

11. Збірник тез доповідей II-ї міжнародної наукової конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» (19-21 березня 2015 р.) / НДІ техніки, енергетики та інформатизації АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – С. 7–9
12. Гуревич Л. Л. Импульсные системы автоматического дозирования агрессивных жидкостей / Л. Л. Гуревич, М. В. Соколов. – М.: Энергия, 1973. – 112 с.

Аннотация. Проведен анализ современного состояния и тенденции развития средств контроля и поддержания норм расхода жидкости в средствах для внесения жидких минеральных удобрений.

Ключевые слова: жидкие минеральные удобрения, дозировка, сменные нормы внесения

Annotation. The analysis of the current state and trends of controls and maintaining standards in the mass flow rate for liquid fertilizer.

Key words: liquid fertilizers, dosing, variable application rate

УДК 674.047

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ В РОЗВ'ЯЗКАХ РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНОМАТЕРІАЛІВ

Р. А. Калініченко, докторант*

Анотація. Розроблено методику визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності при граничних умовах III роду за експериментальними даними кінетики нагрівання зернівки.

Ключові слова: термообробка зерна, теплофізичні коефіцієнти, апроксимація, розподіл температури

Постановка проблеми. В технологічних процесах післязбиральної обробки зерна провідне місце займає термообробка. Теплова обробка зерна дозволяє не тільки забезпечити збереження якості зібраного зерна, а і в процесі післязбиральної термообробки її підвищити [1]. Розвиток, вдосконалення та інтенсифікація процесів теплової обробки

*Науковий консультант – доктор технічних наук В. П. Ковбаса

© Р. А. Калініченко, 2016

базуються на теорії теплопровідності складовою частиною якої є знання та аналіз теплофізичних властивостей зерноматеріалів – як об'єктів термообробки для вибору методів і оптимальних режимів процесу і на цій основі – до створення раціональної конструкції апаратів. Тобто, раціональне використання аналітичних математичних моделей теорії теплопровідності на практиці вимагає знання властивостей різних зерноматеріалів, які піддаються термообробці, а саме теплофізичних властивостей та їх кількісних характеристик [2]. Термічне сушіння і охолодження зерна – два найбільш розповсюджені способи післязбиральної термообробки зерна, які здійснюються, у переважній більшості випадків, конвективним теплообміном. При використанні теорії теплопровідності [3] для моделювання конвективного теплообміну між зерноматеріалом і оточуючим середовищем потрібно мати конкретні для кожного випадку значення теплофізичних коефіцієнтів зерна: a – температуропровідності і λ – теплопровідності. Крім їх мати значення коефіцієнта теплообміну α . Величина коефіцієнта теплообміну залежить від природи нагріваючого або охолоджуючого середовища, температури і циркуляції середовища, температури поверхні зернівки, тому цей коефіцієнт найбільш складно визначати. Тому в розв'язках рівнянь теплопровідності математичні співвідношення з коефіцієнтом теплообміну замінюють критеріальними залежностями, зокрема критерієм Біо:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (1)$$

де: α – коефіцієнт теплообміну між зернівкою і зовнішнім середовищем, λ – коефіцієнт теплопровідності зернівки, R – еквівалентний радіус зернівки. Критерій Біо характеризує теплообмін між зернівкою і середовищем при конвективній теплопередачі і може бути визначений із критеріальних емпіричних залежностей [4].

Аналіз останніх досліджень. Для визначення теплофізичних коефіцієнтів a – температуропровідності і λ – теплопровідності існують два основні підходи. Перший (традиційний) – експериментальне визначення теплофізичних характеристик відомими методами, що базуються на вирішенні крайових задач теплопровідності [5]. Другий – аналітичне визначення теплофізичних характеристик на основі теоретичних уявлень про механізми переносу теплоти в модельних структурах, характерних для реальних твердих тіл і дисперсних систем [6].

Але наявні в літературі [2, 7–9] дані по теплофізичним характеристикам зерноматеріалів отримані за переліченими

методами суттєво відрізняються, причому різниця в значеннях може досягати 50%.

Тому **метою** наших **досліджень** було розробити методику визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності (для випадку конвективного теплообміну) при мінімально можливих для цього ресурсних затратах і максимально простих експериментальних дослідженнях, що з достатньою точністю дозволять ідентифікувати процеси теплової обробки зерноматеріалів.

Результати досліджень. Форму зернівки приймемо у вигляді кулі (що особливо актуально для бобових культур), еквівалентний радіус якої, визначаємо, як радіус кулі, що має об'єм рівний об'єму середньої (за масою) частинки:

$$R_e = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}}, \quad (2)$$

де: $V = G/n \cdot \rho_m$ – об'єм однієї зернівки; G і n – відповідно маса довільної наважки зернівок і кількість зернівок в наважці, ρ_m – середня густина зернівок.

Теплообмін між зернівкою і середовищем розглядаємо за законом конвекції. Отримаємо задачу теплообміну при граничних умовах III роду. Запишемо диференціальне рівняння теплопровідності для кулі:

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

Початкові і граничні умови для конвективного теплообміну такі:

$$-\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + H[t_c - t(R, \tau)] = 0, \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad t(0, \tau) \neq \infty, \quad t(r, 0) = f(r). \quad (4)$$

Задача охолодження кулі за законом конвекції при початковому розподілі температури $t(r, 0) = f(r)$ при граничних умовах III роду буде мати рішення [2]:

$$t(r, \tau) - t_c = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\mu_n - \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\sin(\mu_n \frac{r}{R})}{r \cdot R} \int_0^R r \cdot f_1(r) \sin(\mu_n \frac{r}{R}) dr \cdot e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}}, \quad (5)$$

де: $f_1(r)$ – певна функція, що визначається із співвідношення:

$$f_1(r) = f(r) - t_c \quad (6)$$

де: t_c – температура оточуючого середовища (повітря).

Якщо температура зернівки в початковий момент часу не залежить від r :

$$t(r, 0) = f(r) = t_0 = const \quad (7)$$

то інтеграл у формулі (5) може бути знайденим і вона запишеться у вигляді:

$$t(r, \tau) - t_c = (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin(\mu_n) - \mu_n \cos(\mu_n))}{\mu_n - \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\sin(\mu_n \frac{r}{R})}{r \cdot \mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{a \cdot \tau}{R^2}}. \quad (8)$$

У формулах (5), (8) μ_n визначається з характеристичного рівняння:

$$\operatorname{ctg}(\mu) = \frac{1 - Bi}{\mu}. \quad (9)$$

Для визначення зміни середньої температури зернівки скористаємося заліжністю:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 t(r, \tau) dr. \quad (10)$$

Якщо підставити (8) в (10) і тригонометричні функції замінити через μ_n і критерій Біо відповідно до характеристичного рівняння (9) то після інтегрування отримаємо [2]:

$$\bar{t}(\tau) = t_c + (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6Bi^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)} e^{-\mu_n^2 \frac{a \cdot \tau}{R^2}}. \quad (11)$$

Зміну середньої температури зернівки за часом (кінетику охолодження чи нагрівання) нескладно визначити експериментально. Для використання експериментальних точок визначеної кінетики охолодження (нагрівання) зернівки в процесі пошуку невідомих теплофізичних коефіцієнтів (a – температуропровідності і критерію Біо) в рівнянні (11) за алгоритмом Левенберга-Макварда, апроксимуємо емпіричними залежностями розв'язки $\mu_1 - \mu_6$ трансцендентного рівняння (9). Чисельні розв'язки рівняння (9) отримувались у математичному пакеті Mathcad 14, рис. 1.

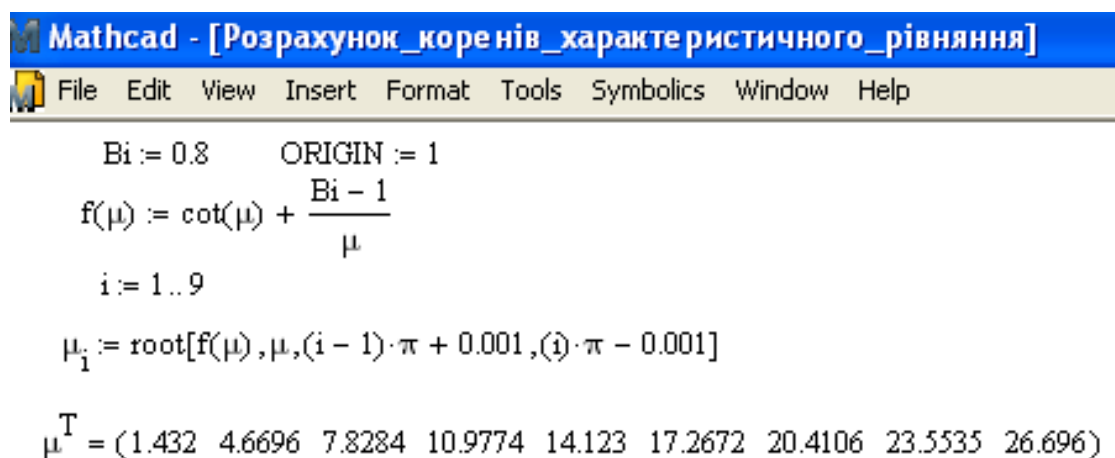


Рис. 1. Визначення коренів характеристичного рівняння (9) в математичному пакеті Mathcad.

Для μ_1 після проведених числових експериментів з різними апроксимуючими математичними структурами в пакеті Statistica 10 визначена емпірична залежність з найвищим рівнем множинної кореляції ($R=0,99981$) виду:

$$\mu_1 = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^{b_3}, \quad (12)$$

де: коефіцієнти: $b_0 = -0,090821$, $b_1 = -0,27041$, $b_2 = -1,924477$, $b_3 = 0,461608$, $Bi = 0,02 \div 10,5$. Графічна ілюстрація проведеної апроксимації наведена на рис. 2.

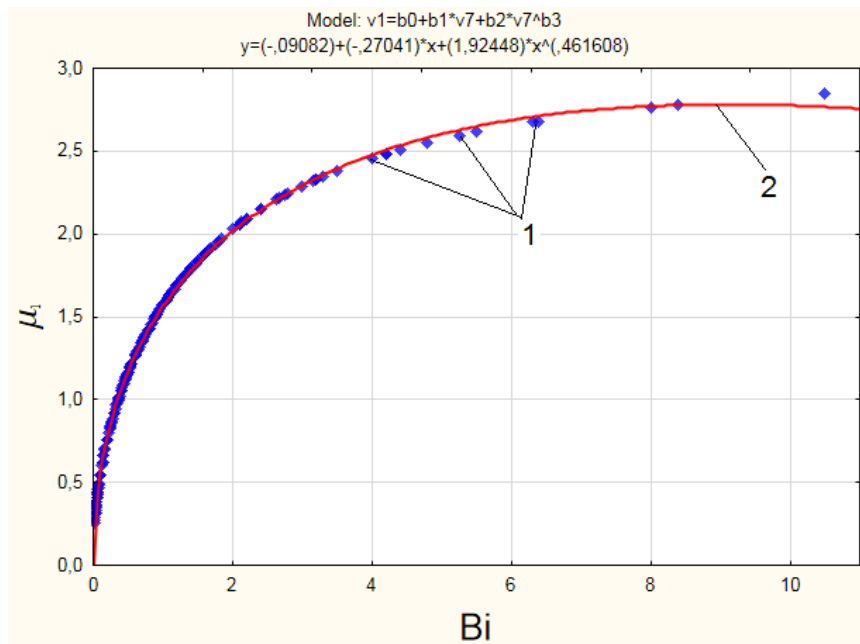


Рис. 2. Графічна ілюстрація апроксимації (♦ – 1 – точки в яких значення μ_1 є чисельними розв'язками рівняння (9), 2 – графік апроксимуючої залежності (12)).

Для $\mu_2 - \mu_6$ апроксимуючі залежності від критерію Біо визначимо у вигляді поліному другого степеня:

$$\mu = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^2. \quad (13)$$

Значення коефіцієнтів залежності (13) визначалися у пакеті Statistica 10 і наведені у табл. 1.

1.

μ	b_0	b_1	b_2	R (коефіцієнт множинної кореляції)
μ_2	4,49427	0,228132	-0,0108	0,9998
μ_3	7,72303	0,136715	-0,00428	0,9999
μ_4	10,90255	0,09611	-0,00206	0,9999
μ_5	14,06520	0,07373	-0,00112	0,9999
μ_6	17,22012	0,05973	-0,00067	0,9999

Визначені залежності $\mu_1 - \mu_6$ від Bi підставимо в залежність (11) і за допомогою вбудованої функції `genfit` у математичному пакеті `Mathcad`, що реалізовує алгоритм Левенберга-Маквардта, визначимо значення Bi та a при яких залежність (11) буде найбільш точно описувати набір заданих експериментальних точок. Початкові апріорні приблизні значення a і Bi для заданих технологічних параметрів процесу нагріву (охолодження) беремо з літературних джерел. Екранний фрагмент розрахунків a і Bi за формулами (11) – (13) в пакеті `Mathcad` зображено на рис. 3.

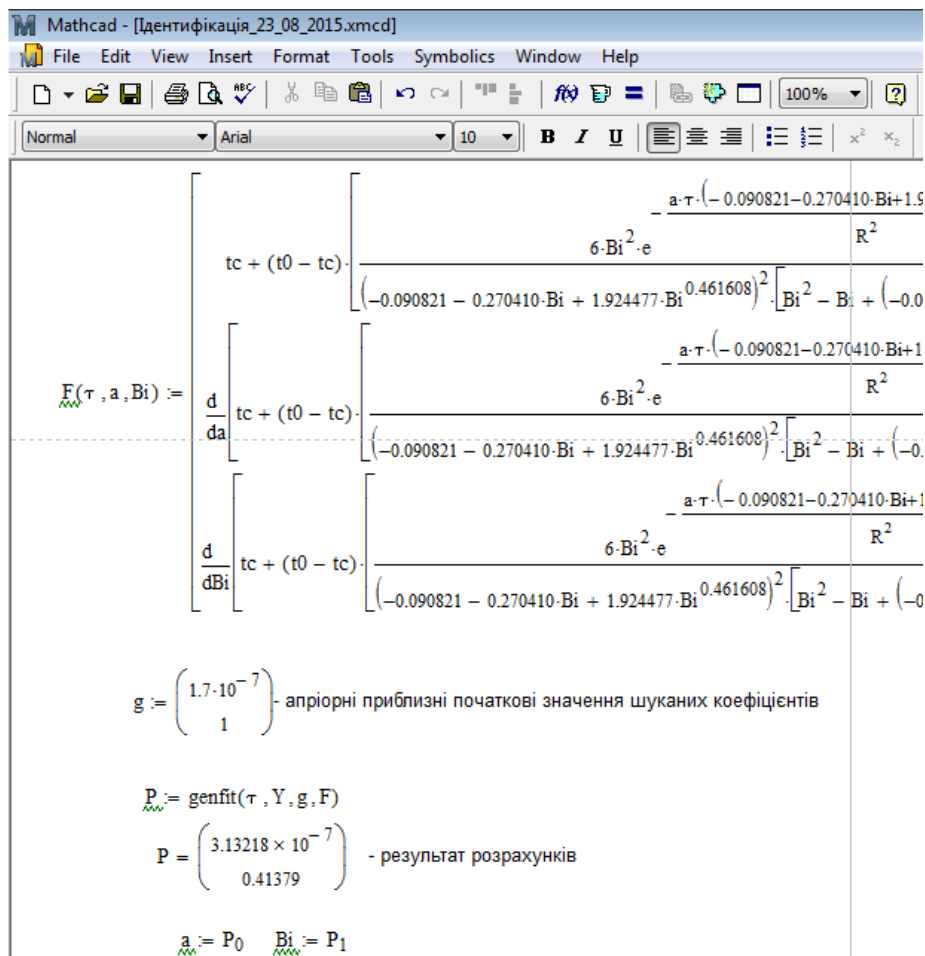


Рис. 3. Екранний фрагмент реалізації функції `genfit` у математичному пакеті `Mathcad` для визначення коефіцієнту температуропровідності a і критерію Bi .

Підставляючи отримані значення a і Bi у формулу (11) отримаємо аналітичну залежність зміни температури зернівки, рис. 4. Якщо у формулу (11) підставити отримане значення коефіцієнта температуропровідності – a , а замість Bi підставити залежність (1) то за наведеною методикою можна знайти коефіцієнти λ – теплопровідності зернівки і α – теплообміну між зернівкою і зовнішнім середовищем, рис. 5.

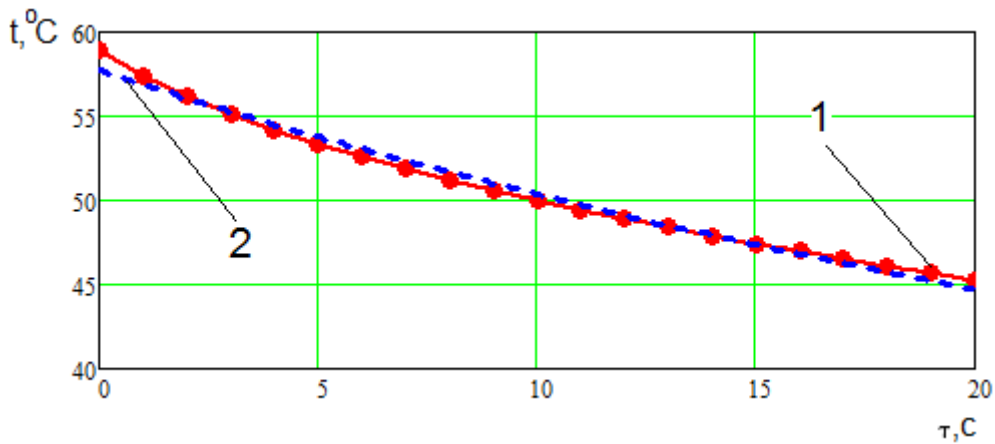


Рис. 4. Зміна середньої температури зернівки (1 – експериментальні дані, 2 – аналітична крива отримана за формулою (11)).

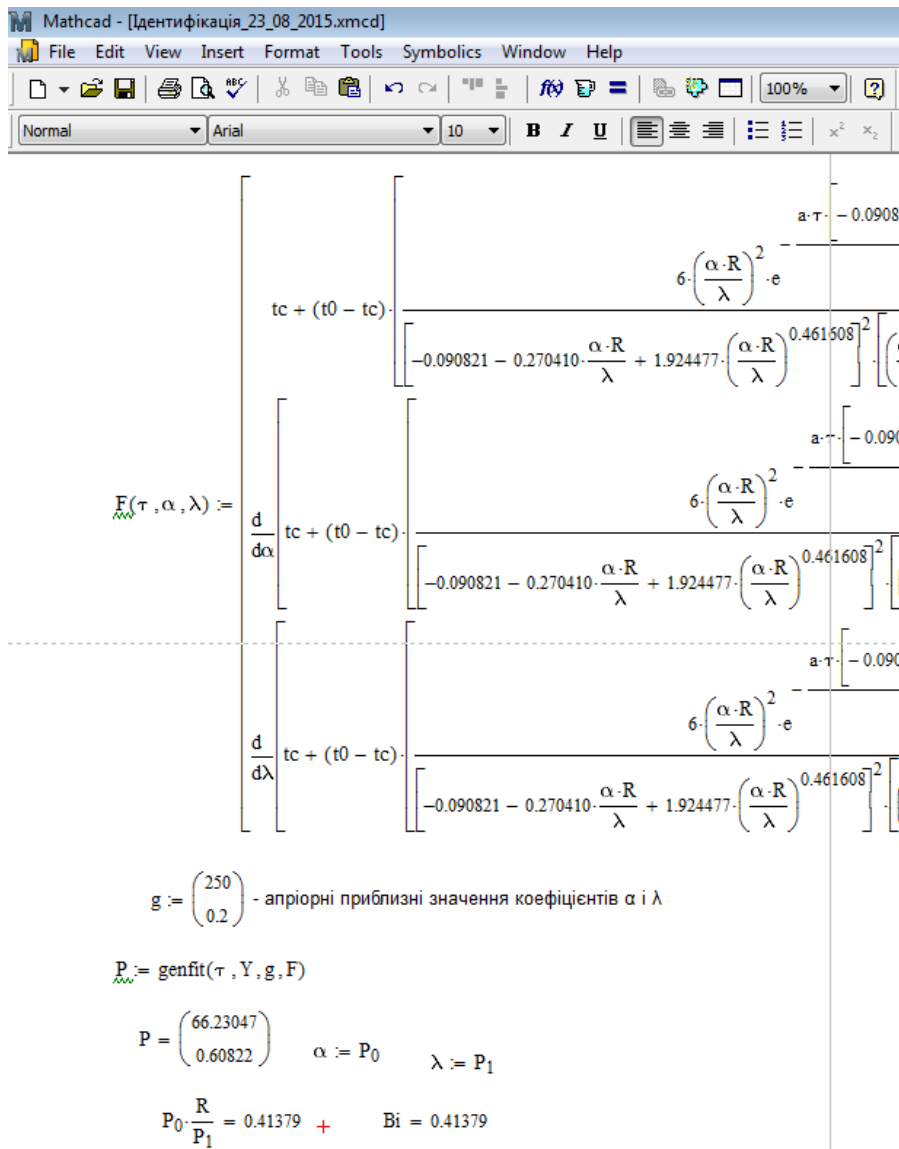


Рис. 5. Екранний фрагмент реалізації функції genfit у математичному пакеті Mathcad для визначення коефіцієнтів теплопровідності – λ і теплообміну – α .

Маючи визначені теплофізичні коефіцієнти за наведеною методикою знайдемо температурне поле зернівки в процесі охолодження за формулами (8), (12), (13) рис. 6 і рис. 7.

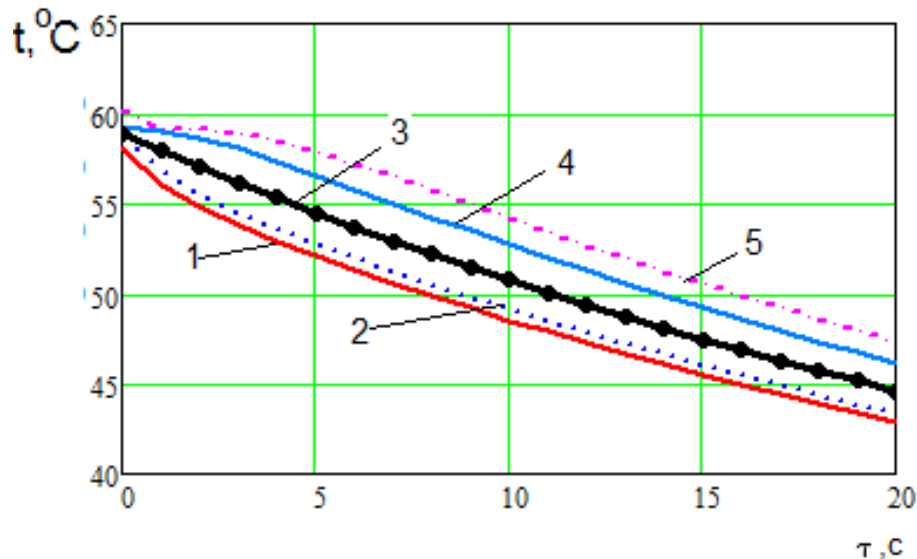


Рис. 6. Розподіл температури в зернівці в процесі охолодження (1 – $R=0.0038$ м – поверхня зернівки, 2 – $R=0.0036$ м, 3 – середня температура зернівки, 4 – $R=0.0019$ м, 5 – $R=0.0001$ м – центр зернівки).

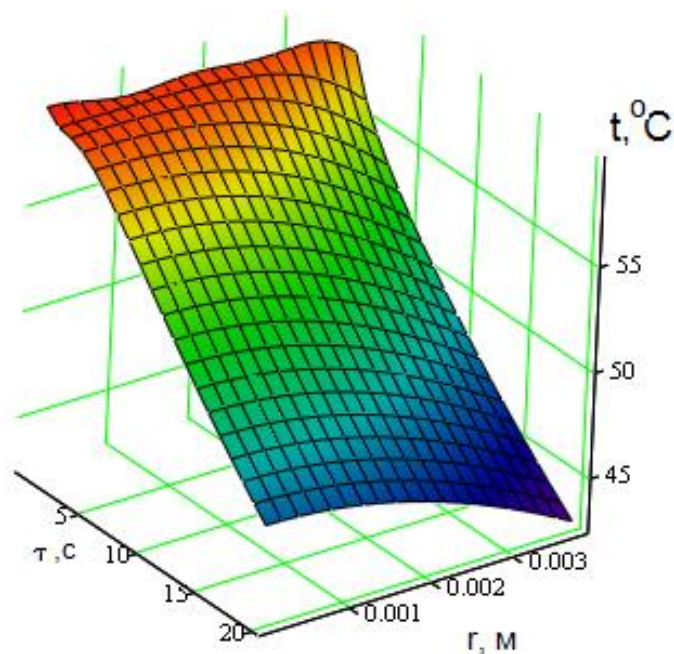


Рис. 7. Температурне поле зернівки.

Висновки

Отримана методика визначення теплофізичних коефіцієнтів у розв'язках рівнянь теорії теплопровідності дозволяє ідентифікувати

експериментально-аналітичним методом процеси термообробки зерноматеріалів з достатньою точністю для інженерних розрахунків.

Використання у розрахунках теплових процесів аналітичних математичних моделей дозволяє застосовувати ці моделі для широкого спектру зерноматеріалів і умов проведення термообробки.

Список літератури

1. 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 им. П. А. Столыпина, 2013. – 290 с.
2. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
4. Муштаев В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
5. Алексашенко А. А. Общий метод оценки погрешностей определения теплофизических характеристик из приближенных решений / А. А. Алексашенко // Труды VI Всесоюз. конф. по теплофиз. свойствам веществ. – Минск, 1978. – С. 69–70.
6. Колпащиков В. Л. Теоретические исследования теплофизических свойств на основе термодинамической теории / В. Л. Колпащиков, А. И. Шнип // Труды VI Всесоюз. конф. по теплофиз. свойствам веществ. – Минск, 1978. – С. 69–70.
7. Бобкова Н. А. Исследование теплофизических свойств зерна / Н. А. Бобкова // Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1956. – 18 с.
8. Герчесов Б. А. Теплофизические свойства зерна пшеницы в зависимости от влажности / Б. А. Герчесов, Т. Н. Серых // Изв. ВУЗов. Пищевая технология. – 1977. – №1. – С. 150–151.
9. Старовойтов В. Н. Исследование теплофизических свойств зерна пленчатых крупяных культур с целью оптимизации гидротермической обработки на крупозаводах / В. Н. Старовойтов // Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1978. – 27 с.

Аннотация. *Разработана методика определения теплофизических коэффициентов в решениях уравнения теплопроводности при граничных условиях III рода экспериментальных данных кинетики нагрева зерновки.*

Ключевые слова: *термообработка зерна, теплофизические коэффициенты, аппроксимация, распределение температуры*

Annotation. *Developed method of determining the physical characteristics in the heat equation with boundary conditions of three kinds of experimental data of kinetics of heating caryopses.*

Key words: *heat treatment of grain, thermal coefficients, approximation, temperature distribution*