УДК 631.365

© В.П. Ковбаса, д.т.н., Р.А.Калініченко, к.т.н.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ЗЕРНІВКИ В ЗМІННОМУ РАДІАЦІЙНОМУ ПОТОЦІ

У статті розглянуті аналітичні математичні моделі нагрівання зернівки інфрачервоним випромінюванням при постійному і змінному радіаційному потоці для рухомого шару зерноматеріалу.

ІНФРАЧЕРВОНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ, НАГРІВАННЯ ЗЕРНА, ТЕРМООБРОБКА, РАДІАЦІЙНИЙ ПОТІК.

Постановка проблеми. Поміж численних проблем аграріїв одна з головних – як зберегти зібраний врожай вологого зерна. Вибір технологій невеликий – охолодження, хімічна консервація, сушіння. Найбільш поширеним способом консервації є сушіння, воно забезпечує довготривале зберігання, підвищує якість готового продукту, але є найбільш енергозатратним. Зазвичай, в нашій кліматичній зоні потреба в сушінні складає 50-55% валового збору зерна. За експертними оцінками, із загальної кількості енергоресурсів, витрачених на виробництво зерна, прямі витрати на сушіння сягають 30-35%, а частка енерговитрат у собівартості сушіння складає 75-80% [11]. Тому проблема зниження енергоємності процесів доведення зерна до кондиційного за вологістю і температурою стану надзвичайно актуальна.

На практиці використовують різні види сушіння, до основних відносяться: конвекційне сушіння (високотемпературне і низькотемпературне), радіаційне сушіння (інфрачервоним випромінювання-ІЧ), сублімаційне сушіння, тощо. В таблиці 1 наведені техніко-економічні показники основних видів сушіння[6].

Як видно з таблиці найбільш економічно вигідний метод сушіння зерноматеріалів є радіаційний, а саме, інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням.

ІЧ-випромінювання проникає в зерноматеріал [10] і діє безпосередньо на воду в обробляємому матеріалі (рис.1), а не нагріває проміжний теплоносій і повітропроводи, це значно скорочує непродуктивні витрати енергії і призводить до економії енергії від 40%[13] до декількох разів [3] в залежності від виду ІЧ-обробки .

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика різних видів сушіння

Показники	ІЧ-сушіння	Конвекційне високотемпературне сушіння	Сублімаційне сушіння
Час сушіння, год	0,5–2,5	1–4	20–30
Питомі витрати енергії на 1 кг випаровуваної вологи, кВт·год	1	1,85–2,5	4,5
Інтегральна температура оброблення продукту, ^{0}С	30–60	50–110	–

Рис. 1 - Схема термообробки зерна при ІЧ-енергопідводі

Оскільки, радіаційний метод дозволяє підвести до зерноматеріалу енергії в 20-100 разів більше, ніж при конвективному чи кондуктивному енергопідводі то ІЧ-випромінюванням проводять також різні види термообробки зерна: попередній нагрів вологого зерна перед конвекційним сушінням, передпосівну стимуляцію зерна, мікронізацію і дезінсекцію зерна.

Для різних видів термообробки зерноматеріалів використовують ІЧ-установки різних конструкційних оформлень, але усі вони мають спільні суттєві недоліки – завищені енерговитрати на обробку, недосконалість апаратного і режимного оформлення процесів. Невідповідність наявної технічної бази для ІЧ-термообробки зерноматеріалів умовам сільськогосподарського виробництва (різні масштаби виробництва, різні форми власності) обумовлює необхідність механіко-технологічного обґрунтування для корінних змін у технічному забезпеченні процесів термічної обробки зерноматеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями теоретичних досліджень і практичного застосування ІЧ-

випромінювання для сушіння і термообробки зерноматеріалів присвячені роботи [1, 2, 4, 9], їх аналіз дає можливість визначити високу технологічну ефективність процесів обробки зернопродуктів інфрачервоним випромінюванням. Однак інфрачервона термообробка зерна в практиці господарств використовується недостатньо [7,10].

Одним із основних резервів зниження питомих витрат енергії при ІЧ-термообробці, наряду з іншими технічними рішеннями вдосконалення обладнання, є наближення випромінювача до поверхні зернового шару [5], оскільки, енергія що передається матеріалу обернено-пропорційна квадрату відстані між випромінювачем і матеріалом. Але це призводить до суттєвої нерівномірності опромінення зернівки, зокрема, в установці ІЧ-термообробки зерна конвеєрного типу, рис.2.

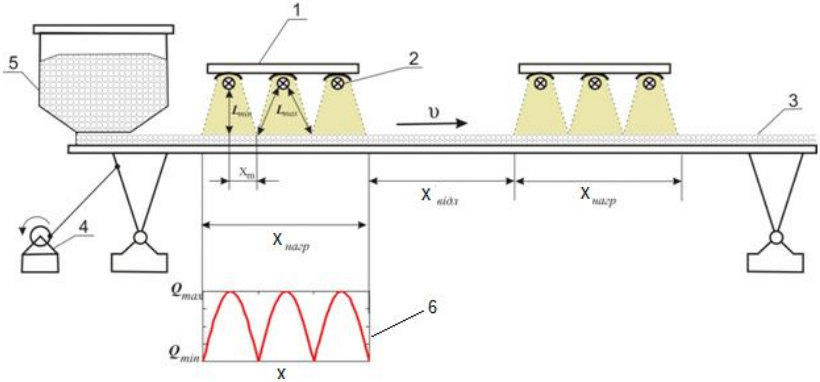

Рис. 2 - Схема терморадіаційної установки: 1 – екран; 2 – випромінювач; 3 – зерно; 4 – віброзбуджувач; 5 – бункер; 6 – залежність опроміненності зерна за координатою в період нагріву

Збільшення концентрації теплового потоку, який сприймається поверхнею зерна, суттєво інтенсифікує процес термообробки, але при цьому визначальним критерієм для управління процесом буде комбінація факторів температури поверхні зерна і середньої температури зернівки, що залежить від виду термообробки. Так зокрема, при сушінні зерна середня температура зернівки не повинна перевищувати 55 ^{0}С. При мікронізаціїї температура зерна повинна підвищуватися до 130-140 ^{0}С, а час дії забезпечувати значне покращення поживної цінності і унеможливлення підгоряння поверхні зерна. При дезінсекції зерна температура поверхні повинна досягати критичної для загибелі шкідливих організмів, а час її дії

унеможливлювати зменшення схожості та омертвіння зерна. Для всіх видів термообробки висока температура поверхні зернівки повинна бути короткочасною, щоб не призвести пригорання.

Тому **метою досліджень** була розробка аналітичної математичної моделі що описуватиме динаміку розвитку температурного поля зернівки в рухомому шарі від параметрів змінного радіаційного потоку, для оптимізації процесів різних видів ІЧ-обробки за критерієм енергоефективності**.**

Результати дослідження. Розглянемо нагрів зернівки (приймемо форму зернівки – куля), що рухається по транспортеру рис.2. При постійному тепловому потоці радіальний розподіл температури в зернівці в будь-який момент часу можна описати рівнянням теплопровідності для кулі:

$$\frac{\partial t(R,\tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r} \right), \qquad (1)$$

з крайовими умовами:

$$\lambda \frac{\partial t(R,\tau)}{\partial r} = Q, \quad \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad t(0,\tau) \neq \infty, \qquad t(r,0) = t_0 . \qquad (2)$$

Рішення цієї задачі для постійного теплового потоку наведено в [8]:

$$t(r,\tau) = t_0 + \frac{QR}{\lambda} \left[\frac{3 \cdot a \cdot \tau}{R^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2} \right) \right], \qquad (3)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, Вт/м·К; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; Q – тепловий потік, Вт/м^2; μ_n – корені характеристичного рівняння – $tg\mu = \mu$.

Оскільки в нашому випадку рис. 2, віддалення ІЧ-випромінювача від зерна є порівняно невеликим (10-12 см) то розрахунок з використанням моделі точкового випромінювача є неможливим. Для розрахунку процесу нагріву зернівки потрібно враховувати геометричне розташування обробляємого матеріалу і випромінювачів тобто враховувати вплив нерівномірності радіаційного потоку за координатою x.

В експериментальній установці, схема якої зображена на рис.2, генераторами ІЧ-випромінювання використовувалися лампи КГТ-220-1000. Лампа КГТ конструкційно являє собою скляний циліндр, заповнений галогенним газом, в якому вміщена спіраль нагрівача. Така форма випромінювача дозволяє створювати тепловий потік який буде

рівномірний за напрямом, що перпендикулярний до руху транспортера і нерівномірний в напрямку руху. Нерівномірність в напрямку руху транспортера пояснюється зміною відстані між нагрівачем і зернівкою внаслідок її повздовжнього руху на вібраційному транспортері, рис.3.

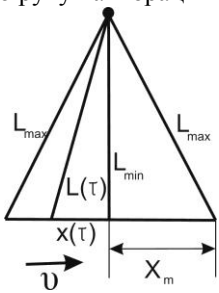

Рис.3 - Схема зміни відстані L між зернівкою і випромінювачем: υ – швидкість руху зернівки, *x(τ)* – відстань від зернівки до спільного перпендикуляра між нагрівачем і поверхнею транспортера

Зміну положення зернівки за координатою *x* можна знайти із співвідношення:

$$x = \upsilon \cdot \tau \tag{4}$$

де υ – швидкість переміщення зернівки по транспортеру, м/с; τ – час, с.

Залежності (1)-(2) перепишемо у вигляді:

$$\frac{\partial t(R,x)}{\partial x} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t(r,x)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r,x)}{\partial r} \right) \tag{5}$$

з крайовими умовами:

$$\lambda \frac{\partial t(R,x)}{\partial r} = Q, \qquad \frac{\partial t(0,x)}{\partial r} = 0, \quad t(0,x) \neq \infty, \qquad t(r,0) = t_0 . \tag{6}$$

З урахуванням (4) розв’язок рівняння (5) буде такий:

$$t(r,x) = t_0 + \frac{QR}{\lambda} \left[\frac{3 \cdot a \cdot x}{\upsilon R^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} - \right.$$

$$\left. - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{ax}{\upsilon R^2} \right) \right] \tag{7}$$

Для вирішення рівняння (5) при змінному радіаційному потоці, змінний радіаційний потік *Q(x)* представимо у вигляді:

$$Q(x) = Q_m \cdot \phi(x) \qquad (8)$$

де Q_m – постійна величина радіаційного потоку при найменшій відстані L_{min} зернівки до ІЧ-лампи, $\phi(x)$ – періодична функція, що описує складну залежність зміни радіаційного потоку за координатою **x** і скористаємося інтегралом Дюамеля:

$$t_z(x) = t(x) \cdot \phi(0) + \int_0^x t(\theta) \cdot \phi'(x-\theta) d\theta. \qquad (9)$$

Використання інтеграла Дюамеля значно скорочує об'єм розрахункових робіт при інтегруванні рівнянь з однаковими лівими частинами і різними правими [12].

Функцію *φ(x)* для батареї ІЧ-ламп без зон перекриття опромінення можна визначити так:

$$\phi(x) = \frac{L_n^2}{L_n^2 + x_m{}^2} + \left(1 - \frac{L_n^2}{L_n^2 + x_m{}^2}\right) \cdot \left|\sin\left(\pi\left(\frac{x}{2x_m} - 1\right)\right)\right|, \qquad (10)$$

де $L_n = L_{min}$ – відстань від нагрівача центру до зернівки по нормалі;

$x_m = \upsilon \cdot \frac{T}{2}$ – відстань від нагрівача до зернівки в крайній точці опромінення, T – період перебування зернівки під опроміненням однієї ІЧ-лампи; υ – швидкість руху зернівки по вібротранспортеру;

Для аналітичного визначення температурного поля зернівки при змінному радіаційному потоці використання формули (10) призводить громіздких залежностей, тому розкладемо (10) у ряд Фур'є:

$$\phi_f(x) = A_0 + B_1 \sin(\omega x) + C_1 \cos(\omega x) + \sum_{k=2}^{\infty} B_k \sin(k\omega x) + \sum_{k=2}^{\infty} C_k \cos(k\omega x)\,. \qquad (11)$$

Оскільки, залежність (11) симетрична відносно осі ординат то синусна складова в розкладі в ряд Фур'є (13) буде відсутня ($B_к$=0) і (11) перепишемо у вигляді.

$$\phi_f(x) = A_0 + C_1 \cos(\omega x) + \sum_{k=2}^{\infty} C_k \cos(k\omega x)\,. \qquad (12)$$

Коефіцієнти ряду (12) визначимо із залежностей:

$$A0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \phi(x) dx\,;\; C_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \phi(x) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot x) dx\,, \qquad (13)$$

де $T_0 = 2 \cdot x_m$, $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T_0}$, $k = 1, 2, 3...$.

Перепишемо залежність (7) фіксованого значення змінної *r* у вигляді:

$$t(x) = t_0 + A\cdot(3\cdot B\cdot x - C - \sum_{n=1}^{\infty} D_n \exp(-B\cdot x\cdot \mu_n^2)\,, \qquad (14)$$

де $A = \dfrac{QR}{\lambda}$; $B = \dfrac{a}{\upsilon\cdot R^2}$; $C = \dfrac{3\cdot R^2 - 5\cdot r^2}{10\cdot R^2}$; $D_n = \dfrac{2}{\mu_n \cos(\mu_n)} \dfrac{R\cdot \sin(\mu \dfrac{r}{R})}{r\cdot \mu_n}$.

Підставимо (14) і два перші члени ряду (12) в (9) і знайшовши визначений інтеграл отримаємо:

$$t_z(x) = (A_0 + C_1)\cdot\left(t_0 + A\cdot(3\cdot B\cdot x - C - \sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{-B\cdot x\cdot \mu_n^2}\right) + C_1\omega\times$$

$$\times\left(t_0(\cos(x)-1) + AB(\sin(x)-x) - AC(\cos(x)-1) + \right.$$

$$\left. + A\sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n(e^{-B\cdot x\cdot \mu_n^2} - \cos(x) + B\sin(x)\cdot \mu_n^2)}{1 + B^2\mu_n^2}\right). \qquad (15)$$

На рис. 4 представлена зміна температури поверхні зернівки і внутрішнього шару (r=0.002м) в процесі руху зернівки по вібротранспортеру в зоні опромінення відповідно за залежностями (7) і (14).

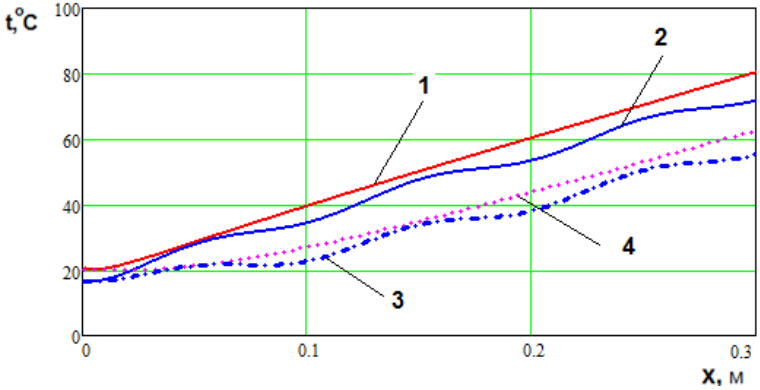

Рис.4 - Зміна температури поверхні зернівки і внутрішніх шарів (1 – поверхня, r=0,003м, $Q=Q_m=20$ кВт/м^2; 2 - поверхня, r=0,003м, $Q(x)=Q_m\cdot\varphi(x)$; 3 - внутрішній шар зернівки, r=0,002м, $Q=Q_m=20$ кВт/м^2; 4 - внутрішній шар зернівки, r=0,002м, $Q(x)=Q_m\cdot\varphi(x)$; швидкість руху зернівки по вібротранспортеру – υ=0,015 м/с)

На рис.5 і рис. 6. температурні поля зернівки при постійному і змінному радіаційних потоках.

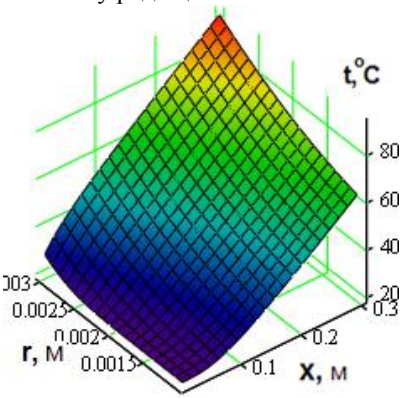

Рис.5 - Температурне поле зернівки при постійному тепловому потоці ($Q=Q_m=20$ кВт/м^2, $\upsilon=0.015$ м/с, R=0.003м)

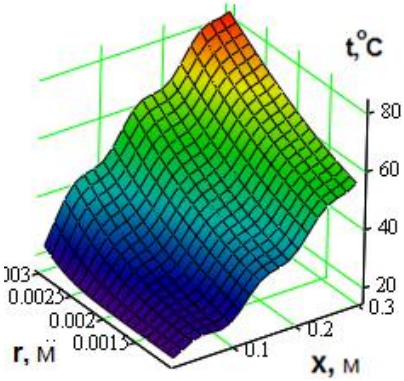

Рис.6. Температурне поле зернівки при змінному тепловому потоці($Q_m=20$ кВт/м^2, $\upsilon=0.015$ м/с, R=0.003м, $L_n=0.09$м, $X_m=0.05$м)

Динаміку зміни середньої температури зернівки на стадії нагрівання, можна визначити із залежності:

$$\overline{t}_z(x) = \frac{3}{R^3}\int_0^R r^2 \cdot t_z(r,x)dr. \qquad (16)$$

Графічна ілюстрація зміни середньої температури зернівки під дією сталого і змінного радіаційного потоку наведена на рис.7.

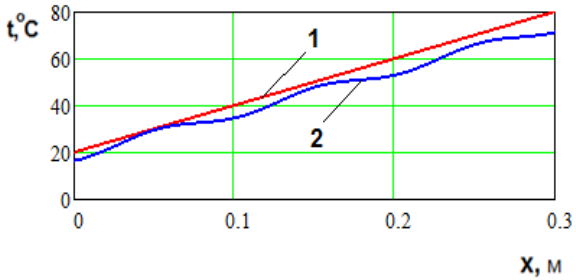

Рис.7 - Зміна середньої температури зернівки на стадії опромінення (1 - опромінення стале Q=20 кВт/м^2, $x_{нагр}=0.4$ м; 2 - опромінення змінним радіаційним потоком, $Q(x)=Q_m\cdot\varphi(x)$, $Q_m=20$ кВт/м^2; швидкість руху зернівки по вібротранспортеру – $\upsilon=0.015$ м/с)

Висновки

1. Розглянуті аналітичні математичні залежності дозволяють визначати розвиток температурного поля зернівки під час термообробки ІЧ-випромінюванням в залежності від технологічних і технічних параметрів терморадіаційної установки.

2. Отримані аналітичні залежності дозволяють моделювати динаміки зміни середньої температури, температури поверхні, темп нагріву зернівки при термообробці ІЧ-випромінюванням в рухомому шарі з метою визначення оптимальних технологічних значень часу дії і потужності теплового потоку (з урахуванням періодичної зміни його потужності, що сприймається рухомим зерноматеріалом) для різних видів термообробки.

3. Аналітична модель температурного поля зернівки дозволяє ідентифікувати нестаціонарний процес променистого теплообміну при різних видах ІЧ-обробки зерноматеріалу.

4. В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що для забезпечення оптимальної інтенсивності нагріву зернівки повинні бути забезпечені умови змінного теплового потоку а також змінного в часі закону та траєкторії руху зернівки по відношенню до випромінювача.

Література

1. Беляев М.И.Теоретические основы комбинированых способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография/ М.И. Беляев, П.Л. Пахомов.–Х.: ХИОП, 1991. –160с.

2. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности М.1966. Пищевая промышленность. –407с.

3. Елькин Н.В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы / Н.В. Елькин // Хранение и переработка зерна, 2006, № 4. С. 26-30.

4. Ильясов С.Г. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов / Ильясов С.Г., Красников В.В. – М.: Пищевая промышленность, – 1978. – 359 с.

5. Котов Б. І. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В. В. Кифяк // Вісник Харківського технічного університету сільського господарства, 2014, вип. 152., С. 181 – 190.

6. Корчемний М. Енергозбереження в АПК /М.Корчемний, В.Федорейко, В.Щербань. – Тернопіль: Підручникі і посібники, 2001. – 984с.

7. Лахно В.А. Использование компьютерных систем для повышения эффективности информационной поддержки инфракрасной сушки зерна монография / В.А.Лахно, Д.А. Ширяев. – Луганск: Элтон-2, 2011.–165с.

8. Лыков А.В., Теория теплопроводности. -М.: Высшая школа, 1967. –599с.

9. Поперечний А.М. Кінетика процесу сушіння плодових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М.Поперечний, Н.О.Миронова // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства. Х. – 2007. Вип.58. С.122-129.

10. Соболевский В. Ігноруємо ми й досі мікронізацію зернових/ В.Соболевский, В.Горбенко, К.Кузнецов // Зерно і хліб.– 2005.– № 2. С. 16-17.

11. Сорочинский В. Ф. Снижение энергозатрат при конвективной сушке зерна / В. Ф. Сорочинский // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. - 2010. - Вип. 38(1). - С. 79-82.

12. Старков В.Н. Операционное исчисление и его применение. Учебн. пособ. – СПб, 2000.-65с.

13. Чекановкин А. Инфракрасный нагрев и кукуруза / А.Чекановкин, А.Мельников // Зерно, 2012, №8(77). С.202-204.

Рецензент д.т.н., проф. В.Ф. Дідух