



Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI: 10.37128/2520-6168-2021

Machinery  
Energetics  
Transport  
of Agribusiness



**ТЕХНІКА  
ЕНЕРГЕТИКА  
ТРАНСПОРТ АПК**





## ЗМІСТ

**I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ.***Алієв Е.Б., Яропуд В. М., Бабін І.А., Буйницький О. І.***РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ТЕСТЕРА ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК v. 2.0..... 4***Vasyl Muzychuk***COLD PLASTIC DEFORMATION OF PROCESSES IN CONDITIONS OF BORDER FORMATION..... 15***Зозуляк І.А.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОЛОЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОЇ СИСТЕМИ ..... 23***Карнаух С.Г.***РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СХЕМ ПОДІЛУ ТРУБ НА МІРНІ ЗАГОТОВКИ..... 30***Матвійчук В. А., Колісник М. А.***РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШИРОКИХ ФЛАНЦІВ НА ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВКАХ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ..... 38***Oleg Gaidamak***INVESTIGATION OF THE SPEED OF MOVEMENT OF POWDER PARTICLES OF COLD GAS DYNAMIC SPRAYING ..... 46***Островський А.Й.***МОДЕРНІЗАЦІЯ ШАБЛОНУ ДЛЯ РОЗМІЧАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ВИРОБІВ НАЙПОШИРЕНІШИХ ПРОСТОРОВИХ ФОРМ ..... 53***Полєвода Ю.А., Волинець Є.О.***ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОРЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ШАРУ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА... 60***Посвятенко Е.К., Будяк Р.В., Аксьом П.А.***РОЗШИРЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ У ХАРЧОВІЙ ГАЛУЗІ..... 70***Sergii Karnaukh, Igramotdin Aliiev***RESEARCH OF PROCESS OF DIVISION OF GRADE ROLLING ON THE MEASURED BLANKS BY METHOD OF BREAKING BEND AT STATIC AND SHOCK LOADING ..... 81****II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА***Пазюк В.М., Токарчук О.А., Токарчук Д.М.***СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СВІТІ ТА В УКРАЇНІ..... 88***Стаднік М.І., Штуць А. А., Пилипенко О. В.***РІВЕНЬ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТВАРИНИЦЬКИХ ФЕРМ ЗА РАХУНОК БІОГАЗУ... 100****III. АГРОІНЖЕНЕРІЯ***Гунько І.В., Стаднік М.І., Шаргородський С.А., Руткевич В.С.***КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ЗАМКНУТИХ ГІДРОСИСТЕМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ..... 113***Грушецький С. М. Яропуд В.М. Токарчук О. А.***ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ І МАШИН В УКРАЇНІ І ЗА КОРДОНОМ..... 126***Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А.***ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНО ЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ДВИГУНІВ МАЛОГАБАРИТНОЇ ТЕХНІКИ..... 137***Середа Л.П., Купчук І.М, Ковальчук Д.А., Замрій М.А.***РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ З ОДНОЧАСНИМ ВНЕСЕННЯМ ДОБРІВ..... 152**



УДК 631.563.2:633.854.78

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-3

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОЛОЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОЇ СИСТЕМИ**

**Зозуляк Ігор Анатолійович**, к.т.н., ст. викладач  
Вінницький національний аграрний університет

**Igor Zozulyak**, PhD., Senior Teacher  
Vinnytsia National Agrarian University

*В даний час перед харчовою промисловістю нашої країни стоять завдання збільшення обсягів виробництва, отримання продуктів високої якості і їх збереження. Рішення даних завдань можливе за рахунок застосування інноваційних технологій і обладнання. Проблема збереження продуктів харчування і одержання продуктів високої харчової цінності може бути вирішена при розробці новітніх технологій обробки і сушки сипучої сільськогосподарської сировини, що застосовується для харчування людини.*

*Реалізація інноваційних технологій визначається використанням нової елементної бази та обладнання. Аналіз розвитку технологій, що застосовуються для сушіння сільськогосподарської сировини, показав, що установки, що працюють на принципі перетворення електричної енергії в енергію інфрачервоного випромінювання, мають суттєві переваги і великий діапазон використання.*

*Технологія інфрачервоної сушки вологих продуктів дозволяє практично на 100% використовувати підведену до продукту енергію і значно скоротити тривалість обробки і сушки. Дана технологія має високу ефективність при температурі 40 ... 60 ° С. При такій сушці максимально зберігається продукт, не руйнуються клітинні мембрани, зберігаються вітаміни. У той же час інфрачервоне випромінювання, володіє стерилізуючим ефектом, робить дані продукти придатними для тривалого зберігання.*

*В роботі проведено аналіз літературних джерел і обґрунтовано необхідність і можливість створення нових конструкцій сушарок з використанням інфрачервоного впливу на продукт і вібраційних коливань робочого контейнера для інтенсифікації процесу сушіння.*

*Запропоновані розрахунки по визначенні як часу знаходження продукту в камері обробки так і висоти шару дадуть можливість розробити адаптивну схему керування процесом сушіння в псевдозрідженому шарі, в апаратах з інфрачервоним підведенням теплової енергії і таким чином впливати на якісні показники висушеної продукції.*

*Ключові слова:* зерно, сушіння, конвективне сушіння, віброосушарка, вібрація, віброкип'ячий шар.

**Ф. 20. Рис. 1. Табл. 1. Літ. 10.**

---

**1. Постановка проблеми**

Сипуча сільськогосподарська сировина, що застосовується для харчування людини, як об'єкт зберігання і переробки, відрізняється неоднорідністю і мінливістю в часі, що викликаються різними процесами, які відбуваються в складових її частинах.

Найбільш важливим параметром, що визначає фізико-хімічні властивості зернової сировини, є вологість. Від неї багато в чому залежать температура, свіжість, а також її якість. При сушці максимально необхідно зберегти продукт, мінімізувати руйнування клітинних мембран, максимально зберегти вітаміни та харчову цінність продукту.

Саме тому таке важливе значення набуло створення обладнання з адаптивним керуванням процесом сушки сипучої сировини, як технологічний процес, що забезпечує не тільки збереження зерна, а й поліпшення його якості.

В результаті відслідковування дійсної амплітуди коливань корпусу на встановленій резонансній частоті та автоматичній корекції амплітуди циклічної примусової сили керованого віброприводу забезпечується стабільне в часі, оптимальне значення питомої потужності вібраційного поля та інфрачервоного випромінювача при довільній продуктивності віброосушарки та довільній масі завантаження, що в свою чергу дозволяє забезпечити задану якість перемішування сипучого матеріалу при технологічному процесі сушіння із температурним градієнтом та технологічному процесі конвективного сушіння.



Численними дослідженнями доведено, що застосування вібрації дозволяє істотно інтенсифікувати процес сушіння. Тому виникає необхідність у подальшому поглибленні наукових досліджень, спрямованих на розробку, методик розрахунку як часу знаходження продукту в камері обробки так і висоти шару продукту в робочій камері при заданих параметрах для створення оптимальних режимів тепло-масообмінних процесів під час сушки.

## 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує велика різноманітність способів, методів і засобів сушіння сировини рослинного походження, що обумовлено особливостями матеріалів, що піддаються сушці, видами зв'язку вологи з матеріалом, метою сушіння, економічними міркуваннями: природна, конвективна, сублимаційна, СВЧ-сушка, кондуктивна, інфрачервона (ІЧ).

При виборі технологічного обладнання для сушіння конкретного матеріалу, в першу чергу, необхідно звернути увагу на ефективність методу, реалізованого в цьому пристрої. Метод термообробки сировини повинен відповідати наступним вимогам: найменших витрат енергії, зниження втрат активно діючих речовин повинно бути мінімальним, кінцевий продукт повинен володіти високими харчовими і смаковими властивостями, добре відновлюватися, зберігатися тривалий час, зберігаючи найбільш цінні компоненти і поживні речовини. Однак, реалізувати всі ці вимоги на основі традиційних методів обробки надзвичайно важко.

Одним з найбільш ефективних і можливих виходів із такого становища є застосування інфрачервоної сушки з регульованими параметрами процесу.

## 3. Мета дослідження

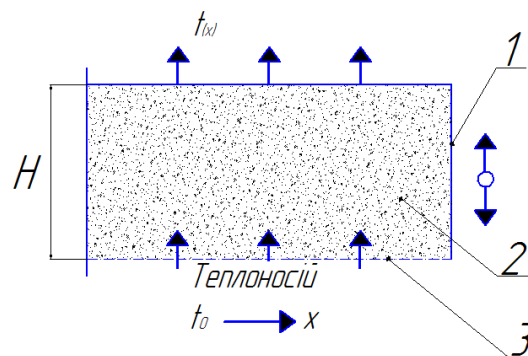
Мета роботи – підвищення ефективності процесу сушіння, шляхом розробки методики розрахунку часу знаходження продукту в камері обробки та висоти шару продукту в робочій камері при заданих параметрах для створення оптимальних режимів тепло-масообмінних процесів під час дії на продукт інфрачервоного теплоперенесення.

## 4. Виклад основного матеріалу

Досліджувану систему (рис.1) можна вважати частковою, що містить в якості дисперсійного середовища тверду сипку фазу, між частками якої зосереджені прошарки рідини. Рівноважна фіксована товщина такого прошарку відповідає мінімуму поверхневої енергії. Таку систему можна з достатньо високою вірогідністю назвати структурою з коагуляційними контактами. Міцність зчеплення часток в такому контакті становить:

$$F_{зч} = 0,1 \div 10Н. \quad (1)$$

Контакти даного типу практично повністю відновлюються після руйнування за міцністю, що досить важливо для масообмінних хіміко – технологічних процесів у харчових дисперсних системах.



**Рис. 1. Розрахункова схема апарата з комбінованим способом псевдозрідженням:  
1 – вібруючий контейнер; 2 – сипуча сировина, що висушується; 3 – решітка**

Процеси руйнування - відновлення при реалізації масообміну в структурах з високим вмістом твердої фази характеризуються переважно зміною їх структурно – механічних або реологічних властивостей. При цьому переважними є залежності в'язкості  $\eta_p$ , модуля пружності  $E$ , періоду обробки  $\theta$  від швидкості деформації  $\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt}$  або швидкості зміни об'єму системи  $V = \frac{dv}{dt}$ , які визначають степінь



руйнування структури [1].

Діапазон зміни даних характеристик зростає з підвищенням дисперсності твердої фази та її концентрації у дисперсійному середовищі (табл. 1).

Оцінюючи напружено-деформований стан досліджуваної системи (табл. 1) під псевдорозрідженням можна розуміти як зниження опору деформуванню з порушення зв'язків між частинами продукції та їх переміщення без відриву один від одної з певним зменшенням об'єму шару (явище псевдоущільнення за  $a \approx q$ ) або без його зміни. За псевдокипіння відбувається його зниження до мінімуму реологічних опорів деформуванню, вільне переміщення часток та істотне збільшення об'єму зрідженого шару.

Таблиця 1

**Зміна реологічних характеристик дисперсної структури по мірі поглиблення псевдорозрідження**

№ п/п	Тип псевдорозрідженого шару	Тип дисперсійної системи	Основні характеристики системи
1	Псевдорозрідження	Т-Г	$\rho \approx const; P_m \rightarrow 0; \eta_p \rightarrow \eta_{min};$ $E_p \rightarrow E_{min}; \theta_p \rightarrow \theta_{min}.$
		Т-Р-Г	$\frac{\eta_0}{\eta_{min}^{3+5^{11}}}; \frac{\eta_p}{\eta_{min}}.$
2	Псевдокипіння	Т-Г	$\rho \rightarrow \rho_{min}; P_m = 0; \eta_p == \eta_{min};$ $E_p = E_{min}; \theta_p = \theta_{min}.$
		Т-Р-Г	$\frac{\eta_p}{\eta_{min}}; \eta_p = \eta_{cr} p_{min}.$
3	Максимальна текучість по всьому об'ємі	Т-Р Т-Р-Г	$\eta_p = \eta_{min}; E_p \rightarrow E_{min};$ $\theta_p \rightarrow \theta_{min}.$
4	Максимальна текучість поверхневого шару в зоні контакту	Т-Р Т-Р-Г	$\eta_p \rightarrow \eta_{min}; E_{p0min};$ $\theta_{p0min}.$

де  $\eta_0$  – в'язкість незруйнованої структури;  $\eta_{min}$  – мінімальна в'язкість повністю зруйнованої структури;  $\phi$  – концентрація дисперсної фази у дисперсійному середовищі;  $\eta_p$  – поточна в'язкість при руйнуванні структури;  $a$  – прискорення силового поля.

Системи Т-Р та Т-Р-Г є найбільш близькі до зволоженого дисперсного матеріалу, зокрема зерно-круп'яної маси. У процесі вібраційного сушіння здійснюється руйнування контактів між твердою та рідкою фазами методом теплової дії на продукцію за умови знакозмінних навантажень, що дозволяє ототожнити його з розглянутими вище.

Для характеристики частинок неправильної форми серед геометричних параметрів доцільно використовувати такі:

- геометричний коефіцієнт форми  $f$ , як відношення поверхні частинки  $F_\phi$  до поверхні рівновеликої кулі  $F_K$ :

$$f = \frac{F_\phi}{F_K} = \left(\frac{d_F}{d_V}\right)^2, \quad (2)$$

де  $d_F$  та  $d_V$  – відповідно діаметри куль, що є еквівалентні за поверхнею та об'ємом;

- коефіцієнт сферичності  $\phi$ , як величина обернено пропорційна коефіцієнту форми становить:

$$\phi = f^{-1}. \quad (3)$$

- динамічний коефіцієнт форми  $f_d$  можна визначити як відношення коефіцієнта лобового опору несферичної частинки до коефіцієнту лобового опору сферичної частини, що є рівна їй за об'ємом;

Для зернокруп'яного матеріалу, що є продовгуватої форми, можна приймати  $f = 1,5h$ ,  $\phi = 0,65$ ; для округлих форм без різних виступів  $f = 1,16 \div 1,2$ ,  $\phi = 0,83 \div 0,86$  [2].

- для помірних швидкостей теплоносія ( $\omega < 0,5\omega_p$ ) порозність псевдорозрідженого шару змінюється незначним чином

$$\varepsilon = \varepsilon_{кр}(\omega/\omega_{кр})^\xi. \quad (4)$$

За даними [3]  $\xi = 0,7A_q^{0,031}$  при  $177 < A_q < 2,14 \cdot 10^4$  за джерелом [4] величина  $\xi$  залежить від діаметра  $d$  часток таким чином:

для  $d < 0,3$  мм  $\xi = 0,08$ ;

для  $d = 0,3 \div 2,7$  мм  $\xi = (0,05 \div 0,065)d$ ;

для  $d > 2,7$  мм  $\xi = 0,2$ .



Перенесення теплоти у псевдокиплячому шарі реалізується за рахунок температуропровідності пошарово від джерела вібрації, а також внаслідок конвективної теплопередачі газовидним енергоносієм. Внесок останнього фактора в загальній теплопередачі є незначним, тому, що об'ємна теплоємність повітряного теплоносія значно менша ніж у частинок, що також здійснюють теплообмін. При цьому перемішування частинок у вертикальній площині є значно інтенсивнішим ніж у горизонтальній.

Для оціночних розрахунків можна використати дифузійну модель з наближеними значеннями емпіричних коефіцієнтів теплоперенесення (рис. 3.1)

Для оцінки коефіцієнта дифузії часток у горизонтальному напрямі можна використати формулу [4]:

$$k_g \approx \frac{1}{60} \left( \frac{n}{n_{кр}} - 1 \right) \sqrt{gl_{min}^3}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (5)$$

де  $l_{min}$  – менший із розмірів шару по висоті або ширині.

Приймаємо, що у псевдокиплячому шарі перенесення теплоти здійснюється за рахунок перемішування частинок, тому:

$$\alpha_{тем} = K_g, \quad (6)$$

де  $\alpha_{тем}$  – коефіцієнт температуропровідності.

Тривалість повного змішування за даних умов  $\tau_p$  повинен бути пропорційним відношенню висоти  $H$  шару до швидкості  $\sigma_{ц}$  циркуляційного руху часток, що займають певну частину об'єму  $V'$  при підніманні шару в процесі «кипіння».

$$\sigma_{ц} = V' U_0, \quad (7)$$

де  $U_0$  – витрата теплоносія через одиницю площі шару.

Тоді

$$\tau \approx H_{кр} / (2,6 V' U_0), \quad (8)$$

де  $H_{кр}$  – висота шару на межі псевдозрідження.

Тривалість повного змішування по висоті, як правило, є значно меншим, ніж середній час перебування  $\tau_{ш}$  часток у шарі [3], тому можна вважати, що протягом  $\tau_{ш}$  частинки сировини перебувають у стані ідеального перемішування по висоті, тобто температуру частинок по висоті вважають однаковою, а нерівномірність температур має місце тільки у горизонтальному напрямі.

Для наведених вище умов коефіцієнт температуропровідності:

$$\alpha_{тем} = \frac{1}{60} \sqrt{gl_{min}^3}. \quad (9)$$

Диференціальне рівняння передачі теплоти по довжині апарату в стаціонарному режимі представляємо у вигляді:

$$\lambda_T \frac{d^2 t}{dx^2} - \delta c \rho \frac{dt}{dx} - c_T \rho_T \delta_n (t - t_0) + g = 0. \quad (10)$$

За граничних умов

$$\delta c \rho t_0 = \delta c \rho t(0) - \lambda_T \frac{dt}{dx} |_{x=0}; \quad (11)$$

$$\lambda_T \frac{dt}{dx} |_{x=l} = 0, \quad (12)$$

де  $\delta$  – швидкість руху частинок сировини вздовж апарату;

$c, \rho$  – теплоємність та щільність шару в апараті;

$\lambda_T$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності шару в горизонтальному напрямі;

$c_T \rho_T$  – теплоємність та щільність теплоносія;

$\delta_n$  – швидкість псевдозрідження, тобто швидкість газу в апараті в розрахунку на одиницю вільного перерізу;

$g$  – потужність тепловиділення в одиницю об'єму шару.

Для оціночних розрахунків можна використати наближене рівняння, що є справедливим за  $Pe < 1$  [5]:

$$\Delta t = t(l) - t(0) = (\bar{t} - t_0) Pe \cdot 0,5, \quad (13)$$

де  $Pe = \frac{\delta l}{\alpha_{тем}}$  – число Пекле

$\bar{t}$  – середня температура в апараті.

У шарі порівняно пружних частинок сировини турбулізуюча дія сусідніх часток на потік газовидного теплоносія призводить до інтенсифікації процесів тепломасообміну порівняно з одною частинкою, тому рекомендується розраховувати міжфазний теплообмін у псевдокиплячих шарах при



$\frac{Re}{\varepsilon}$  за рівнянням [6]:

$$Nu_o = 0,4(Re/\varepsilon)^{2/3} Pr^{1/3}, \quad (14)$$

де  $Nu_o = \frac{\alpha_o d}{\lambda_r}$  – критерій Нуссельга;  $Re = \frac{vd}{\nu_r}$  – критерій Рейнальдса;  $\lambda_r, \nu_r$  – теплопровідність та кінематична в'язкість газовидного теплоносія;  $\varepsilon$  – порозність шару.

При розрахунках можна враховувати лише умови, що відповідають початку псевдозрідження (за  $v = v_{кр}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$ ), оскільки частки переважно перебувають у суцільній фазі, яку пронизує теплоносій зі швидкістю, що є близькою до початку псевдозрідження.

Приймаючи для часток довільної форми  $\varepsilon_{кр} \approx 0,48$  можна дещо спростити представлені вище формули [6]:

$$Re_{кр} = 0,25\sqrt{Ar}. \quad (15)$$

Тоді рівняння для розрахунку міжрядного теплообміну у псевдозрідженому шарі порівняно крупних часток при  $\frac{Re_{кр}}{\varepsilon_{кр}} > 200$ , або  $Ar > 10^6$  можна використовувати формулу:

$$Nu_o = 0,26(Ar Pr)^{1/3}. \quad (16)$$

У разі  $\frac{Re_{кр}}{\varepsilon_{кр}} < 200$  справедливе рівняння  $Nu_o = 0,016(Re/\varepsilon)^{1,3} \cdot Rr^{1/3}$

Зі збільшенням розмірів часток сировини підвищується висота активної зони через збільшення швидкості газовидного теплоносія та зменшення питомої (на одиницю об'єму шара) поверхні часток.

У прирешітковій зоні при рівномірному газорозподіленні умови розширення є близькими до розширення однорідного шару, для якого справедливе рівняння:

$$Re = Ar \cdot \varepsilon^{4,75} / (18 + 0,61\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}). \quad (17)$$

Відповідно  $Re_{кр} = Ar / (1400 + 5,22\sqrt{Ar})$

Критерій Аргона визначаємо як:

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu_r^2} \cdot \frac{\rho_v - \rho_r}{\rho_r}. \quad (18)$$

Далі перевіряємо  $\frac{Re_{кр}}{\varepsilon_{кр}} \geq 200$  та визначаємо критерій Нуссельта за наведеною вище формулою.

Знайдену величину  $Nu_o$  підставляємо у вираз, що отриманий за передумови про режим повного витіснення при русі газовидного теплоносія через рівномірно зріджений шар монодисперсних часток однакової температури  $t_r$ :

$$\theta = \frac{t - t_r}{t_o - t_r} = \exp \left[ - \frac{6Nu_o}{PePr} \frac{h}{d} \right]. \quad (19)$$

Далі визначаємо коефіцієнт порозності  $\varepsilon$  за формулою (4), критерій  $Nu_o$  за формулою (14).

Висоту зони прогрівання  $h$  знаходимо із рівняння (14), а саме:

$$h = \frac{d Re_{кр} Pr \cdot \ln \theta}{6Nu_o(1 - \varepsilon_{кр})}. \quad (20)$$

#### 4. Висновки

Запропоновані розрахунки дають можливість визначити як час знаходження продукту в камері обробки так і висоту шару при заданих параметрах в'язкості  $\eta_p$ , модуля пружності  $E$ , швидкості деформації  $\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt}$  або швидкості зміни об'єму системи  $V = \frac{dv}{dt}$ , які визначають степінь руйнування структури, та дадуть можливість розробити адаптивну схему керування процесом сушіння в псевдозрідженому шарі, в апаратах з інфрачервоним підведенням теплової енергії і таким чином впливати на якісні показники висушеної продукції.

#### Список використаних джерел

1. Берник П. С., Паламарчук И. П., Зозуляк И. А. Анализ конструкций вибрационных сушилок для сыпучей сельскохозяйственной продукции. *Вибрации в технике и технологиях. Винница*, 1998. № 2 (6). С. 14–21.
2. Берник П. С., Денисов П. Д., Зозуляк И. А. Вибрационные лотковые сушарки. *Вибрации в технике и технологиях. Винница*, 2000. № 1(13). С. 32–33.



3. Burdo O. Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2017. Issue 4. P. 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399
4. Паламарчук І. П., Берник П. С., Стецько З. А., Яськов В. В., Зозуляк І. А. Механічні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва. Том 1. Навчальний посібник. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2004. 336 с.
5. Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Бандура В. Н. Принципы направленного энергетического действия в пищевых нанотехнологиях. *Проблемы региональной энергетики*. 2015. Т. 1, № 27. С. 79–85
6. Paziuk V. M., Liubin M. V., Yaropud V. M., Tokarchuk O. A., Tokarchuk D. M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2018. 56(3), P. 39–48
7. Paziuk V. M., Petrova Z.O., Tokarchuk O.A., Yaropud V.M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2019. 58(2), P. 303–310.
8. Burdo O. G., Bandura V. N., Levtrinskaya Yu. O. Electrotechnologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018/3/1. Vol. 54, № 2. P. 210–218.
9. Севостьянов І. В., Зозуляк І. А. Технологічне обладнання цехів переробки продукції тваринництва. Навчальний посібник. Вінн. нац. аграр. ун-т. Вінниця : ВНАУ, 2020. 130 с.
10. Зозуляк І.А. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів інфрачервоної вібраційної сушарки. *Техніка, енергетика та транспорт АПК*, 2020. № 1(108). С. 75–81.

#### References

- [1] Bernik, P. S., Palamarchuk, I. P., Zozulyak, I. A. (1998). Analiz konstrukcij vibracziionnykh sushilok dlya sypuchej selskokhozyajstvennoj produkcii [Analysis of the design of vibratory dryers for bulk agricultural products]. *Vibraczii v tekhnike i tekhnologiyakh*. Vinniczya, 2(6), 14–21. [in Russian].
- [2] Bernik, P. S., Deni`sov, P. D., Zozulyak, I. A. (2000). Vibracziijni lotkovi susharki [Vibrating tray dryers]. *Vibraczii v tekhnike i tekhnologiyakh*. Vinniczya, 1(13), 32–33. [in Ukrainian]
- [3] Burdo, O. Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. (2017). Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer. *EUREKA: Physics and Engineering*. Issue 4. P. 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399. [in English]
- [4] Palamarchuk, I. P., Bernik, P. S., Steczko, Z. A., Yaskov, V. V., Zozulyak, I. A. (2004). *Mekhanichni procesi ta obladnannya pererobnogo ta kharchovogo virobnicztva [Mechanical processes and equipment of processing and food production]*. Том 1. Navchalnij posibnik. Lviv: Vidavnicztvo NU «Lvivska politekhnika». [in Ukrainian]
- [5] Burdo, O. G., Terziev, S. G., Bandura, V. N. (2015). Princzipy napravlennogo energeticheskogo dejstviya v pishhevykh nanotekhnologiyakh. *Problemy regionalnoj energetiki*, 1(27), 79–85. [in Russian].
- [6] Paziuk, V. M., Liubin, M. V., Yaropud, V. M., Tokarchuk, O. A., Tokarchuk, D. M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2018. 56(3), 39–48. [in English]
- [7] Paziuk, V. M., Petrova, Z.O., Tokarchuk, O.A., Yaropud, V.M. Research of rational modes of drying rape seed *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2019. 58(2), c. 303-310. [in English].
- [8] Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Yu. O. (2018). Electrotechnologies of targeted energy delivery in the processing of food raw materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 54, 2, 210–218 [in English].
- [9] Sevostianov, I. V., Zozuliak, I. A. (2020). *Tekhnolohichne obladnannya tsekhiv pererobky produktsii tvarynyntstva [Technological equipment of livestock processing shops. Tutorial]*. Navchalnyi posibnyk. Vinn. nats. ahrar. un-t. Vinnytisia : VNAU. [in Ukrainian]
- [10] Zozuliak, I.A. (2020). Obgruntuvannia konstruktsiino-tekhnolohichnykh parametriv infrachervonoj vibratsiinoj susharki [Substantiation of design and technological parameters of infrared vibration dryer]. *Tekhnika, enerhetyka ta transport APK*, 1(108). 75–81. [in Ukrainian]

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ СИСТЕМЫ**

В настоящее время перед пищевой промышленностью нашей страны стоят задачи увеличения объёмов производства, получения продуктов высокого качества и их сохранности. Решение данных задач возможно за счёт применения инновационных технологий и оборудования. Проблема сохранности продуктов питания и получения продуктов высокой пищевой ценности может быть решена при разработке новейших технологий обработки и сушки сыпучего сельскохозяйственного сырья, применяемого для питания человека.





Реализация инновационных технологий определяется использованием новой элементной базы и оборудования. Анализ развития технологий, применяемых для сушки сельскохозяйственного сырья, показал, что установки, работающие на принципе преобразования электрической энергии в энергию инфракрасного излучения, имеют существенные преимущества и обширный диапазон использования.

Технология инфракрасной сушки влажных продуктов позволяет практически на 100% использовать подведенную к продукту энергию и значительно сократить продолжительность обработки и сушки. Данная технология обладает высокой эффективностью при температуре 40...60°C. При такой сушке максимально сохраняется продукт, не разрушаются клеточные мембраны, сохраняются витамины. В то же время инфракрасное излучение, обладая стерилизующим эффектом, делает данные продукты пригодными для длительного хранения.

В работе проведен анализ литературных источников и обоснована необходимость и возможность создания новых конструкций сушилок с использованием инфракрасного воздействия на продукт и вибрационных колебаний рабочего контейнера для интенсификации процесса сушки.

Предложенные расчеты по определению, как времени нахождения продукта в камере обработки, так и высоты слоя дадут возможность разработать адаптивную схему управления процессом сушки в псевдооживленном слое, в аппаратах с инфракрасным подводом тепловой энергии и таким образом влиять на качественные показатели высушенной продукции.

**Ключевые слова:** зерно, сушка, конвективная сушка, вибросушарка, вибрация, виброкипящий слой.

**Ф. 20. Рис. 1. Табл. 1. Лит. 10.**

### MODELING OF DEGRADATION PROCESSES OF A HOMOGENEOUS SYSTEM

Currently, the food industry of our country faces the task of increasing production, obtaining high quality products and preserving them. The solution of these problems is possible through the use of innovative technologies and equipment. The problem of food preservation and obtaining high nutritional value can be solved by developing the latest technologies for processing and drying of bulk agricultural raw materials used for human consumption.

The implementation of innovative technologies is determined by the use of new elements and equipment. Analysis of the development of technologies used for drying agricultural raw materials has shown that plants that operate on the principle of converting electrical energy into energy of infrared radiation have significant advantages and a wide range of uses.

The technology of infrared drying of wet products allows to use almost 100% of the energy supplied to the product and significantly reduce the duration of processing and drying. This technology is highly effective at a temperature of 40 ... 60 ° C. With such drying, the product is stored as much as possible, cell membranes are not destroyed, vitamins are stored. At the same time, infrared radiation, which has a sterilizing effect, makes these products suitable for long-term storage.

The analysis of literature sources is carried out in the work and the necessity and possibility of creation of new designs of dryers with use of infrared influence on a product and vibration fluctuations of the working container for intensification of drying process is substantiated.

The proposed calculations to determine both the time of the product in the processing chamber and the height of the layer will allow to develop an adaptive control scheme for the drying process in the fluidized bed, in devices with infrared heat supply and thus affect the quality of dried products.

**Key words:** grain, drying, convective drying, vibration dryer, vibration, vibro-boiling layer.

**F. 20. Fig. 1. Table. 1. Ref. 10**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Зозуляк Ігор Анатолійович** – кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних та харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [zozulak@vsau.vin.ua](mailto:zozulak@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>)

**Зозуляк Ігорь Анатоліевич** – кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Технологических процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: [zozulak@vsau.vin.ua](mailto:zozulak@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>)

**Igor Zozulyak** – PhD, senior teacher of the Department of "Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions" of the Vinnytsia National Agrarian University (3 Solnechnaya St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [zozulak@vsau.vin.ua](mailto:zozulak@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>).