

2. Козин Н. И. Применение эмульсий в пищевой промышленности / Н. И. Козин. – М. : Пищевая промышленность, 1966. – 250 с.

3. Файвишевский М. Л. О переработке и использовании жиров убойных животных / М. Л. Файвишевский // Мясные технологии. – 2009. – № 12. – С. 52–53.

4. Федоткин И. М. Интенсификация технологических процессов пищевых производств / И. М. Федоткин, Б. Н. Жарик, Б. И. Погорельский. – К. : Техника, 1984. – 176 с.

5. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості / О. А. Литвиненко, О. І. Некоз, П. М. Немирович, З. Кіндрат. – К. : УДУХТ, 1999. – 87 с.

6. Заяс Ю. Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности / Ю. Ф. Заяс. – М. : Пищевая промышленность, 1970. – 292 с.

7. Хмелёв В. Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве : монография / В. Н. Хмелёв, О. В. Попова. – Барнаул : АлтГТУ, 1997. – 160 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© Г.В. Дейниченко, Г.М. Постнов, В.М. Червоний, 2012.

УДК 664.834.2

**В.О. Потапов**, д-р техн. наук, проф.

**М.М. Цуркан**, канд. техн. наук, доц.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РІВНОМІРНОГО НАГРІВАННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ У ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ ЄМНОСТІ НВЧ-СУШАРКИ**

*Розглянуто питання визначення умов рівномірного нагріву зневоднюваної сировини у функціональній ємності НВЧ-сушарки, що є одним з основних факторів підвищення енергоефективності процесу НВЧ-сушіння.*

*Рассмотрен вопрос определения условий равномерного нагрева обезвоживаемого сырья в функциональной емкости СВЧ-сушилки, что является одним из основных факторов повышения энергоэффективности процесса СВЧ-сушки.*

*The question of determination of terms of the even heating of the dehydrated raw material is considered in the functional capacity of MV-dryer, that is one of basic factors of increase of energyefficiency of process of MV-drying.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Як відомо, процеси сушіння різної харчової сировини є досить енергозатратними, як і подібні процеси у всіх промислових галузях. Визначення шляхів

підвищення енергоефективності відповідних технологічних процесів у харчовій промисловості є пріоритетною проблемою для галузевої науки. Одним з перспективних наукових напрямків є застосування в процесах сушіння харчової сировини НВЧ-енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дана робота є продовженням теоретичних і експериментальних досліджень процесів сушіння у функціональних ємностях (масообмінних модулях) з використанням НВЧ-енергопідведення [1]. Забезпечення рівномірності нагрівання сировини, що зневоднюється, під дією НВЧ-поля є однією з умов підвищення енергоефективності даного процесу, а також підвищення якості кінцевого продукту.

**Мета та завдання статті.** Метою роботи є теоретичне обґрунтування параметрів НВЧ-поля й геометрії функціональної ємності дослідної НВЧ-сушарки, які забезпечують умови рівномірного нагрівання харчової сировини в процесі його сушіння.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Оскільки функціональна ємність (ФЄ) із сировиною являє собою паралелепіпед, в якому одна сторона на порядок (як мінімум) менше інших, то її можна уявити у вигляді пластини товщиною  $d$ , розміщеної в центрі резонаторної НВЧ-камери.

У першому наближенні будемо вважати, що на пластину уздовж осі  $z$ , яка перпендикулярна її площині, падає плоска електромагнітна хвиля, вектор напруженості електричного поля якої, відповідно, паралельний площині пластини. У цьому випадку електромагнітне поле усередині й поза пластиною описується системою рівнянь [2]:

$$\frac{d \dot{E}_{in}}{dz} = i\omega\mu_0 \dot{H}_{in}, \quad \frac{d \dot{H}_{in}}{dz} = i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon} \dot{E}_{in}, \quad (1)$$

$$\frac{d \dot{E}_{ex}}{dz} = i\omega\mu_0 \dot{H}_{ex}, \quad \frac{d \dot{H}_{ex}}{dz} = i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon} \dot{E}_{ex},$$

де  $\dot{E}, \dot{H}$  – комплексні амплітуди електричного (В/м) і магнітного (А/м) полів; індекс  $in$  належить до внутрішнього поля,  $ex$  – до зовнішнього;

$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$  – комплексна відносна діелектрична проникність;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$  – електрична постійна;  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{Гн/м}$  – магнітна постійна;  $\omega$  – циклічна частота, с;  $i$  – уявна одиниця.

Граничні умови для системи (1) запишемо у вигляді:

$$\left. (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{ex}) \right|_{z=\pm d/2} = 0, \quad \left. (\dot{H}_{in} - \dot{H}_{ex}) \right|_{z=\pm d/2} = 0. \quad (2)$$

Рішення системи рівнянь (1) щодо вектора напруженості електричного поля усередині ФЄ за даних граничних умов має вигляд:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_0 e^{ik_0 \frac{d}{2}} \left( 1 + \frac{\cos \frac{kd}{2} - i\sqrt{\varepsilon} \sin \frac{kd}{2}}{\cos \frac{kd}{2} + i\sqrt{\varepsilon} \sin \frac{kd}{2}} \right) \frac{\cos kz}{\cos \frac{kd}{2}} \quad (3)$$

де  $\dot{E}_0$  - комплексна амплітуда напруженості поля в незаповненій резонаторній камері, В/м;  $k = k' - ik'' = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda}$  - комплексна постійна поширення у ФЄ, м<sup>-1</sup>;  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  - постійна поширення в повітрі, м<sup>-1</sup>;  $\lambda$  - робоча довжина хвилі, м.

Як відомо питома потужність, яка генерується у функціональній ємності з матеріалом, визначається квадратом модуля напруженості електричного поля [3]. На підставі (3) запишемо:

$$w(z) = Aw_{нов}(\text{ch } 2k''z + \cos 2k'z); \quad (4)$$

$$w_{нов} = \frac{k''E_0^2(1+G)}{W}; \quad (5)$$

$$G = \frac{\cos \frac{kd}{2} - i\sqrt{\varepsilon} \sin \frac{kd}{2}}{\cos \frac{kd}{2} + i\sqrt{\varepsilon} \sin \frac{kd}{2}}; \quad A = \frac{1}{(\text{ch } k''d + \cos k'd)} \quad (6)$$

де  $w(z)$  - питома потужність, яка генерується по товщині функціональної ємності з матеріалом; Вт/м<sup>3</sup>;  $w_{нов}$  - питома НВЧ-потужність на поверхні функціональної ємності; Вт/м<sup>3</sup>;

$W = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'}}$  - хвильовий опір діелектричного матеріалу у функціональній ємності, Ом;

$$k' = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon'}}{\lambda}; \quad k'' = \frac{\pi\sqrt{\varepsilon'}\operatorname{tg}\delta}{\lambda}; \quad \operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Рівняння (4) описує поле внутрішніх джерел теплоти, яка генерується у матеріалі. Як випливає із цього виразу мають місце як загасання потужності НВЧ-коливань від поверхні до центра пластини ( $A_{w_{нов}} \cdot \operatorname{ch} 2k''$ ), так і наявність періодичних пучностей потужності, виражених другою складовою ( $A_{w_{нов}} \cdot \cos 2k'z$ ). Тому залежно від товщини пластини  $d$  щільність внутрішніх джерел теплоти в центрі пластини може бути як менше, так і більше чим на її поверхні. Щоб визначити раціональну товщину пластини, що нагрівається в резонаторній НВЧ-камері, необхідно розглянути вплив теплопереносу на формування результуючого поля температур по товщині пластини.

У загальному випадку поле усередині ФЄ із матеріалом за НВЧ-нагрівання описується системою рівнянь тепломасопереносу за умови конвективного теплообміну з навколишнім середовищем [4]. Зневажаючи впливом зміни вологовмісту, тиску й електрофізичних характеристик на температурне поле за час характерний для першого етапу сушіння (нагрівання харчової сировини у функціональній ємності), вирівняємо рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{w(z)}{C\rho} \quad (7)$$

з наступними крайовими умовами:

$$T(z,0) = T_0; \quad \frac{\partial T}{\partial z}(0,t) = 0; \quad \frac{\partial T\left(\frac{d}{2}, \tau\right)}{\partial z} = -H_t(T - T_0),$$

де  $T$  – температура матеріалу, К;  $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  $\tau$  – час, с;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $C$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·К;  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $H_t = \alpha/\lambda_t$  – відношення коефіцієнта теплообміну до коефіцієнта теплопровідності, 1/м.

Рішення рівняння (7), отримане методом перетворень Лапласа, має такий вигляд у просторі зображень:

$$T_L = \frac{T_0}{s} + \frac{Aw_{ное}}{s\lambda_t} \left[ \frac{\frac{\text{ch} 2k''z}{a} + \frac{\cos 2k'z}{s - 4k''^2} + \frac{\frac{2k''}{H_t} \text{sh} k''d + \text{ch} k''d}{\frac{s}{a} + 4k''^2}}{\frac{s}{a} - 4k''^2} + \frac{\frac{s}{a} - 4k''^2}{\frac{s}{a} + 4k''^2} + \frac{\cos k'd - \frac{2k'}{H_t} \sin k'a}{\frac{s}{a} + 4k''^2} \right] \times \left( \frac{\text{ch} \left( \sqrt{\frac{s}{a}} z \right)}{\frac{1}{H_t} \sqrt{\frac{s}{a}} \text{sh} \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \frac{d}{2} \right) + \text{ch} \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \frac{d}{2} \right)} \right), \quad (8)$$

де  $T_L$  – функція температури в просторі зображень;  $s$  – аргумент перетворення Лапласа.

Якщо врахувати, що на першому етапі НВЧ-нагрівання температурний потік нестационарний й теплові втрати малі, то вираження (8) можна спростити. Математично ці умови запишуться у такий спосіб:

$$Fo < 1; \quad BiFo < 1,$$

де  $Fo = \frac{4a\tau}{d^2}$  – число Фур'є,  $Bi = \frac{H_t d}{2}$  – число Біо.

У просторі зображень наведеним нерівностям відповідають наступні нерівності:

$$\sqrt{\frac{s}{a}} \frac{d}{2} \gg 1; \quad \sqrt{\frac{s}{a}} \frac{1}{H_t} \gg 1,$$

тому гіперболічні функції в (8) замінимо їх асимптотами й відкинемо складові пропорційні  $\left( \frac{s}{a} + 4k''^2 \right)^{-1} \ll \left( \frac{s}{a} - 4k''^2 \right)^{-1}$ , оскільки в просторі оригіналів цій нерівності відповідає нерівність  $\exp(-4k''^2 a \tau) \ll \exp(4k''^2 a \tau)$ .

Зроблені допущення виконуються для типових умов розігріву харчової сировини в резонаторній НВЧ-камері:  $a = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $\lambda_t = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\tau = 2 \cdot 10^2 \text{ с}$ ;  $\varepsilon' = 45$ ;  $\text{tg}\delta = 0,3$ ;  $\lambda = 12,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . В цьому випадку  $\text{Fo} = 0,2$ ;  $\text{Bi} \cdot \text{Fo} = 0,16$ ;  $4k''^2 a \tau = 9$ ;  $4k''^2 a \tau = 0,8$ .

Зневажаючи членами  $\sim 10^{-2}$ , одержимо наближене рішення рівняння (8):

$$T_L \approx \frac{T_0}{s} + \frac{Aw_{нов}}{\lambda_t \left( \frac{s}{a} - 4k''^2 \right)} \times \left( \frac{\text{ch} 2k''z}{s} - \left( \frac{2k''}{H_t} \text{sh} k''d + \text{ch} k''d \right) \cdot \frac{\exp \left( -\sqrt{\frac{s}{a} \left( \frac{d}{2} - z \right)} \right)}{\frac{1}{H_t} s \sqrt{\frac{s}{a}}} \right). \quad (9)$$

За умову рівномірного нагрівання виберемо рівність температури в центрі функціональної ємності й на її поверхні. Шукана різниця температур  $\Delta T_L$  у просторі зображень Лапласа визначається наступним виразом:

$$\Delta T_L \approx \frac{Aw_{нов}}{\lambda_t \left( \frac{s}{a} - 4k''^2 \right)} \left( \frac{1 - \text{ch} k''z}{s} + \left( \frac{2k''}{H_t} \text{sh} k''d + \text{ch} k''d \right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{H_t} s \sqrt{\frac{s}{a}}} \right) = (10)$$

$$= F_1 F_2$$

Відповідно до теореми про згортку функції оригінал добутку  $F_1(s) \cdot F_2(s)$  може обертається в нуль за рівності нулю оригіналу однієї з функцій зображень. Досліджуючи зворотне перетворення Лапласа від цих функцій, одержуємо, що в нуль обертається оригінал функції  $F_2(s)$  за наступної умови:

$$\tau_0 = \frac{\pi}{16ak''^2} \left( \frac{\text{ch} k''d - 1}{\text{sh} k''d + \frac{H_t}{2k''} \text{ch} k''d} \right)^2. \quad (11)$$

Отримана формула пов'язує товщину ФЄ й тривалість нагрівання матеріалу  $\tau_0$  у полі НВЧ, за яких нагрівання можна вважати рівномірним. Як слідує з (11) у разі більших значень  $k''d$  (практично при  $k''d > 3$ ) тривалість досягнення рівної температури в центрі й на поверхні ФЄ швидко прагне до деякого граничного значення:

$$\tau_{\text{гран}} = \frac{\pi}{16ak''^2(1 + H_f/2k'')^2}. \quad (12)$$

Тому для функціональної ємності товщиною  $d > 3/k''$  практично неможливо здійснити рівномірне нагрівання матеріалу, тому що час нагрівання незалежно від значення  $d$  обмежено величиною  $\tau_{\text{гран}}$ . Для прийнятих параметрів НВЧ-нагріву  $\tau_{\text{гран}} = 135$  с. Для товщини ФЄ  $d = 2 \cdot 10^{-2}$  м тривалість рівномірного нагріву згідно (11) дорівнює  $\tau_0 = 78$  с.

Для збільшення тривалості рівномірного нагрівання необхідно зменшувати теплові втрати, що виходить з (11) і (12). У першому наближенні нагрівання матеріалу у ФЄ можна вважати нагріванням у закритому контейнері, для якого коефіцієнт теплообміну в середньому знижується до  $5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . При цьому оптимальна тривалість НВЧ-нагріву складає  $\tau_0 = 102$  с.

Щоб нагріти ФЄ до заданої температури за оптимальний час  $\tau_0$  необхідно знати потужність, яку потрібно до неї підвести від НВЧ-генератора. Знайдемо вираз для температури в центрі ФЄ. Виходячи з формули (8), зробивши зворотне перетворення Лапласа, з урахуванням прийнятих допущень, одержимо залежність для температури в центрі ФЄ:

$$T(0, \tau) = T_0 + \frac{Aw_{\text{нов}}}{4k''^2 \lambda_t} \exp\left[(4k''^2 a \tau) - 1\right]. \quad (13)$$

Підставляючи в цей вираз тривалість рівномірного нагрівання (11), одержимо формулу для визначення питомої потужності НВЧ-поля на поверхні ФЄ необхідну для рівномірного нагрівання матеріалу за час  $\tau_0$ :

$$w_{\text{нов}} = \frac{4k''^2 \lambda_t \Delta T}{A \exp\left[(4k''^2 a \tau_0) - 1\right]}, \quad (14)$$

де  $\Delta T = (T(0, \tau) - T_0)$  – задана різниця кінцевої й початкової температур у центрі ФЄ з матеріалом.

**Висновки.** Оптимальні умови НВЧ-сушіння харчової сировини у функціональних емностях у частині його нагрівання на першому етапі забезпечуються за певного співвідношення між глибиною ФЄ й тривалістю НВЧ-нагрівання. При цьому сировина, що зневоднюється, нагрівається до заданої температури рівномірно по товщині при мінімальній потужності НВЧ-поля, що є одним з основних факторів підвищення енергоефективності процесу НВЧ-сушіння.

#### *Список літератури*

1. Погожих Н. И. Метод определения напряженности СВЧ-поля по темпу нагрева модельного тела / Н. И. Погожих, В. А. Потапов, Н. М. Цуркан, О. Ю. Гриценко // Научно-методические аспекты энергоеffectивности моделирования энерготехнологий – Одеса : ОНАХТ, 2011. – Вип. 39, том 2. – С. 16 – 18.
2. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Негушил [и др.]. – М. ; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 480 с.
3. Рогов И. А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 200 с.
4. Романовский С. Т. Конвективный и комбинированный тепло- и массообмен при термической обработке капиллярнопористых материалов / С. Т. Романовский. – Минск : Наука и техника, 1977. – 155 с.

Отримано 30.03.2012. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, М.М. Цуркан, 2012.

УДК 641.78:664

**В.О. Потапов**, д-р техн. наук, проф.

**Є.М. Якушенко**, ст. викл.

### **КІНЕТИКА СУШІННЯ ВИНОГРАДНОЇ ВИЧАВКИ В ТЕПЛОМАСООБМІННОМУ МОДУЛІ З ВНУТРІШНІМ НАГРІВАЧЕМ**

*Наведено результати досліджень кінетики вологовмісту та температури в процесі сушіння змішаним теплопідведенням (ЗТП-сушіння) виноградної вичавки в тепломасообмінному модулі (ТМОМ) з внутрішнім нагрівачем.*

*Приведены результаты исследования кинетики влагосодержания и температуры виноградной выжимки в процессе сушки смешанным теплоподводом (СТП-сушки) в тепломассообменном модуле (ТМОМ) с внутренним нагревателем.*

*The paper presents the results of a study of the kinetics of moisture content and temperature of the grape pomace during STP-drying in the heat mass transfer unit with an internal heater.*