



УДК 631.365.22

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАГРІВАННЯ ЗЕРНІВКИ В ЗМІННОМУ РАДІАЦІЙНОМУ ПОТОЦІ

Котов Б.І., д.т.н.,

Калініченко Р.А., к.т.н.,

Романенко О.І., інженер

*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

Тел.: +380(44) 527-83-82

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

Ключові слова – інфрачервоне випромінювання, нагрівання зерна, термообробка, радіаційний потік.

Постановка проблеми. Значення термічної обробки в агропромисловому виробництві величезне. Практично немає такої галузі сільськогосподарства, в якій би не застосовувалася термообробка зерноматеріалів. В даний час приблизно 15% від усієї споживаної енергії в агропромисловому комплексі розвинутих країн припадає на процеси термічної обробки сільськогосподарських матеріалів[6]. Тому проблема зниження енергоємності цих процесів надзвичайно актуальна у всьому світі.

До основних видів термічної обробки зерна відносяться: охолодження і сушіння зерна, передпосівна стимуляція насіннєвого зерна, підготовка фуражного зерна до згодовування, харчова переробка зерна і т.д.(рис.1).

Вибір способу термічної обробки залежить від технологічних властивостей обробленого зерна і його призначення. Найбільш економічно вигідний метод високотемпературної термообробки зерноматеріалів є радіаційний, а саме, інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням. Цей метод 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 оброблюваному матеріалі [11], а не нагріває проміжний теплоносій і повітропроводи, це значно скорочує непродуктивні витрати енергії і

призводить до економії енергії від 40% [12] до декількох разів [3] в залежності від виду термообробки.



Рис.1. Види термообробки зерна.

Для різних видів термообробки зерноматеріалів використовуються як універсальні ІЧ-терморадіаційні установки і обладнання, так і спеціалізовані 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). Збільшення концентрації теплового потоку досягається також створенням зон перекриття опромінення від ламп), який сприймається поверхнею зерна суттєво інтенсифікує процес термообробки, але при цьому визначальним критерієм для визначення періоду нагрівання в залежності від виду термообробки буде комбінація факторів температури поверхні зерна і середньої температури зернівки.

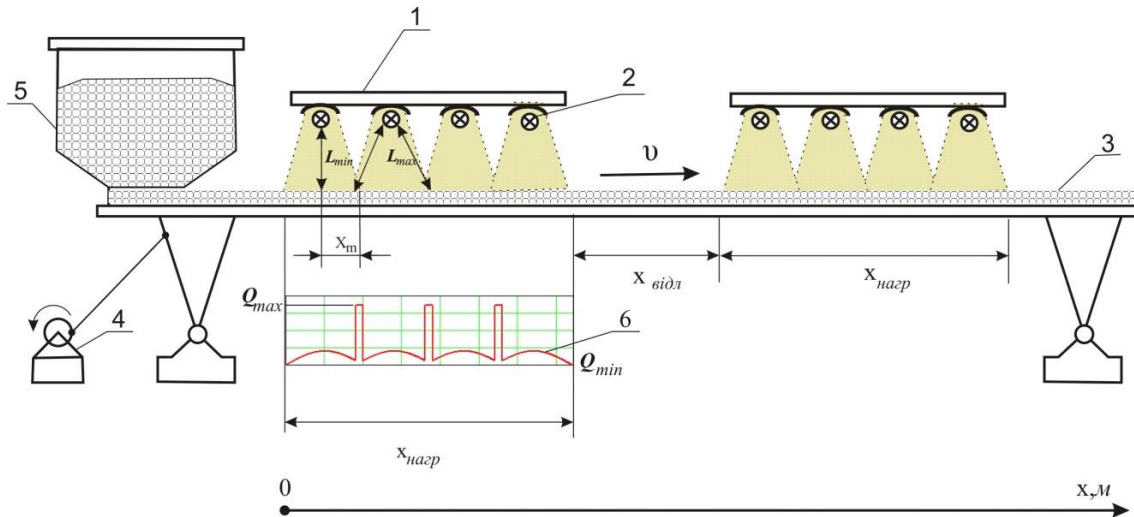


Рис.2. Схема терморадіаційної установки: 1 – екран; 2 – випромінювач; 3 – зерно; 4 – вібробуджувач; 5 – бункер; 6 – залежність опроміненості зерна за координатою в період нагріву.

Мета дослідження. Розробка математичної моделі що описуватиме динаміку процесу нагріву зернівки і її поверхні в рухомому шарі від визначальних параметрів процесу (змінного радіаційного потоку, періоду опромінення) для оптимізації процесу ІЧ-обробки за критерієм енергоефективності і обмеженнями термолабільності зерна.

Матеріали та методика досліджень. Розглянемо нагрів зернівки (прийемо форму зернівки – куля), що рухається по транспортері (див. рис.2). При постійному тепловому потоці радіальний розподіл температури в зернівці в будь-який момент часу можна описати рівнянням теплопровідності для кулі:

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

з крайовими умовами:

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

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

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

де a – коефіцієнт температуропровідності, Вт/м·К;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

Q – тепловий потік, Вт/м²;

μ_n – корні характеристичного рівняння – $tg \mu = \mu$.



Оскільки в нашому випадку (див. 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 оброблюваного матеріалу і випромінювачів, тобто, враховувати вплив нерівномірності радіаційного потоку за координатою x .

Зміну положення зернівки за координатою x можна знайти із співвідношення:

$$x = v \cdot \tau \quad (4)$$

де v – швидкість переміщення зернівки по транспортеру, м/с;

τ – час, с.

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

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

з крайовими умовами:

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

З урахуванням (6) розв'язок рівняння (7) буде такий:

$$t(r, x) = t_0 + \frac{QR}{\lambda} \left[\frac{3 \cdot a \cdot x}{vR^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{ax}{vR^2}\right) \right] \quad (7)$$

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

$$Q(x) = Q_m \cdot \varphi(x) \quad (8)$$

де Q_m – постійна величина радіаційного потоку при найменшій відстані L_{min} зернівки до ІЧ-лампи;

$\varphi(x)$ – періодична функція, що описує складну залежність зміни радіаційного потоку за координатою x ;

і скористаємося інтегралом Дюамеля:

$$t_1(x) = t(x) \cdot \varphi(0) + \int_0^x t(\theta) \cdot \varphi'(x - \theta) d\theta. \quad (9)$$

Використання інтеграла Дюамеля значно скорочує об'єм розрахункових робіт при інтегруванні рівнянь з однаковими лівими частинами і різними правими [11].

Функцію $\varphi(x)$ для батареї ІЧ-ламп без зон перекриття опромінення можна визначити так:

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

де:

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

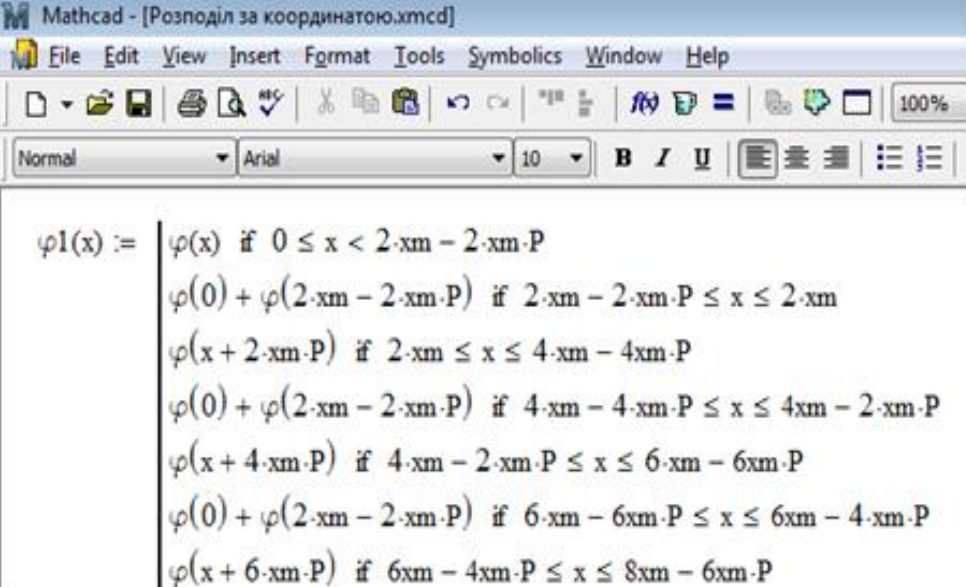
$x_m = v \cdot \frac{T}{2}$ – відстань від нагрівача до зернівки в крайній точці

опромінення;

T – період перебування зернівки під опроміненням однієї ІЧ-лампи;

v – швидкість руху зернівки по вібротранспортеру.

Аналitiчну залежність $\varphi_1(x)$ при перекритті зон опромінення між ІЧ-лампами (див. рис.2) можна описати такою залежністю в Mathcad, для батареї з чотирьох ІЧ-ламп (рис.3):



$$\varphi_1(x) := \begin{cases} \varphi(x) & \text{if } 0 \leq x < 2 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P \\ \varphi(0) + \varphi(2 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 2 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P \leq x \leq 2 \cdot x_m \\ \varphi(x + 2 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 2 \cdot x_m \leq x \leq 4 \cdot x_m - 4 \cdot x_m \cdot P \\ \varphi(0) + \varphi(2 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 4 \cdot x_m - 4 \cdot x_m \cdot P \leq x \leq 4 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P \\ \varphi(x + 4 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 4 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P \leq x \leq 6 \cdot x_m - 6 \cdot x_m \cdot P \\ \varphi(0) + \varphi(2 \cdot x_m - 2 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 6 \cdot x_m - 6 \cdot x_m \cdot P \leq x \leq 6 \cdot x_m - 4 \cdot x_m \cdot P \\ \varphi(x + 6 \cdot x_m \cdot P) & \text{if } 6 \cdot x_m - 4 \cdot x_m \cdot P \leq x \leq 8 \cdot x_m - 6 \cdot x_m \cdot P \end{cases} \quad (13)$$

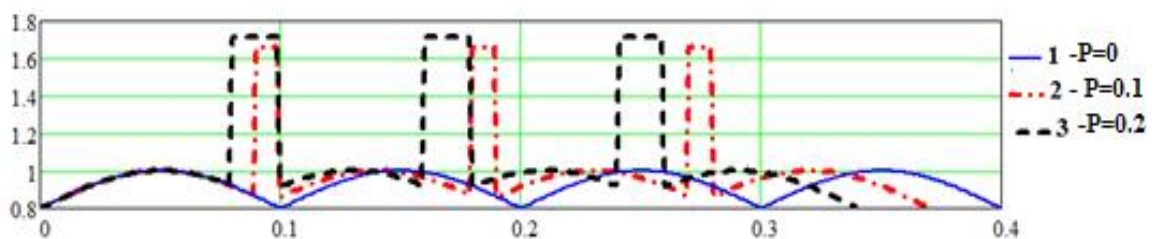


Рис.3. Залежність зміни радіаційного потоку за координатою x для чотирьох ламп (P – зона перекриття опромінення між лампами; x_m – половина довжини зони опромінення від однієї лампи).

Підставивши залежності (7) і (13) в (9) і провівши розрахунки в математичному середовищі Mathcad отримаємо залежності для визначення зміни температурного поля зернівки після її опромінення батареєю ІЧ-ламп. На рисунку 4 представлена зміна температури поверхні

зернівки в залежності від геометричного розташування ІЧ-ламп (з перекриттям зон опромінення і без перекриття).

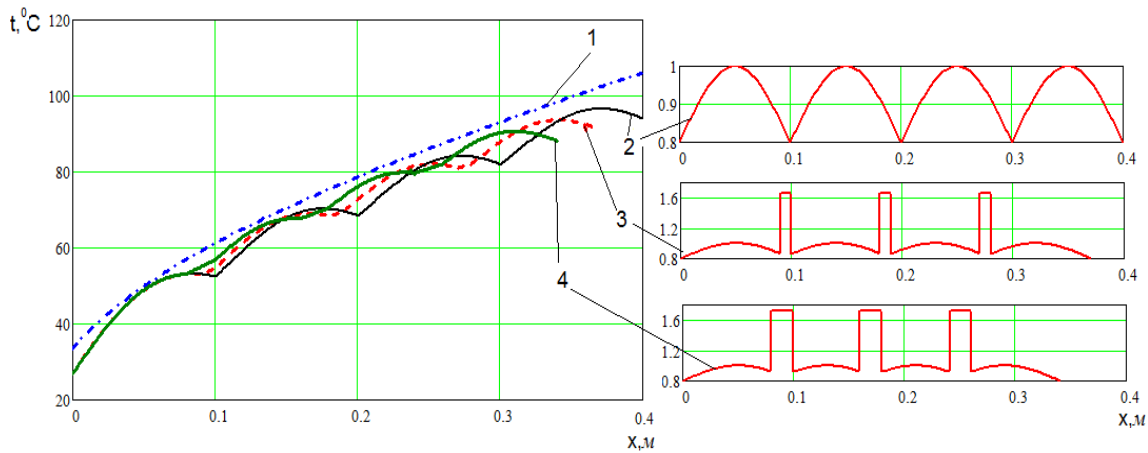


Рис.4. Зміна температури поверхні зернівки на стадії опромінення (1 - опромінення стале $Q=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.4$ м; 2- опромінення без зон перекриття $P=0$, $Q_m=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.4$ м; 3- опромінення із зонами перекриття $P=0.1$ (10%), $Q_m=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.37$ м; 4- опромінення із зонами перекриття $P=0.3$ (20%), $Q_m=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.34$ м; швидкість руху зернівки по вібротранспортеру – $v=0.05$ м/с)

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

$$\bar{t}_1(x) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \cdot t_1(r, x) dr. \quad (14)$$

Графічна ілюстрація зміни середньої температури зернівки під дією сталого і змінного радіаційного потоку наведена на рисунку 5.

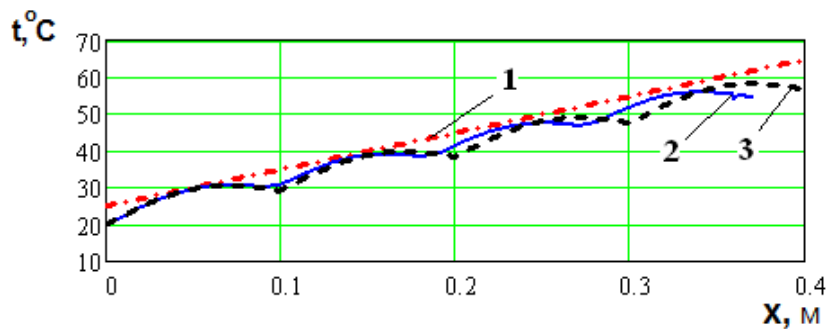


Рис.5. Зміна середньої температури зернівки на стадії опромінення (1 - опромінення стале $Q=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.4$ м; 2- опромінення без зон перекриття $P=0$, $Q_m=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.4$ м; 3- опромінення із зонами перекриття $P=0.1$ (10%), $Q_m=30$ кВт/м², $x_{\text{нагр}}=0.37$ м; швидкість руху зернівки по вібротранспортеру – $v=0.05$ м/с)

Використання розглянутих аналітичних залежностей дозволяє також проводити розрахунок зміни температурного поля зернівки в кінці стадії опромінення в залежності від швидкості руху зернівки по вібротранспортеру – (рис.6, 7).

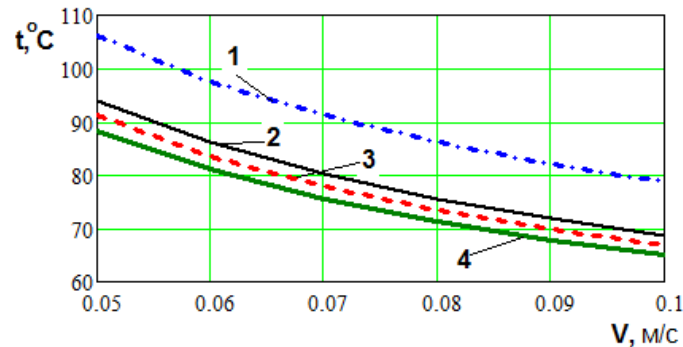


Рис.6. Залежність температури поверхні зернівки в кінці стадії опромінення $x = x_{\text{нагр}}$ від швидкості руху зернівки по вібротранспортеру (1 - $x_{\text{нагр}}=0.4$ м, опромінення стале $Q=30$ кВт/м²; 2- $x_{\text{нагр}}=0.4$ м, опромінення без зон перекриття $P=0$, $Q_m=30$ кВт/м²; 3- $x_{\text{нагр}}=0.37$ м, опромінення із зонами перекриття $P=0.1$ (10%), $Q_m=30$ кВт/м²; 4- $x_{\text{нагр}}=0.34$ м, опромінення із зонами перекриття $P=0.2$ (20%), $Q_m=30$ кВт/м²)

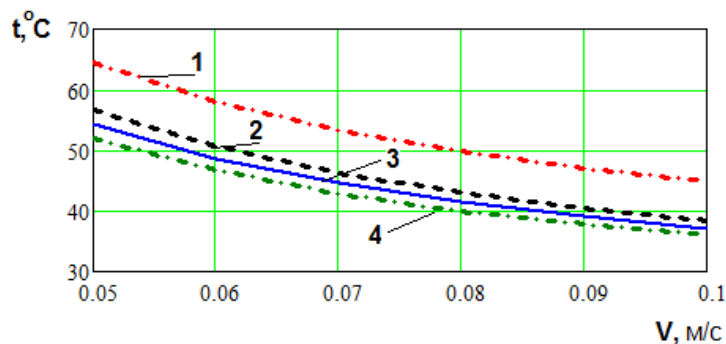


Рис.7. Залежність середньої температури зернівки в кінці стадії опромінення $x = x_{\text{нагр}}$ від швидкості руху зернівки по вібротранспортеру (1 - $x_{\text{нагр}}=0.4$ м, опромінення стале $Q=30$ кВт/м²; 2- $x_{\text{нагр}}=0.4$ м, опромінення без зон перекриття $P=0$, $Q_m=30$ кВт/м²; 3- $x_{\text{нагр}}=0.37$ м, опромінення із зонами перекриття $P=0.1$ (10%), $Q_m=30$ кВт/м²; 4- $x_{\text{нагр}}=0.34$ м, опромінення із зонами перекриття $P=0.2$ (20%), $Q_m=30$ кВт/м²)

Висновки.

1. Розглянуті математичні залежності дозволяють визначати розвиток температурного поля зернівки під час термообробки ІЧ-випромінюванням в залежності від розміщення ІЧ-ламп в терморадіаційній установці і швидкості руху зерноматеріалу.

2. Розроблена методика розрахунку дозволяє робити розрахунок конструкційних параметрів установок ІЧ-термообробки зерноматеріа-



лів на стадії проектування і здійснювати оптимальні налаштування – за критерієм енергоефективності і обмеженням термолабільності зерна, існуючих терморадіаційних установок (враховуючи нерівномірність радіаційного потоку) в залежності від виду термообробки.

Література

1. *Беляев М.И.* Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов : монография / *М.И. Беляев, П.Л. Пахомов.* – Х.: ХИОП : Комунист, – 1991. – 160с.
2. *Гинзбург А.С.* Инфракрасная техника в пищевой промышленности / *А.С.Гинзбург.* - М.: Пищевая промышленность, -1966.– 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. *Курдюмов. В.И.* Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / *В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин.* - Ульяновск: УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.
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. /*А.В.Лыков.*-М.: Высшая школа, 1967. –599с.
9. *Поперечный А.М.* Кінетика процесу сушіння плодкових кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / *А.М.Поперечный, 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. *Старков В.Н.* Операционное исчисление и его применение / *В.Н. Старков.* Учебн. пособ. – СПб, 2000.-65с.



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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
НАГРЕВАНИЯ ЗЕРНОВКИ В СМЕННОМ
РАДИАЦИОННОМ ПОТОКЕ**

Б.И. Котов, Р.А. Калиниченко, О.И. Романенко

Аннотация – в статье рассмотрены аналитические математические модели нагрева зерновки инфракрасным излучением при постоянном и переменном радиационном потоке для подвижного слоя зерноматериала.

**MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMICS
HEATING GRAINS PER SHIFT RADIOACTIVE FLUX**

B. Kotov, R. Kalinichenko, O. Romanenko

Summary

The article describes the analytical mathematical models of infrared heating caryopses at constant and variable radioactive flux for moving bed grains.