

ДИНАМІКА ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА В АЕРОГРАВІТАЦІЙНОМУ ШАРІ

Котов Борис Іванович д.т.н., професор

Труханська Олена Олександрівна к.т.н., ст. викладач

Вінницький національний аграрний університет

Курганський Олександр Дмитрович аспірант

Національний Університет біоресурсів і природокористування України

Kotov B.

Truhanska O.

Vinnitsa National Agrarian University

Kurganskiy O.

National Agriculture University of Ukraine

Анотація: на основі аналізу теплового балансу отриманих і спрощених уявлень про процес теплообміну повітря із зерном отримані диференціальні рівняння охолодження зерна повітрям у стаціонарному режимі аероґравітаційного транспортування та розрахункові формули основних параметрів процесу. В результаті проведених теоретичних досліджень створені спрощені математичні моделі теплових процесів при охолодженні зерна в стані пневмоґравітаційного транспорту. Отримані формули для розрахунків експозиції охолодження зерна і розподілу його температури в напрямку руху та визначення ефективності використання охолоджуючого повітря.

Ключові слова: зерно, повітря, охолодження, аероґравітаційний рух, тепловий баланс, експозиція процесу, розподіл температури.

Постановка проблеми

Охолодження зерна в шахтних зерносушарках займає третину всього часу його перебування в шахті, що знижує продуктивність всього сушильного агрегату. Виносні охолоджувачі зерносушарок колонкового типу з гравітаційним рухомим шаром зерна кільцевого перетину дозволяють частково інтенсифікувати процес охолодження і відносно збільшити продуктивність установки. Але такі охолоджувачі мають суттєві недоліки: обмежена можливість енергоощадної інтенсифікації зумовлена значним опором повітря при збільшенні його швидкості; «екранізація» поверхні теплообміну зерна у щільному шарі зменшує кількість теплоти що відводиться на 40%. Крім того, значна висота колонок вимагає застосування додаткових транспортних засобів (норій). Перспективним напрямком інтенсифікації процесу охолодження і підвищення ефективності використання всього сушильного обладнання є суміщення процесів охолодження і транспортування зерна в аероґравітаційних транспортерах. Аеродинамічні транспортери (аерожолоба) для зернових матеріалів і продуктів їх переробки широко використовуються в сільському господарстві і переробних підприємствах. Вони мають високу пропускну здатність при розвантаженні зерносховищ та більш економічні в порівнянні з стрічковими і вібраційними транспортерами [1]. Такі транспортери застосовуються не тільки для переміщення зернової маси, але і у суміщених процесах аерації сушіння і охолодження дисперсних матеріалів [2, 3]. Незважаючи на суттєве вивчення процесу переміщення матеріалів аероґравітаційними транспортерами «аерожолобами» процес охолодження нагрітого зерна (після сушарок) вивчені недостатньо за відсутністю надійних математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Охолодження зерна атмосферним повітрям використовується для зменшення температури як після високотемпературних зерносушарок так і в процесі зберігання вологого зерна, що нагрівається «біологічною» теплотою.

Процеси аероґравітаційного переміщення для охолодження зернових матеріалів дозволяють суміщення процесів переміщення і тепломасообміну. Аеродинамічний транспорт зерна вивчався В.І. Анискіним [1], Блохіним П.В. [2], Е.М. Зимінім [3], Черняєвим Н.П. [5] та іншими дослідниками. Процес охолодження в аеродинамічному транспортері експериментально досліджено В.П. Блохіним [2], питання теплообміну процесу сушіння в псевдозрідженому шарі висвітлені в узагальнюючих роботах Поперечною А.М. [4]. Аналіз літературних джерел і практика експлуатації існуючих пневмотранспортних засобів вказують на доцільність використання аероґравітаційних транспортерів для охолодження зерна. Але питання дослідження процесу охолодження і визначення їх ефективності вивченні недостатньо.



Математичне моделювання процесу охолодження зерна в аерозрідженому стані при його переміщенні дозволить визначити параметри і характеристики установки без конкретизації конструктивних особливостей, тобто на стадії проектування обладнання.

Мета дослідження

Аналітичне визначення параметрів процесу охолодження нагрітого зерна і охолоджуючого повітря при аерогравітаційному транспортуванні.

Результати досліджень

Розглянемо процес охолодження зерна повітрям в стані аерогравітаційного переміщення. При аерогравітаційному транспортуванні нагрітого зерна повітряним потоком, що фільтрується крізь шар псевдозрідженого матеріалу, відбувається інтенсивне перемішування частинок в шарі.

Перемішування частинок зернового матеріалу сприяє вирівнюванню температури в об'ємі шару (в тому числі і за висотою). Повне перемішування матеріалу означає, що при взаємодії з повітрям, температура якого має змінюватись за висотою, матеріал може мати певну середню температуру, величину якої можна прийняти постійною (по висоті шару). Тобто температура матеріалу вздовж напрямку руху повітря є незмінною.

Приймаємо, що рух повітря крізь шар матеріалу відповідає режиму повного витиснення.

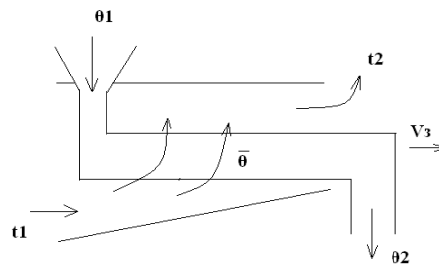


Рис. 1. Розрахункова схема процесу

Температура зернового матеріалу змінюється тільки за координатою в напрямку руху (рис.1).

Відповідно до зроблених припущень рівняння теплового балансу для охолоджуючого повітря можна записати у вигляді:

$$G_V C_p (t_2 - t_1) = \alpha \cdot F (\theta_{II} - t) = aF \Delta T \quad (1)$$

де θ - середня за висотою шару температура матеріалу, °С;

θ_{II} - температурний напір;

t - температура повітря на вході в шар зерна і виході з нього.

При прийнятому припущенні, що температура по висоті не змінюється, величину θ можна визначити як середньо логарифмічну, тобто:

$$\Delta T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\theta - t_1}{\theta - t_2}} \quad (2)$$

Для виключення невідомої температури, використаємо поняття коефіцієнта нагріву повітря за аналогією з коефіцієнтом охолодження [6]:

$$\eta = \frac{t_2 - t_1}{\theta - t_1} \quad (3)$$

Із рівностей (1) і (2), розв'язуючи їх відносно θ , отримаємо залежність коефіцієнту нагріву повітря від повітряного режиму (η та інтенсивності тепловідводу (a).

$$\eta t_2 = 1 - e^{-\frac{aF}{G_V C_p}} \quad (4)$$

Використовуючи отримані значення (4) і (3) та рівняння (1), запишемо диференціальне рівняння теплового балансу для зернового матеріалу у вигляді:



$$\eta G_V C_V (\theta - t_1) = -G_3 C_3 L \frac{d\theta}{dy} \quad (5)$$

Розв'язок рівняння (5) при граничних умовах: $y=0$; $\theta=\theta_1$; отримаємо у вигляді:

$$\theta(y) = t_1 - (t_1 - \theta_1) \cdot e^{-k_3 y} \quad (6)$$

де L_1 - довжина транспортного засобу (пневогравітаційного транспортера), м.

Таким чином, зміна температури зерна в напрямку руху визначається рівнянням (6). Кінцева температура зерна, визначиться при умові: $y=L_1$.

Температуру відпрацьованого повітря можна визначити з рівняння (6) підставивши значення

$$\theta_2 = t_1 - \Delta T_1 e^{-\frac{G_V C_p}{G_3 C_3}} \quad (7)$$

$$t_2 = \theta_2 \eta - t_1 (\eta - 1) = \theta_2 \eta + t_1 e^{-\frac{\alpha F}{G_V C_p}} \quad (8)$$

Експозицію охолодження зерна при такому способі відведення теплоти отримаємо із розв'язку диференціального рівняння (для регулярного режиму):

$$m_3 C_3 \frac{d\theta}{d\tau} = \alpha F \cdot (t - \theta) \quad (9)$$

Для визначення змінної температури t повітря скористуємося рівнянням теплового балансу: інтегрування якого дає співвідношення:

$$t = t_1 + R_{21} \theta_1 - R \theta \quad (10)$$

при чому $R_{21} = \frac{G_3 C_3}{G_V C_p}$

Підставляючи значення t з (10) в (9) після інтегрування при початкових умовах і відповідних перетворень матимемо:

$$\tau = \frac{1}{T} \ln \frac{A - \theta_1}{A - \theta_2} \quad (11)$$

де $T = \frac{G_V C_p}{G_3 C_3} + \eta$;

$A = t_1 + R_{21} \theta_1$ - питома поверхня зерна, м²/кг.

Величину коефіцієнту теплообміну α в залежності від гідродинамічного режиму можна визначити із критеріального рівняння $Nu = 0.215 Re^{0.56}$.

Зміна температури зерна при взаємодії з повітрям в режимі аерогравітаційного транспорту наведена у вигляді графіку розподілу температури вздовж повітряного тракту в залежності від питомих витрат представлена на (рис. 2б), а експозиція охолодження в залежності від витрат повітря на (рис.2а).

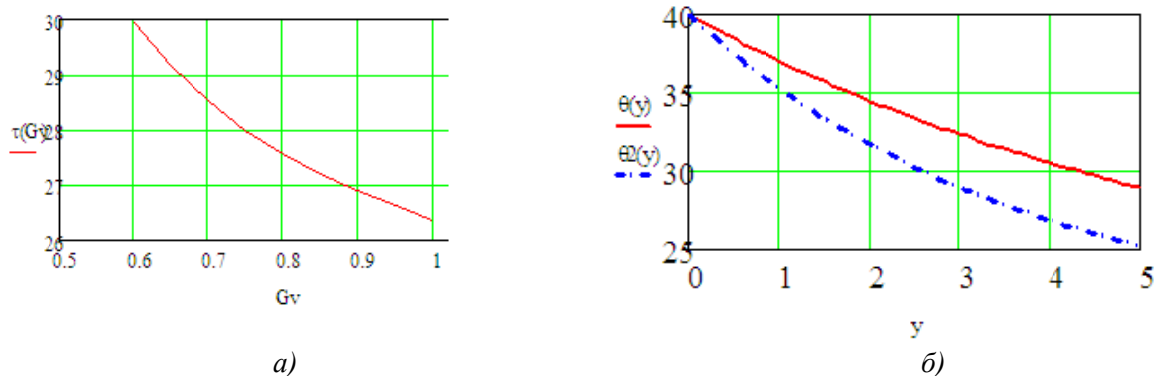


Рис. 2. Зміна температури зерна при взаємодії з повітрям в режимі аерогравітаційного транспорту: а) в залежності від витрат повітря; б) в залежності від питомих витрат

При наявності видалення вологи в процесі охолодження недосушеного зерна не складає труднощів врахувати відносну кількість теплоти витраченої на випаровування вологи:



$$r_0 G_0 \frac{dU}{dy} = Q_{sun} \quad (12)$$

де – продуктивність установки по абсолютно сухому зерну (масова витрата) кг/с;
- питома теплота пароутворення при температурі матеріалу, Дж/кг;
- поточний вологовміст зерна, кг/кг с.р.

Додамо до рівняння (5) додаткову складову :

$$L G_3 C_3 \frac{d\theta}{dy} = \alpha F \eta \cdot (t - \theta) + r_0 G_0 \frac{dU}{dy} \quad (13)$$

Використовуючи критерії Ребіндера — і зробивши заміну[7]: — — в рівнянні (13) після перетворень матимемо рівняння:

$$\frac{d\theta}{dy} = K_0 (t - \theta) \quad (14)$$

де — —

Підставляючи значення невідомої температури t з рівняння (10) отримаємо рівняння:

$$\frac{1}{K_0} \frac{d\theta}{dy} = \alpha_1 - b_1 \theta \quad (15)$$

де

Розв'язок рівняння (15) за початкових (граничних) умов $y=0$; (t_1 – температура зерна на вході до транспортера) отримано у вигляді:

$$\theta(y) = \frac{\alpha_1}{b_1} - \left(\frac{\alpha_1}{b_1} - \theta_1 \right) \exp\left(-\frac{b_1 y}{K_0}\right) \quad (16)$$

Температура охолодженого зерна (на виході транспортера) визначається з рівняння (16) підстановкою $y=L_1$:

$$\theta_2 = \frac{\alpha_1}{b_1} - \left(\frac{\alpha_1}{b_1} - \theta_1 \right) \exp\left(-\frac{b_1 L_1}{K_0}\right) \quad (17),$$

а температура відпрацьованого повітря визначиться з рівняння (10) підстановкою

$$t_2 = t_1 + R_{21} \theta_1 - R_{21} \theta_2 \quad (18)$$

Коефіцієнт ефективності використання охолоджуючого повітря визначимо за аналогією з ефективністю використання сушильного агента:

$$\eta = 1 - \frac{\theta_2 - t_2}{\theta_1 - t_1} \cdot R_{21} \quad (19)$$

Аналіз отриманих залежностей показує, що основним інтенсифікуючим фактором охолодження зерна є питома витрата повітря, збільшення якої призводить до зменшення величини. Крім цього збільшення витрат повітря, шляхом збільшення швидкості подачі під решітку інтенсифікує теплообмін. Але такий спосіб інтенсифікації обмежений «винесенням» матеріалу із шару при переведенні його в киплячий стан.

Висновки

В результаті проведених теоретичних досліджень створені спрощені математичні моделі теплових процесів при охолодженні зерна в стані пневмогравітаційного транспорту.

Отримані формули для розрахунків експозиції охолодження зерна і розподілу його температури в напрямку руху та визначення ефективності використання охолоджуючого повітря.

Список літератури

1. Анискин В.И. *Аэротранспорт семян и зерна* / В.И. Анискин, А.В. Голубкович, Л.О. Онхонова // *Техника в сельском хозяйстве*. М. 1999 №6-с. 75-78.
2. Блохин П.В. *Аэрогравитационный транспорт* / П.В. Блохин - М. Колос 1974 – 119с.
3. Зимин Е.М. *Пневмотранспортные установки для вентилирования, транспортирования и сушки зерна* / Е.М. Зимин. Киров. Изд. КГСХА 2000-215с.



4. Поперечний А.М. Сушіння харчової сировини у псевдозрідженому шарі : монографія / А. М. Поперечний, Н. М. Варваріна, І. В. Жданов; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган - Барановського. - Донецьк : ДонНУЕТ, 2013. - 303 с.
5. Черняев Н.П. Аэродинамическое транспортирование зерна и других компонентов комбикормов /Н.П. Черняев. – М. Колос. 1985-89с.
6. Загоруйко В.А. Моделирование и метод расчета кинетики процесса сушки зернистых материалов/В.А. Загоруйко, Ю.И. Кривошеев, А.В. Соколовская // Промышленная теплотехника. 1980 т.2 №2. с.81-90
7. Котов Б.І. Аналітичне визначення динамічних процесів тепловологовмісних режимів зерносушарок безперервної дії/Б.І.Котов, Р.А.Калініченко, М.І.Лупунов// Конструювання, виробництво та експлуатація с-г машин. Кіровоград .2012.№42 с. 340-346.

References

1. Anyskyn V.Y. Aerotransport semyan y zerna/ V.Y. Anyskyn, A.V. Holubkovych, L.O. Onkhonova//Tekhnyka v sel'skom khozyaystve. M.1999 #6-s.75-78.
2. Blokhyn P.V. Aerohravytatsyonnyy transport / P.V. Blokhyn - M. Kolos 1974 – 119s.
3. Зумун Е.М. Пневмотранспортные установкy dlya ventilyrovanyya, tranportyrovanyya y sushky zerna / Е.М. Зумун. Киров. Yzd. К-НСKhA 2000-215s.
4. Poperechnyy A.M. Sushinnya kharchovoyi syrovyny u psevdozrzdzhenomu shari : monohrafiya / A. M. Poperechnyy, N. M. Varvarina, I. V. Zhdanov; Donets. nats. un-t ekonomiky i torhivli im. M. Tuhan - Baranovs'koho. - Donets'k : DonNUET, 2013. - 303 с.
5. Chernyaev N.P. Аэродинамическое transportyrovanye zerna y druykhh komponentov kombykormov /N.P. Chernyaev. – М. Kolos. 1985-89с.
6. Zahoruyko V.A. Modelyrovanye y metod rascheta kynetyky protsessy sushky zernystykh materyalov/V.A. Zahoruyko, Yu.Y. Kryvosheev, A.V. Sokolovskaya // Promyshlennaya teplotekhnika. 1980 t.2 #2. s.81-90
7. Kotov B.I. Analitychne vyznachennya dynamichnykh protsesiv tepvolohovmisnykh rezhymiv zernosusharok bezperervnoyi diyi/B.I.Kotov, R.A. Kalinichenko, M.I. Lypunov// Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya s-h mashyn. Kirovohrad .2012.#42 s. 340-346.

ДИНАМИКА ОХЛАЖДЕНИЯ ЗЕРНА В АЕРОГРАВИТАЦИЙНОМУ СЛОЕ

Аннотация: на основе анализа теплового баланса полученных и упрощенных представлений о процессе теплообмена воздуха с зерном полученные дифференциальные уравнения охлаждения зерна воздухом в стационарном режиме аэрогравитационного транспортировки и расчетные формулы основных параметров процесса. В результате проведенных теоретических исследований созданы упрощенные математические модели тепловых процессов при охлаждении зерна в состоянии пневмогравитационного транспорта. Полученные формулы для расчетов экспозиции охлаждения зерна и распределения его температуры в направлении движения и определение эффективности использования охлаждающего воздуха.

Ключевые слова: зерно, воздуха, охлаждения, аэрогравитационный движение, тепловой баланс, экспозиция процесса, распределение температуры.

DYNAMICS OF GRAIN COOLING IN AERO GRAVITATIONAL LAYER

Summary: the analysis of the heat balance obtained and simplistic notions of process heat air grain obtained differential equations grain cooling air in steady aerogravity transportation and formulas of basic process parameters.

Aerodynamic transporter for grain materials and their products are widely used in agriculture and processing enterprises.

Despite substantial study of the movement of material conveyors aero gravity process of cooling the heated grain (after dryer) studied enough in the absence of reliable mathematical models.

As a result of theoretical investigations established simplified mathematical model of thermal processes under refrigerated condition pnevmohravitatsiynoho grain transport.

The resulting formula for the calculation of exposure cooling the grain and its temperature distribution in the direction of motion and determine the efficiency of the cooling air.

Keywords: grain, air, cooling, aerogravity movement, heat balance, exposure process, the temperature distribution.