С. 87–88. *Здобувачем використано системний аналіз для дослідження тепломасообмінних процесів.*

30. Черевко О. І., Маяк О. А., Костенко С. М., Сардаров А. М. Удосконалення тепломасообмінного обладнання шляхом використання системного аналізу // Актуальні проблеми розвитку ресторанного, готельного та туристичного бізнесу в умовах світової інтеграції: досягнення та перспективи: ІІ Міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 вересня 2019 р.: тези доп. Харків – Варна: ХДУХТ, 2019. С. 164–167. *Здобувачем проведено імітаційне моделювання з використанням програмного комплексу системного аналізу Vensim.*