

МОДЕЛЬ ПЛАСТОВОГО САМОЗІГРІВАННЯ В ЗЕРНОСХОВИЩАХ

Вступ

З погляду енергозбереження галузь зернопереробки потребує якісного оновлення. Особливо це стало відчутно в період енергетичної та економічної кризи. Цьогорічні високі врожаї зернових в Україні ще більш загострили це питання, адже великі об'єми зернової сировини потребують якіснішого контролю та надійнішого збереження, а діючих автоматичних систем недостатньо. Крім того, більшість технологічних процесів зернопереробки та зернозбереження є високоенергозатратними. Так, наприклад, процес сушіння вологого зерна потребує високих енерговитрат, до того ж в першу чергу традиційно дорогих видів рідкого і газоподібного палива та електроенергії. Ціна енергоматеріалів у вартості такого сушіння становить 80...90%. Збільшені об'єми зерна та його обробка вимагають впровадження в господарствах ефективних, відносно дешевих технологій, які дозволять скоротити витрати енергії на науково обґрунтованій основі.

Технологічним прийомом, що забезпечує суттєве зниження енергії в галузі зернозбереження, є активне вентилування, яке набуло широкого використання в елеваторно-складському господарстві. Причиною цього є заготівля великих об'ємів зерна, яке можна обробляти без термічного сушіння. Виявилось, що з певною вологою зерно, як фуражне так і харчове, можна поступово підсушувати, охолоджувати, консервувати, аерувати залежно від його стану і призначення. Крім того, цей прийом не потребує складного обладнання чи великих капітальних вкладень. Тому не випадково, що на базі активного вентилування були розроблені технології, які широко застосовуються при обробці основних об'ємів високоякісного зерна у ряді аграрно розвинутих країн (США, Канада, Австралія) [2].

Для знаходження оптимальних режимів вентилування необхідне детальне вивчення процесу зберігання зерна і тих факторів, що є вирішальними при визначенні параметрів роботи системи.

Розв'язання цієї проблеми неможливе шляхом емпіричного аналізу різних технологічних чи конструкторських рішень і пропозицій. Ефективним інструментом пошуку в даному випадку може бути тільки математичне моделювання комплексу процесів, що протікають в реальній системі, з подальшим дослідним опрацюванням рішень і схем.

Для збереження якості зерна з моменту його надходження в зерноскладах необхідно встановити систематичний контроль за температурою, вологістю насіння і навколишнього повітря, органолептичними показниками якості насіння (запахом, кольором), зараженістю. Це дозволить виявити початок несприятливих процесів і вжити необхідних заходів. Адже відсутність достовірної інформації про стан зернової маси усередині сховища за вищевказаними параметрами призводить до ускладнення завдання зберігання без втрат і нерідко до ухвалення запізнених технологічних рішень щодо усунення процесів деструкції і погіршення якості зерна і самозігрівання, що вже почалися. Хоча це погіршення звичайно відбувається повільно на початку процесу (35...120 діб) при вологості нижче критичної (14%) і температурі 10...25°C, повна втрата якості зерна, що зберігається, може відбутися при несприятливому поєднанні вищезазначених чинників за лічені дні [1].

За цих умов пошук нових підходів до проблеми раннього діагностування ділянок з підвищеною фізіологічною активністю та вогнищ самозігрівання і на сьогодні не втрачає свою актуальність.

Постановка задачі. Представити математичну модель розподілу температурних полів у пласті зерна з метою розробки і наукового забезпечення оптимальних режимів його зберігання шляхом стабілізації температурних показників у сховищах та організації вчасного активного вентилування.

Запропонована математична модель дозволить проводити систематичні розрахунки параметрів процесу розповсюдження тепла у зерносховищі.

Найважливішим показником стану зерна під час зберігання є температура. Правильно організований контроль цього параметра дозволяє вчасно виявити вогнища самозігрівання зерна і попередити його псування [3].

Визначимо основні фактори, що впливають на підвищення температури зерна.

1 Аеробне дихання. Зерно, як і всі живі організми, дихає. В результаті чого виділяється тепло, яке з причини низької теплопровідності зернової маси накопичується і призводить до зростання температури.

2 Підвищена вологість. Даний фактор інтенсифікує процес дихання, тим самим сприяючи подальшому підвищенню температури.

3 Термовологопровідність. Температурний градієнт завжди має місце, оскільки спричинюється різницею температур зовнішнього та внутрішнього (на поверхні, біля стінок і в глибині зернового насипу) середовищ. Це призводить до виникнення небезпечних вогнищ самозігрівання.

Таким чином, самозігрівання виникає в результаті інтенсивного дихання зерна, активного розвитку мікроорганізмів і поганої теплопровідності зернових мас. Навіть у насипі заввишки 1 м температура підвищується до 55...60°C. У неочищених від домішок зернових масах з вологістю більше 18 ... 20% і за температури вище 10°C процес самозігрівання протікає особливо бурхливо, коли температура зерна досягає 24...25°C. При цьому створюються оптимальні умови для розвитку пліснявих грибів і різко зростає інтенсивність дихання самого зерна. За 5... 6 діб свіжозібране зерно може бути зовсім зіпсованим, оскільки втрачає не тільки посівні, але і харчові та фуражні якості [6].

Візуальні дослідження формування структури зернової маси в зерносховищах при їх завантаженні чи відвантаженні виявили особливості пошарової стратифікації розміщуваних партій зерна як в радіальному напрямі, по вертикальній осі сховища, так і напрямних конусної поверхні за наявності перепускних отворів (рис. 1). Отже, місце дислокації вогнища самозігрівання може бути довільним – у верхньому шарі, в нижній третині силосного сховища, вертикальне пластове або гніздове в застійних ділянках зернової маси .

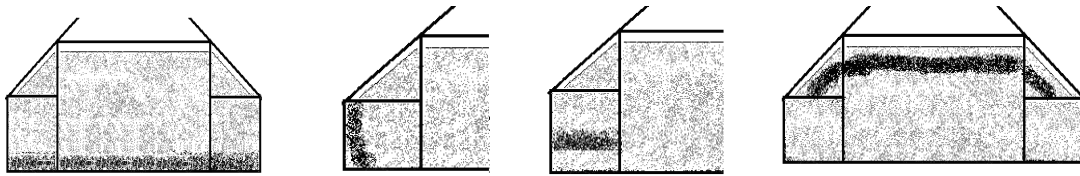


Рис.1. Місця дислокації вогнищ самозігрівання

Аналізуючи температурний процес, розглядають різні форми вогнищ самозігрівання. Це може бути циліндр, куля або пласт. Практично немає різниці в аналізі динаміки зміни температури в зерновій масі залежно від форми вогнища самозігрівання. Тому можна вибрати одну з них - пласт зерна товщиною в один метр і розглянути характер розвитку температури від такого вогнища самозігрівання в глибині зернового насипу [5].

За модель описаних вище процесів візьмемо нестационарну задачу теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла.

Для того, щоб знайти температурне поле тіла у будь-який момент часу, тобто вирішити диференціальне рівняння, треба знати геометричну форму тіла і крайові умови (початкові і граничні).

Розглянемо конкретний випадок, коли процес самозігрівання відбувається у глибині насипу. Форму джерела тепла в процесі самозігрівання зернової сировини ми розглянемо у вигляді пласта. В такому випадку задача теплопровідності є двовірною [3]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v(x, y), \quad (1)$$

де ρ, λ, c - густина, теплопровідність та питома теплоємність зерна;

x, y - декартові координати;

T - температура;

q_v - тепловий потік;

τ - час .

Початковими умовами є розподіл температури в початковий момент часу, тобто

$$T_{\tau=0} = T_0(x, y). \quad (2)$$

Граничні умови визначають закон взаємодії між навколишнім середовищем і поверхнею тіла. В даному випадку розглядають граничні умови третього роду:

$$\left[\mp \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_{0x,k} T \right]_{x=0, l_x} = 0, \quad (3)$$

$$\left[\mp \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_{0y,l_y} T \right]_{y=0, l_y} = 0, \quad (4)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі на бокову поверхню.

Вирішення даної задачі аналітичним способом дозволяє розв'язати її з великою кількістю припущень. Тому доцільніше використати чисельні методи, в даному випадку – кінцево-різницевий метод апроксимації рівняння (1) [4].

При побудові різницевих схем для багатомірних областей зазвичай використовують метод балансу. Згідно з цим методом після визначення області рішення її розбивають на елементарні комірки, для яких записують рівняння теплового балансу. Після цього проводиться апроксимація членів рівняння шляхом вираження їх через значення сіткової функції. В результаті матимемо повну схему алгебраїчних рівнянь, що визначає рішення поставленої задачі.

Отже, сформуємо нерівномірну просторову сітку (рис.2). Елементарні комірки для всіх внутрішніх вузлів побудуємо, відступивши від кожного вузла на половину кроку:

$$\{x_n, y_m\}_{n=1, m=1}^{N, M}, \quad h_{x_n} = x_{n+1} - x_n, \quad h_{y_m} = y_{m+1} - y_m,$$

$$\text{та рівномірну сітку по часу: } \{\tau_j\}_{j=0}^J, \quad \tau_j = j \Delta \tau.$$

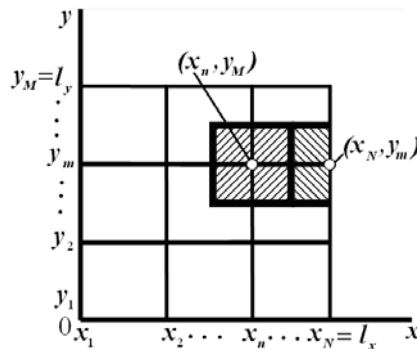


Рис.2. Нерівномірна просторова сітка

Грані елементарних об'ємів розмістимо посередині між вузловими точками.

Складемо кінцево-різницеве рівняння для будь-якого внутрішнього елементарного об'єму, який містить вузлову точку (x_n, y_m) . Цей об'єм оточений чотирма сусідніми. Тому в рівнянні теплового балансу слід враховувати чотири теплових потоки від сусідніх об'ємів.

Закон збереження енергії для елементарної комірки можна виразити згідно з такою схемою, де усі складові відносяться до одиниці площі поперечного перерізу і виражені у Вт/м²:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{потік від} \\ \text{комірки (n+1)} \\ \text{у комірку n} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{потік від} \\ \text{комірки (n-1)} \\ \text{у комірку n} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{потік від} \\ \text{комірки (n+1)} \\ \text{у комірку m} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{потік від} \\ \text{комірки (n-1)} \\ \text{у комірку m} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{потік від} \\ \text{комірки n} \\ \text{у середовище} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{потужність} \\ \text{джерела} \\ \text{комірки n} \end{array} \right\} = 0$$

Отже, рівняння балансу буде мати вигляд:

$$\int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \int_{y_{m-1/2}}^{y_{m+1/2}} c \rho (T^j - T^{j-1}) dy dx = \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \left(-P_{n+1/2} + P_{n-1/2} - P_{m+1/2} + P_{m-1/2} + \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \int_{y_{m-1/2}}^{y_{m+1/2}} q_n dy dx \right) d\tau. \quad (5)$$

Розрахунок теплових потоків $P_{n\pm 1/2}, P_{m\pm 1/2}$ проводиться згідно з такими виразами:

$$P_{n+1/2} = \lambda \frac{(u_{n,m} - u_{n+1,m})(h_m + h_{m-1})}{h_n \cdot 2},$$

$$P_{m-1/2} = \lambda \frac{(u_{n,m-1} - u_{n,m})(h_n + h_{n-1})}{h_m \cdot 2}, \quad (6),$$

де $u_{n,m}, u_{n+1,m}, u_{n,m-1}$ - наближені значення температури у відповідних точках;

$\frac{(h_m + h_{m-1})}{2}$ та $\frac{(h_n + h_{n-1})}{2}$ - множники, що відповідають граням елементарного об'єму, через які проходять теплові потоки.

Тоді для неявної схеми маємо:

$$c\rho \frac{(h_n + h_{n-1})(h_m + h_{m-1})}{4} \cdot \frac{(u_{n,m}^j - u_{n,m}^{j-1})}{\Delta\tau} = \lambda \left[\frac{u_{n+1,m}^j - u_{n,m}^j}{h_n} - \frac{u_{n,m}^j - u_{n-1,m}^j}{h_{n-1}} \right] \cdot \frac{(h_m + h_{m-1})}{2} + \lambda \left[\frac{u_{n,m+1}^j - u_{n,m}^j}{h_m} - \frac{u_{n,m}^j - u_{n,m-1}^j}{h_{m-1}} \right] \cdot \frac{(h_n + h_{n-1})}{2} + \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} \int_{y_{m-1/2}}^{y_{m+1/2}} q_v dy dx. \quad (7)$$

Замінюючи в правій частині індекс часу j на $(j-1)$, отримаємо явну схему.

За допомогою методу балансу складаємо різниці рівняння і для граничних елементарних об'ємів. При цьому в рівняннях теплового балансу слід враховувати теплові потоки на межі області в навколишнє середовище. Наприклад, для об'єму, що прилягає до межі $x = l_x$ і містить вузол x_n, y_m (рис.2), отримаємо :

$$c\rho \frac{h_{N-1}(h_m + h_{m-1})}{4} \cdot \frac{(u_{N,m}^j - u_{N,m}^{j-1})}{\Delta\tau} = \left[-\alpha_{lx} u_{N,m}^j + \lambda \frac{u_{N-1,m}^j - u_{N,m}^j}{h_{N-1}} \right] \cdot \frac{(h_m + h_{m-1})}{2} + \lambda \left[\frac{u_{N,m+1}^j - u_{N,m}^j}{h_m} - \frac{u_{N,m}^j - u_{N,m-1}^j}{h_{m-1}} \right] \cdot \frac{h_{m-1}}{2} + \int_{x_{N-1/2}}^x \int_{y_{m-1/2}}^{y_{m+1/2}} q_v dy dx. \quad (8)$$

Отже, розв'язок нелінійного диференційного рівняння з частковими похідними зводиться до вирішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Оскільки задача нестационарна, то систему необхідно вирішувати на кожному часовому кроці.

Практично для рішення (7) можна використовувати різні ітераційні методи [5], проте всі вони потребують багатоваріантних розрахунків при дуже великій кількості кроків по часу, що диктує необхідність застосування високопродуктивних засобів обчислення, як наприклад паралельних систем, що засновані на нейромережовій парадигмі.

Використання даної моделі дозволить провести експериментальні дослідження в умовах, які максимально наближені до натурних, що дає можливість ґрунтовно вибрати проектно-конструкторське і технологічне рішення щодо оптимальної кількості датчиків температури та геометрії їх розміщення. Адже якщо крок розміщення датчиків є дуже великий, то система може не дати достовірної інформації про підвищення температури в сировині. В свою чергу, надмірна кількість термодатчиків призведе до ускладнення та підвищення вартості системи термоконтролю.

Крім того, експериментальні дослідження, які будуть проводитись на основі даної моделі, дозволять оптимізувати режими роботи систем активного вентилявання, доцільність якого визначається за показником перевищення певного значення температури.

Висновки

Таким чином, за допомогою створеної моделі можна провести аналіз та дослідження розподілу температури у зерносовищі з метою виявлення процесів самозігрівання. Це дозволить в подальшому провести оптимізацію роботи системи вентилявання та діагностики температури, що в кінцевому результаті призведе до зниження енерговитрат шляхом оперативного управління електрообладнанням.

Література

1. Вобликов Е.М., Станкевич Г.Н. Современные технологии хранения зерна. – Хранение и переработка зерна, 2005г. май №5 (71) С.36-38.
2. Кирпа М. Використання енергії в процесах зберігання і обробки зерна. Інститут зернового господарства УААН (<http://www.lol.org.ua/ukr/showart.php?id=18772>).
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. – 598 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем – М. : Наука, 1989. – 616 с.
5. Федоренко В.С. . «Автоматическая система прогнозирования самосогревания зерна» // «Хлебопродукты», №3, 2003г.