

Малич Володимир Володимирович, магістрант, кафедра загальноінженерних дисциплін і обладнання, Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Адреса: вул. Островського, 16, м. Кривий Ріг, Україна, 50005. Тел.: 0671049709; e-mail: ido@donnuet.edu.ua.

Малич Владимир Владимирович, магістрант, кафедра общенженерных дисциплин и оборудования, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. Адрес: ул. Островского, 16, г. Кривой Рог, Украина, 50005. Тел.: 0671049709; e-mail: ido@donnuet.edu.ua.

Malych Volodymyr, master, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of General Engineering Disciplines and Equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0671049709; e-mail: ido@donnuet.edu.ua.

DOI: 10.5281/zenodo.3263706

УДК 004.942:641.539

МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В ІНФРАЧЕРВОНИХ АПАРАТАХ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Ю.М. Тормосов, С.Ю. Саєнко

Розглянуто один із можливих методів моделювання втрат теплової енергії в інфрачервоних апаратах харчової промисловості. Наведена модель базується на законі Бугера. Отримано модель залежності відстані від випромінювача до приймача залежно від газового середовища, визначено вплив втрат частини енергії на форму відбивача теплових променів у апаратах харчової промисловості, де використовуються інфрачервоні випромінювачі.

Ключові слова: *інфрачервоний випромінювач, втрати енергії, газове середовище, відбивач, приймач.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ИНФРАКРАСНЫХ АППАРАТАХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ю.М. Тормосов, С.Ю. Саєнко

Рассмотрен один из возможных методов моделирования потерь тепловой энергии в инфракрасных аппаратах пищевой промышленности. Представленная модель базируется на законе Бугера. Получена модель зависимости расстояния между излучателем и приемником в зависимости от

© Тормосов Ю.М., Саєнко С.Ю., 2019

газовой среды, установлено влияние потерь части энергии на форму отражателя тепловых лучей в аппаратах пищевой промышленности, где используются инфракрасные излучатели.

Ключевые слова: инфракрасный излучатель, потери энергии, газовая среда, отражатель, приемник.

MODELING LOSS OF ENERGY IN INFRARED DIVICES OF FOOD INDUSTRY

Y. Tormosov, S. Saienko

One of the possible methods of modeling heat energy losses in infrared apparatuses of the food industry is considered. It is proved that the Bouguer law is valid for weakly divergent beams of beams in most practical situations and can be used as the basis for solving the problems of finding energy losses in the working chambers of food industry apparatuses. The working chambers are considered to contain vapor with different relative humidity. The dependence of heat energy loss is found depending on the distance between the source and the receiver, and the medium in which the heat travels. The obtained dependence is based on the Bouguer law but in the three-dimensional formulation, that is, the energy from the emitter is considered on a flat angle, but in a solid angle. An estimation of the efficiency of radiant energy use taking into account absorption and carrying capacity of H₂O (depending on the relative humidity of the steam-air environment). A number of computational experiments were carried out under the following conditions: the pressure of the steam-air medium in the working chamber $P = 1,01$ MPa, the relative humidity has a value of 0% (diathermic medium), 20%, 40%, 60%, a cylindrical emitter with a power of 1kW, the distance from the radiator to the surface of 600 mm, the dimensions of the receiver 300x300mm. The dependence between the humidity of gas and the distance traveled by thermal beam is established. From the results obtained, it is possible to see that the higher the humidity in the working chamber is, the more energy absorption occurs. The problem of finding the relationship between the absorption of heat and the shape of reflectors in the working chamber is also considered and solved. It turned out that the absorption of energy in the operating chamber has little effect on the shape of the reflecting surface, and more often leads to a decrease in the intensity of heat flux on the receiving surface. From the dependence found, one can conclude that when calculating forms of the reflective surfaces, absorption of energy by the medium and the surface of the reflector can be neglected.

Keywords: infrared emitter, energy losses, gas medium, reflector, receiver.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Одним із важливих технологічних процесів обробки харчових продуктів є термообробка інфрачервоним випромінюванням, яка інтенсифікує більшість технологічних процесів: жарення, сушіння, випікання тощо.

Одним із важливих параметрів під час розрахунку теплового устаткування харчової промисловості, що використовує інфрачервоне (ІЧ) випромінювання, є густина теплового потоку на приймальній поверхні. Існує багато методів та теорій подібного розрахунку, але в більшості випадків розрахунок проводиться в ідеальному середовищі, тобто без втрат енергії, тому такі методи розрахунку недоцільні для реальних апаратів. У працях [1–3] викладено результати дослідження впливу газового середовища на інтенсифікацію теплової обробки. Автори виявили, що зі збільшенням парціального тиску двоокису вуглецю та відносної вологості пароповітряного середовища (ППС) підвищується ефективність використання променевої енергії за рахунок зростання температури середовища, загального коефіцієнта тепловіддачі та загального теплового потоку. Однак зайве підвищення парціального тиску і відносної вологості двоокису вуглецю та ППС є не бажаним з економічних міркувань, бо збільшує витрати газового середовища та ускладнює апаратне оформлення процесу. Розрахунки, наведені в працях [1–3], є досить приблизними та потребують додаткової експериментальної перевірки. До того ж фактичне температурне поле в ІЧ-апараті є нерівномірним, тому отримані значення є усередненими.

Крім того, існує теорія розповсюдження та поглинання теплової енергії в газах [4], але такі втрати дуже незначні й ними можна знехтувати. Ще одна теорія розповсюдження та поглинання теплової енергії в газах наведена в праці [5]. У праці розглядається теорія поглинання енергії газами атмосфери.

У багатьох ІЧ-апаратах використовують відбивачі теплових променів для забезпечення більш ефективного розподілу тепла в робочих камерах. Вплив газового середовища на форму відбивачів у таких апаратах майже не досліджували.

Авторами розроблена теорія, що дає змогу дослідити втрати енергії під час проходження ІЧ-променів через газове середовище та встановити його вплив на форму відбивальних поверхонь.

Мета статті – визначити залежність між інтенсивністю випромінювання та поглинальною здатністю газового середовища в робочих камерах ІЧ-апаратів харчових виробництв.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо, що одно та двоатомні гази (гелій, водень, кисень, азот тощо) є майже прозорими (діатермічними) [4] для випромінювання. Триатомні гази (у першу чергу H_2O , CO_2 , які використовуються в багатьох технологічних процесах харчових виробництв), мають значні випромінювальну та поглинальну здатності [5]. Випромінювання газів має об'ємний

характер, тому їх поглинальна здатність залежить від густини та товщини газового шару (зі збільшенням густини та товщини шару його поглинальна здатність збільшується). Крім того, випромінювання газів має селективний характер, тобто здатність поглинати енергію лише в певних смугах спектра.

Під час розповсюдження випромінювання в поглинальному середовищі на деякому відрізку шляху променя dl частина енергії поглинається, тобто переходить в інші форми енергії. Відносне зменшення потоку енергії є пропорційним до шляху, який проходить випромінювання в поглинальному середовищі:

$$\frac{dI}{I} = -k \cdot dl. \quad (1)$$

Для плоского шару розв'язок рівняння (1) називається законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-kl}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт поглинання; I та I_0 – інтенсивність плоскої монохроматичної хвилі на вході в шар поглинальної речовини завтовшки l та на виході з нього відповідно.

Розглянемо диференціально малий елемент джерела випромінювання. При такій постановці від випромінювача утворюється розбіжний пучок. Доведемо доцільність використання закону Бугера для такої задачі. Використаємо таку схему (рис. 1), де S – точкове джерело випромінювання. Розіб'ємо заданий пучок на елементарні конічні пучки з кутовою товщиною $d\alpha$, де кут α змінюється від 0 до α_0 . Для кожного елементарного пучка виконується закон Бугера:

$$dI = dI_0 e^{-kl(\alpha)},$$

де $dI_0 = I_0 \frac{d\alpha}{\alpha_0}$, $l(\alpha) = \frac{l_0}{\cos \alpha}$, k – коефіцієнт поглинання середовища.

Інтенсивність пучка на відстані l_0 від джерела дорівнює

$$I(l_0) = \int_0^{\alpha_0} dI_0 e^{-kl(\alpha)} = \frac{I_0}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} e^{-\frac{kl_0}{\cos \alpha}} d\alpha. \quad (3)$$

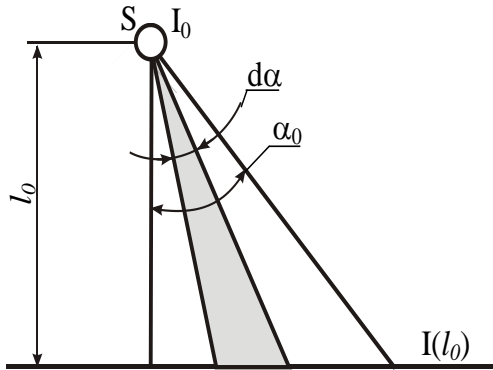


Рис. 1. Схема випромінювання для слабозбіжного пучка

Після проведення необхідних розрахунків із формули (3) знаходимо остаточний вираз:

$$I(l_0) = I_0 e^{-kl_0} \left(1 - \frac{kl_0 \alpha_0^2}{6}\right). \quad (4)$$

Ця формула відрізняється від закону Бугера поправкою $\frac{kl_0 \alpha_0^2}{6}$.

Зауважимо, що для $\alpha_0 < 500$ та $kl_0 < 0.35$, як було прийнято вище, ця поправка становить $\frac{kl_0 \alpha_0^2}{6} \approx 0.06$, тобто менше 10%. Тому

застосування закону Бугера $I(l_0) = I_0 e^{-kl_0}$ для слабозбіжних пучків променів є доцільним у більшості практичних ситуацій.

Якщо розглянути більш реалістичну задачу, тобто не у двовимірній постановці, а в просторі, то теплову хвилю слід розглядати як сферичну.

Розглянемо розповсюдження випромінювання в деякому тілесному куті ω (рис. 2).

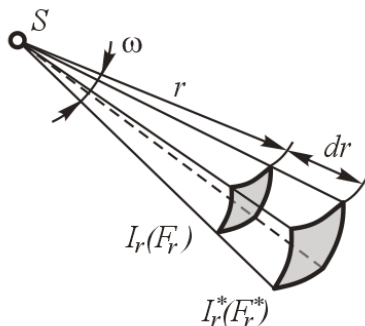


Рис. 2. Розповсюдження сферичної хвилі в тілесному куті ω

Потік випромінювання Q (Дж/с) через F_r , тобто кількість енергії, яка переноситься випромінюванням за одиницю часу в межах елементарного тілесного кута ω через поверхню F_r , дорівнює

$$Q = I_r F_r \omega = I_r (r^2 \omega).$$

Потік випромінювання через поверхню F_r^* становить

$$Q^* = I_r^* F_r^* \omega = I_r^* (r + \Delta r)^2 \omega^2.$$

Опустимо математичні перетворення та отримаємо інтенсивність випромінювання залежно від відстані r , що визначається за формулою

$$I_r = \frac{N e^{-kr}}{4\pi r^2 \omega}. \quad (5)$$

Для розрахунку густини теплового потоку взято схему, що складається з випромінювача потужністю $N = 1$ кВт, розташованого на відстані $0,6$ м від приймальної поверхні розмірами $0,3 \times 0,3$ м.

При наявності водяної пари в робочій камері ІЧ-устаткування важливо оцінити ефективність використання променевої енергії з урахуванням поглинальної та пропускну здатності H_2O (залежно від відносної вологості ППС). Виконано ряд обчислювальних експериментів за таких умов: тиск ППС у робочій камері $p = 1,01$ МПа, відносна вологість має такі значення: 0% (діатермічне середовище), 20% , 40% , 60% . Теплоприймальна поверхня розбивається на ixj елементарних площадок. Густина потоку інтегрального теплового випромінювання на поверхні ij площадки,

який надходить від циліндричного випромінювача, з урахуванням поглинальної здатності H_2O визначається за формулою

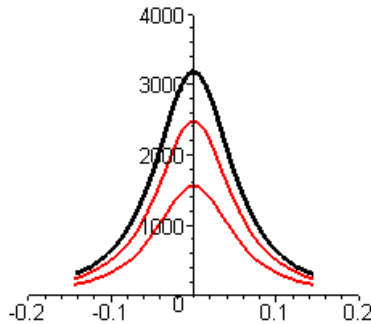
$$E_{ij} = \frac{N}{\pi^2 L} \int_L \frac{\cos \varphi_{ij}}{l_{ij}^2} e^{-kl_{ij}} dL = \frac{N}{\pi^2 L} \int_L \frac{(1-a_{ij}) \cos \varphi_{ij}}{l_{ij}^2} dL, \quad (6)$$

де N – потужність джерела; L – довжина спіралі джерела; φ_{ij} – кут падіння променя на ij -ту площадку; a_{ij} – поглинальна здатність H_2O .

На рис. 3 наведено графіки зменшення густини променевого потоку за рахунок поглинання енергії, залежно від відносної вологості ППС.

Рисунок 4 ілюструє зростання частки енергії, що поглинається, з віддаленням від джерела випромінювання та збільшенням відносної вологості. Для відносної вологості $\varphi = 20\%$ частка енергії, що поглинається, зростає від 6,2% (у центрі теплоприймача) до 11,4% (на межі). Для відносної вологості $\varphi = 60\%$, ці показники відповідно дорівнюють 12,6% та 21,7%.

Існує така довжина променя $L_0 = 1/k$, для якої енергія випромінювання повністю поглинається середовищем. У квантовій інтерпретації вона є середньою довжиною проходження фотона, або вірогідністю виживання кванта.



**Рис. 3. Графіки зменшення густини променевого потоку внаслідок поглинання, залежно від відносної вологості ППС:
1 – 20%; 2 – 40%; 3 – 60%**

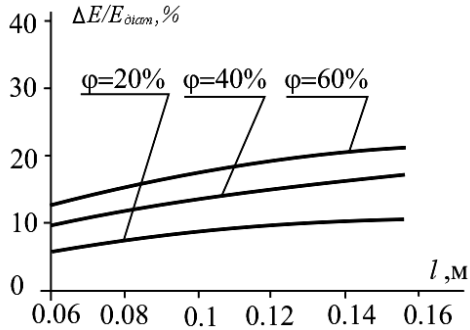


Рис. 4. Залежність відносного зменшення густини променевого потоку від відстані до джерела випромінювання та відносної вологості ППС

У праці [6] наведено залежність форми відбивача від ступеня поглинання ним енергії. Якщо врахувати теоретичні дані, викладені в цій статті, то отримуємо залежність форми відбивача від поглинання енергії середовищем. Форма відбивача з урахуванням втрат енергії описується таким рівнянням:

$$\frac{dR}{d\xi} = f(R, \varphi(\xi)) \varphi'(\xi), \quad (7)$$

$$\text{де, } \varphi'(\xi) = \frac{4\pi r^2 \omega}{4\pi r^2 \omega - Ne^{-kr}} \left[\pi \left(1 - \frac{Ne^{-kr}}{4\pi r^2 \omega} + \frac{\alpha Ne^{-kr}}{5\pi r^2 \omega} \right) - \frac{m}{(m\xi)^2 + 1} \right],$$

$$\frac{dR}{d\varphi} = f(R, \varphi) \left(f(R, \varphi) = -R \frac{(R_1 - R) \cos \varphi + \xi l}{(R_1 + R) \sin \varphi + h} \right).$$

Рівняння (7) розв'язувалося чисельним методом для випадку $\alpha = \pi/3$ і двох значень відносної вологості: 0 та 40%. Результати обчислень наведені на рис. 5. Суцільна лінія відповідає випадку відносної вологості 0, пунктирна – 40%.

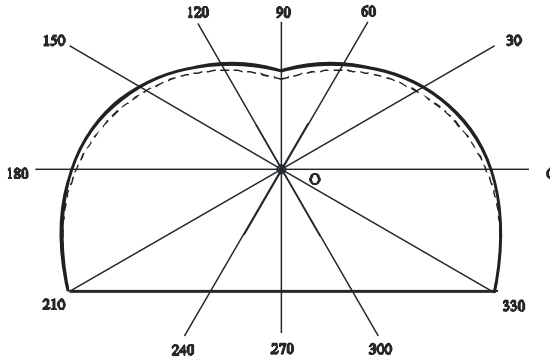


Рис. 5. Форми рефлектора

Висновки. Таким чином, вплив відносної вологості пароповітряного середовища на густину теплового потоку випромінювання є досить значним і збільшується зі зростанням відстані від центру випромінювача.

Одним із важливих елементів ІЧ-обладнання є рефлектори. У деяких апаратах використовуються складні відбивальні системи для забезпечення заданого розподілу теплового потоку на приймальній поверхні. Використовуючи отримані дані, досліджено вплив газового середовища на форму відбивальної поверхні. З отриманих результатів можна зробити висновок, що поглинання енергії в камері мало впливає на форму відбивної поверхні, а частіше призводить до зниження інтенсивності теплового потоку на приймальній поверхні. Зі знайденої залежності можна зробити висновок, що під час розрахунку форм відбивних поверхонь поглинанням енергії середовищем і поверхнею відбивача можна знехтувати.

Список джерел інформації / References

1. Черевко О. І. Експериментальні дослідження теплової обробки харчових продуктів інфрачервоним випромінюванням у пароповітряному середовищі / О. І. Черевко, В. М. Михайлов, І. В. Лебединець // Обладнання та технології харчових виробництв : зб. наук. пр. ДонДУЕТ – Донецьк, 2002. – № 7. – С. 365–372.

Cherevko, O., Mikhailov, V., Lebedynets, I. (2002), “Experimental researches of heat treatment of food products by infra-red radiation in a steam-air environment”, *Equipment and technology of food production* [“Eksperymentalni doslidzhennya teplovoi obrobky` harchovy`h produktiv infrachervony`m vy`prominyuvannyam u paropovityrnomu sere dovuy`shhi”], No. 7, Donetsk, pp. 365-372.

2. Михайлов В. М. Вплив двоокису вуглецю на енерговитрати при інфрачервоному жарінні / В. М. Михайлов // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України / ХДТУСГ. – Х., 2002. – № 10. – С. 318–326.

Mikhailov, V. (2002), “Influence of carbon dioxide on energy consumption at infrared frying”, *Problems of energy supply and energy conservation in AIC of Ukraine* [“Vplyv dvooky`su vuglecyu na energovy`traty` pry` infrachervonomu zharinni”], No. 10, Kharkiv, pp. 318-326.

3. Hottel, H.C., Sarofim, A.F. (1967), *Radiative Transfer.*, McGraw-Hill Book Company, New York.

4. Кочетков А. В. Необходимые дополнения к теории реальных газов [Электронный ресурс] / А. В. Кочетков, П. В. Федотов // Наукоедение. – 2016. – Т.8, № 2. – Режим доступа : <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN216.pdf>. – DOI: 10.15862/104TVN216

Kochetkov, A., Fedotov, P. (2016), “Necessary additions to the theory of real gases” [“Neobxody`mye dopolneny`ya k teory`y` real`nih gazov”], *Naukovedenie*, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN216.pdf>. DOI: 10.15862/104TVN216

5. Hermann, H. (2013), “Radiation and Heat Transfer in the Atmosphere: A Comprehensive Approach on a Molecular Basis”, *International Journal of Atmospheric Sciences*. Article ID 503727, 26p., available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/503727>

6. Плевако В. П. Визначення форми відбивача ІЧ-установки з урахуванням випромінювання частини енергії в довкілля / В. П. Плевако, С. Ю. Саєнко // Геометричне та комп'ютерне моделювання / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2004. – № 6. – С. 28–32.

Plevako, V., Saenko, S. “Determination of the shape of the reflector of the infrared device, taking into account the radiation part of the energy in the environment”, *Geometric and computer simulation* [“Vy`znachennya formy` vidby`vacha ICh ustanovky` z urahuvannyam vy`prominyuvannya chasty`ny` energiyi v dovkillya], Kharkiv, No. 6, pp. 28-32.

Тормосов Юрій Михайлович, д-р техн. наук, проф., кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузей, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: tormosov@ukr.net.

Тормосов Юрій Михайлович, д-р техн. наук, проф., кафедра підготовки и переподготовки специалистов холодильной и торговой отрасли, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: tormosov@ukr.net.

Tormosov Yuri, Doctor of Sciences (comparable to the academic degree of Doctor of Philosophy, PhD), Department of Training and Retraining of Refrigeration and Trade Specialists, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-88; e-mail: tormosov@ukr.net.

Саснко Сергій Юрійович, канд. техн. наук, доц., кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузей, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: saeserg@gmail.com.

Саенко Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доц., кафедра підготовки та перепідготовки спеціалістів холодильної та торгової отрасли, Харьковський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-88; e-mail: saeserg@gmail.com.

Saienko Sergey, PhD in Technical Sciences (comparable to the academic degree of Doctor of Philosophy, PhD), Department of Training and Retraining of Refrigeration and Trade Specialists, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-88; e-mail: saeserg@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.3263735

УДК 637.2.225

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ВЕРШКОВОГО МАСЛА З МЕТОЮ ВДОСКОНАЛЕННЯ МАСЛОВИГОТІВНИКІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

В.М. Михайлов, А.О. Шевченко, І.Г. Бабанов, О.І. Бабанова

Досліджено процес виробництва вершкового масла для поліпшення його якості й забезпечення рівномірного розподілення вершків під час оброблення по всьому об'єму робочої ємності масловиготівника та отримання ефективного контакту робочих органів по всій поверхні оброблюваного продукту. На основі результатів дослідження створено фізичну модель у масштабі 1:5 та проведено моделювання процесу оброблення вершків. Аналітично обґрунтовано процес збивання вершків жирністю 35% та на основі комп'ютерного моделювання вдосконалено конструкцію масловиготівника періодичної дії.

Ключові слова: *перетворення вершків, масловиготівник, робоча ємність, моделювання процесу.*