

**М.М. Петренко, проф., канд.техн.наук; Т.Г.Сабірзянов, проф., д-р техн. наук,
І.О. Скриннік, ас., В.М. Сало, проф., д-р техн. наук, М.О. Скриннік, ас.,
Д.В. Богатирьов, доц., канд.техн.наук**
Кіровоградський національний технічний університет

Модель переносу тепла в зерносушарці каскадного типу від каскаду до шару насіння

В статті розглянуто модель переносу теплоти від каскаду до шару насіння в зерносушарці каскадного типу. Наведені дослідження, які дозволяють теоретично визначити перенос теплоти від каскаду до шару насіння в зерносушарці з урахуванням особливостей руху насіння.
каскад, псевдорозріджений шар насіння, нагріваюча поверхня, теплопровідність

Сушіння зерна є основною технологічною операцією з приведення його в стійкий стан. Необхідність і своєчасність штучного сушіння зернових культур викликана підвищеною післязбиральною їх вологістю. До 80% врожаю всіх зернових культур, що надходять на хлібозбиральні підприємства або на токи господарств, мають підвищену вологість під час збирання до 35-45% і обов'язково потребують додаткового сушіння. Тому забезпечення стійкого збереження і стабілізація якості насіння можуть бути досягнуті тільки своєчасним, якісним та інтенсивним сушінням [1].

На сьогодні запропоновано багато технічних рішень, які реалізують технологічний процес сушіння насіння та зерна. Але слід відмітити, що результат більшості з них не відповідає агротехнічним вимогам або економічно не ефективні [2].

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету розроблено конструкцію зерносушарку каскадного типу, при проведенні експерименту було встановлено, що тепло передається не тільки конвективно (від нагрітого агента сушіння до шару насіння), але і кондуктивно (від нагрітого каскаду до шару насіння), та по результатам експерименту було побудовано модель переносу теплоти від каскаду до шару насіння [3].

При розробці моделі переносу теплоти виходили з того, що значення коефіцієнта тепловіддачі α_{\max} від каскаду до шару насіння близьке по величині і для псевдорозріджених і для рухомих шарів твердих насінин однакового розміру. Це обумовлено загальним фізичним механізмом переносу теплоти, закладеним в основу інтенсифікації зовнішнього теплообміну. Інтенсивність тепловіддачі від агента сушіння до частинки насінин в першу чергу визначається частотою зміни насінин, котрі знаходяться на каскаді сушарки та насінинами з основного об'єма шару, а спосіб генерації руху насінин з точки зору теплопереноса, відіграє другорядну роль. Крім того, в розвинутому псевдорозрідженому середовищі крупні насінини першого ряду, при безпосередньому дотиканні до каскаду мають лише одну точку контакту – з нагріваючою поверхнею, а контактом один з одним можна знехтувати, оскільки шар насіння вже є розрідженим, тому і частинки майже не дотикаються між собою.

Тому центральне місце у моделюванні зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах зайняв аналіз одиничного акта теплопередачі–від нагріваючої поверхні каскаду сушарки співударної з нею одиничної насінини, яка відіграє роль ефективного стоку тепла. Насінини і агент сушіння відбирали теплоту від нагріваючого елемента конструкції (каскаду) та виносили її в основну зону шару конвективним переносом. За основу прийняли ідею аддитивності загального теплового потоку q , що передається від каскаду до шару (або навпаки).

Через велику теплопровідність насінин (наявність вологи в зерні зумовлює високу теплопровідність насінини λ_H), в порівнянні з теплопровідністю агента сушіння λ_a , велика частина теплоти, перенесеної від нагрітого каскаду до насінини, проходить крізь невелику площу дотику F_{m0} насінини з поверхнею каскаду, F_{m0} оточуює п'ятно контакту (рис.1), а основним термічним опором був повітряний зазор товщиною δ між каскадом та частинкою. Градієнт температури в цьому зазорі був набагато більшим, ніж в об'ємі насінини. Питома потужність теплового потоку q від поверхні до насінини збільшувалась зі зменшенням δ .

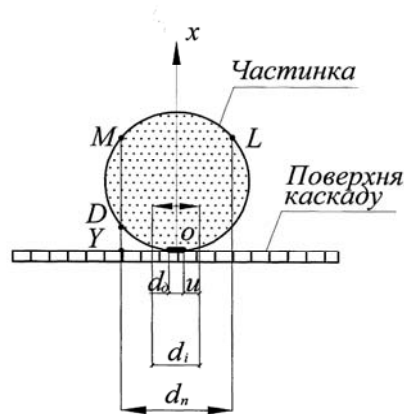


Рисунок 1 –Схема визначення контакту частинки з каскадом

Біля п'ятна контакту величина q виявилась настільки великою, що з'явився градієнт температури і в насінині. Через велику λ_H тепловий потік інтенсивно розподілявся по напівсфері від точки контакту. Величина q при віддалені від п'ятна різко зменшилась, що призвело до відповідного зменшення температури. Таким чином градієнт температури спрямований від зазору та тонкого поверхневого шару частинки насінини. За межами цього шару температура насінини T_n однакова, тобто рівномірно розподілена.

Визначимо вираз для потужності повного теплового потоку Q з урахуванням температур в насінинні, котра знаходиться на протязі часу $\tau_K = 0.9 \dots 3.0$ с в контакті з каскадом. Враховуючи, що п'ятно контакту має форму кола діаметром d_0 тоді площа дотику $F_{m0} = \pi d_0^2 / 4$.

Величину d_0 визначали за формулою[4]

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{1 - \mu_K^2}{E_K} - \frac{1 - \mu_H^2}{E_H} \right) P \frac{d}{2}}, \quad (1)$$

де μ_K і μ_H - коефіцієнти Пуассона (матеріал каскаду – сталь; частинка – зерно);

E_K та E_H - модулі пружності (каскаду та частинки);

P - найбільший тиск між контактуючими тілами, Н/м;

d – діаметр насінини, м.

Ефективна площа п'ятна контакту насінини – насінини та насінини - каскад дуже мала. Умовно розбиваємо систему «каскад - насінини» на ряд коаксіальних циліндрів i (рис.1) зовнішній діаметр котрих $d_i = d_K + 2ib$,

де b - радіальний зазор між двома ближніми циліндрами (приймаємо $b = const$),

$i=1,2,3, \dots, n$ починаючи з циліндра, зовнішній діаметр якого d_0 і закінчуючи циліндром із зовнішнім діаметром d_n , співвісних з віссю ОХ та направлених по нормалі до каскаду.

Кондуктивний тепловий потік q визначали з рівняння

$$q = \sum_{i=1}^n q_i + q_{\phi} \quad (3)$$

Так як тепловий потік в зоні контакту направлений по нормалі до нагріваючого каскаду, то задачу можливо вважати одномірною.

Кондуктивний тепловий потік визначили розв'язком рівнянь нестационарної теплопровідності тіл, що дотикаються при граничних температурах двох дотикаючих на півпросторів з тепловим контактом лише в колі діаметром d_0 .

Густина кондуктивного теплового потоку, що передається насінині за час τ , визначаємо по закону Фур'є на поверхні ($x = 0$) – початок координат (т.дотику)

$$q_{\phi} = -\lambda_n \frac{\partial T_n(x, \tau)}{\partial x} = -\frac{\lambda_n (T_{ш} - T_k)}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_k c_k \rho_k}}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{2} \alpha_n \tau} \right) = \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\pi \tau}} \frac{(T_k - T_{ш})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_k c_k \rho_k}}} \quad (4)$$

де λ_n - теплопровідність насінини, [кДж/(м К)];

λ_k - коефіцієнт теплопровідності каскаду, [кДж/(м К)];

c_k - питома теплоємність каскаду, (Дж/(кг К));

c_n - питома теплоємність насінини, (Дж/(кг К));

ρ_k - густина каскаду, кг/м³;

ρ_n - густина насінини, кг/м³;

$T_{ш}$ - температура шару насіння; °С;

T_k - температура каскаду, °С;

T_n - температура насінини, °С;

α_n - коефіцієнт температуропровідності матеріалу насінини,

$$\alpha_n = \lambda_n / c_n \rho_n \quad (5)$$

$\lambda_k c_k \rho_k$ - коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність та густина матеріалу каскаду, відповідно.

Середнє час τ_k - це час за який кількість теплоти, що сприймається однією частинкою пройде крізь площу $F_{m\delta}$

$$Q_{\phi} = \int_0^{\tau_r} \int_F q_{\phi} dF d\tau = \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n \tau_k}{\pi}} F_{m\delta} \frac{(T_k - T_{ш})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_k c_k \rho_k}}} \quad (6)$$

де $F_{m\delta}$ - площа точки дотику насіння з каскадом, м².

Розглянемо підвід теплоти до частинки насінини крізь повітряну лінзу та шаровий пояс. Температура поверхні частинки в цій зоні вже не була рівна T_k через великий контакт термічного опору. Градієнт температури в плівці агента набагато більше, ніж в об'ємі частинки. Необхідно знати падіння температур в повітряному зазорі товщиною δ .

Для i коаксіальних циліндрів з товщиною стінки b залишилося в силі все вищесказане для передачі теплоти крізь площу $F_{m\partial}$. Основна відмінність лише в різній товщині повітряного зазору δ_i . Для кожного елемента системи «каскад – повітряний зазор – насінина» застосовували рівняння для системи обмеженого (повітряний зазор) та полуграничного (частинка).

Площа теплового контакту умовно обмежена циліндричною поверхнею діаметром d_n , при якому $YD=YM$ (рис.1).

В цьому випадку $\delta_n = d/3$, а граничний діаметр циліндричної поверхні

$$d_n = d(2\sqrt{2}/3) \quad (7)$$

Товщина повітряного зазору

$$\delta_i = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \left[\frac{\sqrt{2}}{3}d - (n-i)b \right]^2}, \quad (8)$$

де $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Виходячи з рівності потоків тепла, густину кондуктивного теплового потоку q_i , передаваного частинці крізь повітряний зазор товщиною δ_i за час τ_k .

$$\begin{aligned} q_i &= -\lambda_n \frac{\partial T_n(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_i} = -\lambda_n (T_k - T_w) \frac{\partial}{\partial x} \times \\ &\times \left\{ \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} - \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}}{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} + \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}} \right)^{k-1} \operatorname{erfc} \left[\frac{(x - \delta_i) + (2k-1)\delta_i \sqrt{\frac{a_n}{a_a}}}{2\sqrt{a_n \tau}} \right] \right\} \Big|_{x=\delta_i} = \\ &= -\lambda_n (T_k - T_w) \times \\ &\times \left\{ \frac{2}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} - \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}}{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} + \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}} \right)^{k-1} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\left[\frac{(2k-1)\delta_i \sqrt{\frac{a_n}{a_a}}}{2\sqrt{a_n \tau}} \right]^2} 2\sqrt{a_n \tau} \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Середній час τ_k за який було сприйнято кількість теплоти i -м шаровим поясом частинки площею F_i крізь повітря зазор товщиною δ_i ,

$$\begin{aligned} Q_i &= \pi [bd_0 + (2i-1)b^2] \lambda_n \frac{2(T_k - T_w)}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n c_n \rho_n}{\lambda_a c_a \rho_a}}} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} - \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}}{\sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} + \sqrt{\lambda_a c_a \rho_a}} \right)^{K_1 - \frac{1}{2}} \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{\pi a_n}} (-\Gamma^2 \sqrt{\Gamma}) \sum_{K_1=0}^{K_1=K_1^*} \left[\frac{1}{K_1! \left(K_1 - \frac{1}{2} \right)} \left(\frac{\Gamma}{\tau_k} \right)^{K_1 - \frac{1}{2}} - \frac{1}{K_1! \left(K_1 - \frac{1}{2} \right)} \left(\frac{\Gamma}{\tau_0} \right)^{K_1 - \frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{де } \Gamma = - \left[(2k-1) \delta_i \sqrt{\frac{a_H}{a_a}} \right]^2 / 4a_H;$$

a_a - коефіцієнт температуропроводності агента сушіння, $a_a = \lambda_a / c_a \rho_a$.

Сумарна кількість тепла, поглинаюча однією частинкою за τ_K

$$Q = Q_\phi + \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (11)$$

Щоб перейти до кількості тепла, поглинутого усіма частинками, потрібно помножити (11) на числову концентрацію часток, $(1 - \varepsilon_{np})$ на об'єм частинки

$V_H = \pi d^3 / 6$ і на частоту ω_H зміни насінини в прикаскадній зоні.

Не дивлячись на ряд умов, якими нехтували, запропонований механізм зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах якісно пояснює характер зміни α від фізичних та режимних параметрів роботи установки.

Наявність максимального зовнішнього теплообміну в дисперсних середовищах доводить про неможливість паралельної інтенсифікації переносу теплоти тільки за рахунок зміни швидкості агента.

Проведена перевірка показує про дієздатність розробленої моделі кондуктивно – конвективного переносу в дисперсних середовищах, а результати розрахунку не суперечать відомим даним.

Частинки забезпечують ефективний сток в місцях контакту. Тому тепловий потік від каскаду до псевдорозріджуючого середовища прийняли пропорційним числу каскадів на одиницю теплообмінної поверхні та зміни насінини ω_H в при каскадній зоні. При цьому насінини з ростом частоти зміни фаз будуть отримувати за одиницю часу кінцеву кількість теплоти, оскільки прийняли, що $\tau_0 = \tau_{\min} \neq 0$.

Список літератури

1. Котов Б.І., Коваль С.М., Шустик Л.П., Цема Т.В. Технічні засоби для зберігання зерна в господарствах України // Пропозиція, 1999. № 11. – С. 25-27.
2. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. – М.: Колос, 1975. – 496 с.
3. Петренко М.М., Скринник І.О. Зерносушильна установка касетного типу // Збірник наукових праць КДТУ (техніка в сільськогосподарському машинобудуванні, галузеве машинобудування, автоматизація). Випуск 15. – Кіровоград: КДТУ, 2004. – С.323 - 328.
4. Дворецкий С.И., Королёв В.Н., Ногорнов С.А., Таров В.П. Техника и технологии псевдооживления: гидродинамика и теплообмен с погружёнными телами. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун.-та, 2005. – 168 с.

В статье рассмотрено перенос теплоты от каскада к слою семян в зависимости от параметров установки и процесса сушки в зерносушильной установке. Приведены исследования, которые позволяют теоретически определить кондуктивно-конвективный тепловой перенос с учетом особенностей движения семян.

In the article motion of seed is considered for to the cascades of the installation for dry grain in the booling layer. Researches which allow in theory to define the structural parameters of dryer taking into account the features of motion of seed are resulted.