

12. Колычев Е. И. О выборе расчетного случая воздействия при исследовании плавности хода тракторов и сельхозмашин [Текст] / Е. И. Колычев, И. М. Перельцвайг // Тракторы и сельхозмашины. – 1976. – №3. – С. 9–11.

**Yevhen Ihnatiev, eng.**

*Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Zaporozhye region, Ukraine*

**Theoretical modeling of oscillatory motion of beet tops harvesting machine which is frontally-mounted on integral arable and row-crop tractor HTZ-16131**

Using of the frontally-mounted beet tops harvesting machines with rotary cutting units, as well as a significant increase in speeds of harvesting cause intense oscillations in its longitudinal vertical plane, which reduces the quality of the pruning heads of root crops and causing significant loss of beet tops.

Therefore there is a need for theoretical study of oscillatory motion in the longitudinal vertical plane of beet tops harvesting machines, which frontally-mounted on wheeled tractor. To do so developed a mathematical model of motion of beet tops harvesting machine, based on the use of the initial equations of dynamics in Lagrange form of the 2nd kind.

According to the elaborated equivalent circuit chosen and generalized coordinates and performed the necessary mathematical transformations was obtained a system that consists of two nonlinear differential equations that describe the oscillations of the rotary cutting device of beet tops harvesting machine in longitudinal vertical plane while moving its pneumatic gauge wheels on a rough surface of the soil.

**beet tops, rotary cutting unit, tractor, oscillation, differential equations**

Одержано 15.10.16

**УДК 631.362.36; 664.723**

**Б. І. Котов, проф., д-р техн. наук**

*Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна*

**Р.А. Калініченко, канд. техн. наук, О.Д. Курганський, асп.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна*

**С.П. Степаненко, канд. техн. наук, ст. наук. співр, В.О. Швидя, канд. техн. наук**

*Національний науковий центр „Інститут механізації та електрифікації сільського господарства”, с.м.т. Глеваха, Україна, E-mail: Stepanenko\_s@ukr.net*

## Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі

Розроблені математичні моделі і отримано аналітичні залежності для розрахунку режимних параметрів процесу охолодження зерна у вібропневмовідцентровому апараті.

**вібропневмовідцентровий апарат, зерновий матеріал, охолодження, перехресний рух потоків, кільцевий шар**

**Б.И. Котов, проф., д-р техн. наук**

*Винницький національний аграрний університет, г. Вінниця, Україна*

**Р.А. Калининко, канд. техн. наук, А.Д. Курганский, асп.**

*Національний університет біоресурсів і природоиспользования Украины, г. Киев, Украина*

**С.П. Степаненко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр, В.А. Швидя, канд. техн. наук**

*Національний научний центр „Институт механизации и электрификации сельского хозяйства”, п.г.т. Глеваха, Украина*

**Теоретические исследования процесса охлаждения зернового материала при перемещении в виброцентробежном слое**

Разработаны математические модели и получены аналитические зависимости для расчета режимных параметров процесса охлаждения зерна в вибропневмоцентробежном аппарате.

**вибропневмоцентробежный аппарат, зерновой материал, охлаждение, перекрёстное движение потоков, кольцевой слой**

**Постановка проблеми.** Охолодження зернових матеріалів в практиці агропромислового виробництва застосовується для зниження дії джерел самозігрівання при тимчасовому зберіганні та зниження температури зерна після сушіння в зерносушарках, так як за нормативними вимогами зерно після сушіння повинно мати температуру на 10°C більшу за атмосферне повітря (середовище зберігання) [1]. Практична експлуатація сушарок, де в якості охолоджувачів використовуються камери з повітророзподільчими коробами, які є продовженням шахтних сушильних камер, показує, що вони не забезпечують належного ефекту охолодження просушеного зерна. Більш перспективними є виносні охолоджувачі колонкового типу, які набули поширення у виробництві, але можливості інтенсифікації процесу теплообміну в них майже використані і обмежуються підвищенням швидкості повітря до 1,5 м/с. Використання віброзрідженого шару рухомого зерна для обробки охолоджуючим повітрям дозволяє суттєво інтенсифікувати теплообмін і підвищити продуктивність обладнання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробкам теоретичних основ процесу охолодження зернового матеріалу і технічних засобів реалізації охолодження присвячена значна кількість робіт, виконаних у різні роки [2-7]. В роботі [2] обґрунтовані режимні параметри колонкових охолоджувачів, в роботі [3] досліджено охолодження у віброзрідженому шарі, роботи [4,5] висвітлюють питання інтенсифікації охолодження у закручених повітряних потоках пневмовідцентрового апарата; охолодження зерна у аероґравітаційних транспортерах вивчалось в роботах [6,7]. Аналізом існуючих публікацій виявлено, що основним інтенсифікуючим фактором процесу охолодження нагрітого зерна є підвищення відносної швидкості руху повітряного потоку (швидкості обтікання зернин). Але можливості збільшення швидкості повітряного потоку у пневмо і віброзрідженому шарі існуючих установок обмежені виносом матеріалу із шару. Тому є доцільним розглянути можливості інтенсифікації процесу охолодження зерна повітряним потоком в установках вібровідцентрової дії.

**Постановка завдання.** Скласти математичний опис теплових і механічних процесів при охолодженні зернового матеріалу у пневмовібровідцентровому шарі.

**Виклад основного матеріалу.** Для складання математичної моделі процесу охолодження зерна шляхом фільтрації повітря крізь кільцевий вертикально рухомий шар зернового матеріалу в режимі перехресної течії приймемо такі припущення, спрощуючи подальший аналіз:

– всі складові тепловіддачі зерна повітрю враховуються коефіцієнтом теплообміну, значення якого залежить від режиму обтікання і в процесі охолодження не змінюється;

- градієнтом температури всередині зернини нехтуємо через його незначущість;
  - фізичні властивості зерна і повітря умовно прийняті постійними і віднесені до середніх температур входу і виходу із апарата;
  - швидкість руху повітря крізь шар приймаємо постійною.
- Розрахункова схема процесу показана на рис. 1.

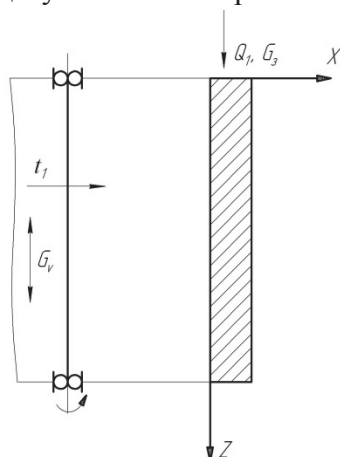


Рисунок 1 – Розрахунково-технологічна схема теплового процесу

Шар зерна рухається вздовж циліндричної опорної поверхні, яка обертається навколо вертикальної вісі і здійснює гармонічні коливання у вертикальному напрямку. Повітряний потік (шляхом просмоктування крізь шар) рухається у радіальному напрямку від центра до опорної перфорованої поверхні барабану).

З урахуванням прийнятих припущень, двомірний опис теплових процесів у перехресному русі потоків зерна (напрямок OZ) і повітря (OX) може бути записаний у вигляді диференціальних рівнянь теплообміну:

$$m_3 C_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + G_3 C_3 H \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha \cdot F (t - \theta), \quad (1)$$

$$m_v C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v C_p L \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot F (\theta - t) \quad (2)$$

і рівняння теплового балансу повітря і зерна:

$$G_3 C_3 \partial \theta = G_v C_p \partial t. \quad (3)$$

В рівняннях (1) – (3) позначено:

$\theta, t$  – температура зерна і повітря, °C;

$C_3, C_p$  – питома теплоємність зерна і повітря, Дж/кг·°C;

$m_3, m_v$  – маса зерна і повітря в об'ємі шару що знаходиться на роторі, кг;

$G_3, G_v$  – масові витрати зерна і повітря, кг/с;

$\alpha, F$  – коефіцієнт і поверхня теплообміну, відповідно Вт/м<sup>2</sup>·°C і м<sup>2</sup>;

$H, L$  – висота і товщина шару матеріалу на поверхні барабану, м.

Розглянемо стаціонарний режим теплового процесу обробки зерна повітрям, коли в кожній точці об'єму рухомого шару на даний момент часу параметри зерна і повітря незмінні: прирівняємо похідні за часом до нуля  $\partial t / \partial \tau = \partial \theta / \partial \tau = 0$ .

Інтегруванням рівняння (3) в межах від  $t_1$  до  $t$  та від  $\theta_1$  до  $\theta$ , отримаємо:

$$t - t_1 = R \cdot (\theta_1 - \theta), \quad (4)$$

де  $R = G_3 C_3 / G_v C_p$ ;  $t_1, \theta_1$  - температура потоків на вході.

Підставляючи значення температури повітря  $t$  з рівняння (4) в рівняння (1) за

умови стаціонарності процесу, матимемо:

$$\frac{G_3 C_3 H}{\alpha F (R+1)} \cdot \frac{d\theta}{dz} = \frac{t_1 + R\theta_1}{R+1} - \theta. \quad (5)$$

Розв'язок рівняння (5) за граничної умови:  $z = 0, \theta = 0$ , отримаємо у вигляді:

$$\theta(z) = A - (A - \theta_1) \cdot e^{-\frac{z}{T_1}}, \quad (6)$$

$$\text{де } A = \frac{t_1 + R\theta_1}{R+1}, T_1 = \frac{G_3 C_3 H}{\alpha F (R+1)}.$$

Враховуючи, що шар зерна має невелику товщину, прийемо лінійний розподіл температури повітря в напрямку ОХ, тобто прийемо:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{L}, t = t_{cp} = \frac{t_2 + t_1}{2},$$

де  $t_1, t_2$  – температура повітря на вході і виході з шару зерна.

Тоді рівняння (1) представимо у вигляді:

$$G_3 C_3 (t_2 - t_1) = \alpha F (\theta - 0,5t_1 - 0,5t_2). \quad (7)$$

Звідси визначимо температуру повітря на виході із шару зерна (температура відпрацьованого повітря):

$$t_2 = mt_1 + n\theta, \quad (8)$$

$$\text{де } n = \frac{\alpha F}{G_v C_p + 0,5\alpha F}, m = \frac{G_v C_p - 0,5\alpha F}{G_v C_p + 0,5\alpha F}.$$

Оскільки температура зерна змінюється в напрямку руху, то і температура повітря на виході шару буде змінюватись: підставляючи значення  $\theta(z)$  із (6) у рівняння (8), матимемо:

$$t_2(z) = mt_1 + n \left[ A - (A - \theta_1) \cdot e^{-\frac{z}{T_1}} \right]. \quad (9)$$

Для визначення кінетики і експозиції охолодження зерна в процесі, що розглядається, продиференціюємо рівняння (6) по  $z$  і підставимо отримане значення в рівняння (1). Отримаємо диференціальне рівняння динаміки охолодження зерна:

$$\frac{m_3 C_3}{\alpha F} \frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{R+1}{G_3 C_3 H \alpha F} \cdot (A - \theta_1) \cdot e^{-\frac{z}{T_1}} + \bar{t} - \theta, \quad (10)$$

де  $\bar{t} = 0,5t_1 + 0,5t_2(z)$  - середнє значення температури повітря.

З урахуванням (9) середня температура повітря визначиться наступним чином:

$$\bar{t} = 0,5 \cdot (1+m)t_1 - 0,5 \cdot n\theta. \quad (11)$$

Підставляючи значення  $\bar{t}$  в рівняння (10) після перетворень матимемо:

$$T_2 \frac{d\theta}{d\tau} = B - \theta, \quad (12)$$

$$\text{де } T_2 = \frac{m_3 C_3}{\alpha F (1-0,5n)}; B = \frac{(1+m)0,5t_1 - F(z)}{1-0,5n}; F(z) = \frac{(R+1)(A - \theta_1)}{G_3 C_3 H \alpha F} \cdot e^{-\frac{z}{T_1}}.$$

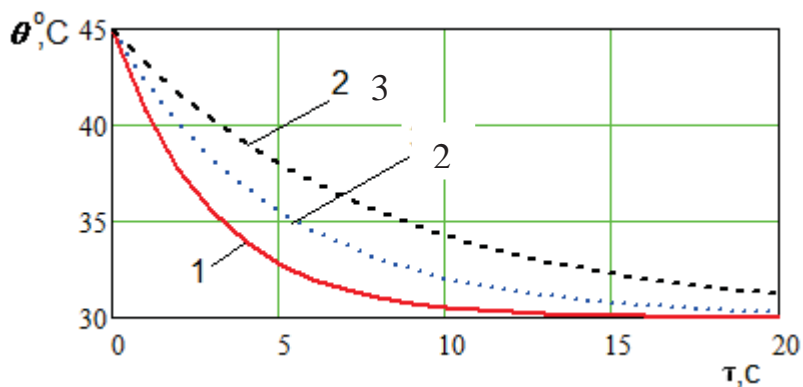
Розв'язуючи рівняння (12) за початкових умов:  $\tau = 0; \theta = \theta_0 = \theta_1$ , отримаємо: час охолодження зерна:

$$\tau = \frac{1}{T_2} \ln \frac{B - \theta_0}{B - \theta}, \quad (13)$$

зміна температури зерна в часі:

$$\theta(\tau) = B - (B - \theta_0) \cdot e^{-\frac{\tau}{T_2}}. \quad (14)$$

Таким чином, отримали рівняння для розрахунку процесу охолодження зерна в рухомому кільцевому шарі зерна при перехресному русі потоків. На рис.2 наведено графіки зміни температури зерна за часом.



1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм

Рисунок 2 – Графічні залежності зміни температури зерна за часом від товщини шару зерна

В усі отримані рівняння входить параметр  $G_3$  – масова подача зерна, яка визначається швидкістю переміщення зернового шару вздовж поверхні:

$$G_3 = S \cdot V \cdot \rho_H, \quad (15)$$

де  $S = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2l)^2]$  – площа перетину шару зерна, м<sup>2</sup>;

$\rho_H$  – насінна щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – швидкість руху.

Для визначення швидкості переміщення шару зерна та, відповідно, продуктивності установки, прийемо елементарний об'єм зернового шару  $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta z$  за матеріальну точку і розглянемо її рух по циліндричній поверхні, яка рівномірно обертається навколо вертикальної вісі і одночасно здійснює гармонічні коливання у вертикальній площині (рис.3).

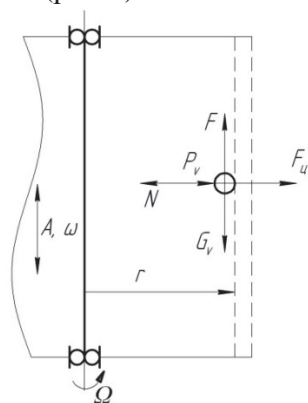


Рисунок 3 – Розрахунково-технологічна схема переміщення частки

Рівняння відносного руху матеріальної частки в проекції на вісі рухомої системи

координат, запишеться в такому вигляді:

$$\begin{aligned} m\ddot{z} &= mA\omega^2 \sin \omega t - mg + F \\ m\ddot{x} &= mr\Omega^2 - N + P_v \end{aligned} \quad (16)$$

де  $m$  – маса частки;

$A, \omega$  – амплітуда і частота вертикальних коливань;

$\Omega$  – кутова швидкість обертання;

$r$  – радіус циліндричної поверхні;

$F = N \cdot f$  – сила тертя;

$f$  – коефіцієнт тертя;

$N$  – нормальна реакція;

$P_v = k_b \cdot m \cdot g$  – сила повітряного потоку;

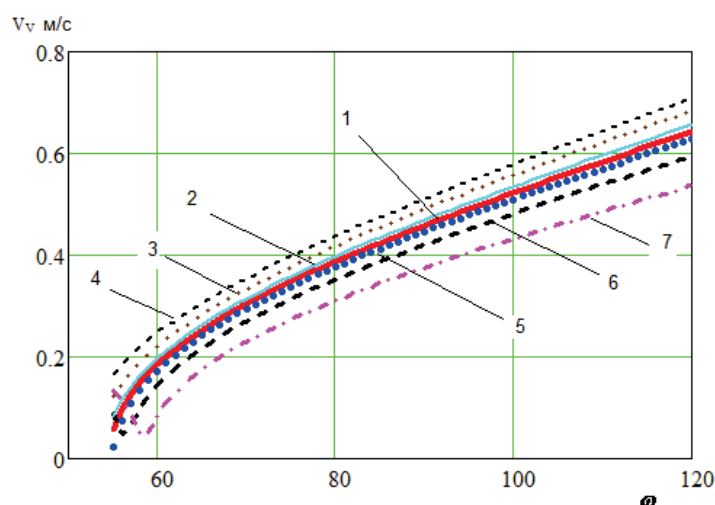
$k_a = \frac{v_v^2}{v_{a\dot{e}i}^2} + \frac{3\Delta P}{4 \cdot d_3 \cdot \rho_3 \cdot g}$  – коефіцієнт впливу повітряного потоку;

$\Delta P$  – різниця тиску повітря на поверхні шару і під решіткою;

$d_3, \rho_3$  – розмір і густина зернини;

$V_v$  – швидкість потоку зернини.

Для регулярного безвідриного режиму руху частини з миттєвими зупинками рівняння (14) мають стандартний розв'язок [8]. Результати дослідження руху частинки по поверхні при потокці повітря, діючого на внутрішню і зовнішню поверхню шару зерна, подано на рис. 4.



Крива 1 – безповітряного потоку; Крива 2,3,4 – подача повітряного потоку на зовнішню поверхню решета: Крива 2 –  $V=3$  м/с, Крива 3 –  $V=6$  м/с, Крива 4 –  $V=9$  м/с,

Крива 5,6,7 – подача повітряного потоку на внутрішню поверхню шару зерна (від центру):  
Крива 5 –  $V=3$  м/с, Крива 6 –  $V=6$  м/с, Крива 7 –  $V=9$  м/с

Рисунок 4 – Залежність швидкості руху зернового потоку від частоти обертання решета та швидкості повітряного потоку

Таким чином, отримані аналітичні залежності і їх графічна інтерпретація для розрахунків параметрів процесу охолодження зерна у вібровідцентрово-пневматичному агрегаті.

**Висновки.** В результаті проведених теоретичних досліджень створені спрощені математичні моделі процесів охолодження зерна в рухомому вібровідцентровому шарі при дії перехресного повітряного потоку.

Отримані розрахункові формули і графіки, які дозволяють визначити параметри теплового і кінематичного режиму роботи охолоджувальної установки.

## Список літератури

1. Послеуборочная обработка и хранение зерна [Текст] / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов, Б.К. Маратов, А.С. Прокопец. – РнД. «Март», 2001. – 240с.
2. Лурье В.М. Исследование процесса охлаждения семенного зерна: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / Лурье В.М.; ВИМ. – М., 1970. – 27с.
3. Авдеев А.В. Изыскание и исследование рациональных охладителей для зерносушилок сельскохозяйственного назначения: автореф. дис.... канд. техн. наук [Текст] / А.В. Авдеев; ВИСКОМ.– М., 1975. –20с.
4. Алтухова Т.А. Экспериментальные исследования работы вихревого охладителя зерна с помощью полнофакторного эксперимента [Текст] / Т.А. Алтухова, С.Н.Шуханов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – №9. – С.99-102
5. Ханхасаев П.Ф. Интенсификация процесса охлаждения зерна путем повышения скорости обдува атмосферным воздухом: автореф.... дис. канд. техн. наук [Текст] / Ханхасаев П.Ф.. – Новосибирск, 1989. – 18с.
6. Соловьев М.И. Исследование теплообмена при движении зернистых материалов в горизонтальной пневмотрубе: автореф.... дис. канд. техн. наук [Текст] / М.И. Соловьев. – Минск, 1964. – 20с.
7. Блохин П.В. Аэрогравитационный транспорт [Текст] /П.В. Блохин. – М.: Колос, 1974. – 120с.
8. Заика П.М. Вибрационнопеременчивые твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах [Текст] / П.М. Заика. – К.: Изд-во УСХА, 1998. – 625с.

### **Borys Kotov, prof., DSc.**

*Vinitskii National Agrarian University, Vinnitsa, Ukraine*

### **Roman Kalinichenko, PhD tech. sci., Olexandr Kurganskiy, post-graduate**

*National University of life and environmental sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

### **Sergiy Stepanenko, PhD tech. sci., Sen. Researcher, Viktor Shvidia, PhD tech. sci.**

*National scientific centre "Institute for Agricultural Engineering and Electrification", Glevakha, Ukraine*

### **Theoretical research the cooling process of grain material when moving in layer vibrocentrifugal**

The purpose of research – create a mathematical description of the thermal and mechanical processes during cooling of the grain material pneumovibrocentrifugal layer.

Dimensional mathematical model describing the thermal processes in the cross-flow grain and the air has been developed. The analysis which made it possible to obtain a differential equation of grain cooling dynamics and the formula for calculating the change in the temperature of grain in time.

By analyzing the movement of a point on the inner surface of a rotating cylindrical sieve, which performs vertical harmonic oscillations were obtained image velocity depending on the flow of grain from the airflow and rotation frequency of the sieve.

As a result of theoretical investigations established simplified mathematical model of grain cooling processes in rolling vibrocentrifugal layer when exposed to air cross flow. These formulas and graphics that allow you to define the parameters of thermal and kinematic modes of operation of the cooling unit.

**pneumovibrocentrifugal apparatus, grain material, cooling, cross-flow movement, annular layer**

Одержано 08.09.16