

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2

Вібрації в техніці та технологіях



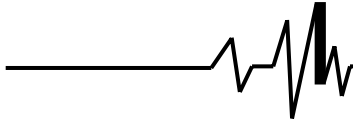
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 2 (109)

Вінниця 2023

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2023. – 2 (109) – 134 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 2 від 25.08.2023 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвійчук В.А. – д.т.н. професор,
Вінницький національний аграрний
університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

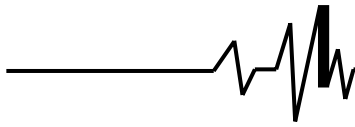
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

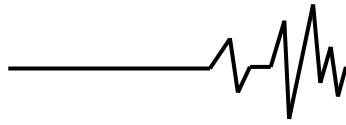
Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

<i>Цуркан О.В., Спірін А.В., Твердохліб І.В., Дідик А.М.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ.....	5
<i>Kupchuk I., Kravets R., Burlaka S., Dubrovina O.</i> THEORETICAL RESEARCH OF PROCESS REGULARITIES OF GRINDING STRUCTURAL- HETEROGENEOUS ORGANIC MATERIALS.....	12
<i>Алієв Е.Б., Дудін В.Ю., Лінко М.О.</i> РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЕКСПАНДАТІВ.....	20
<i>Алієв Е.Б., Павленко С.І.</i> СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ БУРТА І ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ КОМПОСТНОЇ СУМІШІ ОДНОБАРАБАННИМ АЕРАТОРОМ.....	30

2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА

<i>Veselovska N.</i> INNOVATIVE METHODS OF MONITORING THE MECHANICAL PROCESSING PROCESS.....	40
<i>Матвійчук В.А., Савків В.В.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ ПРИ ВІДБОРТУВАННІ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ.....	45
<i>Возняк О.М., Солоня О.В., Замрій М.А., Тихонова С.В.</i> ШІМ-КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ У МЕХАТРОНИХ МОДУЛЯХ ЗА ПРИНЦИПОМ ПРОСТОРОВОВО-ВЕКТОРНОЇ МОДУЛЯЦІЇ.....	53
<i>Веселовська Н.Р., Луц П.М.</i> ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПОННИХ УСТАНОВОК ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ З АВТОМАТИЗОВАНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОЩУВАННЯ.....	62
<i>Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОГО ЦИКЛУ НА ПОВЕРХНІ ЗАГОТОВКИ ВНАСЛІДОК ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ.....	72
<i>Sereda L., Trukhanska O., Shvets L., Dyachenko A.</i> PERSPECTIVES AND FEATURES OF BRANCH UTILIZATION TECHNOLOGIES IN INTENSIVE GARDENS AND PARKS.....	85
<i>Колісник М.А., Штуць А.А.</i> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ЗБУДЖЕННЯ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН.....	93
<i>Чмих К.В., Волковський І.В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DEFORM.....	104
<i>Шаргородський С.А., Замрій М.А., Кондратюк Д.А.</i> РОЗРОБКА СТЕНДА ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ НАСОСА ДОЗАТОРА ГІДРОСТАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ САМОХІДНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....	111
<i>Солоня О.В., Твердохліб І.В., Котов Б.І., Панцир Ю.І.</i> ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ УНІВЕРСАЛЬНОГО ВІБРОМЛИНА ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	122

**Солоня О.В.**

к.т.н., доцент

Твердохліб І.В.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Котов Б. І.**

д.т.н., професор

Панцир Ю.І.

к.т.н., доцент

**Подільський державний
аграрно-технічний
університет****Solona O.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Tverdokhlib I.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****Kotov B.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Pantsyr Y.**Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Podolsk State Agrarian
Technical University****УДК 631.365: 631.53.01(043)****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-14****ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО
ОРГАНУ УНІВЕРСАЛЬНОГО
ВІБРОМЛИНА ДЛЯ СУШІННЯ
ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ**

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації тепло і – масопереносу в процесах сушіння рослинних матеріалів і підвищення енергетичної ефективності сушильних установок є застосування вібраційного поля для перемішування зернового матеріалу при переміщенні в сушильній камері. Аналізом існуючих вібраційних установок виявлено, що найбільш перспективним є використання вібропомельних камер з просторово – циркуляційним рухом матеріалу для реалізації термічної обробки зерна, зокрема сушіння. Таким чином, пропонується використовувати апробовану елементну базу вібраційного млина, в якості робочого органа якого є помельні камери з просторово – циркуляційним рухом завантаження.

В статті представлено конструктивно – технологічну схему вібротермосушильної установки, конструкційні параметри установки та розроблено математичний опис процесу сушіння зерна. Отримані диференціальні рівняння складають математичну модель нестационарного процесу безперервного сушіння зернового матеріалу і визначають зміну в часі, параметри зерна і парогазової суміші на виході зерносушильної камери. Побудована математична модель процесу сушіння дає змогу визначити режими нагріву та зневоднення зернового матеріалу при циркуляційному переміщенні у вібраційній камері з кондуктивним підведенням енергії і частковим вакуумуванням камери для розширення технологічних можливостей установок типу «вібромлин». Наведено графічні залежності зміни в часі температури і вологості зерна, данні для побудови яких визначені експериментально при нагріві моношару зерна масою m на зріючій поверхні площею F при стабілізованій температурі поверхні θ_n . В роботі отримані показники кінетики сушіння і нагріву зерна, за якими розраховані параметри вібротермосушильної установки. Також використовуючи результати експериментів, встановлено показники функціонування вібросушарки, створеної на базі помельної камери вібромлина.

Ключові слова: сушіння, вібраційна установка, вакуум, кондуктивний нагрів, зерно, помельні камери з просторово – циркуляційним рухом завантаження адаптивного вібраційного млина.

Постановка проблеми. Одним із прогресивних напрямків інтенсифікації процесів обробки сипких сільськогосподарських матеріалів є застосування вібраційних технологій, які широко використовуються в різних галузях переробної промисловості і, зокрема вібраційних машин

безперервної дії з просторово – циркуляційним рухом завантаження.

Особливим класом таких машин є вібраційні подрібнювачі сипких матеріалів – вібромлини. Технологічні особливості таких машин полягають в інтенсивному малоенергозатратному



перемішуванні матеріалу в камері при його просторово – циркуляційному переміщенні в прямому або замкнутому циклах. Практично матеріал (завантаження) під дією сформованого вібраційного поля обертається в циліндричних камерах утворюючи розпушений суцільний обертальний шар, який щільно контактує з внутрішньою поверхнею камери. Такий механізм процесу переміщення та перемішування сипкого матеріалу є дуже привабливим для організації процесів термообробки або сушіння вологих матеріалів шляхом підведення до матеріалу теплової енергії та видалення залишкової вологи з віброкамери.

Таким чином, є реальна можливість використовувати створену і апробовану елементну базу, а саме сполучені помельні камери з просторово-циркуляційним рухом завантаження для нагріву або сушіння зернових матеріалів.

Враховуючи, що вібромеханічні характеристики вібромлина достатньо вивчені і висвітлені в публікаціях [9, 11] виникає необхідність аналітичного (як першого етапу) дослідження теплових процесів, які визначають режими процесу термічного сушіння матеріалу при циркуляційно-просторовому переміщенні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним способом сушіння зерна в господарствах залишається – конвективне сушіння в щільному рухомому (переважно гравітаційному) шарі. Недоліками такого способу є екранування до 30 % поверхні теплообміну та значні втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом [1]. Суттєвої інтенсифікації сушіння зерна можна досягти застосуванням вібраційного зрідження зернового шару [2-5]. Вібраційна дія на зерновий матеріал розпушує щільний шар, збільшує рівномірність обробки зернівок сушильним агентом, виключає місцевий перегрів окремих частинок [4, 5]. Останніми роками дослідження в області сушіння у вібраційному шарі спрямовано за напрямками вдосконалення режимів сушіння [6], застосування комбінованих методів підведення енергії до матеріалу [7, 8], використанням інфрачервоного випромінювання [7], кондуктивної теплопередачі теплової енергії до матеріалу [12]. Проаналізовані дослідження [2-8, 12] стосуються в основному інтенсифікації конвективного тепло- і масообміну, але значні втрати енергії з відпрацьованим сушильним агентом, не дозволяють повно використовувати підведену до матеріалу енергію.

Разом з тим, значної енергетичної ефективності зерносушарок можна досягти, застосуванням кондуктивного теплопідводу безпосередньо в шар матеріалу [12, 14, 15] і використанням сушильного агента не як теплоносія, а як середовища для поглинання і видалення вологи. Хороші результати досягнуто також вакуумуванням сушильної камери [16].

Процеси дослідження процесів перемішування і транспортування матеріалу у просторово – циркуляційному шарі, наприкладі, вібромлинів з різними варіантами використання вібраційних полів досить детально висвітлені в роботах [9, 10]. Однак, залишено маловивченими процеси тепло- і масообміну в апаратах з просторово – циркуляційним рухом матеріалу при кондуктивному теплопідводі, хоча ефективність такого способу передачі теплоти підтверджено в роботах [13, 14].

Формування мети досліджень.

Побудова математичної моделі процесу сушіння для визначення режимів нагріву та зневоднення зернового матеріалу при циркуляційному переміщенні у вібраційній камері з кондуктивним підведенням енергії і частковим вакуумуванням камери, для розширення технологічних можливостей установок типу «вібромлин».

Викладення основного матеріалу. В якості установки для нагрівання та сушіння зернового матеріалу використано робочий орган – помельну камеру рис.1 вібраційного млина [9, 10] додатково оснащено електричним нагрівальним елементом для підведення теплової енергії до матеріалу, що циркулює в камері та системою вакуумування об'єму камери обробки матеріалу. Камера рис. 2, виконана у вигляді двох циліндричних контейнерів 1 і 2 встановлених один від одного послідовно відкритими торцями і з'єднаних по твірних з'єднувальним жолобом 3 в тильній частині. Передні торці циліндричних контейнерів з'єднані між собою переважувальним жолобом 4, який складається з вертикального жолоба 1 (рис.1), що переходить у розвантажувальний лоток 2 з вивантажувальним клапаном 6 (рис. 2). На зовнішній поверхні циліндричних стінок 1, 2 закріплений нагрівальний елемент 9 (рис. 2 б) у вигляді намотаного високоомного дроту 10 підключеного до джерела живлення. У торці перехідного жолоба (3) вмонтовано патрубок (7) для відсмоктування водяної пари, що виділяється із вологого продукту в камерах (1 і 2), за допомогою компресорної установки. Для запобігання утворенню «застійної зони» (малорухомого ядра матеріалу [10]) в центрі камери встановлюють циліндричну перфоровану вставку 11, з'єднану з патрубком 7, яку використовують як «колектор» пароповітряної суміші. Для герметизації камери на вході 5 та виході 6 встановлюють шлюзові затвори 12 та 13.

Термосушильна вібраційна установка працює наступним чином. Після запуску привода – вібробудника та подачі напруги на нагрівальний елемент, під дією утворюваного плоского вібраційного поля, створюваного вібробуджувачем контейнерів, їм передають коливання, внаслідок чого матеріалу передається



просторовий циркуляційний рух уздовж контейнерів. Матеріал набуває обертальний рух і контактуючі з нагрітою поверхнею контейнерів отримує від неї теплоту, яка витрачається на

нагрів вологого матеріалу і випаровування вологи, яка видаляється з камери у вигляді пароповітряної суміші.

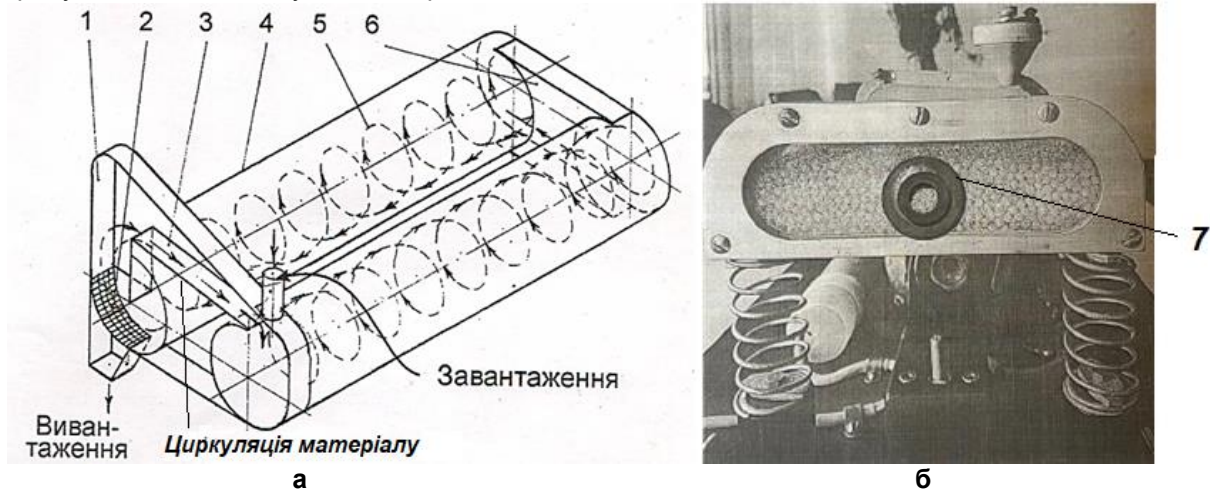


Рис. 1. Конструктивно-технологічна модель помельної камери вібромліна: а – схема помельної камери вібромліна; б – модель помельної камери вібромліна

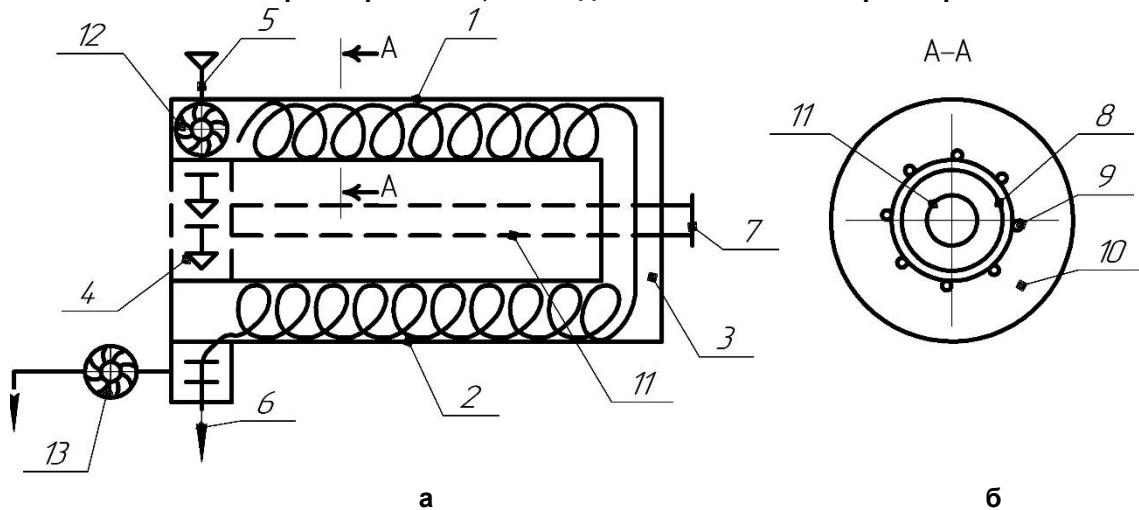


Рис. 2. Конструктивно-технологічна схема вібротермосушильної установки

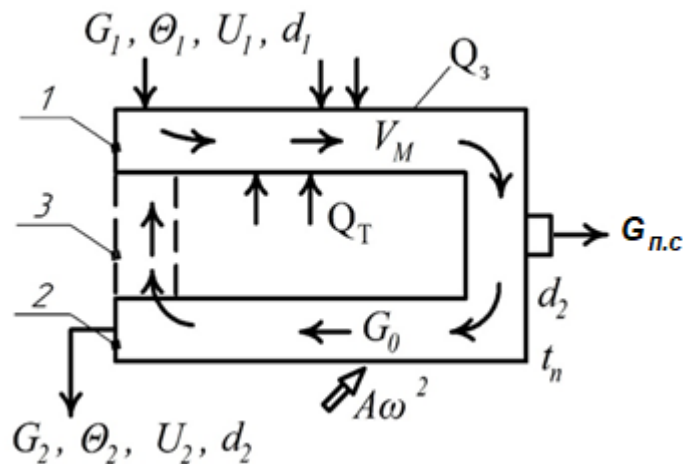


Рис. 3 Розрахункова схема вібротермосушильної установки

Сушильно-термічна віброустановка матеріалу від входу 1 до вивантаження 2 — може функціонувати в двох гідродинамічних режимах: безперервне транспортування (рис. 3); другий режим — режим ідеального витиснення — установка працює безперервно (рис. 3);



періодичне завантаження (установка періодичної дії) — матеріал циркулює по замкненому контуру (1-2-3-1) — режим ідеального змішування.

Розглянемо процес тепломасопереносу при взаємодії віброзрідженого обертового шару зернового матеріалу з нагрітою поверхнею, яка здійснює коливальний площинний рух.

Як відомо [17], для інтенсифікації тепломасообмінних процесів, яким є сушіння зерна при контактній передачі теплової енергії, бажано щоб оброблювальний матеріал змінював своє положення відносно нагрітої поверхні, тобто щоб постійно змінювались умови тепло- і масообміну частинок з нагріваючою поверхнею. Це досягається дією вібраційного поля на елементи (частинки) зернового матеріалу. Для кількісного визначення теплового потоку від нагрітого тіла до частинки, що нагрівається, О. Кришером [17] запропонована така схема: за час контакту температура на поверхні контактуючих зон буде на протязі контакту постійною і рівною t_n , а на зворотній поверхні частинки буде залишатися початкова температура t_z . При цьому кількість теплоти отримана частинкою за одиницю часу визначається виразом:

$$Q = F \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_k}} \cdot (\theta_n - \theta_z), \quad (1)$$

де F — поверхня теплопередачі, м²;

λ — коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

c — питома теплоємність, Дж/кг·°С;

τ_k — час контакту, с;

ρ — густина матеріалу, кг/м³;

θ_n — температура нагрівальної поверхні, °С;

θ_z — температура матеріалу, °С.

Для визначення сумарної кількості теплоти за час контакту τ_k інтегруванням добутку $Q \cdot dt$, отримано [17]:

$$Q_{\tau} = F \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\tau} \cdot (\theta_n - \theta_z). \quad (1')$$

При розрахунках теплообміну нагрівальної поверхні з рухомих середовищем зазвичай використовують коефіцієнт теплообміну α , а кількість переданої теплоти за одиницю часу визначають рівнянням Ньютона:

$$Q = \alpha F (\theta_n - \theta_M), \quad (2)$$

де θ_M — температура рухомого теплоносія, °С.

Враховуючи, що віброзріджуючий шар зерна є рухомих теплосприймаючим середовищем із співставлення (1) та (2)

отримано значення коефіцієнта контактного теплообміну

$$\alpha = \frac{2 \cdot \sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\pi \cdot \sqrt{\tau}}}, \quad (3)$$

де $\sqrt{\lambda c \rho}$ — коефіцієнт проникнення теплоти, Дж/м²·°С·с^{1/2}.

Диференціальні рівняння для визначення нестационарних параметрів процесу сушіння: температури $\theta(\tau)$, вологовмісту $u(\tau)$ на нагрівальній поверхні $\theta_n(\tau)$ можна отримати з рівнянь теплового і матеріального балансів при наступних припущеннях:

- теплота від нагрівальної поверхні до зерна передається контактною теплопровідністю і рушійною силою є температурний напір $(\theta_n - \theta_M)$;

- показником інтенсивності теплопередачі є коефіцієнт теплообміну α , що враховує складові теплообміну (кондуктивний, радіаційний);

- волога із зерна видаляється за законом випаровування із вільної поверхні, дифузійним переносом від поверхні матеріалу в оточуюче середовище через пограничний шар парогазової суміші знехтуємо;

- потенціалом переносу є різниця парціальних тисків на поверхні матеріалу та в середовищі, або різниця концентрацій водяної пари на поверхні матеріалу та в оточуючому парогазовому середовищі.

Інтенсивність випаровування за законом Дальтона визначається рівнянням:

$$m_0 \frac{du}{d\tau} = W = F \frac{\beta}{R_n \cdot T} (p_n - p_{n.c.}) \quad (4)$$

де m_0 — маса абсолютно сухого матеріалу, кг;

F — поверхня випаровування, м²;

β — коефіцієнт масообміну, моль/м²·с;

R_n — універсальна газова стала, $R = 8,314$ кг/с² моль·°С;

T — температура пари, °С;

W — випарна здатність поверхні, кг/с.

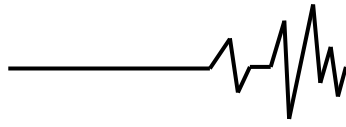
$p_n, p_{n.c.}$ — парціальний тиск пари на поверхні (при температурі поверхні) та в оточуючому середовищі, Па.

Оскільки, $\frac{p_n}{R_n \cdot T} = \rho_n$ — густина

(об'ємна концентрація) пари, то рівняння (4) можна переписати у вигляді:

$$W = F \beta (\rho_n - \rho_{n.c.}). \quad (5)$$

Але, оскільки, густина залежить від температури, простіше використовувати масову концентрацію — вологовміст пари. Тоді рівняння масообміну в диференціальній формі можна записати так:



$$-m_0 \frac{du}{d\tau} = F\beta(d_{\text{п}} - d_{\text{п.с.}}) \quad (6)$$

де $d_{\text{п}}$, $d_{\text{п.с.}}$ — масова концентрація пари на поверхні та в оточуючому середовищі, кг/м³.

Коефіцієнт масообміну β визначається з критеріального рівняння [17]:

$$\beta = Nu' \frac{D}{R_r},$$

де Nu' — критерій Нусельта масообмінний, моль/м⁴;

D — коефіцієнт дифузії пари, м²/с;

R_r — відстань руху пари (радіус зернівки), м.

Коефіцієнт дифузії водяної пари залежить від температури і тиску парогазової суміші, і визначають згідно [17] за формулою:

для сушильної камери з нагрівачем:

$$m_{\text{н}} c_{\text{н}} \frac{d\theta_{\text{н}}}{d\tau} = P_{\text{н}} - \alpha F(\theta_{\text{н}} - \bar{\theta}_3) - k F_3(\theta_{\text{н}} - t_3), \quad (9)$$

для зернового матеріалу в камері:

$$m_3 c_3 \frac{d\theta_3}{d\tau} = G_3 c_3 (\theta_1 - \theta_3) + \alpha F(\theta_{\text{н}} - \bar{\theta}_3) - r \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_3], \quad (10)$$

для пароповітряної суміші:

$$m_{\text{пс}} c_{\text{пс}} \frac{dt}{d\tau} = G_{\text{пс}} c_{\text{пс}} (t_1 - t) - r \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c], \quad (11)$$

та рівнянь матеріального балансу:

$$m_{\text{пс}} \frac{dd}{d\tau} = G_{\text{пс}} (d_1 - d) + \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c], \quad (12)$$

$$-m_0 \frac{du}{d\tau} = G_0 (u_1 - u) + \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c]. \quad (13)$$

В рівняннях (9) – (13) позначено:

$\theta_{\text{н}}$, θ_3 , t — температура нагрівальної поверхні, зернового матеріалу та пароповітряної суміші, °С;

$P_{\text{н}}$ — потужність нагрівача нагрівальної поверхні, Вт;

α , β — коефіцієнти теплообміну і масообміну, Вт/м²·°С і кг/м²·с;

F , F_3 — поверхня нагріву зерна та зовнішня поверхня камери сушіння, м²;

c_3 , $c_{\text{пс}}$ — питома теплоємність зерна та пароповітряної суміші, Дж/кг °С;

$c_{\text{н}}$ — питома теплоємність матеріалу нагрівальної поверхні з нагрівальним елементом, Дж/кг °С;

$m_{\text{н}}$, m_3 , $m_{\text{пс}}$, m_0 — маса нагрівача, зернового матеріалу, пароповітряної суміші і сухого повітря в об'ємі камери, кг;

G_3 , G_0 — витрати (масові) вологого та абсолютно сухого зерна, кг/с;

$$D = 0,112 \frac{P_{\text{Б}}}{P_{\text{С}}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \frac{1}{3600}, \quad (7)$$

де $P_{\text{Б}}$, $P_{\text{С}}$ — барометричний тиск і тиск середовища в камері, Па.

Оскільки при дифузійному переносі пари масообмінний критерій Нусельта дорівнює $Nu' = 2$, то коефіцієнт масообміну визначається формулою:

$$\beta = 2 \cdot \frac{0,112 P_{\text{Б}}}{3600 P_{\text{С}}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} R_r^{-1}. \quad (8)$$

При прийнятих припущеннях математичний опис процесу сушіння у вібраційній сушарці з циркуляційно-просторовим рухом матеріалу в умовах вакууму сформуємо у вигляді диференціальних рівнянь теплового балансу:

$G_{\text{пс}}$ — витрати пароповітряної суміші, кг/с;

u_1 , u — початковий та поточний вологовміст зерна, кг/кг;

d_1 , d , \bar{d}_c — початковий (на вході), поточний і середній вологовміст пароповітряної суміші, кг/кг;

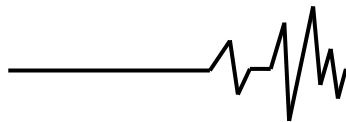
$d_{\text{н}}(\theta_3)$ — вологовміст насиченої пари на поверхні зерна при його температурі, кг/кг;

t_1 , θ_1 — температура пароповітряної суміші та зернового матеріалу на вході в камеру, °С;

t_3 — температура зовнішнього середовища, °С;

k — коефіцієнт теплопередачі від нагрівача до зовнішнього середовища, Вт/м²·°С.

Отримані рівняння складають математичну модель (проточна модель ідеального змішування) нестационарного процесу безперервного сушіння зернового матеріалу і визначає зміну в часі параметрів



зерна і парогазової суміші на виході зерносушильної камери.

Для отримання аналітичних залежностей зміни параметрів зернового матеріалу в часі від впливових факторів зробимо спрощення системи рівнянь (9-13). Залежність насиченого вологовмісту пароповітряної суміші апроксимуємо виразом:

$$d''_H(\theta_3) = a\theta_3 + b, \quad (14)$$

де a, b — коефіцієнти лінійної апроксимації, $a = 3,4$; $b = -7,0$ г/кг.с.п.

За умови розігрітої нагрівальної поверхні $\frac{d\theta_H}{d\tau} = 0$ її температура визначається рівнянням:

$$\theta_H = A + B\theta_3, \quad (15)$$

$$\text{де } A = \frac{P_H + kF_3 t_3}{\alpha F + k_3 F_3}, \quad B = \frac{\alpha F}{\alpha F + k_3 F_3}.$$

Конвективну складову теплообміну не враховуємо, а температуру пароповітряної суміші на виході приймаємо рівній температурі зернового матеріалу ($t = \theta_3$). З урахуванням виразів (14) та (15) рівняння (10) та (12) набувають вигляду:

$$T_1 \frac{d\theta_3}{d\tau} + a_1 \theta_3 - b_1 = d, \quad (16)$$

$$T_2 \frac{dd}{d\tau} + a_2 d - b_2 = \theta_3, \quad (17)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{m_3 c_3}{0,5r\beta F},$$

$$a_1 = \frac{\alpha F + r\beta F a - \alpha F b}{0,5r\beta F},$$

$$b_1 = \frac{G_3 c_3 \theta_1 + 0,5r\beta F d_1 - r\beta F b}{0,5r\beta F}, \quad T_2 = \frac{m_{nc} d}{\alpha \beta F},$$

$$a_2 = \frac{G_{nc} + 0,5\beta F}{\alpha \beta F}, \quad b_2 = \frac{(G_{nc} - 0,5\beta F)d_1 + \beta F b}{\alpha \beta F}.$$

$$-\frac{m_0}{G_0} \frac{du}{d\tau} + u = u_1 + \frac{\beta F}{G_0} [a_1 \theta(\tau) + C_1 - 0,5d_1 - 0,5d(\tau)]. \quad (22)$$

Підставляючи значення $\theta_3(\tau)$ та $d(\tau)$ в рівняння (22) після перетворень матимемо:

$$-\frac{m_0}{G_0} \frac{du}{d\tau} + u = \left[u_1 + \frac{D_3}{c_1} (D_1 - D_2) \right] + r_1 P e^{r_2 \tau} - r_2 P e^{r_1 \tau}, \quad (23)$$

$$\text{де } D_3 = \frac{\beta F}{G_0} (C_1 - 0,5d_1),$$

$$P = D_3 (aP_1 - 0,5P_2), \quad P_1 = \frac{\theta_0 c_1 - D_1}{c_1 (r_1 - r_2)},$$

$$P_2 = \frac{d_0 c_1 - D_2}{c_1 (r_1 - r_2)}.$$

Додатково позначимо:

Зводячи рівняння (16) та (17) до одного матимемо:

$$A_1 \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + B_1 \frac{d\theta}{d\tau} + C_1 \theta = D_1, \quad (18)$$

$$A_1 \frac{d^2 d}{d\tau^2} + B_1 \frac{dd}{d\tau} + C_1 d = D_2, \quad (19)$$

$$\text{де } A_1 = T_1 T_2 \text{ і } B_1 = a_1 T_2 + a_2 T_1,$$

$$C_1 = a_1 a_2 - 1, \quad \text{і } D_1 = b_2 + b_1 a_2,$$

$$D_2 = b_1 + b_2 a_1.$$

Розв'язок неоднорідних диференціальних рівнянь (18), (19) за початкових умов: $\tau = 0, \theta = \theta_0 = \theta_1, d = d_0 = d_1, \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dd}{d\tau} = 0,$

$$\theta_3(\tau) = \frac{\theta_0 c_1 - D_1}{c_1 (r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_1}{c_1}, \quad (20)$$

$$d(\tau) = \frac{d_0 c_1 - D_2}{c_1 (r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_2}{c_1}, \quad (21)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1}$ — корені характеристичного рівняння.

При використанні вібраційної сушарки в періодичному режимі функціонування (разове завантаження зернового матеріалу масою m) параметри $\theta_3(\tau)$ і $d(\tau)$ визначаються залежностями (20), (21) при $G_3 = 0$.

Рівняння кінетики сушіння (13) при використанні рівнянь (14) та (20) набуває вигляду:

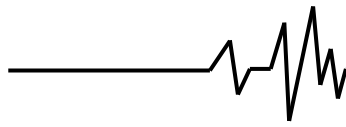
$$A_2 = \frac{G_0}{m_0} \left[u_1 + \frac{D_3}{c_1} (D_1 - D_2) \right],$$

$$B_2 = \frac{G_0 r_1 P}{m_0}, \quad B_3 = \frac{G_0 r_2 P}{m_0} \text{ і перепишемо}$$

рівняння (23) у вигляді:

$$-\frac{du}{d\tau} + \frac{G_0}{m_0} u = A_2 + B_2 e^{r_2 \tau} + B_3 e^{r_1 \tau}. \quad (24)$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (24) отримуємо у



вигляді суми рішень однорідного та неоднорідного рівнянь:

$$u_1(\tau) = C_0 e^{-A_3 \tau},$$

$$u_2(\tau) = R_1 + R_2 e^{r_2 \tau} + R_3 e^{r_1 \tau},$$

у вигляді:

$$u(\tau) = C_0 e^{-A_3 \tau} - A_2 \frac{m_0}{G_0} + \frac{B_2}{r_2 - A_3} e^{r_1 \tau} + \frac{B_3}{r_1 - A_3} e^{r_2 \tau}, \quad (25)$$

де $A_3 = \frac{G_0}{m_0}$, $u_2(\tau)$ отримано

методом невизначених множників.

Стала інтегрування C_0 визначена з початкових умов: $\tau = 0, u = u_1$,

$$C_0 = u_1 - \frac{A_2}{A_3} + \frac{B_2}{r_2 - A_3} + \frac{B_3}{r_1 - A_3}.$$

Таким чином, параметри процесу сушіння зерна у вібраційній сушарці в умовах вакууму: температура $\theta(\tau)$ і вологовміст $u(\tau)$ на виході сушарки визначаються з рівнянь (20) та (25).

При розрахунках параметрів сушарки за отриманими рівняннями (20) та (25) треба знати значення коефіцієнтів теплообміну α_k і масообміну β , та поверхонь: F_k – теплосприймаючої та випаровування F_3 які можна визначити за даними експериментів використовуючи моделі періодичного сушіння (за О.В. Ликовим):

$$m_3 c_3 \frac{d\theta}{d\tau} - m_0 r \frac{du}{d\tau} = \alpha_k F_k (\theta - \theta), \quad (26)$$

та модифіковану за Морелем запис рівняння Дальтона:

$$m_0 \frac{du}{d\tau} = \beta' F_B [d''(\theta) - d_c] \frac{P_B}{P_C}, \quad (27)$$

де F_B — поверхня випаровування;

$$d''(\theta) = \alpha\theta - c, \text{ кг/кг};$$

d_c — вологовміст пароповітряного середовища, кг/кг.

З рівняння (26) матимемо (замінюючи похідні приростами ($dx = \Delta x$) формулу для визначення α_k :

$$\alpha_k F_k = \frac{m_3 c_3 \Delta\theta + m_0 r \Delta u}{\tau_c LN}, \quad (28)$$

$$\text{де } LN = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln\left(\frac{\theta_H - \theta_1}{\theta_H - \theta_2}\right)}; \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1,$$

$\Delta u = u_1 - u_2$; θ_1, θ_2 і u_1, u_2 — початкові та кінцеві значення температури матеріалу та вологовмісту, °C і %; τ_c — час сушіння, с.

Оскільки теплота від поверхні нагріву передається зернівкам не тільки контактом, а також випромінюванням, то за поверхню теплообміну F_k — приймається вся поверхня нагрівача на якій розміщено зерно.

Величина коефіцієнта масообміну β' визначається з рівняння (27)

$$\beta' F_B = \frac{m_0 \Delta u}{(\alpha\theta - c - d_c) \tau_c}. \quad (29)$$

Величину поверхні випаровування можна визначити (наближено) із співвідношення:

$$F_B = \frac{\beta}{\beta'}, \quad (30)$$

де β теоретичне значення за виразом (8).

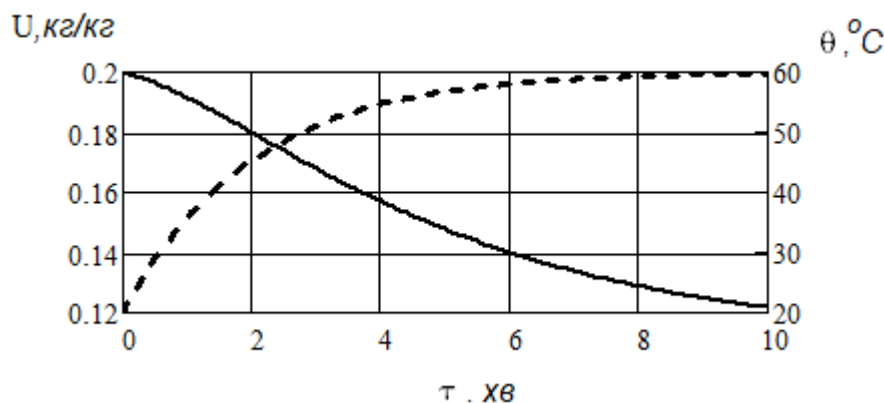


Рис.4. Кінетика сушіння і нагрівання зерна при атмосферному тиску

На рис. 4 наведено графічні залежності зміни в часі температури і вологовмісту зерна визначені експериментально при нагріві моношару зерна масою m на гріючий поверхні

площею F при стабілізованій температурі поверхні θ_H .

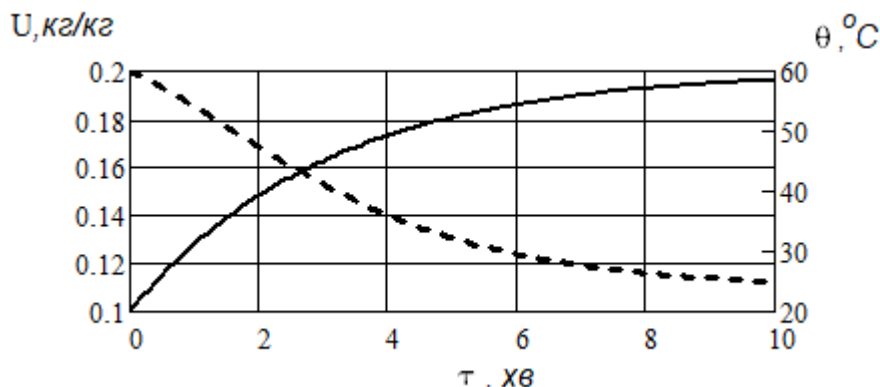
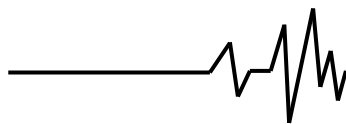


Рис.5. Кінетика сушіння і нагрівання зерна у вакуумі (P=20 кПа)

На рис. 5 аналогічні залежності для сушіння у вакуумі (P=20 кПа). З графіків визначаємо середні значення (за процес) швидкості сушіння $\frac{\Delta u}{d\tau}$ та нагріву $\frac{\Delta \theta}{d\tau}$ і розраховуємо коефіцієнти теплообміну

$$\alpha_{ат} = 38,6 \text{ Вт/м}^2\text{К},$$

$$\alpha_{вак} = 78 \text{ Вт/м}^2\text{К}, \quad \text{критерій}$$

Рейнхера $R_{B_{ат}} = 0,33$; $R_{B_{вак}} = 0,23$.

Таким чином, визначене вакуумування камери сушіння дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сушіння зернового матеріалу.

За даними літературного аналізу коефіцієнт теплообміну між нагрівальною поверхнею і матеріалом у віброзрідженому шарі збільшується з підвищенням параметрів вібрації. Узагальнена, за даними ряду дослідників, залежність коефіцієнта теплообміну від параметрів вібрації нагрівальної поверхні може бути апроксимована рівнянням:

$$\alpha_{вібр} = 86 + 6,7 \frac{A\omega^2}{g}, \quad (31)$$

де A , ω — амплітуда і частота коливань нагрівальної поверхні, мм, c^{-1} ; g — прискорення сили тяжіння, m/c^2 .

Використовуючи критерій Рейнхера $\left(Rb = \frac{c d\theta}{r du} \right)$ і апроксимуюче рівняння графічної залежності θ_τ (рис. 5):

$$\theta_\tau = 60,1 - 40,2 e^{-0,51 \tau}, \quad (32)$$

з рівняння (24) матимемо:

$$du = \frac{\alpha F (\theta_n - \theta_3)}{r \cdot m_3 Rb} e^{-\frac{\alpha F}{m_3 c_3} \tau} d\tau \quad (33)$$

Графічна інтерпретація розв'язку рівняння (33) наведена на рис. 6. В якості теоретичної кривої сушіння зерна у вакуумній камері яка реалізує вібраційні коливання з частотою $\omega = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м [9].

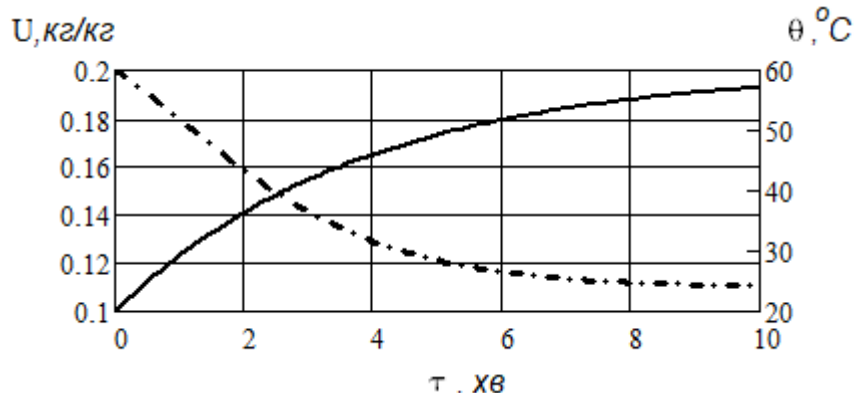


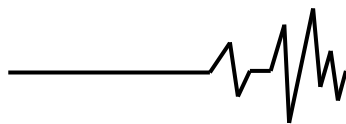
Рис.6. Теоретичні криві сушіння і нагрівання зерна у вакуумі за наявності вібрації

Як впливає з графіка $U(\tau)$ експозицію сушіння можна зменшити до 223с при застосуванні кондуктивного підведення теплоти у вакуумній сушильній камері за наявності вібрації нагрівальної поверхні.

Коефіцієнт масообміну визначений за даними графіка $U(\tau)$ по формулі (27) дорівнює

$\beta = 7,3 \cdot 10^{-6}$ м/с, за формулою (8) $\beta = 7,97 \cdot 10^{-6}$ м/с. Таким чином отримана теоретична залежність відповідає прийнятим припущенням.

Визначивши невідомі коефіцієнти і сталі величини, які містять рівняння (20) та (25) отримали графічні залежності перехідного процесу сушіння зерна у вакуумній віброкамері,



тобто зміну в часі температури $\theta_2(\tau)$ та вологовмісту $U_2(\tau)$ на виході з камери в безперервному режимі – рис.7.

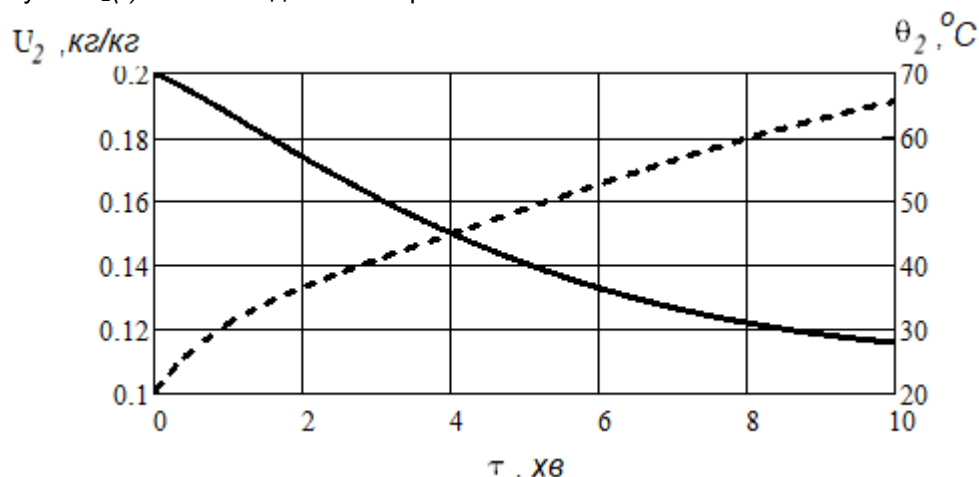


Рис 7. Кінетичні залежності зміни параметрів матеріалу на виході камери $\theta_2(\tau)$, $U_2(\tau)$ від часу сушіння

Із графіку $U_2(\tau)$ визначається експозиція сушіння τ_c . Із емпіричної залежності швидкості переміщення матеріалу ($\rho=1400$ кг/м³) від параметрів вібраційного впливу A та ω : $V_3 = -27.67 + 0.16\omega + 11.25A + 1461.6 \cdot 10^{-3} + 0.0157A\omega - 3.44 \cdot 10^{-4}\omega^2 - 3.11A^2 - 9.9\rho^2 \cdot 10^{-8}$ визначається швидкість переміщення V_3 зернового матеріалу. Знаючи ці параметри розраховується довжина камери за очевидним співвідношенням:

$$L = v_3 \tau_c, \quad (34)$$

де v_3 — швидкість руху зерна в сушарці, м/с.

Продуктивність сушарки залежить від режимних і конструкційних параметрів

$$G_3 = v_3 S_H S'_3, \quad (35)$$

де S'_3 — площа поперечного перетину матеріалу в камері, м²;

S_H — насипна щільність матеріалу, кг/м³.

Із співвідношення (34) та (35) матимемо:

$$G_3 = \frac{L}{\tau_c} S_H S'_3 = \frac{m_3}{\tau_c}, \quad (36)$$

$$P_H = \alpha_k F_H (\theta_H - \bar{\theta}_3) = G_3 c_3 (\theta_2 - \theta_1) + G_0 r (u_1 - u_2) + k F_3 (\theta_H - t_3), \quad (39)$$

звідки

$$F_H = \frac{P_H}{\alpha_k (A, \omega)} (\theta_H - \bar{\theta}_3). \quad (40)$$

За отриманими даними кінетики сушіння і нагріву зерна $u(\tau)$, $\theta(\tau)$ та розрахунковими співвідношеннями (29), (31) – (40) розраховані параметри зерносушарки. Для базової моделі помельної камери вібротлина МВЕ-5 [9] при збільшенні об'єму камери до 14,5 дм³, при потужності нагрівального елемента 7,5

де m_3 — маса зерна в камері, кг;

L — довжина камери, м.

Задаючись продуктивністю сушарки G_3

та визначив τ_c із графіка (рис. 7), через $u(\tau)$ розраховують масу матеріалу в камері m_3 , його об'єм V_3 та об'єм камери V_k :

$$V_k = \varepsilon V_3 = S'_k L, \quad (37)$$

де ε — коефіцієнт заповнення камери;

S'_k — площа поперечного перетину камери ($S'_k = \frac{\pi D_k^2}{4}$), м².

Із геометричних співвідношень визначаємо площу перетину камери:

$$S'_k = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{F_H}{\pi L}}, \quad (38)$$

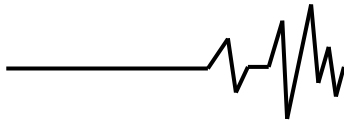
де $F_H = \pi D_k L$ — поверхня нагріву, м².

Енергетична характеристика сушарки визначається рівнянням енергетичного (теплового) балансу:

кВт — продуктивність зерносушіння складатиме = 157 кг/год. При цьому вологонапруженість об'єму камери складатиме 25,2 кг/м³, що в рази перевищує цей показник для конвективних сушарок.

Висновки:

1. Аналізом попередніх досліджень встановлено високу ефективність і перспективність термообробки зернових матеріалів у вібраційних установках, зокрема з



просторово-циркуляційним рухом обробляемого матеріалу.

2. Сформульований математичний опис процесу сушіння зернового матеріалу у віброкамері з просторово-циркуляційним рухом матеріалу при кондуктивному підведенні теплової енергії використано для визначення параметрів функціонування сушильної установки в безперервному та періодичному режимах.

3. Базуючи на отриманих розрахунках даних, встановлено, що при об'ємі сушильної камери 14,5 дм³ і підведеній потужності нагрівального елемента 7,5 кВт можна реалізувати процес сушіння зерна продуктивністю 157 кг/год.

Список використаних джерел

1. Присяжнюк Д. В. Аналіз обладнання для сушіння зернової сировини при післязбиральній обробці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 3(86). С. 136–144.

2. Цуркан О. В., Пришляк В. М., Присяжнюк Д. В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. №2(97). С. 99–103.

3. Цуркан О. В., Полевода Ю. А., Присяжнюк Д. В. та ін. Вібромеханічна інтенсифікація тепломасообмінних процесів при зневодненні зерна. *Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 8-10 листопада 2016 р. Київ : К., 2016. С. 112–114.*

4. Пазюк О. Д., Паламарчук І. П., Пазюк В. М. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності сушіння зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4(64). С. 105–122.

5. Калетник Г. М., Цуркан О. В. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високоволової насінневої сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1(100). С. 5–12.

6. Пазюк В. М., Пазюк О. Д., Романенко О. Д. Енергозберігаючі режими сушіння насінневого зерна та реалізація їх у вібраційній зерносушарці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 3(83). С. 202–207.

7. Зозуляк І. А. Обґрунтування параметрів сушіння зерна соняшника у вібраційних машинах з U – видним

контейнером: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. : Вінниця, 2015. 22 с.

8. Паламарчук І. П., Бандура В. М., Паламарчук В. І. Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвейерної вібраційної сушарки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 2(66). С. 116–128.

9. Солоня О. В. Вібраційні машини з просторово-циркуляційним рухом завантаження для тонкого помелу сипких матеріалів : монографія. Вінниця : РВВ ВДАУ, 2008. 133 с.

10. Солоня О. В., Білик Д. А. Вібраційні млини для помелу сипких матеріалів сільськогосподарського виробництва. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 2 (70). 2013. С. 196–199.

11. Денісов П. Д., Бернік П. Є., Солоня О. В. Дослідження поведінки завантаження в сполучених помельних камерах вібраційних млинів безперервної дії. *Машинознавство*. 1999. № 12(30). С. 44–51.

12. Чубик Р. В., Зозуляк І. А., Бандура В. М. Електромеханічна модель адаптивної резонансної двохконтейнерної вібраційної сушарки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 1(63). С. 128–134.

13. Котов Б. І., Лисенко В. П., Комарчук Д. С. Математичне моделювання теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом. *Науковий вісник НУБіП України*. 2011. № 166, ч. 4. С. 113–118.

14. Швидя В. О. Теоретичне обґрунтування використання контактного нагріву для сушіння насіння у вакуумі. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. № 10(103). С. 67–74.

15. Котов Б. І., Швидя В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. Математичне моделювання динамічних режимів зерносушарки з індукційним підведенням енергії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. № 1(104). С. 64–70.

16. Адамчук В. В., Швидя В. О. Математична модель нагріву насіння перемішуванням в барабані вакуумної сушарки насіння. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. Вип. № 13 (112). С. 89–96.

17. Krischer O. Die Wissenschaftlichen GrundPagen der Trocknungstechnik. Berlin – Göttingen — Heldeeburg. 1956. 337 с. (Кришер О. Наукові основи техніки сушіння. М. 1961. 337 С. (переклад з німецької)).



18. Цуркан О. В. Вібромеханічна інтенсифікація сушіння насіння баштових культур у процесі післязбиральної обробки : автореф. дис. На здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : Глеваха, 2020. 40 с.

19. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Ліпунов М. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологістних режимів зерносушарок безперервної дії. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42, ч. 2. С. 1–23.

20. Швидя В. О., Анеляк М. М., Степаненко С. П. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник. Глеваха, 2019. Вип. №8 (107). С. 89-96.

References

1. Prysiazhnyuk D.V. (2017). Analiz obladnannya dlya sushinnya zernovoyi syrovyny pry pislyazbyral'niy obrobtisi. [Analysis of equipment for drying grain raw materials during post-harvest processing]. *Vibrations in engineering and technology*. № 3(86). 136–144. [in Ukrainian].

2. Tsurkan O.V., Pryshlyak V.M., Prysiazhnyuk D.V. (2017) Intensyfikatsiya sushinnya zerna u protsesi yoho pislyazbyral'noyi obroby. [Intensification of grain drying in the process of its post-harvest processing]. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. № 2(97). 99–103. [in Ukrainian].

3. Tsurkan O.V., Polevoda Yu. A., Prysiazhnyuk D. V. and others. (2016). Vibromekhanichna intensyfikatsiya teplomasoobminnykh protsesiv pry znevodnenni zerna. [Vibromechanical intensification of heat and mass exchange processes during grain dehydration]. *Udoskonalennya protsesiv i obladnannya – zaporuka innovatsiynoho rozvytku kharchovoyi promyslovosti: materialy mizhnar. nauk.-tekhn. konf., (8-10 lystopada 2016 r., m. Kyiv)*. [Improvement of processes and equipment is the key to innovative development of the food industry: materials of the International science and technology conference. (November 8-10, 2016, Kyiv)]. 112–114. [in Ukrainian].

4. Pazyuk O.D., Palamarchuk I.P., Pazyuk V.M. (2020). Vibratsiyni zernosusharky yak sposib intensyfikatsiyi ta pidvyshchennya ekonomichnosti sushinnya zerna. [Vibrating grain dryers as a method of intensification and increasing the efficiency of grain drying]. *Vibrations in engineering and technology*. № 4(64). 105–122. [in Ukrainian].

5. Kaletnyk G.M., Tsurkan O.V. (2021). Osoblyvosti konstruktsiyi vibratsiynoho obladnannya dlya sushinnya vysokovolohoyi nasinnyevoyi syrovyny. [Design features of

vibrating equipment for drying high-moisture seed raw materials]. *Vibrations in engineering and technology*. № 1(100). 5–12. [in Ukrainian].

6. Pazyuk V.M., Pazyuk O.D., Romanenko O.D. (2016). Enerhozberihayuchi rezhymy sushinnya nasinnyevoho zerna ta realizatsiya yikh u vibratsiyniy zernosusharky. [Energy-saving methods of drying seed grain and their implementation in a vibrating grain dryer]. *Vibrations in engineering and technology*. № 3(83). 202–207. [in Ukrainian].

7. Zozulyak I.A. (2015). Obgruntuvannya parametriv sushinnya zerna sonyashnyku u vibratsiynykh mashynakh z U-vydnym konteynerom. [Justification of sunflower grain drying parameters in vibrating machines with a U-visible container]. (Extended abstract of candidate's thesis). Vinnytsia. [in Ukrainian].

8. Palamarchuk I.P., Bandura V.M., Palamarchuk V. I. (2012). Obgruntuvannya konstruktyvnoyi ta tekhnolohichnoyi skhemy konveyernoyi vibratsiynoyi susharky. [Justification of the constructive and technological scheme of the conveyor vibrating dryer]. *Vibrations in engineering and technology*. № 2(66). 116–128. [in Ukrainian].

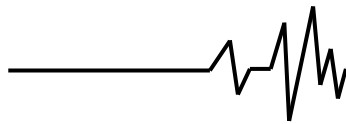
9. Solona O.V. (2008). Vibratsiyni mashyny z prostorovo-tsyrkulyatsiynym rukhom zavantazhennya dlya tonkoho pomelu sypykhykh materialiv. [Vibrating machines with spatial circulation movement of loading for fine grinding of loose materials]. Vinnytsia. RVV VDAU. [in Ukrainian].

10. Solona O.V., Bilyk D.A. (2013). Vibratsiyni mlyny dlya pomelu sypykhykh materialiv sil'skohospodars'koho vyrobnytstva. [Vibrating mills for grinding loose materials of agricultural production]. *Vibrations in engineering and technology*. № 2 (70). 196–199. [in Ukrainian].

11. Denisov P.D., Bernik P.E., Solona O.V. (1999). Doslidzhennya povodinky zavantazhennya v spoluchennykh pomelnykh kamerakh vibratsiynykh mlyniv bezperervnoyi diyi. [Study of loading behavior in combined grinding chambers of continuous vibrating mills]. *Mechanical engineering*. № 12(30). 44–51. [in Ukrainian].

12. Chubyk R.V., Zozulyak I.A., Bandura V.M. (2012). Elektromekhanichna model' adaptivnoyi rezonansnoyi dvokhkonteynernoyi vibratsiynoyi susharky. [Electromechanical model of an adaptive resonant two-container vibrating dryer]. *Vibrations in engineering and technology*. № 1(63). 128–134. [in Ukrainian].

13. Kotov B.I., Lysenko V.P., Komarchuk D.S. (2011). Matematychno modelyuvannya teplovykh protsesiv pres-ekstrudera z induktsiynym obihrivom. [Mathematical modeling of thermal processes of a press-extruder with induction heating]. *Scientific*



bulletin of NUBiP of Ukraine. № 166, Part 4. 113–118. [in Ukrainian].

14. Shvydya V.O. (2019). Teoretychne obgruntuvannya vykorystannya kontaktnoho nahrivu dlya sushynnya nasynnya u vakuumi. [Theoretical justification of the use of contact heating for drying seeds in a vacuum]. *Mechanization and electrification of agriculture*. № 10(103). 67–74. [in Ukrainian].

15. Kotov B.I., Shvydya V.O., Pantsyr Yu.I., Gerasimchuk I.D. (2019). Matematychno modelyuvannya dynamichnykh rezhymiv zernosusharky z induktsiynym pidvidennyam enerhiyi. [Mathematical modeling of dynamic modes of a grain dryer with induction energy supply]. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. № 1(104). 64–70. [in Ukrainian].

16. Adamchuk V.V., Shvydya V.O. (2021). Matematychna model' nahrivu nasynnya peremishuvannyam v barabani vakuumnoyi susharky nasynnya. [Mathematical model of seed heating by stirring in the drum of a vacuum seed dryer]. *Mechanization and electrification of agriculture*. № 13 (112). 89–96. [in Ukrainian].

17. Krischer O. (1956). Die Wissenschaftlichen GrundPagen der Trocknungstechnik. Berlin – Göttingen – Heldeberg. 337. (Krysher O. (1961). Scientific basis of drying technique. M. 337. (translated from German)). [in German].

18. Tsurkan O.V. (2020). Vibromekhanichna intensyfikatsiya sushynnya nasynnya bashtovykh kultur u protsesi pislyazbyral'noyi obrobky. [Vibro-mechanical intensification of seed drying of tower crops in the process of post-harvest processing] (Extended abstract of candidate's thesis). Glevakha. [in Ukrainian].

19. Kotov B.I., Kalinichenko R.A., Lipunov M.I. (2012). Analitychne vyznachennya dynamichnykh teplovohistnykh rezhymiv zernosusharok bezperervnoyi diyi. [Analytical determination of dynamic thermo-humidity modes of continuous action grain dryers]. *Design, production and operation of agricultural machines*. № 42, part 2. 1–23. [in Ukrainian].

20. Shvydya V.O., Anelyak M.M., Stepanenko S.P. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva*. [Mechanization and electrification of agriculture]. Glevakha. 2019. № 8 (107). 89–96. [in Ukrainian].

USE OF THE WORKING BODY OF THE UNIVERSAL VIBRATORY MILL FOR DRYING GRAIN MATERIAL

One of the most perspective directions of intensification of heat and mass transfer in the processes of drying plant materials and increasing the energy efficiency of drying plants is the application of a vibration field for mixing grain material while moving in the drying chamber. The analysis of existing vibration installations has revealed that the most promising is the usage of vibratory grinding chambers with spatial circulation of material for the implementation of grain heat treatment, in particular drying. As a result, it is proposed to use the proven element base of a vibratory mill as a working body of which grinding chambers with spatial circulation of the load are used.

The article presents the structural and technological scheme of a vibratory thermal drying unit, the structural parameters of the unit, and a mathematical description of the grain drying process. The obtained differential equations constitute a mathematical model of the nonstationary process of continuous drying of grain material and determine the change in time, parameters of grain and steam-gas mixture at the outlet of the grain drying chamber. The constructed mathematical model of the drying process makes it possible to determine the modes of heating and dehydration of grain material during circulation in a vibrating chamber with a conductive energy supply and partial vacuuming of the chamber, to expand the technological capabilities of the "vibrating mill" type installations. The graphical dependences of the temperature and moisture content of grain over time, the data for which were determined experimentally, are presented when a monolayer of grain of mass m is heated on a heating surface of area F at a stabilized surface temperature θ_n . In this work, the kinetics of drying and heating of grain were obtained, which were used to calculate the parameters of the vibrothermal drying unit. Also, using the results of the experiments, the performance indicators of the vibration dryer created on the basis of the grinding chamber of the vibrating mill were determined.

Key words: drying, vibration installation, vacuum, conductive heating, grain, grinding chambers with spatial-circulation loading movement of an adaptive vibration mill.

**Відомості про авторів**

Солоня Олена Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: solona_o_v@ukr.net).

Твердохліб Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com.

Котов Борис Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

Панцир Юрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технічного факультету Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, 32316).

Solona Olena – Candidate of Technical Sciences (*Ph. D in Engineering*), Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: solona_o_v@ukr.net).

Tverdokhlib Igor – candidate of technical sciences, associate professor of the department of general technical disciplines and occupational safety, Vinnytsia National Agrarian University: Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com.

Kotov Boris - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agroengineering and Systems Engineering of Podolsk State Agrarian and Technical University (Shevchenko St., 13, Kamenets-Podolsky, 32316, e-mail: eetsapk@pdatu.edu.ua).

Pantsyr Yuriy - Candidate of Technical Sciences (*Ph. D in Engineering*), Associate Professor, Dean of the Engineering and Technical Faculty of the Podilsk State Agrarian and Technical University (13 Shevchenka St., Kamianets-Podilskyi, 32316).