

харчування. Економічні проблеми торгівлі : зб. наук. пр. у 2-х ч.– Х. : ХДУХТ, 2004. Ч.1. – С. 293–296.

6. Вплив розміру часток пастоподібного концентрату напою на ефективну в'язкість / В. І. Маяк // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування на підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі : зб. наук. пр. у 2-х ч.– Х. : ХДУХТ, 2004. Ч.2.– С. 293–296.

7. Новая технология производства напитков / А. И. Черевко [и др.] // Проблемы техники і технології харчових виробництв : Міжвуз. наук.- практик. конф.: матеріали. – Полтава: ПУСКУ, 2004.

8. Черевко. О. І. Дослідження густини пастоподібних концентратів напоїв в залежності від тиску О. І. Черевко, В. І. Маяк, Б. В. Ляшенко // Проблеми техніки і технології харчових виробництв : Міжвуз. наук.-практик. конф. : матеріали. – Полтава : ПУСКУ, 2004.

9. Маяк В. І. Закономірності тепловіддачі в процесі виробництва ПКН / В. І. Маяк, В. М. Михайлов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. – Х. : ХДУХТ, 2007. – Вип. 1(9). – С. 200–207.

10. Маяк В. І. Дослідження соціально-економічної ефективності виробництва ПКН і цукатів за новою технологією / В. І. Маяк, В. М. Михайлов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. – Х. : ХДУХТ, 2007. – Вип. 1(9). – С. 207–214.

Отримано 01.05.2013. ХДУХТ, Харків.

© В.І. Маяк, Б.В. Ляшенко, О.А. Маяк, А.М. Сардаров, О.О. Осьмак, 2013.

УДК 664.8.03:66.063.94:664.8

В.О. Потапов, д-р техн. наук, проф.

В.В. Качалов, асист.

С.В. Михайлова, асист.

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ВНУТРІШНІХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ ПІД ЧАС МІКРОХВИЛЬОВОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Отримано формули для інженерних розрахунків густини внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів. Наведено експериментальні дані про залежність внутрішніх джерел теплоти від об'єму зразків різної геометричної форми.

Получены формулы для инженерных расчетов плотности внутренних источников теплоты при микроволновой обработке пищевых продуктов. Приведены экспериментальные данные о зависимости внутренних источников теплоты от объема образцов различной геометрической формы.

The formulas for engineering calculations of the density of internal heat sources in the microwave processing of food products have been obtained. Experimental data on the dependence of the internal heat sources from the sample volume of various geometric shapes are presented.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Мікрохвильова (НВЧ) обробка є перспективним напрямом удосконалення тепломасообмінних процесів під час виробництва широкого асортименту харчової продукції, зокрема під час розморожування, варення, сушіння, пастеризації, стерилізації та ін. Її перевагами є велика інтенсивність, енергоефективність, висока якість готового продукту.

Найважливішою проблемою застосування мікрохвильової обробки є коректний інженерний розрахунок технологічних режимів розморожування, нагрівання, сушіння або концентрування. Кінетика цих процесів насамперед визначається густиною внутрішніх джерел теплоти, які виникають унаслідок поляризаційних явищ у неідеальних діелектриках, до яких належить більшість харчових продуктів [1].

Існує відома формула для обчислення густини внутрішніх джерел теплоти (питомої теплової потужності, що виділяється в продукті) під час НВЧ-нагрівання, яка пов'язує діелектричні характеристики продукту та напруженість електромагнітного поля всередині продукту [1].

$$\omega = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \quad (1)$$

де ω - густина внутрішніх джерел теплоти, Вт/м³; ε_0 – електрична стала ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); f - частота електромагнітних коливань, Гц; ε – відносна діелектрична проникність середовища (дійсна частина); $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута втрат; E – напруженість електричного поля в продукті, В/м.

Використання цієї формули на практиці стикається з необхідністю розв'язання електродинамічної задачі з визначення напруженості електромагнітного поля всередині продукту. В окремих найпростіших випадках така задача може бути розв'язана, наприклад для пластини симетрично розташованої в одномодової резонаторної НВЧ - камері [2]. Але таке рішення є досить грубим наближенням до реальних умов обробки в найпоширеніших типах НВЧ-пристроїв –

багатомодових резонаторних НВЧ-камерах. Річ у тому, що конструкція таких камер передбачає збудження багатомодових електромагнітних коливань, щоб максимумами та мінімумами напруженості електромагнітного поля, які виникають, були більші менш рівномірно розподілені за об'ємом НВЧ-камери. Але розподілення результуючої напруженості поля значною мірою залежить від діелектричних характеристик продукту, що обробляється, його геометрії та розташування у НВЧ-камері, тому не можливо визначити величину E у формулі (1).

Існують декілька наближених методів розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти. Найпростіша та найпопулярніша формула виглядає таким чином [1]:

$$\omega = \frac{P}{V}, \quad (2)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт; V – об'єм продукту, м³.

Ця формула під час розрахунку ω дає в деяких випадках непоганий результат, але в більшості випадків має чималу похибку, що пов'язано з тим, що вона не враховує діелектричних характеристик продукту. Тому інший підхід полягає у використанні рівняння (1) з емпіричною залежністю для квадрата напруженості електромагнітного поля E^2 всередині продукту. Так у праці [3] запропоновано використовувати метод регулярного режиму для визначення діелектричних та теплофізичних характеристик, за умов закону розподілення внутрішніх джерел теплоти. Тобто пропонується обчислювати фізичні характеристики продукту за кінетикою НВЧ-нагрівання продукту, але в цьому випадку треба для кожного продукту проводити експеримент, щоб визначити коефіцієнти відповідної емпіричної залежності для E^2 .

Деяко простішу методику запропоновано в праці [4]. На підставі експериментів з вивчення швидкості НВЧ-нагрівання для тіл різної геометричної форми запропоновано таку формулу для середньої за об'ємом тіла V густини внутрішніх джерел теплоти:

$$\omega = \omega_0 \exp\left(-\frac{V}{V_0}\right)^n, \quad (3)$$

де величини ω_0 , V_0 , n визначаються за експериментальною залежністю темпу нагрівання зразка продукту від його об'єму.

Ця формула досить коректно описує експериментальні дані, але містить невідомі коефіцієнти, які треба кожного разу визначати з експерименту.

Метою та завданням статті є обґрунтування фізично коректного рівняння для інженерних розрахунків густини внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів.

Основними завданнями є обґрунтування фізичної моделі взаємодії електромагнітного поля з продуктом довільної форми, який розміщено в резонаторній НВЧ-камері, формулювання математичної моделі та отримання на її підставі інженерної формули для розрахунків густини внутрішніх джерел теплоти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Спочатку визначимо зв'язок між напруженістю електромагнітного поля, що генерується в резонаторній НВЧ-камері, та потужністю НВЧ-генератора. Для цього скористаємося загально відомими рівняннями електродинаміки [5].

Питома потужність Π (Вт/м^2), що переноситься електромагнітною хвилею в довільному середовищі, визначається за формулою:

$$\Pi = v\varepsilon\varepsilon_0 E^2, \quad (4)$$

де $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$, швидкість світла у середовищі, м/с; $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ –

швидкість світла у вакуумі м/с; μ_0 – магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – відносна магнітна проникність середовища.

Зауважимо, що у вільному робочому об'ємі НВЧ-камери електромагнітна хвиля переміщується зі швидкістю світла у вакуумі, оскільки для повітря, як і для вакуума, $\varepsilon = \mu = 1$.

Якщо навантаження резонаторної НВЧ-камери є оптимальним, тобто узгодженим за об'ємом продукту та резонатору (у іншому випадку к.к.д резонатора малий та НВЧ-генератор може вийти з ладу), питому потужність електромагнітної хвилі на границі продукт-вільний об'єм НВЧ-камери можна визначити наступним чином

$$\Pi = \frac{P}{S}, \quad (5)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт; S - площа поверхні продукту, м².

Порівнюючи праві частини виразів (4) і (5), отримуємо формулу для визначення напруженості електромагнітного поля E_0 на поверхні продукту

$$E_0 = \sqrt{\frac{P}{\varepsilon_0 c S}}. \quad (6)$$

Далі треба визначити напруженість електромагнітного поля яка виникає в самому продукті, оскільки вона відрізняється від напруженості на мережі «продукт–робочий об’єм НВЧ-камери» внаслідок залежності швидкості поширення електромагнітної хвилі від діелектричних характеристик середовищ. За умов оптимального навантаження НВЧ-резонатора вся енергія електромагнітної хвилі поглинається продуктом, тобто питома потужність Π електромагнітної хвилі не змінюється на межі «продукт–НВЧ-камера». На підставі (4) отримуємо:

$$v\varepsilon\varepsilon_0 E_{i0}^2 = c\varepsilon_0 E_0^2, \quad (7)$$

де E_{i0} – напруженість електромагнітного поля, яка проникає в продукт.

Звідси, з урахуванням виразу для швидкості світла у середовищі, маємо

$$E_{i0}^2 = \frac{E_0^2}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (8)$$

З урахуванням виразу (6) отримуємо

$$E_{i0}^2 = \frac{P}{\varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} c S}. \quad (9)$$

Далі треба врахувати ефект поглинання електромагнітної енергії у продукті від поверхні до його центру, тобто розрахувати густину потужності внутрішніх джерел теплоти (рис. 1). Для цього запишемо баланс потужності для довільного внутрішнього шару продукту об’ємом dV із площиною поверхні S_V . На підставі (1) та (4) маємо

$$\omega dV = -S_V d\Pi. \quad (10)$$

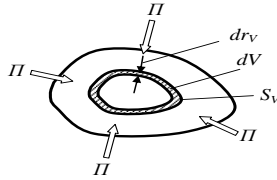


Рисунок 1 – Схема розрахунку потужності внутрішніх джерел теплоти

Знак «мінус» вказує на те, що напруженість внутрішнього електромагнітного поля E_i зменшується внаслідок перетворення на теплоту. З урахуванням $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ отримуємо

$$2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon t g \delta E_i^2 \cdot dV = -c \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} S_V \cdot d(E_i^2). \quad (11)$$

З урахуванням виразу для глибини проникнення НВЧ – енергії в діелектрик (δ , м) [5]

$$\delta = \frac{c}{2\pi f \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon} t g \delta}, \quad (12)$$

та на підставі (11) отримуємо таке диференційне рівняння

$$\frac{d(E_i^2)}{E_i^2} = -\frac{1}{\delta} \frac{dV}{S_V} = -\frac{1}{\delta} dr_V, \quad (13)$$

де r_V – поточна відстань уздовж нормалі від поверхні до внутрішнього шару продукту dV .

Рішення (13) за граничної умови $E_i|_{r_V=0} = E_{i0}$ має вигляд (14) та описує розподілення напруженості електромагнітного поля за внутрішнім об'ємом продукту

$$E_i^2 = E_{i0}^2 e^{-\frac{r_V}{\delta}}. \quad (14)$$

Підставивши (14) у (1), з урахуванням (9) та (12), отримуємо розрахункову формулу для густини джерел теплоти за внутрішнім об'ємом продукту під час його НВЧ – обробки

$$\omega(r_V) = \frac{P}{\delta S} e^{-\frac{r_V}{\delta}}. \quad (15)$$

Зауважимо, що отримана формула повністю збігається з відомою формулою (16) для розрахунку густини внутрішніх джерел теплоти, яку подають зазвичай у такому вигляді [1]:

$$\omega(x) = \omega_0 e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (16)$$

але, на відміну від (16), формула (15), по-перше, містить значення потужності внутрішніх джерел теплоти на поверхні продукту $\omega_0 = P/(\delta S)$, а по-друге, формула є універсальною, оскільки отримана для довільної форми продукту, характерним розміром якого є відношення об'єму до площі його поверхні ($0 \leq r_V \leq V/S$).

Важливим практичним питанням є отримання розрахункової формули для середньої за об'ємом продукту потужності внутрішніх джерел теплоти, бо саме її найчастіше використовують у інженерних розрахунках.

На підставі (15) середнє значення питомої потужності внутрішніх джерел теплоти визначимо інтегруванням

$$\omega = \frac{P}{\delta S} \frac{1}{R_V} \int_0^{R_V} e^{-\frac{r_V}{\delta}} dr_V = \frac{P}{V} \left(1 - e^{-\frac{R_V}{\delta}} \right), \quad (17)$$

де $R_V = V/S$ – відношення об'єму продукту до площі його поверхні, м.

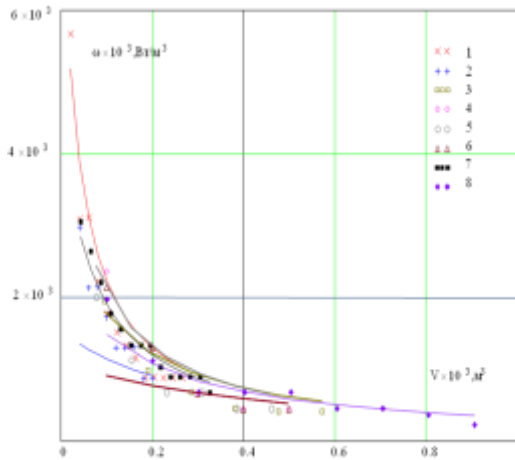


Рисунок 2 – Порівняння експериментальних та розрахункових даних густини внутрішніх джерел теплоти при НВЧ–нагріванні води у контейнерах різної форми: 1) циліндр $D=57$ мм, $H=10...80$ мм; 2) паралелепіпед 170×75 мм, $H=3...10$ мм; 3) циліндр $D=90$ мм, $H=15...90$ мм; 4) циліндр $D=150$ мм, $H=5...28$ мм; 5) циліндр $D=70$ мм, $H=20...120$ мм; 6) циліндр $D=120$ мм, $H=5...28$ мм; 7) паралелепіпед 97×45 мм, $H=10...75$ мм; 8) паралелепіпед 120×70 мм, $H=12...108$ мм

Якщо порівняти отриману формулу (17) з відомим наближенням для густини внутрішніх джерел теплоти (2), то вона збігається з нею, якщо $R_V/\delta \gg 1$, тобто за великих об'ємів продукту. Але відомо, що для забезпечення рівномірності НВЧ – нагрівання розміри, продукту хоча б в одному вимірі, не повинні значно перевищувати глибину проникнення НВЧ – енергії, тому в цих випадках формула (2) буде давати похибку в розрахунках.

Для перевірки отриманого рівняння (17) були проаналізовані експериментальні дані, отримані нами раніше [4]. У цих експериментах потужність внутрішніх джерел теплоти визначалась за швидкістю нагрівання води в контейнерах різної геометричної форми, які розміщували в центрі побутової мікрохвильової печі об'ємом 15 л. потужністю 500 Вт. На рис. 2 точками наведено експериментальні дані, суцільними лініями – розрахунок за формулою (17) для кожного виду контейнера.

Висновки. На підставі фундаментальних рівнянь теорії електродинаміки отримано формулу для інженерних розрахунків

густини внутрішніх джерел теплоти під час мікрохвильової обробки харчових продуктів, яка враховує потужність НВЧ – генератора, довільну геометрію продукту (об'єм та площу його поверхні) та глибину проникнення електромагнітного поля за потужністю. Експериментальна перевірка підтвердила фізичну відповідність отриманого рівняння.

Список літератури

1. Рогов И. А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И. А. Рогов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 272 с.
2. Калинин Л. Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем / Л. Г. Калинин // Наук. праці. ОНХАТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 170–173.
3. Потапов В. А. Определение оптимальной высоты функциональной емкости СВЧ-сушилки / В. А. Потапов, Н. М. Цуркан // Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. праць. Темат. вип. Нові рішення в сучасних технологіях. – Х., 2012. – №1. – С. 148–152.
4. Погожих Н. И. Определение напряженности СВЧ-поля по темпу нагрева модельного тела / Н. И. Погожих, Н. М. Цуркан, О. Ю. Гриценко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39, т.2. – С. 22–25.
5. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Негушил [и др.]. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 480 с.

Отримано 01.05.2013. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, В.В. Качалов, С.В. Михайлова, 2013.