

УДК 621.665.35.022

**Б.І. Котов, д-р техн. наук, В.О. Грищенко**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

## Моделювання динамічних режимів насипу рослинної продукції при фільтрації повітря, як об'єкта автоматизації з розподіленими параметрами

Отримано і досліджено імітаційну модель теплових процесів в штабелі рослинної продукції (в середовищі MatLAB) при фільтрації повітря.

**рослинна продукція, насип, сховище, вентилявання, охолодження**

**Сутність проблеми.** Оптимальні температурні умови в насипі рослинної продукції при її зберіганні в сховищах останнім часом усе ширше підтримуються за допомогою примусової продувки шару (активне вентилявання) [1, 2]. Практичні рекомендації до цього процесу базуються або на часткових емпіричних залежностях, або наближених теоретичних розрахунках, проведених без врахування деяких важливих для знаходження температурних полів у шарі параметрів [3, 4, 5]. Крім того, у роботах вводяться штучні параметри, що є результатом опосередкування незалежних фізичних процесів [4, 5]. Будучи відмінними від загальноприйнятих у теорії теплообміну, вони не розкривають фізичних особливостей процесу.

Відзначені недоліки, а також відносно невелике число робіт з теорії даного питання говорять про необхідність більш строгого підходу до термодинаміки процесу, диференціації обліку великої кількості змінних величин.

**Результати досліджень.** Оптимальний температурний режим в насипу рослинної продукції при її зберіганні можна забезпечити за допомогою штучного продування насипу повітрям з температурою нижчою за продукт.

Фізична модель процесу. При активному вентиляванні повітряний потік рухається у вертикальному напрямку, бокові стінки камер сховища термо- і гідроізолювані. Процес має характер одночасної вимушеної конвекції і фільтрації повітря крізь пористий шар з рівномірно розподіленим в об'ємі джерелом тепловиділення. При переміщенні повітря крізь товщу насипу температура його збільшується разом із збільшенням вологовмісту, тому відносна вологість повітря практично не змінюється. При цьому температура повітря змінюється, як у просторі, так і в часі. Таким чином насип рослинної продукції при фільтрації повітря крізь нього являє собою нестационарну систему з розподіленими параметрами.

Математичний опис процесу включає два взаємозв'язаних рівняння одномірного температурного поля: одне для елементів продукту, друге для охолоджуючого повітря.

Математична модель розроблена на основі рівнянь теплового балансу при таких припущеннях:

- фізичні властивості повітря та елементів продукту прийняті незмінними і віднесені до середніх значень за процес;
- температурний градієнт в елементах продукту відсутній;

- обмін теплотою продукту з повітрям відбувається конвективно за законом Ньютона;
- теплопередача теплопровідністю відсутня;
- коефіцієнт теплообміну залежить тільки від швидкості повітря, що фільтрується крізь шар.

Розглянемо теплові процеси в елементі шару продукції висотою  $dx$  за час  $d\tau$ , використовуючи такі позначення:  $\theta, t$  - температура рослинної продукції та повітря;  $F_p, F_{np}, F_n$  - площа решітки, поверхня продукту та вільного об'єму шару в перетині;  $v$  - швидкість повітря в перетині;  $\alpha$  - коефіцієнт теплообміну;  $q_{np}$  - питомі тепловиділення на одиницю висоти вздовж координати  $x$ ;  $\rho_n, \rho_{np}$  - густина повітря і продукту;  $G_v$  - витрати повітря;  $m_v, m_{np}$  - маса повітря і продукту в об'ємі насипу;  $H$  - висота насипу.

Рівняння теплового балансу для елементарного об'єму насипу  $\Delta V = dx F_p$  за час  $d\tau$ :

$$c_{np} F_p \rho_{np} dx d\theta_{np} = -q_{np} dx d\tau - \frac{\alpha f}{H} (\theta_{np} - t) dx d\tau. \quad (1)$$

Розкриваючи повний диференціал:

$$d\theta_{np} = \frac{\partial \theta_{np}}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \theta_{np}}{\partial x} dx \quad (2)$$

і враховуючи, що швидкість  $\frac{dx}{d\tau} = v_{np}$  дорівнює нулю,  $v_{np} = 0$ , а  $F_p \rho_{np} H = m_{np}$  рівняння (1) прийме вигляд:

$$c_{np} m_{np} \frac{\partial \theta_{np}}{\partial \tau} = q_{np} - \frac{\alpha f}{H} (\theta_{np} - t), \quad (3)$$

де  $m_{np} = F_{np} \cdot \rho_{np}$  - маса продукції, кг.

Рівняння теплового балансу для повітря з температурою  $t$  для того самого перерізу  $dx$ :

$$c_n F_n \rho_n dx dt = \frac{\alpha f}{H} (\theta_{np} - t) dx d\tau. \quad (4)$$

Вводячи позначення  $G = F_n \cdot \rho_n \cdot v$ ;  $v = \frac{dx}{d\tau}$  перепишемо рівняння теплового балансу для повітря так:

$$c_n G dt = \frac{\alpha f}{H} (\theta_{np} - t) dx. \quad (5)$$

Розкриваючи повний диференціал  $dt$  і підставляючи значення:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\partial t}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dx} + \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6)$$

в рівняння (5) отримаємо:

$$\frac{c \cdot G \cdot H}{V_n} \frac{\partial t}{\partial \tau} + c \cdot G \cdot H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f(\theta_{np} - t). \quad (7)$$

З урахуванням що  $\frac{c \cdot G \cdot H}{V_n} = F_n \cdot c_n \cdot \rho_n = m_n$  отримаємо:

$$c_n \cdot m_n \frac{\partial t}{\partial \tau} + c \cdot G \cdot H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f(\theta_{np} - t), \quad (8)$$

де  $m_n = F_n \rho_n H$  - маса повітря в об'ємі продукції висотою  $H$ .

Таким чином динаміка процесів теплообміну при охолодженні нерухомого шару продукції з тепловиділеннями, примусовим вентиляванням описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} c_{np} m_{np} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = q_{np}(x) - \alpha f(\theta_{np} - t) \\ m_v c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} + G c H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f(\theta_{np} - t) \end{cases} \quad (9)$$

Строгий аналітичний розв'язок системи (9) не існує. Але враховуючи, що математична модель створюється для синтезу систем автоматичного контролю і керування режимами вентилявання, задачу визначення розподілу температури за координатою  $i$  в часі можна спростити, використавши опис теплових процесів в елементарному шарі.

Дослідження процесів зовнішнього теплообміну методами термодинаміки незворотних процесів [6] приводить, в загальному випадку, до потрібної рівності, якою можна описати процес в елементарному шарі продукції, в припущенні, що температура елементів продукту в елементарному шарі незмінна:

$$G_v c_p (t_2 - t_1) = m_{np} \left( c_{np} \frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} + Q_{np} \right) = \alpha f \Delta \bar{T}, \quad (10)$$

де  $t_1, t_2$  - температура повітря на вході та виході із елементарного шару продукту, °C;

$$Q_{np} = q_{np} - r w;$$

$q_{np}$  - питомі тепловиділення;

$r$  - питома теплота випарування вологи;

$w$  - інтенсивність втрат вологи з одиниці маси;

$\Delta \bar{T}$  - середньологарифмічна різниця температур елементів продукту і повітря

$$\Delta \bar{T} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\theta - t_1}{\theta - t_2}}.$$

Використовуючи поняття коефіцієнта охолодження [6]:

$$\eta = \frac{t_2 - t_1}{\theta - t_2}, \quad (11)$$

із першої і третьої частини рівності (10) отримано залежність  $\eta$  від параметрів процесу:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha f}{G_v c_p}\right). \quad (12)$$

З урахуванням (11-12), рівняння (10) представимо теплові процеси в насипу продукції у вигляді системи:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{d\tau} = -k(\theta_1 - t_1) + P'; & t_1 = t_{in} = const \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} = -k(\theta_2 - t_2) + P'; & t_2 = t_1(1 - \eta) + \eta\theta_1 \\ \dots \\ \frac{d\theta_n}{d\tau} = -k(\theta_n - t_n) + P'; & t_n = t_{n-1}(1 - \eta) + \eta\theta_{n-1} \end{cases}. \quad (13)$$

Представимо насип продукції ячеїстою моделлю з  $n$ -шарів масою  $\Delta G_i$  і висотою  $\Delta h_i$ , процеси в яких описуються рівняннями (10-12). Враховуючи, що, відповідно до принципу побудови ячеїстої моделі, температура повітря на виході  $i$ -го шару дорівнює температурі повітря на вході в  $(i+1)$  шар, а температура елементів продукту визначається розв'язком рівняння (10) при температурі повітря на вході в шар  $t_{i+1}$ . Складено імітаційну модель (пакет Simulink середовища MatLAB) у вигляді функціональних блоків (рис. 1-4).

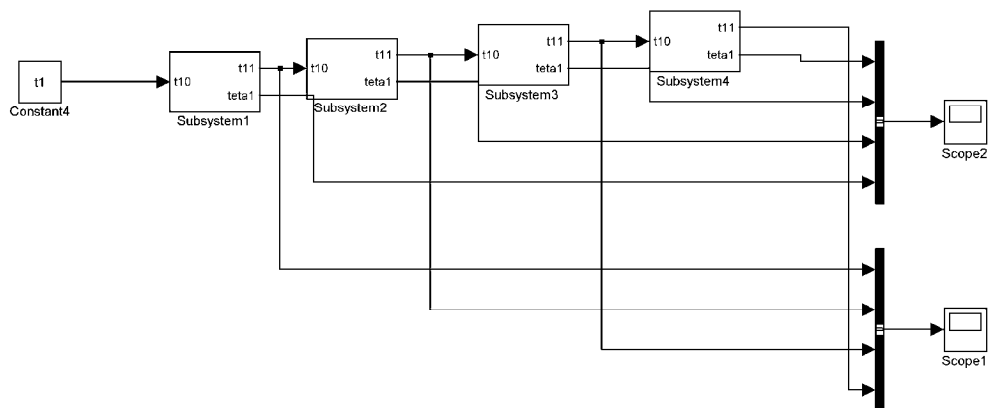


Рисунок 1 - Загальна схема імітаційної моделі теплових режимів в насипу вентильованого продукту

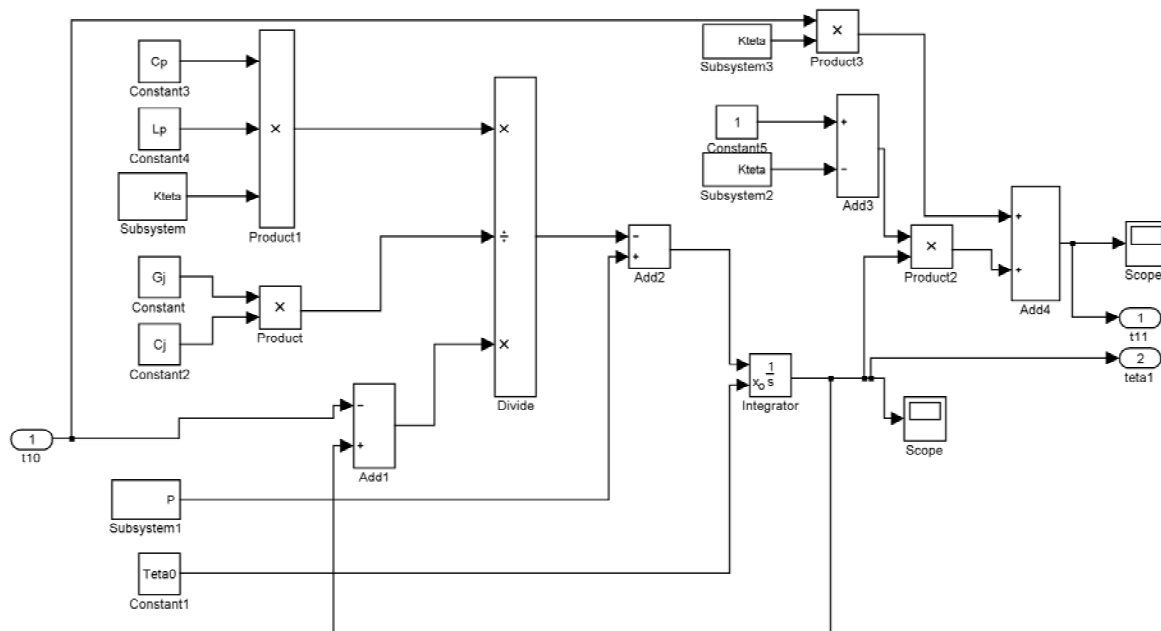


Рисунок 2 - Розрахунок теплового режиму в одному слою

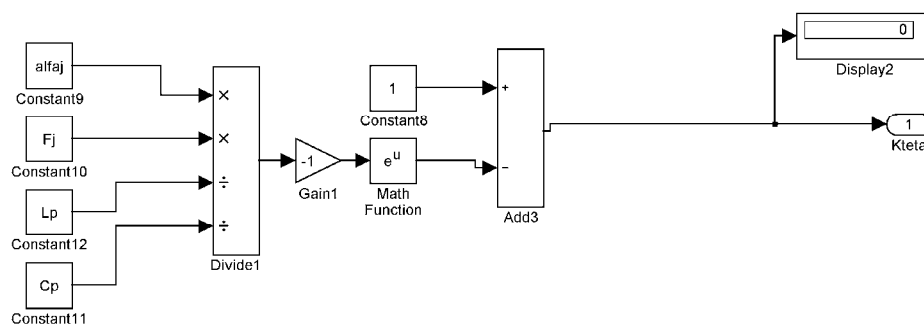


Рисунок 3 - Підпрограма розрахунку коефіцієнта охолодження

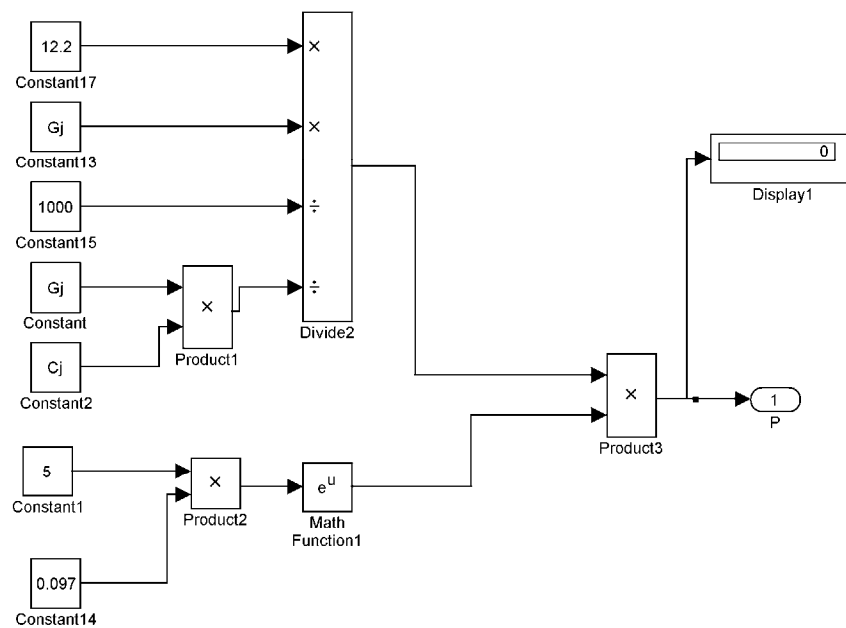


Рисунок 4 - Підпрограма розрахунку тепловиділень

Розв'язок системи (13) за допомогою отриманої моделі дозволяє визначити динаміку змінення температури продувального продукту (рис. 5) в залежності від висоти розміщення датчиків температури та температури повітря на виході зі слою (рис. 6).

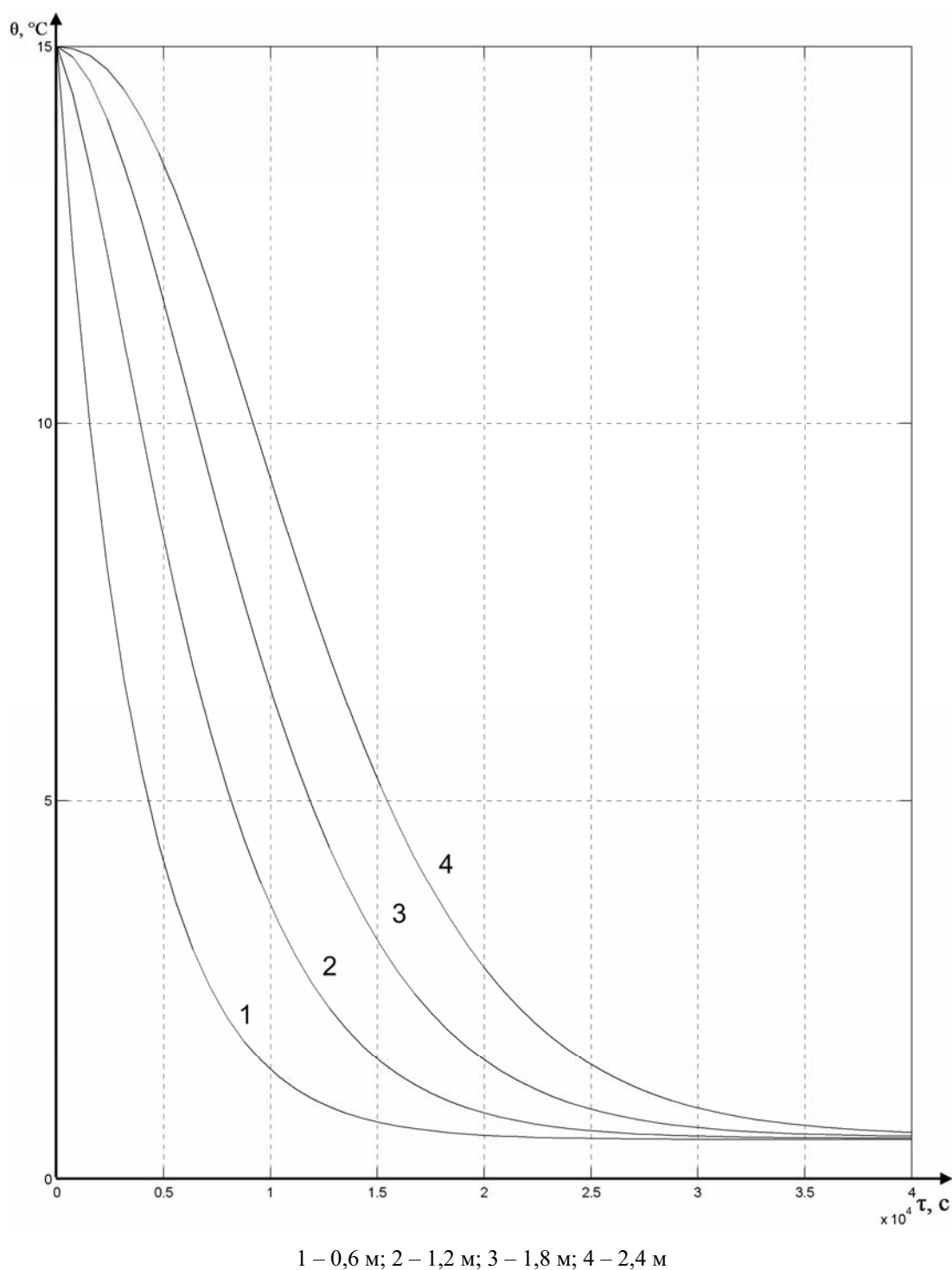
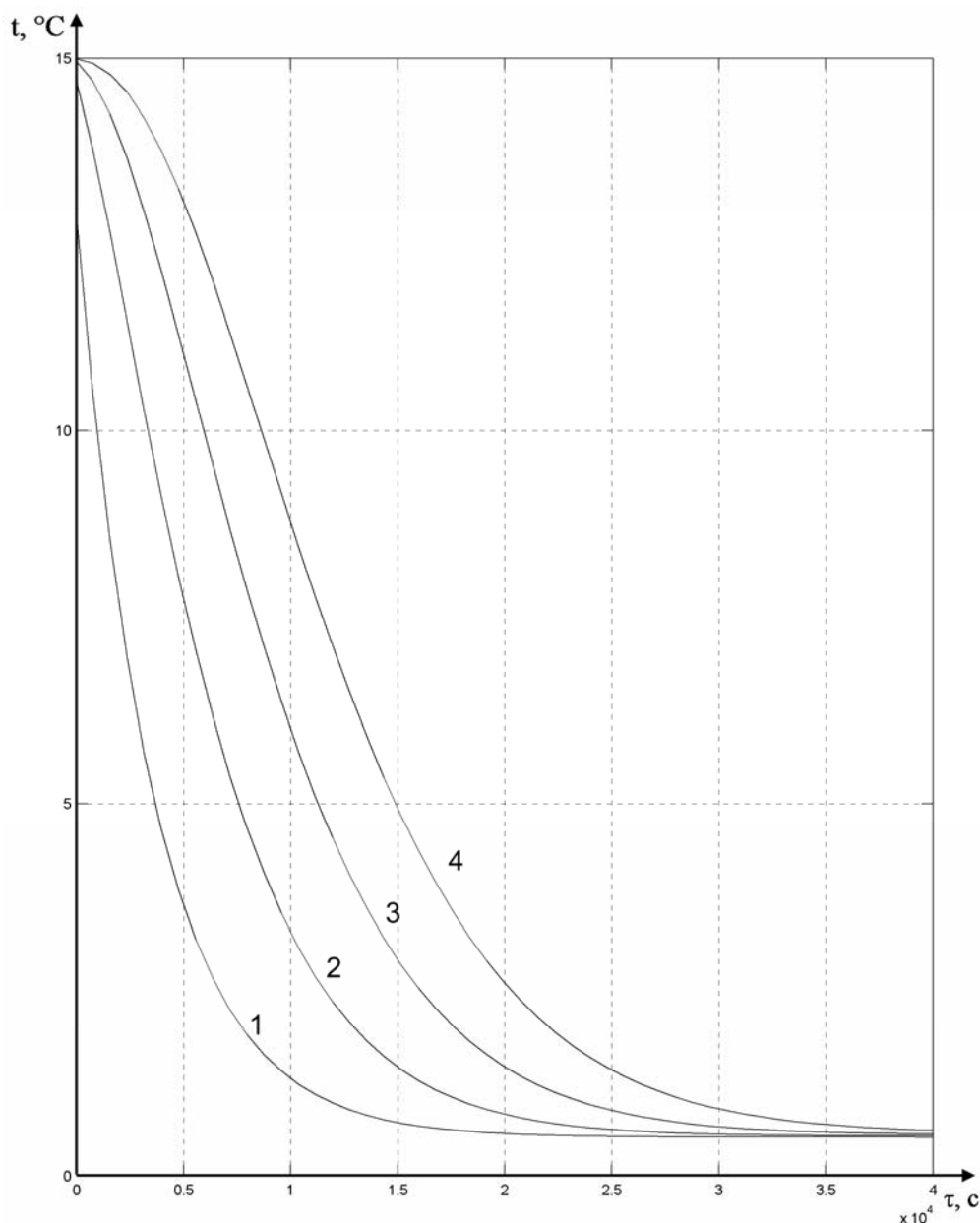


Рисунок 5 - Змінення температури продукту в часі на висоті



1 – 0,6 м; 2 – 1,2 м; 3 – 1,8 м; 4 – 2,4 м

Рисунок 6 - Змінення температури повітря в часі на висоті

**Висновки.** 1. Обґрунтована фізико-математична модель охолодження насипу рослинної продукції примусовим вентиляванням.

2. Побудована та реалізована імітаційна модель теплового режиму насипу, як об'єкта із розподіленими параметрами.

## Список літератури

1. Грищенко В.О. Застосування примусового вентилявання при зберіганні плодовоовочевої продукції// Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин/ Кіровоград, КДТУ. - 2004, вип. 34.- С.80-83.
2. Котов Б.І., Грищенко В.О. Тепло- і масопереносні процеси при зберіганні плодовоовочевої продукції// Збірник наукових праць Національного аграрного університету „Механізація сільськогосподарського виробництва”. – К.: НАУ, 2003. Том 14. – С. 266 – 273.
3. Активное вентилирование картофеля и капусты при хранении. - М.: Колос, 1966. - 231 с.

4. Холмквист А.А. Хранение картофеля и овощей. - Л.: Колос, 1972. - 280 с.
5. Опхюз Б. Влияние интенсивности вентиляции на потери веса картофеля в вентилируемых картофелехранилищах. Сельское хозяйство за рубежом, 1958, №11. - С. 114-128.
6. Загоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Соколовская А.В. Моделирование и метод расчета кинетики процесса сушки зернистых материалов. Промышленная теплотехника. - К.: 1980. - 2, № 2. - С. 81-89.
7. Шевяков А.А., Яковлева Р.В. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1968 - 320 с.

*Б. Котов, В. Грищенко*

**Моделирование динамических режимов насыпи растительной продукции при фильтрации воздуха, как объекта автоматизации с распределенными параметрами**

Получено и исследовано имитационную модель тепловых процессов в штабеле растительной продукции (в среде MatLAB) при фильтрации воздуха

*B. Kotov, V. Grishchenko*

**Simulation of dynamic modes mounds of plant products for filtration of air, as the automation object s distributed parameters**

Obtained and studied a simulation model of thermal processes in the pile of plant products (among MatLAB) with air filtration

Одержано 10.06.12

**УДК 631.361**

**Н.А. Дубчак, доц., канд. техн. наук**

*ВП НУБіПУ «Бережанський агротехнічний інститут»*

## **Дослідження процесу взаємодії коренеплодів з витком шнека очисника**

У статті наведено результати теоретичних досліджень процесу контактної взаємодії коренеплодів які рухаються на поверхні робочої гілки пруткового транспортера з робочими поверхнями шнека, який розташований над прутковим транспортером і поперечно напрямку руху його робочої гілки. Побудовано математичну модель, яка характеризує зміну кута відбивання коренеплодів після їх співудару з витком шнека залежно від параметрів процесу. На основі проведеного аналізу напрямку руху коренеплодів або кута відбивання коренеплодів після їх взаємодії з витком шнека обґрунтовано основні межі зміни конструктивно-кінематичних параметрів комбінованого очисника вороху коренеплодів. **коренеплід, очисник вороху, шнек, діаметр, швидкість, кутова швидкість шнека, математична модель, кут відбивання коренеплодів**

**Постановка проблеми.** Проблема підвищення технічного рівня машин для збирання коренеплодів, основними критеріями оцінки яких є співвідношення втрат, забрудненості та пошкоджень коренеплодів до їх зібраної маси, залишається особливо актуальною у плані подальшого розвитку вітчизняної коренезбиральної техніки.