

Іванов О. М.

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти,
email: oleg.ivanov@pdau.edu.ua
*Полтавський державний аграрний університет,
м.Полтава, Україна*

DOI:<https://doi.org/10.31210/ab2026.10>

МОДЕЛЮВАННЯ САМОЗІГРІВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАС ЯК РЕЗУЛЬТАТУ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Самозігрівання зернової маси є одним із визначальних факторів втрат при тривалому зберіганні зернових і олійних культур. У практиці експлуатації зерносховищ це явище проявляється у вигляді локальних зон підвищеної температури, що супроводжуються погіршенням якості продукції, розвитком мікрофлори та зростанням ризику самозаймання. Причиною самозігрівання є сукупність біохімічних процесів, передусім дихання зерна та діяльності мікроорганізмів, які мають екзотермічний характер. За умов недостатнього тепловідведення тепло акумулюється в зерновій масі, що призводить до розвитку теплового розгону. Подібні явища підтверджуються сучасними дослідженнями температурних полів у зернових масивах, де виявлено формування локальних зон перегріву та їх зв'язок із біологічною активністю зерна [1,2].

Метою роботи є розробка математичної моделі самозігрівання зернової маси як пористого дисперсного середовища з урахуванням внутрішніх джерел теплоти та процесів теплопереносу. Зернова маса розглядається як ефективно однорідне середовище, що характеризується узагальненими теплофізичними параметрами — густиною, теплоємністю та теплопровідністю. У такій постановці основними механізмами переносу теплоти є теплопровідність та, за наявності повітряного потоку, конвективний теплообмін, тоді як джерелом енергії виступає внутрішнє тепловиділення біологічного походження. Відомо, що ефективність тепловідведення суттєво залежить від конструкції сховища та режимів аерації, що підтверджується експериментальними дослідженнями різних систем зберігання зерна [4,5].

Математичний опис процесу базується на рівнянні нестационарного теплопереносу з об'ємним джерелом теплоти:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q,$$

У даному випадку температура є функцією часу та просторових координат, а інтенсивність тепловиділення визначається активністю біологічних процесів у зерновій масі. На відміну від інертних матеріалів, зерно характеризується залежністю швидкості тепловиділення від температури, що обумовлює нелінійний характер задачі.

Для адекватного відображення фізики процесу інтенсивність внутрішнього тепловиділення доцільно задавати експоненційною залежністю від температури:

$$q = q_0 e^{\beta T}.$$

Такий підхід дозволяє описати ефект прискорення біохімічних і мікробіологічних процесів при нагріванні, що добре узгоджується з сучасними уявленнями про механізми самонагрівання біомаси та зернових матеріалів [3]. Нелінійність цієї залежності обумовлює можливість виникнення нестійких температурних режимів навіть при відносно незначних початкових відхиленнях.

Аналіз отриманої моделі показує, що стійкість температурного режиму визначається співвідношенням між тепловиділенням і тепловідведенням. Для оцінки умов переходу до нестійкого режиму доцільно використовувати безрозмірний параметр, аналогічний критерію Франка–Каменецького:

$$\delta = \frac{q_0 L^2}{\lambda T_0}.$$

Зі зростанням об'єму зернового насипу ефективність тепловідведення знижується, що сприяє накопиченню теплоти та формуванню осередків перегріву. Як показують сучасні дослідження, геометричні параметри насипу, умови вентиляції та тип сховища істотно впливають на розвиток температурних полів і швидкість самозігрівання [4,5].

Отримані результати дозволяють зробити низку узагальнень. Найбільш небезпечні зони формуються у центральних частинах зернового насипу, де тепловідведення є обмеженим. Підвищення вологості зерна значно інтенсифікує мікробіологічну активність і збільшує інтенсивність тепловиділення. Крім того, навіть незначне підвищення температури може запускати лавиноподібний процес самозігрівання, що підтверджується експериментальними та чисельними дослідженнями температурної динаміки зернових мас [1].

Практичне значення запропонованої моделі полягає у можливості прогнозування розвитку самозігрівання та обґрунтування ефективних режимів зберігання. Вона дозволяє визначати критичні умови зберігання, оптимізувати параметри вентиляції та підвищити ефективність систем моніторингу. Поєднання математичного моделювання з сучасними методами аналізу температурних полів і інтелектуальними алгоритмами обробки даних відкриває перспективи створення автоматизованих систем контролю стану зернової маси [1,4].

Таким чином, моделювання самозігрівання зернових мас на основі рівнянь теплопереносу з внутрішніми джерелами теплоти є ефективним інструментом для аналізу теплового стану зерносховищ і забезпечення безпечного та якісного зберігання аграрної продукції.

Список використаних джерел

1. Cui H., Zhang Q., Zhang J., Wu Z., Wu W. Classification of grain storage inventory modes based on temperature contour map of grain bulk using back propagation neural network. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(5). 451. DOI: 10.3390/agriculture11050451.

2. Moirangthem T. T., Balik O-D. Disinfestation of stored grains using non-chemical methods: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 107(3). 101771. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.11.002.

3. Yao C., Sheng C. Review on self-heating of biomass materials: understanding, hazards, and mitigation. *Energy & Fuels*. 2022. Vol. 36(1). P. 3–19. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c03369.

4. Yousuf H. M. B., Yasin M., Rebouh N. Y., Aldawood A. S., Ali U., Rosentrater K. A. Comparative assessment of conventional and hermetic storage systems for wheat grains. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). P. 1-22. DOI: 10.1038/s41598-025-18340-z.

5. Zhiwen Z., Yan C., Xilong Y., Guanpeng Q., Weihua C., Shiyu D. A Case Study on Grain Storage in Underground Granaries with Different Lining Materials. *Applied Food Research*. 2026. 102045. DOI: 10.1016/j.afres.2026.102045.