

УДК 631.362

## Моделювання динаміки нагріву зернівки інфрачервоним випромінюванням в рухомому шарі

Р.А. Калініченко

*Національний університет біоресурсів і природокористування України  
(м. Київ, Україна)*

В системі технологічних операцій з післязбиральної обробки зерна важливе місце займає термообробка. Підведення теплової енергії до зерна при термообробці проводиться конвективним, радіаційним, кондуктивним методом. Найбільш економічно вигідний метод підведення енергії до зерноматеріалів є радіаційний, а саме, інфрачервоним випромінюванням, причому, цей метод дозволяє проводити всі види термообробки зерна.

Для оптимізації процесу обробки насіння інфрачервоним випромінюванням за критеріями енергоефективності, а також, термолабільності зерна, поставлено за мету розробити математичну модель, що описуватиме динаміку процесу нагріву зернівки в рухомому шарі в залежності від визначальних параметрів процесу (потужності змінного за довжиною транспортера теплового потоку, максимальної температури нагріву поверхні зернівки).

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

Розглянуті математичні моделі дозволяють визначити динаміку розвитку температурного поля зернівки під час термообробки інфрачервоним випромінюванням в залежності від технологічних параметрів терморадіаційної установки.

Отримані залежності дозволяють моделювати динаміку 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 сприймаємої потужності рухомих зерноматеріалом) для різних видів термообробки.

**Ключові слова:** *інфрачервоне випромінювання, нагрівання, зерно, термообробка, тепловий потік, температура, енергія, термостимуляція.*

**Проблема.** В системі технологічних операцій з післязбиральної обробки зерна важливе місце займає термообробка. Термічне сушіння забезпечує довготривале збереження зібраного матеріалу, мікронізація – підвищує поживні якості фуражного зерна, термічна дезінсекція і дезінфекція – знезаражує зерно перед зберіганням або перед висіванням, термостимуляція насіння підвищує схожість і енергію проростання.[3, 4, 11].

Підведення теплової енергії до зерна при термообробці проводиться конвективним, радіаційним, кондуктивним методом. Найбільш промислово розповсюджений вид термообробки зерна – конвективне сушіння. Але при конвективному сушінні витрати енергії на один кілограм випареної волого становлять в середньому 4800 - 5200 кДж [12]. Великі питомі витрати енергії при конвективному сушінні пояснюються непродуктивними витратами теплоти в сушарках, які за даними [9], розподіляються так: втрати через стінки газопроводів і шахти – 5%; в тепло-

генераторній установці (внаслідок недогорання, тепловіддачі, тощо) – 5%; в теплообміннику теплогенератора – 20%; на нагрів зерна (втрати теплоти із зерном, що виходить із охолоджувача) – 7%; випаровування волого – 38%; нагрів повітря і парів води до температури відпрацьованого теплоносія (втрати з відпрацьованим в сушильній камері і охолоджувачі повітрям) – 25%, як наслідок конвективні сушарки мають ККД на рівні 45 - 55%. Інші види термообробки зерна з конвективним енергопідводом теж мають порівняно низький рівень ККД.

Найбільш економічно вигідний метод підведення енергії до зерноматеріалів є радіаційний, а саме, інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням, причому, цей метод дозволяє проводити всі види термообробки зерна. ІЧ-випромінювання дозволяє підвести до зерноматеріалу енергії в 20 -100 разів більше, ніж при конвективному чи кондуктивному енергопідводі. ІЧ-випромінювання проникає в зерноматеріал і діє безпосередньо на воду в обробляемому матеріалі [11]

рис.1, а не нагріває проміжний теплоносій і повітропроводи, все це значно скорочує непродуктивні витрати енергії від 40% [13] до декількох разів [4] в залежності від виду термообробки.



Рис. 1. Схема термообробки зерна при ІЧ-енергопідводі

Рівень поглинання і глибина проникнення ІЧ-променів залежить від матеріалу що опромінюється, (на цьому, зокрема, базується дезінсекція зерна) і від довжини хвилі променевого потоку. За дослідженнями проведеними вітчизняними і закордонними вченими [4] найбільш ефективною є довжина хвилі 0,75 - 2 мкм.

Таку довжину хвилі забезпечує, галогенний кварцовий генератор – лампа КГТ, тому вона широко використовується в установках ІЧ-обробки різних конструкцій: конвеєрних з віброзрідженням і без, барабанних, тощо. Для різних видів ІЧ-термообробки можуть використовуватися терморадіаційні установки і обладнання, різних конструкційних оформлень, але усі вони мають спільні суттєві недоліки – завищені енер-

говитрати на обробку, недосконалість апаратного і регламентного оформлення процесів.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями теоретичних досліджень і практичного застосування ІЧ-випромінювання для сушіння і термообробки зерноматеріалів присвячені роботи [1, 2, 5, 10], їх аналіз дає можливість визначити високу технологічну ефективність процесів обробки зернопродуктів інфрачервоним опромінюванням. Однак інфрачервона термообробка зерна в практиці господарств використовується недостатньо [7].

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.

В такому випадку енергія що передається матеріалу обернено-пропорційна квадрату відстані між випромінювачем і матеріалом. Це призводить до збільшення теплового потоку, що падає на зернівку при її наближенні до випромінювача і відповідно зменшення при її віддаленні в рухомому шарі установки для ІЧ-термообробки зерна конвеєрного типу, рис. 2. [6]

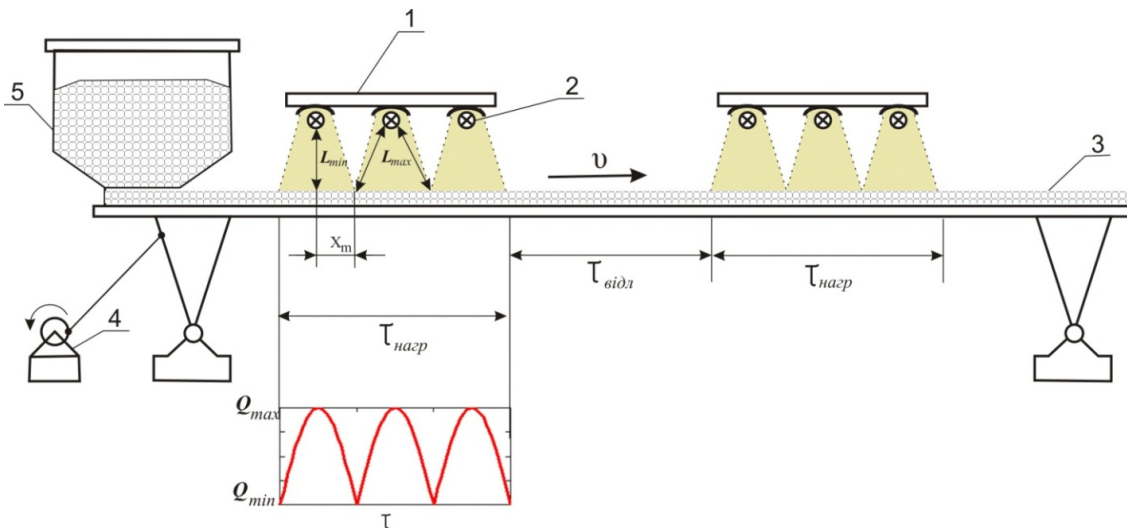


Рис. 2. Схема терморадіаційної установки:

1 – екран; 2 – випромінювач; 3 – зерно; 4 – віброзбуджувач; 5 – бункер

Збільшення теплового потоку, який сприймається поверхнею зерна, суттєво інтенсифікує процес термообробки, але при цьому визначальним критерієм буде комбінація факторів температури поверхні зерна і часу термообробки в залежності від виду термообробки.

Для оптимізації процесу ІЧ-обробки за критеріями енергоефективності, а також, термолабільності зерна, потрібно розробити математичну модель, що описуватиме динаміку процесу

нагріву зернівки в рухомому шарі від визначальних параметрів процесу (потужності змінного за довжиною транспортера теплового потоку, максимальної температури нагріву поверхні зернівки за видом термообробки), що і було метою досліджень.

**Матеріали та методика досліджень.** Розглянемо нагрів зернівки (приймемо форму зернівки – куля), що рухається по транспортеру рис. 2. При постійному тепловому потоці радіа-

льний розподіл температури в зернівці в будь-який момент часу можна описати рівнянням теплопровідності для кулі[8]:

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (3)$$

з крайовими умовами:

$$\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} = Q, \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0, \\ t(0, \tau) \neq \infty, \quad t(r, 0) = t_0. \quad (4)$$

Рішення цієї задачі для постійного теплового потоку наведено в [14]:

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

де:  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, Вт/м·К;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;  $Q$  – тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;  $\mu_n$  – корні характеристичного рівняння –  $\text{tg } \mu = \mu$ .

В установках для ІЧ-термообrotки віддалення ІЧ-випромінювача від зерна є порівняно невеликим (10 - 15 см) то їх розрахунок з використанням моделі точкового випромінювача призводить до неточностей і відповідно потребує врахування зміни геометричного розташування оброблюваного рухомого матеріалу і випромінювача.

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 з 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.

Енергія, що передається матеріалу обернено-пропорційна квадрату відстані між випромінювачем і матеріалом, тому зміна відстані буде впливати на величину теплового потоку, що

сприймається поверхнею зернівки. Зміну теплового потоку відповідно до рис. 2 і рис. 3 можна записати так:

$$Q = Q_m \varphi(\tau), \quad (6)$$

де:  $Q_m = Q_{\max}$  – амплітудне (максимальне) значення теплового потоку;  $\varphi(\tau)$  – періодична функція, що описує зміну відстані між ІЧ-лампою і зернівкою від якої залежить тепловий потік, що сприймається зернівкою. Функцію  $\varphi(\tau)$  визначимо так:

$$\varphi(\tau) = \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} + \left( 1 - \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} \right) \times \left| \sin \left( \frac{\pi}{T} (\tau - T) \right) \right| \quad (7)$$

де:  $T$  – період перебування зернівки під опроміненням однієї ІЧ-лампи;  $\nu$  – швидкість руху зернівки по вібротранспортеру;  $L_n = L_{\min}$  – відстань від нагрівача центру до зернівки по нормалі;  $X_m = \nu T / 2$  – відстань від нагрівача до зернівки в крайній точці опромінення.

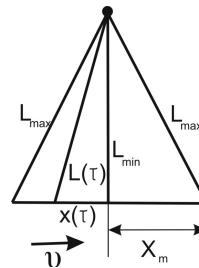


Рис. 3. Схема зміни відстані  $L$  між зернівкою і випромінювачем ( $\nu$  – швидкість руху зернівки,  $x(\tau)$  – відстань від зернівки до спільного перпендикуляра між нагрівачем і поверхнею транспортера)

Гранична умова (4) для теплового потоку (6) запишеться так:

$$\lambda \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} = Q_m \varphi(\tau). \quad (8)$$

Для розв'язку рівняння (2) для змінного теплового потоку (гранична умова (8)), зручно використовувати інтеграл Дюамеля (9), що значно скорочує об'єм розрахункових робіт при інтегруванні рівнянь з однаковими лівими частинами і різними правими:

$$t(\tau) = t(\tau) \varphi(0) + \int_0^{\tau} t(\theta) \varphi'(\tau - \theta) d\theta. \quad (9)$$

Перед підстановкою у вираз (9) залежності (7), модуль замінимо піднесенням до квадрату, для спрощення подальшого диференціювання:

$$\varphi(\tau) = \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} + \left( 1 - \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} \right) \times \sin^2 \left( \frac{\pi}{T} (\tau - T) \right). \quad (10)$$

На рис.4. представлені графіки отримані за залежностями (7) і (10), розбіжності незначні.

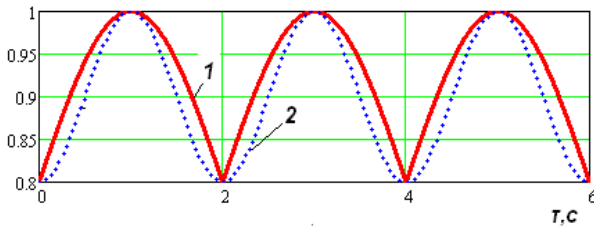


Рис. 4. Характер зміни теплового потоку:  
 1 – за формулою (7), 2 – за формулою (12)  
 ( $T = 2$  с,  $L_n = 0,01$  м,  $\nu = 0,05$  м/с)

Продиференціюємо залежність (10) по змінній  $(\tau - \theta)$ , отримаємо:

$$\varphi'(\tau) = 2\pi \left( 1 - \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} \right) \times \sin \alpha_\tau \cos \alpha_\tau, \quad (11)$$

де  $\alpha_\tau = \pi(\tau - \theta - T)/T$ .

Підставивши (5) і (11) в (9) і знайшовши визначений інтеграл, отримаємо:

$$t_z(r, \tau) = t(r, \tau) \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} + \frac{2\pi}{T} \left( 1 - \frac{L_n^2}{L_n^2 + X_m^2} \right) \times \left[ \frac{T(K_{t1} + K_{t2} - K_{t3})}{40 \pi^2 R \lambda} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{t4} K_{t5} e^{\frac{a\tau\mu_n^2}{R^2}} - K_{t4} 2\pi R^2}{r \lambda \mu_n^3 (4\pi^2 R^4 + a^2 T^2 \mu_n^4)} \cdot e^{-\frac{a\tau\mu_n^2}{R^2}} \right], \quad (12)$$

де:

$$K_{t1} = \pi(5Q_m r^2 - 3Q_m R^2 + 10Rt_0 \lambda + 30aQ_m \tau),$$

$$K_{t2} = \pi(3Q_m R^2 - 5Q_m r^2 - 10Rt_0 \lambda) \cos \gamma_\tau,$$

$$K_{t3} = 15aQ_m T \sin \gamma_\tau,$$

$$K_{t4} = Q_m R^4 T \sec(\mu_n) \sin\left(\frac{r\mu_n}{R}\right),$$

$$K_{t5} = 2\pi R^2 \cos \gamma_\tau - aT \sin \gamma_\tau \mu_n^2,$$

$$\gamma_\tau = 2\pi\tau/T,$$

а  $t(r, \tau)$  – визначається із залежності (5).

На рис. 5 представлені динаміки зміни температури поверхні зернівки при постійному тепловому потоці (за формулою (5)) і при змінному тепловому потоці (за формулою (12)).

На рис. 6. представлено розвиток температурного поля зернівки на стадії нагрівання, розрахований за формулою (12).

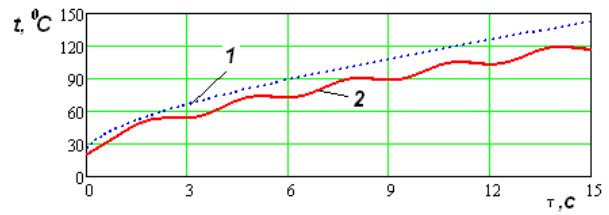


Рис. 5. Динаміка зміни температури поверхні зернівки: 1 – постійний тепловий потік  $Q = 30$  кВт/м<sup>2</sup>, 2 – змінний тепловий потік,  $Q_m = 30$  кВт/м<sup>2</sup>,  $T = 2$  с,  $\nu = 0,05$  м/с,  $L_m = 0,1$  м

Динаміку зміни середньої температури зернівки на стадії нагрівання, можна визначити за залежністю:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 t(r, \tau) dr. \quad (13)$$

Кінетики зміни середньої температури зернівки на стадії нагрівання, розраховані за формулами (5) і (13), (12) і (13) представлені на рис. 6.

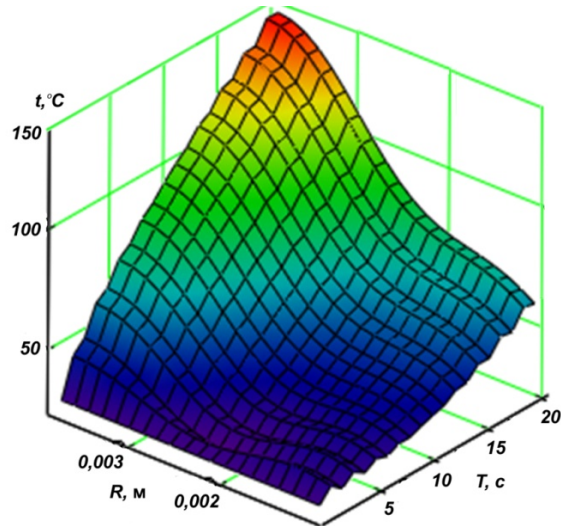


Рис. 6. Температурне поле зернівки на стадії нагрівання ( $Q_m = 30$  кВт/м<sup>2</sup>,  $\lambda = 0,45$  Вт/м·К,  $a = 9,451 \cdot 10^{-8}$  Вт/м·К,  $T = 2$  с,  $\nu = 0,05$  м/с,  $L_m = 0,1$  м)

Проаналізувавши рис. 5 і рис. 7 можна зробити висновок що періодична зміна теплового потоку, який сприймаються зернівкою, суттєво впливає на динаміку розвитку температурного поля зернівки.

Із збільшенням часу термообробки, різниця між температурою зернівки при дії постійного теплового потоку і змінного, із-за зміни геометричного положення взаємодіючих тіл, може досягати 15 - 20%. Такі відхилення можуть

негативно впливати на прогнозовану якість термообробки зерна внаслідок недосягання критичних температур поверхні або середньої температури зернівки в залежності від виду ІЧ-термообробки.

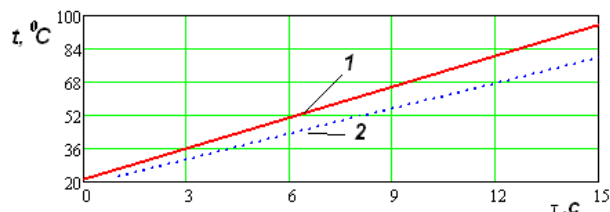


Рис. 7. Динаміка зміни середньої температури зернівки: 1 – постійний тепловий потік  $Q = 30 \text{ кВт/м}^2$ , 2 – змінний тепловий потік,  $Q = 30 \text{ кВт/м}^2$ ,  $T = 2 \text{ с}$ ,  $v = 0,05 \text{ м/с}$ ,  $L_m = 0,1 \text{ м}$

### Висновки

1. Розглянуті математичні моделі дозволяють визначити динаміку розвитку температурного поля зернівки під час термообробки ІЧ-випромінюванням в залежності від технологічних параметрів терморадіаційної установки.

2. Отримані залежності дозволяють моделювати динаміку 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 сприймаємої потужності рухомих зерноматеріалом) для різних видів термообробки.

### Література

1. Беляев М.И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография / М.И. Беляев, П.Л. Пахомов. –Х.: ХИОП, – 1991. –160 с.
2. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 407 с.
3. Дрынча В.М. Основные принципы предпосевного химического протравливания и физи-

ческого обеззараживания семян / В.М. Дрынча, Б.Д. Цынендоржиев // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 12. – С.18 - 22.

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

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

6. 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 ХНТУСГ. – 2014. – Вип. 152. – С. 181 - 190.

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. – 165 с.

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

9. Окунь Г.С. Утилизация зерна в шахтных зерносушилках / Г.С. Окунь, И.И. Верцман // Сб. науч. тр. ВИМ. – М., 1986. – Т. 109. – С. 143 -157.

10. Поперечный А.М. Кинетика процессу сушіння плодівих кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М. Поперечний, Н.О. Миронова // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. –Х.: ХНТУСГ, 2007. – Вип. 58. – С. 122 - 129.

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

12. Сорочинский В.Ф. Снижение энергозатрат при конвективной сушке зерна / В.Ф. Сорочинский. // Хранение и перераб. зерна. – 2010. – № 10. – С. 43 - 45.

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

### Анотація

## Моделирование динамики нагрева зерновки инфракрасным излучением в подвижном слое

Р.А. Калиниченко

В системе технологических операций послеуборочной обработки зерна, важное место занимает термообработка. Подвод тепловой энергии к зерну при термообработке проводится конвективным, радиационным и кондуктивным методом. Наиболее экономически выгодный метод подвода энергии к зерноматериалам является радиационный, а именно, метод инфракрасного облучения. Этот метод позволяет проводить все виды термообработки зерна.

Для оптимізації процесу обробки насіння інфрачервоним випромінюванням по критеріям енергоефективності, а також термолабільності зерна, поставлена мета розробити математичну модель, описуючу динаміку процесу нагріву зерна в подвижному шарі в залежності від визначальних параметрів процесу (потужності змінного по довжині транспортера теплового потоку, максимальної температури нагріву поверхні зернівки).

Відповідно до поставленої мети в статті розглянуті аналітичні математичні моделі нагріву зерна інфрачервоним випромінюванням при постійному і змінному радіаційному потоку, в разі подвижного шару зерноматеріалу.

Розглянуті математичні моделі дозволяють визначати динаміку розвитку температурного поля зерна при термообробці інфрачервоним випромінюванням в залежності від технологічних параметрів налаштування термо радіаційної установки.

Отримані залежності дозволяють моделювати динаміку зміни середньої температури, температури поверхні і темпа нагріву зерна при термообробці інфрачервоним випромінюванням. Зерно знаходиться в подвижному шарі. Використання отриманих результатів дозволяє для різних видів термообробки визначити оптимальні технологічні значення тривалості дії і потужності теплового потоку.

**Ключові слова:** *інфрачервоне випромінювання, нагрів, зерно, термообробка, тепловий потік, температура, енергія, термостимуляція.*

## Abstract

### Modeling the dynamics of heating caryopsis infrared radiation in a moving bed

R.A. Kalinichenko

The system of technological operations of post-harvest grain processing, heat treatment occupies an important place. Supply of heat energy to the grain in the heat treatment is carried convection, radiation and conduction method. The most cost-effective method of supplying energy to the grain material is radiating, namely, infrared method. This method allows for all kinds of heat treatment of grain.

To optimize the process of seed treatment with infrared energy efficiency criteria radiation and thermolability grain, set a goal to develop a mathematical model describing the dynamics of grain heating process in a moving bed, depending on the determining process parameters (power variable over the length of the conveyor of the heat flux, the maximum surface temperature of heating grains).

In accordance with the intended purpose in the article describes the analytical mathematical models of grain heating by infrared radiation at a constant and variable radiation stream, in the case of the moving grain layer.

Consideration of mathematical models allow to determine the dynamics of the temperature field of grain during the heat treatment by infrared radiation, depending on the technological parameters thermoradiation installation settings.

These dependencies allow to simulate the dynamics of changes in average temperature, surface temperature and heating rate of grains during heat treatment by infrared radiation. Grain stored in a moving bed. Using the results obtained allows for various types of heat treatment process to determine the optimal duration of action technological importance and the power of the heat stream.

**Keywords:** *infrared radiation heating, grain, heat treatment, heat flow, temperature, energy, thermal stimulation.*

Представлено від редакції: І.О. Фурман / Presented on editorial: I.O. Furman

Рецензент: І.А. Черепньов / Reviewer: I.A. Cherepn'ov

Подано до редакції / Received: 16.09.2015