

Теоретичні дослідження процесу нагрівання зерна комбінованим енергопідведенням при прямоточному русі зерна¹

Розроблена математична модель нагрівання зерна при комбінованому енергопідведенні, отримані залежності для визначення кінцевих параметрів процесу. Встановлено, що використання комбінованого підведення енергії дозволяє збільшити ступінь нагріву зерна на 11⁰С і підвищити продуктивність процесу.

зерно, нагрівання зерна, камери нагрівання зерна

Вітчизняна та світова практика сушіння зерна базується в основному на тепловому способі сушіння з конвективним підведенням теплоти. Інші способи зерносушіння поки що не отримали широкого розповсюдження, оскільки не можуть конкурувати з простотою конструкції і експлуатаційною економічністю конвективного сушіння. На наш погляд пріоритет конвективного сушіння зерна буде зберігатися і в майбутньому, хоча пошуки нових способів сушіння та методів енергопідведення будуть продовжуватися. Але сушіння зерна енергоємний процес: на кожну планову тону зерна (при зниженні вологості з 20% до 14%) витрачається в середньому біля 8 кг рідкого палива. При цьому корисні витрати енергії складають 40-50%. Найбільші втрати пов'язані з відпрацьованим сушильним агентом і теплотою охолоджуючого зерно повітря. Тому задачі підвищення енергетичної ефективності зерносушильного парку АПК і надалі не втрачатимуть свою актуальність. Одним з головних напрямків вдосконалення технології сушіння зерна, як показав піввіковий досвід експлуатації сушарок, є широке впровадження в практику зерносушіння – попереднього нагрівання сирого зерна перед подачею в сушильну камеру і подальшого ізотермічного сушіння.

Задача даної роботи – вдосконалення сушильної техніки шляхом розробки обладнання існуючих малооб'ємних зерносушарок (5-15 т/год) ефективними апаратами для попереднього нагрівання зерна.

Аналіз сучасного стану питання показує, що у складі зерносушильного парку значну частину складають сушарки (переважно великої потужності) з камерами нагрівання зерна в падаючому шарі, що гравітаційно рухається в розрідженому потоці, об'ємна концентрація якого складає декілька відсотків [1,2]. Перевага таких теплообмінників малий гідравлічний опір, недолік – великі габарити. Разом з тим малий час перебування зерна в стані падіння, що вимірюється 4-6 секундами приводить до необхідності збільшувати температуру теплоносія до 300-400⁰С. Для ефективного використання потенціалу теплоносія штучно збільшують час перебування зерна в камері шляхом аеродинамічного [3], або механічного гальмування. Аеродинамічне гальмування забезпечують висхідним потоком теплоносія, механічне-нааявністю в контурі камери решіток, каскадне розташованих полиць, гірлянд куль, та інших конструктивних елементів [2,3,4].

¹ Робота виконується під керівництвом проф. Котова Б.І., НУБіП України

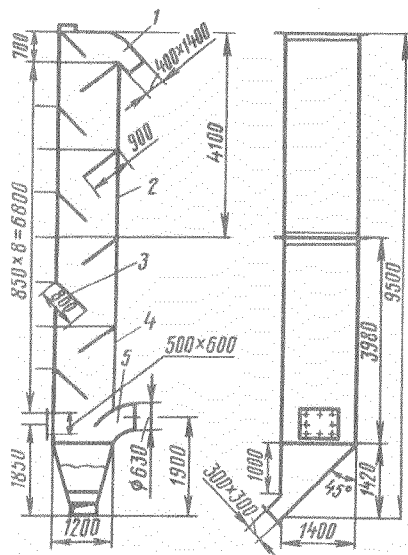
Аеродинамічне гальмування обмежено умовами «виносу» зерна з камери нагрівання. При механічно загальмованому падаючому шарі рух зерна (в повітрі) періодично припиняється, його дійсна концентрація збільшується за ходом руху зерна і, відповідно, збільшується поверхня теплообміну. Найбільший ефект гальмування досягається при повному гасінні швидкості зерна на кожному гальмуючому елементі.

Схеми найбільш розповсюджених нагрівачів з гравітаційним рухом зерна наведені на рисунку 1. Значна металоємність конструкцій з гальмуючими елементами, необхідність транспортування зерна в камеру нагріву, а потім в камеру сушіння збільшують вартість і знижують експлуатаційну ефективність їх використання.

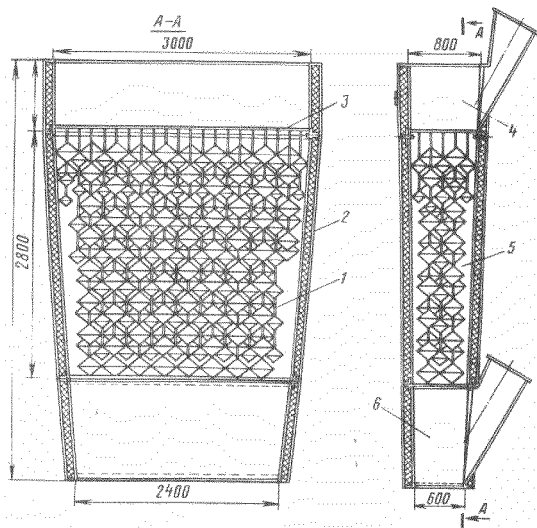
Використання пневмотранспорту для завантаження зерна в сушарки майже не використовують, незважаючи на певні переваги (безперервність процесу, інтенсивність термообробки [5], простота автоматизації, низька питома металоємність). Основною перешкодою для застосування термообробки зерна в умовах пневмотранспорту для сушарок малої продуктивності (10–20 т/год) є необхідність підвищення висоти пневматичного тракту для збільшення часу перебування зерна необхідного для його нагріву до крайової температури. Але цю проблему можна вирішити шляхом інтенсифікації підведення теплоти до зерна, використовуючи додаткове підведення енергії, наприклад, – інфрачервоне випромінювання.

В зв'язку з цим, представляє практичний інтерес дослідити процес нагрівання зерна комбінованим енергопідведенням при його русі в прямоточному режимі.

Розглянемо процес нагріву зерна в безперервно рухаючому шарі при конвективному підведенні теплоти повітряним потоком і додатковим ІЧ–опромінюванням його поверхні. При цьому, для спрощення математичної моделі і її аналізу, величину кількості теплоти, підведеної до зерна, представимо величиною потужності теплового потоку безпосередньо на поверхні зерна. Враховуючі, що при одночасному русі теплоносія і зерна їх параметри в кожній точці (за висотою камери) не змінюються за часом, розглянемо змінення параметрів зерна і теплоносія тільки за висотою камери нагріву. За таких умов теплові процеси можна описати системою рівнянь теплового балансу при таких припущеннях: нагрівання зерна безградієнтне; концентрація зерна за об'ємом камери розподілена рівномірно; потужність ІЧ–випромінювачів розподілена за висотою камери рівномірно; поверхнею теплообміну є сумарна поверхня усіх зерен, що знаходяться в камері. Для рішення задачі використовуємо методику розрахунків рекуперативних теплообмінних апаратів [6].



- а)
1 – патрубок, що відводить; 2 – верхня секція колонки; 3 – перегородка; 4 – нижня секція колонки; 5 – патрубок, що підводить



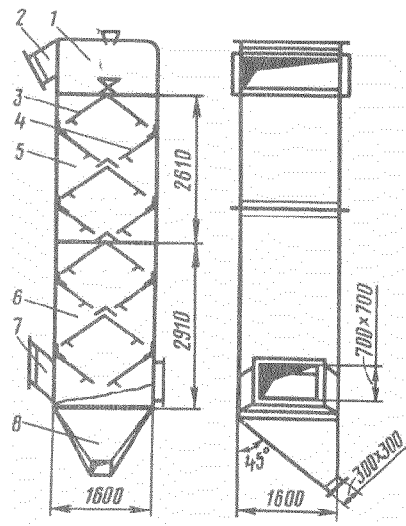
- б)
1 – підвіска з конусами; 2 – корпус; 3 – решітка; 4 – секція для відводу агента сушіння; 5 – робоча секція; 6 – секція для підведення агента сушіння

а) з пересипними полицями; б) з перфорованими полицями; в) з конусними гірляндами; г) з газорозподільними коробами

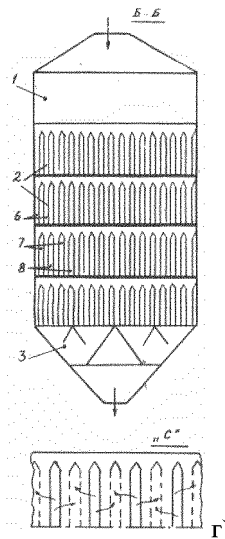
Рисунок 1 - Схеми нагрівачів зерна з гравітаційним рухом

Для елемента каналу довжиною dh рівняння, що описує змінення температури теплоносія вздовж напрямку руху буде мати вигляд:

$$\alpha \cdot f_h(t - \theta) = c_p G_T \frac{dt}{dh} \quad (1)$$



- б)
1 – секція, що відводить; 2 – патрубок, що відводить; 3, 4 – полки; 5, 6 – робітники секції; 7 – патрубок, що підводить; 8 – бункер



- г)
1 - завантажувальний бункер; 2 - секції шахти; 3 - випускний пристрій; 4 - що підводить повітря від; 5 - дифузор; 6 - зерновий шар; 7, 8 - що підводять і відводять короби

Рівняння теплового балансу, що описує змінення температури зерна для того ж перетину dh буде мати вигляд:

$$\alpha \cdot f_h (\theta - t) = c_3 G_3 \frac{d\theta}{dh} + r \cdot G_3 \frac{du}{dh} - q. \quad (2)$$

В рівняннях (1), (2) позначено:

t, θ – температура теплоносія і зерна;

c_p, c_3 – питомі теплоємності теплоносія і зерна;

G_T, G_3 – масові витрати теплоносія і зерна;

$q = \frac{P}{H}$ – питома потужність випромінювача;

f_h – питома поверхня теплообміну зерна на одиницю висоти камери;

α, r – коефіцієнт теплообміну зерна і теплоносія та питома теплота пароутворення;

H – висота камери;

u – вологовміст зерна.

Останній член рівняння (2) являє кількість теплоти, яка затрачена на випаровування води із поверхні при нагріванні. Щоб виключити третю змінну величину $u(h)$ скористаємося критерієм Ребіндера, який має вигляд:

$$Rb = \frac{c_3}{r} \frac{d\theta}{du}. \quad (3)$$

Визначаючи з (3) величину du і підставляючи її значення в (2), після перетворень, будемо мати:

$$\alpha \cdot f_h (\theta - t) = c_3 \cdot G_3 \left(1 + \frac{1}{Rb} \right) \frac{d\theta}{dh} - q. \quad (4)$$

Рівняння (1), (4) являють математичну модель яка описує процеси нагрівання зерна при комбінованому енергопідведенні для сталого режиму роботи прямоточного нагрівача.

Розв'язуючи систему рівнянь (2) і (4) відносно температури теплоносія $t(h)$ отримаємо диференціальне рівняння другого порядку с постійними коефіцієнтами:

$$\frac{d^2 t}{dh^2} - K \frac{dt}{dh} = Q', \quad (5)$$

$$\text{де } K = \frac{B + A}{B \cdot A};$$

$$A = \frac{c_p \cdot G_T}{\alpha \cdot f_h};$$

$$B = \frac{c_3 \cdot G_3 (1 + Rb^{-1})}{\alpha \cdot f_h};$$

$$Q' = \frac{P}{H \cdot \alpha \cdot f_h \cdot B \cdot A}.$$

Розв'язок рівняння (5) при початкових умовах:

$$t|_{h=0} = t_0; \frac{dt}{dh}|_{h=0} = \frac{\theta_0 - t_0}{A} = Z_0, \quad (6)$$

має такий вигляд:

$$t(h) = t_0 + \left(\frac{Z_0}{K} - \frac{Q'}{K^2} \right) (1 - e^{-K \cdot h}) + \frac{Q'}{K} h, \quad (7)$$

де t_0, θ_0 – значення температури теплоносія і зерна на вході в камеру нагріву.

Диференціюючи рівняння (7) і підставивши отримане значення та рівняння (7) в рівняння (1) отримаємо залежність змінення температури зерна за координатою руху:

$$\theta(h) = t_0 + \frac{Q'}{K} (A + h) + [1 - (1 - A \cdot K) e^{-K \cdot h}] \left(\frac{Z_0}{K} - \frac{Q'}{K^2} \right). \quad (8)$$

Рівняння (7) і (8) визначають розподіл температури теплоносія та зерна за висотою камери нагріву і дають можливість аналізувати вплив технологічних параметрів (втрати теплоносія, подача зерна, температура теплоносія, потужність джерела енергії) на величину ступеню нагріву зерна і визначити конструктивні параметри камери нагріву прямої дії.

На рисунках 2 та 3 наведені залежності $t(h)$ та $\theta(h)$, побудовані за рівняннями (7) та (8).

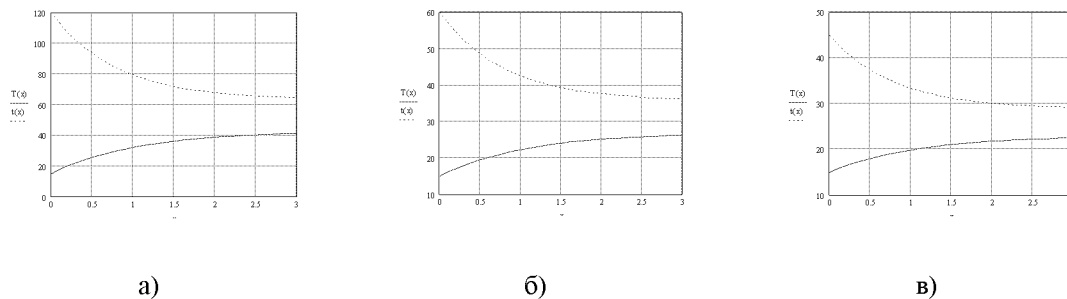
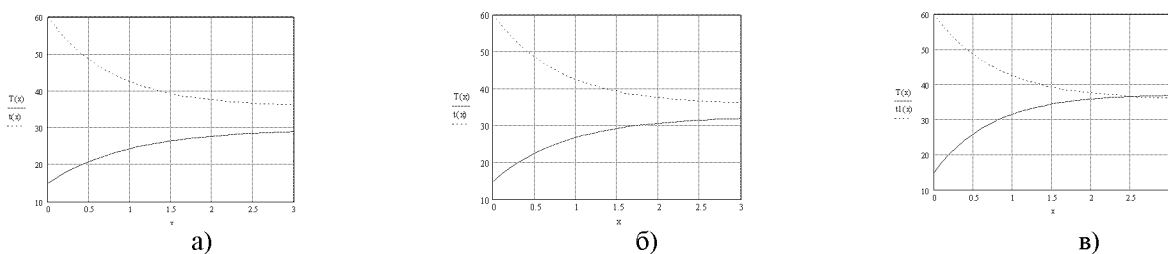


Рисунок 2 - Розподіл температури зерна і теплоносія за висотою камери нагріву при нагріванні теплоносієм з температурою на вході: а) 120°C, б) 60°C, в) 45°C



а) $q=2$ кВт/т год, б) $q=4$ кВт/т год, в) $q=6$ кВт/т год

Рисунок 3 - Розподіл температури зерна і теплоносія при комбінованому енергопідведенні при питомій потужності опромінювача

Аналізом отриманих залежностей встановлено, що нагрівання зерна потоком теплоносія до крайової температури 40°C можливо тільки при використанні сушильного агента з температурою 120°C (частини сушильного агента, що подається в сушильну камеру). При використанні відпрацьованого сушильного агента (з параметрами на виході з сушильної камери 60°C та 45°C) нагріти зерно перед сушінням можна до температури 22–26°C, що є малоефективним. При використанні додаткових джерел енергії з (наприклад випромінювачів) рівномірно розміщених за висотою камери та відпрацьованого сушильного агента з температурою 60°C зерно нагрівається до температури 32–37°C (при питомій потужності 4–6 кВт/т год). При потужності додаткового джерела енергії потужністю 6 кВт/т год можна зменшити висоту камери нагріву на 0,7–1 м., тобто на 23–30%, що еквівалентно підвищенню продуктивності за умови використання камери висотою 3 м.

При попередньому нагріванні зерна зменшується кількість теплоти на випаровування вологи і відповідно теплова потужність зерносушарки на 5–8%; з урахування збільшення при цьому продуктивності зерносушарки на 20% [1] загальна економія питомих витрат енергії може скласти до 15%.

Розроблена удосконалена математична модель процесу нагрівання зерна в прямоточному режимі. Встановлено, що використання комбінованого підведення енергії дозволяє збільшити ступінь нагріву зерна на 11°C (на 30%) при збільшені продуктивності процесу.

Список літератури

1. Алейников В.И. Эффективность предварительного нагрева зерна перед сушкой// Труды ВНИИЗ-1970.- вып. 70.- С.87–94.
2. Малинин Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна.- М.: 1991.- ЦНИИНиТЭИ. – 45 с.
3. Резчиков В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна.- М.: 1991.- «ЦНИИТЭИ Хлебопродуктов», 51 с.
4. Голубкович А.В., Чижилов А.Г. К обоснованию технических средств для предварительного подогрева и подсушки зерна повышенной влажности// Труды ВИМ. – 1980. – т.86.- С.36–45.
5. Муштаев В.И., Ульянов В.М, Тимонин А.С. Сушка в условиях пневмотранспорта. М.:Химия, 1984. – 232 с.
6. Рабинович Г.Д. Расчет теплообменного аппарата типа «газовзвесь»// Сб. тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах.- Минск: «Наука и техника», 1986.- С.164–184.

В. Кифяк

Теоретические исследования процесса нагрева зерна комбинированным энергоподводом при прямоточном движении зерна

Разработана математическая модель нагревания зерна при комбинированном энергоподведении, получены зависимости для определения конечных параметров процесса. Установлено, что использование комбинированного подведения энергии позволяет увеличить нагревание зерна на 11°C и повысить производительность процесса.

І. Куфяк

Theoretical researches of process heating corn combined power placing by uniflow of corn

Developed the mathematical model of heating corn by combined power placing, received dependences for the definition ultimate parameters of process. Determined that the using of combined bringing of energy allow to increase efficiency of process.

Одержано 02.09.09