

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ПРИСЯЖНЮК Дмитро Володимирович

УДК 631.365:62 – 868 (043.3)

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА РОЗРОБКА
ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ
СИРОВИНИ**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Цуркан Олег Васильович,
Ладижинський коледж
Вінницького національного аграрного університету,
директор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дідух Володимир Федорович,
Луцький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри аграрної інженерії;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Степаненко Сергій Петрович,
Національний науковий центр «Інститут механізації
та електрифікації сільського господарства»
Національної академії аграрних наук України,
завідувач відділу перспективних технологій і
технічних засобів для збирання, обробки та
зберігання врожаю зернових і олійних культур.

Захист відбудеться «12» грудня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.854.02 у Вінницькому національному аграрному університеті за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного аграрного університету за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

Автореферат розіслано «8» листопада 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.А. Деревенько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із пріоритетних завдань розвитку аграрної галузі України є забезпечення її продовольчої безпеки, а також нарощування експортного потенціалу за рахунок збільшення виробництва продукції рослинництва.

Ефективний розвиток цієї ланки аграрного сектору економіки неможливий без отримання зернової сировини, яка відповідає вимогам як державних, так і світових стандартів.

Зростаючі обсяги виробництва зерна та підготовка необхідної кількості посівного матеріалу ставлять нові вимоги до техніки і технологій, що використовуються для післязбиральної обробки і, зокрема, сушіння сільськогосподарських культур.

Існуючі зерносушарки працюють неефективно, вони громіздкі, метало- та енергоємні, складні в обслуговуванні та ремонті і мають високу вартість.

Суттєво інтенсифікувати процес сушіння зернової сировини можна шляхом використання вібраційних технологій та обладнання у поєднанні із введенням до складу сушильного агенту озону.

Отже, розробка віброозонуючого комплексу, який забезпечить підвищення ефективності і швидкості процесу сушіння зернової сировини із одночасним зменшенням енерговитрат на його виконання, є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дослідження, що становлять основу дисертаційної роботи, виконувались у Вінницькому національному аграрному університеті за ініціативною науково-дослідною програмою на 2017-2020 рр. «Інтенсифікація процесів механічної обробки сільськогосподарської сировини за вібраційного впливу» (Державний реєстраційний номер 0117U004700), а також згідно договорів про творчу співпрацю Вінницького національного аграрного університету із ТОВ «ПК «Зоря Поділля», ФГ «Столипін» та СТОВ «Надія».

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат при сушінні зернової сировини шляхом розробки та обґрунтування технологічних параметрів віброозонуючого комплексу.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

- провести аналіз основних закономірностей перебігу процесу сушіння зернової сировини та обґрунтувати основні напрямки його інтенсифікації за умови вібраційного впливу на оброблювану сировину та технології озонування;
- розробити математичну модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна під дією вібраційного впливу;
- розробити перспективну схему та конструкцію віброозонуючого комплексу для обробки зернової сировини під час її сушіння;
- обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри розробленого віброозонуючого комплексу та встановити його раціональні режими роботи;
- здійснити перевірку адекватності отриманої математичної моделі;
- здійснити виробничу апробацію експериментально-промислової моделі віброозонуючого комплексу для реалізації процесу сушіння зернової сировини та оцінити економічну ефективність його використання.

Об'єкт дослідження. Процес сушіння зернової сировини в умовах віброзваженого стану з використанням технології озонування.

Предмет дослідження Віброозонуючий комплекс для сушіння зернової сировини, закономірності зміни параметрів досліджуваного процесу.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на методах теорії сушіння, теорії тепломасообміну, математичного моделювання технологічних процесів і проводилися з використанням основних положень вищої математики, а експериментальні дослідження – згідно розроблених та існуючих методик і галузевих стандартів в лабораторних умовах на розробленій експериментальній установці з використанням планування багатofакторного експерименту і застосуванням методів статистичної обробки результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше отримано математичну модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна під дією вібраційного впливу;
- визначено вплив факторів на ефективність технологічного процесу сушіння, які характеризують якісні і кількісні показники роботи віброозонуючого комплексу;
- вперше отримано теоретичні та експериментальні залежності концентрації озону в озоноповітряній суміші від віброприскорення сушильної камери за різних швидкостей руху сушильного агенту.

Практичне значення отриманих результатів. На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано раціональні параметри процесу та розробленого віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини. Розроблено конструкторську документацію і створено дослідний зразок, який успішно пройшов випробування на виробничих потужностях ТОВ «ПК «Зоря Поділля», ФГ «Столипін», СТОВ «Надія».

Встановлено, що застосування розробленого комплексу знижує питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю $W_k=14\%$ при початковій вологості $W_n=20\%$ за використання комплексного теплофізичного впливу при тривалості обробки 160 хв.

Результати техніко-економічного оцінювання розробленого віброозонуючого комплексу для реалізації сушіння зернової сировини засвідчили, що його впровадження у виробництво порівняно з існуючим аналогом (СБЦ-3М) дає змогу отримати річний економічний ефект 66690 грн/рік за середнього терміну окупності 2,02 року.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи здобувачем отримані самостійно. У наукових роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок полягає в такому: проведено літературний аналіз зерносушильного обладнання [5, 9]; сформовано основні технологічні аспекти, що стосуються реалізації процесів сушіння зернової сировини [2, 4, 7, 16]; розроблено принципову схему конструкції та обґрунтовано принцип її дії [1, 19]; конструктивно реалізовано дослідно-промислову модель віброозонуючого комплексу [17]; проведено експериментальні дослідження та обґрунтовано режимні параметри процесу [20, 23].

Загальна частка участі в опублікованих у співавторстві працях становить більше 50%, а в охоронно-правових документах – понад 70%.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи були висвітлені на міжнародних, всеукраїнських та регіональних конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (НУХТ, м. Київ, 2016 р.), Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Енерго- і ресурсозберігаючі технології та машини в аграрному виробництві» (ПДАА, м. Полтава, 2016 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (НУБІП, м. Київ, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку овочівництва» (Інститут овочівництва та баштанництва НААНУ, с. Селекційне, 2017 р.), XI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (ЦНТУ, м. Кропивницький, 2017 р.), Обласній науково-практичній конференції «Молодіжний науковий форум» (Ладижинський коледж ВНАУ, м. Ладижин, 2018 р.), Всеукраїнській інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (ПДАА, м. Полтава, 2018 р.), XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2018 р.), XIX Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (НУБІП, м. Київ, 2018 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 24 наукових працях (6,4 у.д.а.), серед яких 8 статей у фахових виданнях України (3,1 у.д.а.), 1 стаття в закордонному виданні (0,5 у.д.а.), 6 патентів України на корисну модель (1,1 у.д.а.), 9 тез наукових конференцій (1,7 у.д.а.).

Структура та об'єм дисертації. Дисертація викладена українською мовою, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи складає 250 сторінок, в тому числі 97 сторінок додатків, 56 рисунків і 21 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та завдання, об'єкт і предмет досліджень, методи досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі «Аналіз сучасного стану технології і техніки для сушіння зерна»** представлено результати аналітичних досліджень стану проблеми по сушінню зернової сировини. Виділено основні недоліки традиційного зерносушильного обладнання і переваги вібраційних зернових сушарок та обґрунтовано доцільність їх використання. Розглянуто перспективність використання технології озонування при сушінні зернової сировини під час післязбиральної обробки у поєднанні з вібраційним впливом на оброблювану сировину. Представлено аналіз та класифікацію конструктивних схем традиційних та вібраційних сушарок. Сформульовано задачі досліджень.

При формулюванні задач досліджень до уваги бралися праці вчених, які зробили вагомий внесок у розвиток теорії землеробської механіки, сушіння, теорії вібраційних машин, зокрема: В.В. Адамчука, П.С. Берника, І.І. Блехмана, В.М. Булгакова, П.М. Василенка, А.С. Гінзбурга, В.Ф. Дідуха, Г.М. Калетніка, В.П. Ковбаси, Б.І. Котова, А.В. Ликова, Ю.І. Макарова, С.Д. Птіцина, А.В. Спіріна, С.П. Степаненка, Г.К. Філоненка, О.В. Цуркана.

Використовувалися праці А.І. Андреева, В.І. Аніскіна, А.А. Гаврилова, Н.А. Глущенко, Н.Ф. Глущенко, В.Г. Грезчикова, Н.В. Ксенза, Є.А. Соколова, В.Н. Тимошенко, Т.П. Троцької, А.В. Чурмасова, в яких відмічені якісні властивості впливу озону на оброблювану сировину і широкий спектр його використання.

На основі проведеного аналізу відомих конструкцій зернових сушарок зроблено висновок, що значного підвищення якості отриманої зернової сировини після сушіння та зниження енерговитрат даного технологічного процесу можна досягти шляхом комбінованої дії на оброблювану сировину вібраційного поля і озонотеплової суміші в якості сушильного агента.

У другому розділі «Теоретичні дослідження процесу сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючого комплексу» здійснено теоретичні дослідження сушіння зернової сировини за комплексної віброозонуючої дії.

Встановлено фактори, від яких залежать енергетична і технологічна ефективність процесу сушіння зерна в зерносушарках.

Важливим показником енергетичного (теплового) удосконалення зерносушарок прийнято термічний коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_T = r \frac{d_2 - d_1}{c_p(t_1 - t_0) \cdot \rho_{CA}} 10^{-3}, \quad (1)$$

де r – кількість теплоти, яку сприйняла волога (1кг) в сушарці;
 d_1, d_2 – вологовміст сушильного агента на вході і виході сушарки, кг/м³;
 c_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг · К);
 t_1 – температура сушильного агента на вході в зерносушарку, К;
 t_0 – температура повітря, яке подається в теплогенератор, К;
 ρ_{CA} – густина сушильного агента, кг/м³.

Максимально можлива величина ККД:

$$\eta_{\max} = (t_1 - t_m) / (t_1 - t_0), \quad (2)$$

де t_m – температура вологого термометра, К;
 Енергетична ефективність сушильного процесу:

$$q_0 = \frac{c_p \cdot (t_1 - t_0)}{(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}} = \frac{I_1 - I_0}{(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}}, \quad (3)$$

де I_1, I_0 – ентальпія сушильного агента на вході до сушарки і на вході до теплогенератора відповідно.

ККД зерносушарки:

$$\eta = \frac{G_0 \cdot I \cdot f(t, r) 10^{-3}}{S \cdot V_{CA} \cdot \rho_{CA} \cdot c_p (t_1 - t_0)}, \quad (4)$$

де G_0 – продуктивність сушарки по абсолютно сухому зерну, кг/год.;

$I = \frac{dU}{dt}$ – швидкість зневоложення зерна, кг/год.;

V_{CA} – швидкість руху насиченого озonom сушильного агента в зерновій сушарці, м/с;

S – площа поперечного перерізу повітропроводу сушарки, м²;

$f(t, r)$ – питомі затрати тепла:

$$f(t, r) = \frac{r}{G}, \quad (5)$$

де G – продуктивність по вологому зерну, кг/год.

Розроблено математичну модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна під дією вібраційного впливу.

Швидкість поглинання озону зерною сировиною з озоноповітряної суміші визначається сорбуючою активністю зерна та значенням концентрації озону:

$$\frac{dC}{dt} = -K_c \cdot C \cdot S_3, \quad (6)$$

де C – концентрація озону в сушильному агенті на виході із зернової сушарки, мг/м³;

K_c – коефіцієнт, який показує швидкість розповсюдження концентрації озону в шарі зерна по глибині, 1/м²·с;

S_3 – площа зернової маси, м².

Для визначення константи швидкості поглинання озону через шар насіння пропускалаь озоноповітряна суміш з визначеними параметрами (V_{CA} , V , S_3 , C) та через певні проміжки часу вимірювалась концентрація озону на вході та виході шару зерна.

Початкові умови:

$$\text{при } t = 0; \quad C = C_0.$$

Зміна концентрації озону в озоноповітряній суміші при початкових умовах:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S_3}{V} [V_{CA}(C_0 - C) - K_c C V], \quad (7)$$

де V – об'єм оброблюваного зерна, м³;

C_0 – концентрація озону в сушильному агенті на вході в зернову сушарку, мг/м³;

Розв'язок рівняння (7) має вигляд:

$$C = \frac{C_0 \cdot V_{CA}}{V_{CA} + K_c \cdot S_3 \cdot V} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{CA} + K_c \cdot S_3 \cdot V}{V} \cdot t\right) \right]. \quad (8)$$

З рівняння (8) при відомих параметрах V_{CA} , V , S_3 , C можна визначити величину константи швидкості поглинання озону зерном. Оскільки рівняння (6) є трансцендентним відносно K_c і його розв'язок в елементарних функціях не може бути отримано, тому величину K_c можна знайти за рівнянням (8) методом ітерації за допомогою математичного середовища Statistica 10.0.

Математичний опис розповсюдження озону по глибині шару зернової сировини може бути розглянутий на прикладі руху озоноповітряного потоку у вигляді плоского фронту.

Рівняння розповсюдження озону матиме вигляд:

$$\frac{dC}{dX} = \frac{K_c \cdot S(a) \cdot C}{V_{CA}} \quad (9)$$

Коефіцієнт $S(a)$ площі взаємодії поверхні насінини з озоном можна збільшити в результаті розрихлення шару зерна за рахунок використання вібраційного впливу на оброблювану сировину. Стан розрихлення шару зернової сировини, в свою чергу, залежатиме від інтенсивності коливань сушильної камери, а саме від її віброприскорення a .

Коефіцієнт $S(a)$ площі взаємодії поверхні насінини з озоном:

$$S(a) = n \exp\left(-\frac{m}{a}\right), \quad (10)$$

де n, m – емпіричні коефіцієнти, які залежать від параметрів процесу.

Прийmemo, що константа швидкості поглинання озону насінням в усталеному режимі змінюється по експоненті та може бути описана:

$$K_c = -K_0 \cdot \exp[-\beta C], \quad (11)$$

де K_0 – величина константи швидкості поглинання озону насінням при концентрації озону, рівній нулю;

β – константа, що характеризує залежність швидкості поглинання озону від його концентрації.

Тоді з урахуванням (10) і (11) можна записати:

$$\int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} \frac{e^{\beta C}}{C} \cdot dC = -\frac{K_0}{V_{CA}} \int_0^h n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) dX, \quad (12)$$

де h – товщина шару насіння, м.

Розв'язок рівняння (12):

$$\begin{aligned} \int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} \frac{e^{\beta C}}{C} \cdot dC &= \int_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} \frac{1}{C} \left(1 + \frac{\beta C}{1} + \frac{\beta^2 C^2}{2} + \frac{\beta^3 C^3}{6}\right) = \ln|C| \Big|_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} + \beta C \Big|_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} + \\ &+ \frac{\beta^2 C^3}{6} \Big|_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} + \frac{\beta^3 C^4}{24} \Big|_{C_{\text{вх}}}^{C_{\text{вих}}} = \ln C_{\text{вих}} - \ln C_{\text{вх}} - C_k C_{\text{вх}} + b(C_{\text{вих}} - C_{\text{вх}}) + \\ &+ \frac{\beta^2}{6} \cdot (C_{\text{вих}}^3 - C_{\text{вх}}^3) + \frac{\beta^3}{24} \cdot (C_{\text{вих}}^4 - C_{\text{вх}}^4); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{K_0}{V_{CA}} \int_0^h n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) dX = \frac{K_0}{V_{CA}} \cdot n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) \cdot h. \quad (14)$$

З лівої частини рівняння (14) беремо перші два члена, тоді:

$$\ln \frac{C_{\text{вих}}}{C_{\text{вх}}} = -\frac{1}{V_{CA}} K_0 \cdot n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) \cdot h. \quad (15)$$

З цього слідує, що:

$$C_{\text{вих}} = C_{\text{вх}} \cdot \exp\left[-\frac{K_0}{V_{CA}} \cdot n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) \cdot h\right]. \quad (16)$$

Необхідна продуктивність озонатора:

$$\Phi = N_v \cdot C_{вих} , \quad (17)$$

де N_v – продуктивність вентиляційної установки, м³/год.

Концентрація озоноповітряної суміші на вході в сушильну камеру з зерном:

$$C_{вх} = \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0}{V_{CA}} \cdot n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) \cdot h\right]} . \quad (18)$$

Швидкість сушильного агента, насиченого озonom:

$$V_{CA} = \sqrt{\frac{2Rd}{\lambda\rho}} , \quad (19)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя;

ρ – густина озоноповітряної суміші, що переміщується, кг/м³;

d – діаметр отвору, м;

R – питомий опір шару зерна, Па/м.

Відповідно:

$$C_{вх} = \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot n \exp\left(-\frac{m}{a}\right) \cdot h}{\sqrt{\frac{2R \cdot d}{\lambda\rho}}}\right]} = \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{\sqrt[4]{\frac{n \exp\left(-\frac{m}{a}\right)}{\pi}}} \cdot \frac{1}{R}\right]} . \quad (20)$$

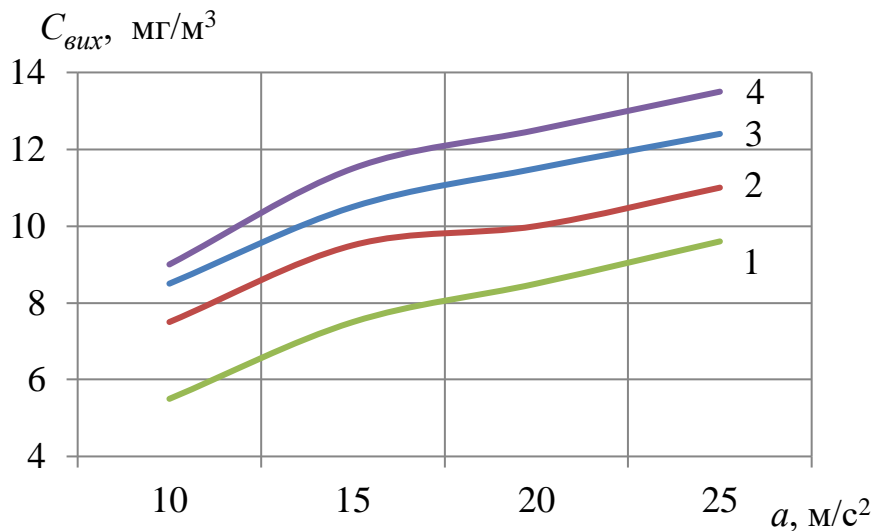
Згідно рівняння для опору шару зерна:

$$C_{вх} = \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot \lambda \cdot \rho}{19,62A \cdot V_{CA}^n \cdot d}\right]} = \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot \lambda \cdot \rho}{39,24 \cdot \sqrt[4]{\frac{n \exp\left(-\frac{m}{a}\right)}{\pi}}} \cdot \frac{1}{A \cdot V_{CA}^n}\right]} . \quad (21)$$

При збільшенні температури та вологості повітря продуктивність озонатора:

$$\Phi = K_{t\varphi} \left(N_v \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d}\right]} \right) = K_{t\varphi} \left(N_v \frac{C_{вих}}{\exp\left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{\sqrt[4]{\frac{n \exp\left(-\frac{m}{a}\right)}{\pi}}} \cdot \frac{1}{R}\right]} \right) . \quad (22)$$

Знаючи значення константи швидкості поглинання озону, можна визначити відношення між концентрацією озону в газовій суміші на виході шару насіння при різних віброприскореннях (рис. 1).



- 1 – при швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 0,5$ м/с; 2 – при швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 1,5$ м/с; 3 – при швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 2,5$ м/с; 4 – при швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 3,5$ м/с

Рисунок 1 – Теоретична залежність концентрації озону $C_{вих}$ в озонотвірній суміші від віброприскорення сушильної камери a

Визначено кінематичні, силові та енергетичні параметри вібрації. До основних енергетичних параметрів вібрації можна віднести роботу змушуючих сил та внутрішніх сил опору коливної системи. Робота зовнішніх сил створюється за рахунок віброзбуджувача та витрачається на подолання сил опору системи і забезпечення коливного руху робочих органів вібраційної машини за заданими параметрами.

Внутрішніми силами опору коливної системи є сили реактивного та дисипативного опорів.

Корисна потужність електродвигуна приводу дебалансного валу:

$$N_{np} = \frac{1}{\eta} m_{\partial} \cdot A \cdot \omega^2 (1 + 0,5d_y \cdot \omega \cdot f), \quad (23)$$

де η – ККД віброприводу;

A – амплітуда коливання сушильної камери, мм;

ω – кутова швидкість обертання дебалансного валу, рад/с;

d_y – діаметр цапфи під посадку підшипника, м;

f – коефіцієнт тертя в підшипниках.

Необхідна потужність електродвигуна головним чином залежатиме від амплітуди коливання сушильної камери, кутової швидкості дебалансного валу та ККД віброприводу.

Описано енергофізичні і термодинамічні процеси в електроозонаторі.

Розрядний проміжок електроозонатора отримує енергію, яка витрачається на сукупність робіт:

$$dW_E = \sum dA_i. \quad (24)$$

Оскільки енергія витрачається на заряд електричного поля відповідно до процесів, що відбуваються в розрядному проміжку до запалювання розряду, вираз набуде вигляду:

$$dW_{E_0} = dA_{EP}, \quad (25)$$

де dW_{E_0} – енергія, що витрачається до запалювання розряду.

Розряд в озонаторі супроводжується виділенням тепла, роботою на подолання діелектричних бар'єрів, світінням широкого спектра, утворенням озону:

$$dW_{E_p} = \sum dA_i = dA_{EP} + dA_{Дис} + dA_{C\delta} + dA_T, \quad (26)$$

де W_{E_p} – енергія, яка витрачається електроозонатором в режимі розряду;

A_T – робота, спрямована на нагрів, Дж;

A_{EP} – робота, спрямована на створення електричного поля, Дж;

$A_{C\delta}$ – втрати на світлове випромінювання, Дж;

$A_{Дис}$ – робота дисоціації молекулярного кисню на атоми, Дж.

При зазначених умовах процес нагрівання та охолодження електроозонатора описується наступним диференціальним рівнянням:

$$A_t \cdot \tau + \frac{C_t d\tau}{dt} = \Delta P_m, \quad (27)$$

де τ – перевищення температури, °С;

ΔP_m – потужність теплових втрат, Вт;

A_t – тепловіддача, Вт/К.

Теплоємність електроозонатора:

$$C_t = c_{P\Pi} \cdot m_{P\Pi}, \quad (28)$$

де $c_{P\Pi}$ – питома теплоємність розрядного пристрою Дж/(кг·К);

$m_{P\Pi}$ – маса розрядного пристрою, кг.

Перевищення температури електроозонатора при його нагріванні у випадку $\Delta P_m = \text{const}$ відбувається по експоненційному закону з постійною часу нагріву:

$$T_H = \frac{C_t}{A_t}. \quad (29)$$

З наведеного вище рівняння видно, що певна частка втрат в електроозонаторі з моменту його ввімкнення, витрачається на нагрів самого розрядного пристрою озонатора, а решта втрат розсіюються з поверхні або виносяться повітрям, що проходить через розрядний проміжок, в навколишнє середовище. Тоді постійна нагріву розрядного блоку озонатора:

$$T_H = \frac{C_t}{\omega_m \theta_v}, \quad (30)$$

де ω_m – коефіцієнт теплопередачі, $\omega_m = 0,278$ Вт/(м²·К).

Кількість тепла, яке переноситься потоком повітря:

$$\theta_v = V \rho c (t_n - t_k). \quad (31)$$

У міру нагрівання електроозонатора температура його поверхні підвищується, дедалі більша частина тепла передається в навколишнє середовище і нагрів пристрою стабілізується. При тривалій ($t = \infty$) роботі в незмінному режимі настає теплова рівновага, при якій всі виділені всередині пристрою втрати розсіюються в навколишнє середовище, а нагрів електроозонатора припиняється. Такий режим характеризується сталою температурою електроозонатора $\Delta t_{cm} = \text{const}$.

При цьому стале перевищення температури:

$$\Delta t_{cm} = \frac{\mu P_m}{\omega_m \theta_v}. \quad (32)$$

Загальним рішенням рівняння (32) є вираз:

$$\Delta t = \Delta t_0 + (\Delta t_\infty - \Delta t_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (33)$$

де Δt_0 – початкове (при $t=0$ °C) перевищення температури поверхні розрядного пристрою озонатора над температурою навколишнього середовища, °C;
 Δt_∞ – кінцеве (при $t=\infty$ °C) перевищення температури поверхні розрядного пристрою озонатора над температурою навколишнього середовища, °C;
 T_n – постійна часу нагріву, °C.

В окремому випадку нагрів розрядного пристрою озонатора з практично холодного стану (при $t=0$; $\Delta t_0=0$, при $t = \infty$; $\Delta t_\infty = \Delta t_{cm}$):

$$\Delta t = \Delta t_{cm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (34)$$

Охолодження відключеного від мережі електроозонатора, який досяг сталої температури (при $t=0$; $\Delta t_0 = \Delta t_{cm}$, при $t = \infty$; $\Delta t_\infty = 0$):

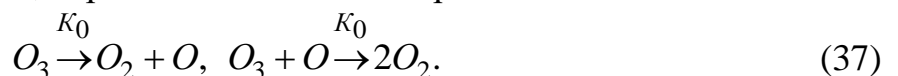
$$\Delta t = \Delta t_{cm} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right]. \quad (35)$$

Вибір режиму роботи електроозонатора необхідно здійснити таким чином, щоб в процесі його експлуатації дотримувалася умова:

$$t_{HC} + t_{max} = t_{кр}, \quad (36)$$

де $t_{кр}$ – допустиме значення температури для електроозонатора, яке визначається критичною температурою інтенсивної деструкції озону.

На підставі робіт Бенсона, приймаємо $t_{кр}=70$ °C, при якій помітно збільшується швидкість реакцій, отриманих даним атомарним механізмом:



У виразі (37) це відображено, як різке зниження значення константи кінетики розкладу озону – K_0 .

Кількість його можна виразити:

$$\frac{K_0}{K_1} = \exp\left(-\frac{\Delta H}{R\tau}\right). \quad (38)$$

В розрядному проміжку основним конструкційним елементом, схильним до нагрівання, є діелектричні бар'єри, між якими і відбувається бар'єрний розряд. Таким чином, температура діелектричних бар'єрів залежить від потужності, яка розсіюється на розрядному пристрої, тепловіддачі розрядного пристрою, температури вхідного газу з навколишнього середовища:

$$t_{ДБ} \leq t_{кр}; \quad (39)$$

$$t_{ДБ} = t_{НС} + \frac{\mu P_{пу}}{\omega_m \theta_v}. \quad (40)$$

Розв'язком рівняння теплового балансу розрядного проміжку електроозонатора є:

$$t_{ДБ} = t_{НС} + \frac{\mu P_{пу}}{\omega_m \theta_v} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_H}}\right), \quad (41)$$

де μ – коефіцієнт, що враховує частку активної потужності, яка витрачається на нагрів.

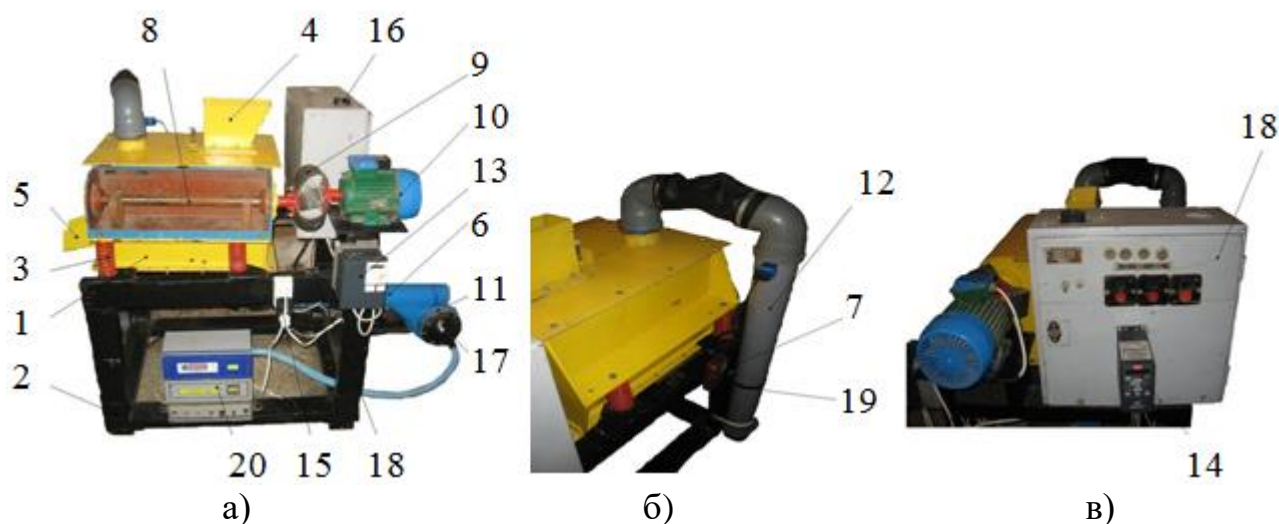
У третьому розділі «Обладнання та методика проведення експериментальних досліджень» наведено програму експериментальних досліджень, описано розроблену дослідно-промислову модель віброозонуючого комплексу (рис. 2), подано методики проведення, обробки і аналізу результатів експериментальних досліджень.

Було розроблено електронний пристрій синтезу озону, для його генерації та наступної подачі до складу сушильного агенту, підібрано ряд експериментального оснащення для виявлення кількісної картини енерговитрат, чіткого контролю та регулювання параметрів сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючого комплексу, а також визначення основних параметрів даного процесу.

В якості основних критеріїв оцінювання процесу сушіння зернової сировини було обрано її кінцеву вологість W_k , % та енерговитрати віброозонуючого комплексу N , кВт·год., які характеризуються впливом чотирьох найбільш вагомих факторів, що визначають кінетику даного процесу: віброприскорення a , м/с² як комплексний параметр динамічного стану вібросистеми; температура сушильного агенту T_{CA} , °С; концентрація озону N_{O_3} , мг/м³ та тривалість обробки у розробленому віброозонуючому комплексі t_O , хв.:

$$W_k = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t_O); \quad (42)$$

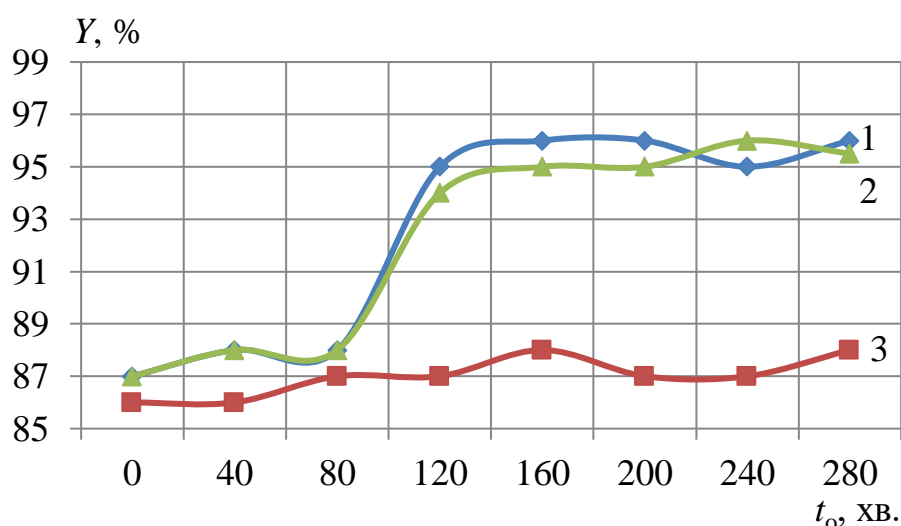
$$N = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t_O). \quad (43)$$



а, – вигляд спереду; б – вигляд ззаду; в – вигляд збоку; 1 – U-подібна камера; 2 – рама; 3 – пружини; 4, 5 – завантажувальний і розвантажувальний лотки; 6, 12 – відповідно вхідний та вихідний повітропроводи; 7 – термоанемометр; 8 – дебалансний вал; 9 – еластична муфта; 10 – електродвигун приводу дебалансного валу; 11 – електродвигун приводу вентилятора; 13, 14 – частотні перетворювачі; 15 – терморегулятор; 16 – реле часу; 17 – вентилятор; 18 – блок керування; 19 – вологоміри; 20 – електронний пристрій синтезу озону
Рисунок 2 – Дослідна модель віброозонуючого комплексу

У четвертому розділі «Експериментальне обґрунтування експлуатаційних режимів розробленого віброозонуючого комплексу» подано результати експериментальних досліджень віброозонуючого комплексу.

Визначено залежність схожості озимої пшениці сорту «Царівна» від часу обробки та концентрації озону у складі сушильного агенту (рис. 3).



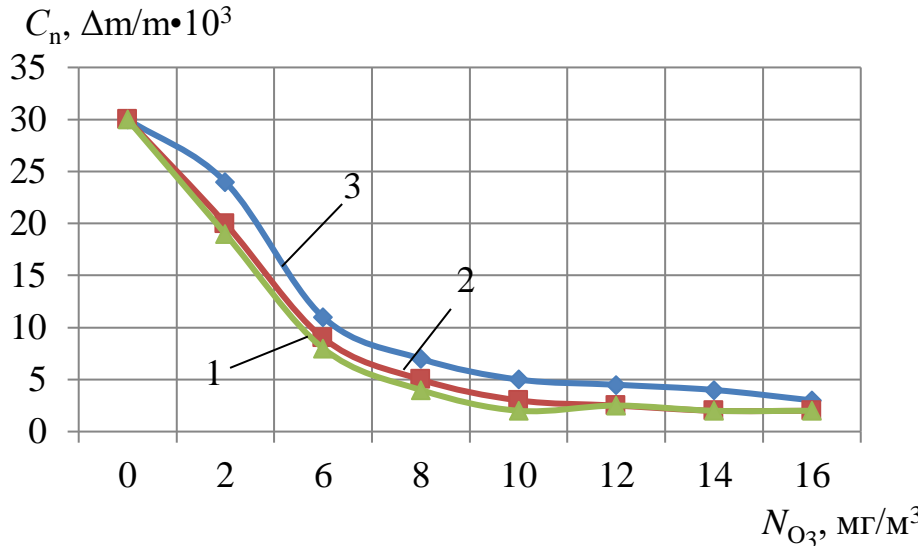
1 – при концентрації озону 10 мг/м^3 ; 2 – при концентрації озону 15 мг/м^3 ;
3 – при відсутності озону у складі сушильного агенту

Рисунок 3 – Схожість отриманої зернової сировини в залежності від концентрації озону

Експериментально отримані залежності показують, що озон позитивно

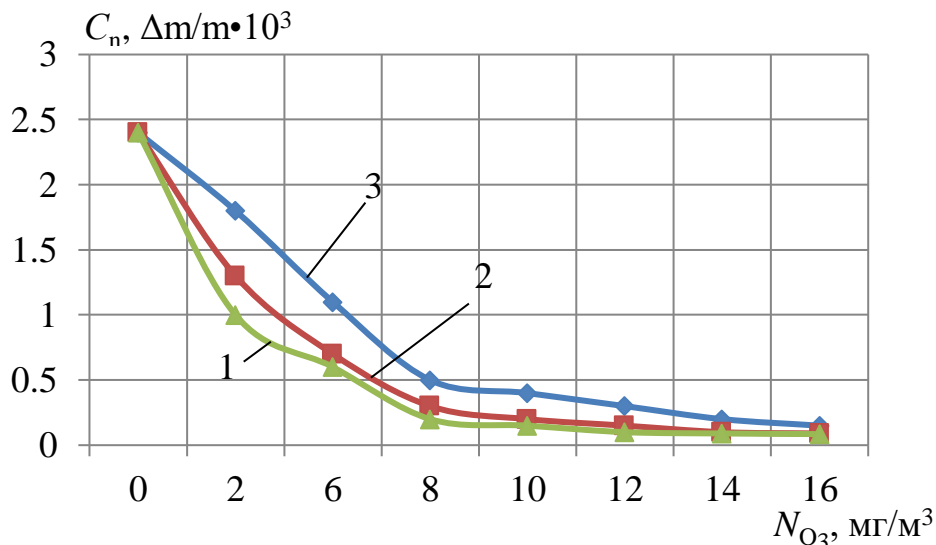
впливає на схожість обробленої зернової сировини. При чому, схожість зростає на 8-9% у порівнянні з сушінням без озонування. Найоптимальнішою концентрацією озону є 10 мг/м^3 , оскільки вища концентрація не має істотного впливу на схожість обробленої озимої пшениці і становить в межах 1%.

Також досліджено знезаражувальні властивості озону в складі сушильного агенту при дії на спори головні і фузаріуму (рис. 4, 5).



1 – при тривалості обробки $t_o=180$ хв.; 2 – при тривалості обробки $t_o=160$ хв.;
3 – при тривалості обробки $t_o=140$ хв.

Рисунок 4 – Стан грибової зараженості озимої пшениці спорами головні



1 – при тривалості обробки $t_o=180$ хв.; 2 – при тривалості обробки $t_o=160$ хв.;
3 – при тривалості обробки $t_o=140$ хв.

Рисунок 5 – Стан грибової зараженості озимої пшениці спорами фузаріуму

Аналізуючи отримані залежності, зроблено висновок, що озон у складі сушильного агенту знижує стан зараженості спорами головні і фузаріуму при концентрації $N_{O_3}=8-10 \text{ мг/м}^3$ та тривалості обробки $t_o=160$ хв., оскільки більші значення не призводять до істотних змін.

Після обробки експериментальних даних у статистичному середовищі Statistica 10.0 було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовано такі залежності:

– кінцева вологість зернової сировини від віброприскорення сушильної камери, температури сушильного агенту, концентрації озону та часу обробки:

$$W_k = 32,23 + 0,22a - 0,134T_{CA} - 0,627N_{O_3} - 0,724t_0 - 0,001(a)^2 - 0,001(T_{CA})^2 - 0,015(N_{O_3})^2 - 0,011a \cdot N_{O_3} + 0,01T_{CA} \cdot N_{O_3} + 0,002N_{O_3} \cdot t_0; \quad (44)$$

– енерговитрати віброозонуючого комплексу від віброприскорення сушильної камери, температури сушильного агенту, концентрації озону та часу обробки:

$$N = 11,828 - 0,005a - 0,303T_{CA} - 0,335N_{O_3} - 0,011t_0 + 0,001(a)^2 + 0,003(T_{CA})^2 + 0,01(N_{O_3})^2 + 0,001N_{O_3} \cdot t_0. \quad (45)$$

На основі отриманих експериментальних даних побудовано карти Парето ефектів для оцінки впливу факторів на кінцеву вологість зернової сировини (рис. 6) та споживані енерговитрати (рис. 7).

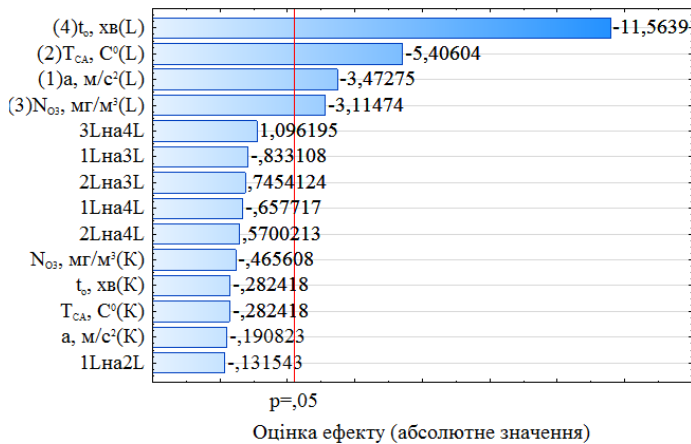


Рисунок 6 – Карта Парето ефектів для оцінки впливу факторів на кінцеву вологість зернової сировини

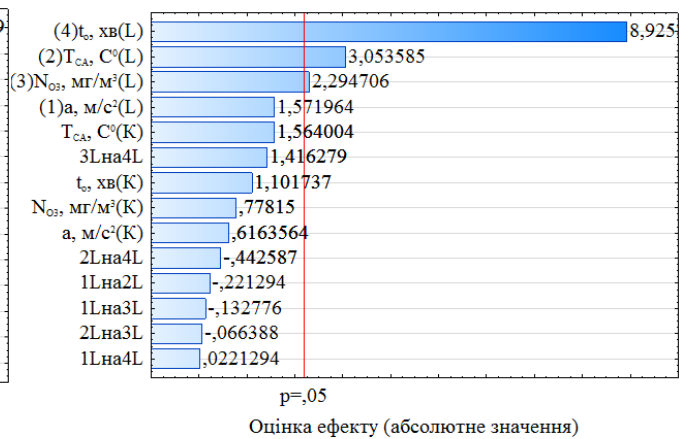
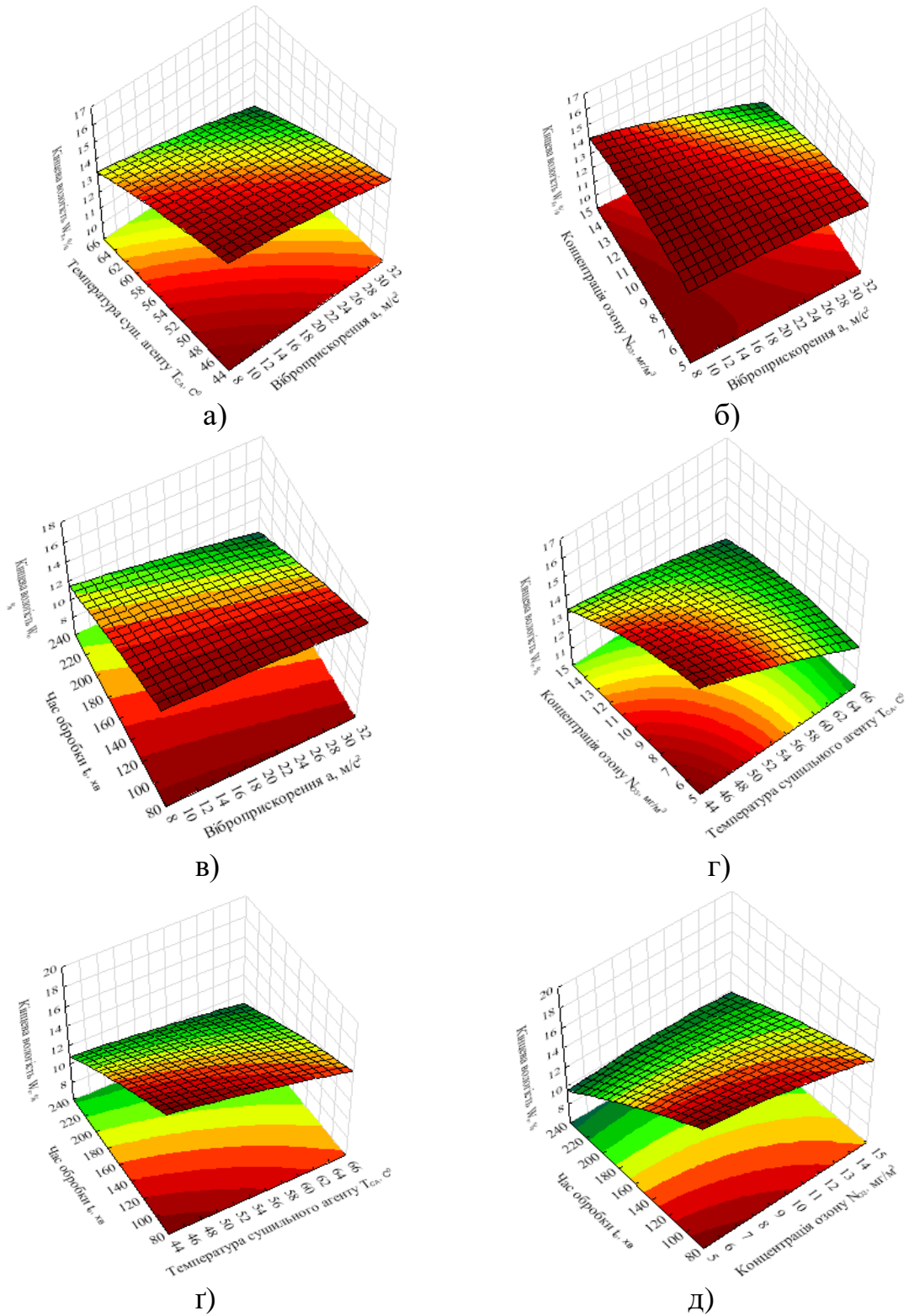


Рисунок 7 – Карта Парето ефектів для оцінки впливу факторів на споживані енерговитрати віброозонуючого комплексу

За результатами проведених експериментальних досліджень розробленого віброозонуючого комплексу на основі побудованих поверхонь відгуку досліджуваних процесів (рис. 8, 9) визначено раціональні технологічні параметри його роботи (табл. 1), значення яких отримано методом Крамера в математичному середовищі Mathcad 15.

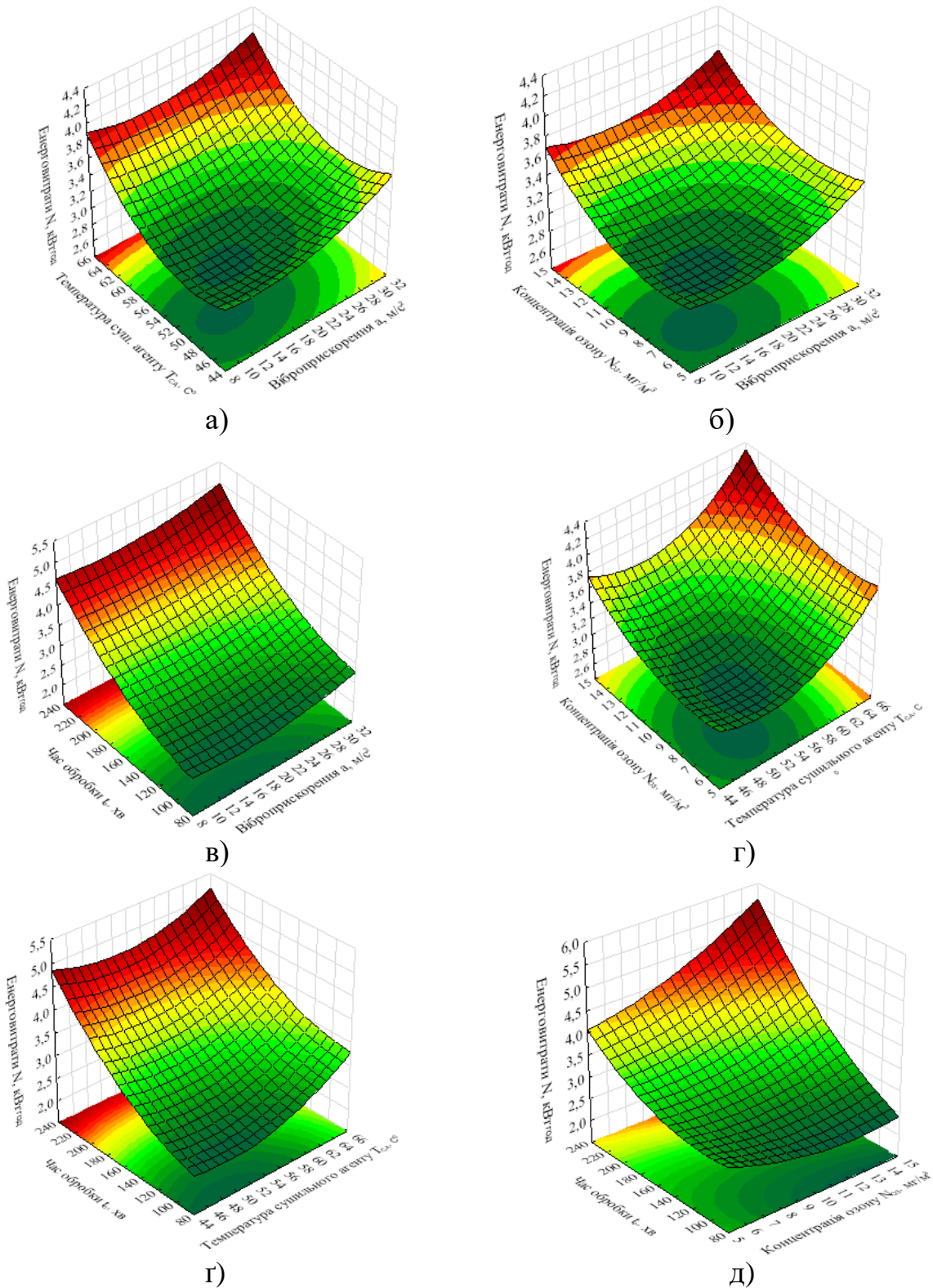
Таблиця 1 – Компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини

Технологічний параметр	Раціональне значення
Віброприскорення, м/с ²	15-20
Температура сушильного агенту, °C	50-55
Концентрація озону, мг/м ³	8-10
Час обробки, хв.	130-160



а – температури сушильного агента T_{CA} та віброприскорення a ; б – концентрації озону N_{O_3} та віброприскорення a ; в – часу обробки t_0 та віброприскорення a ; г – концентрації озону N_{O_3} та температури сушильного агента T_{CA} ; ґ – часу обробки t_0 та температури сушильного агента T_{CA} ; д – часу обробки t_0 та концентрації озону N_{O_3}

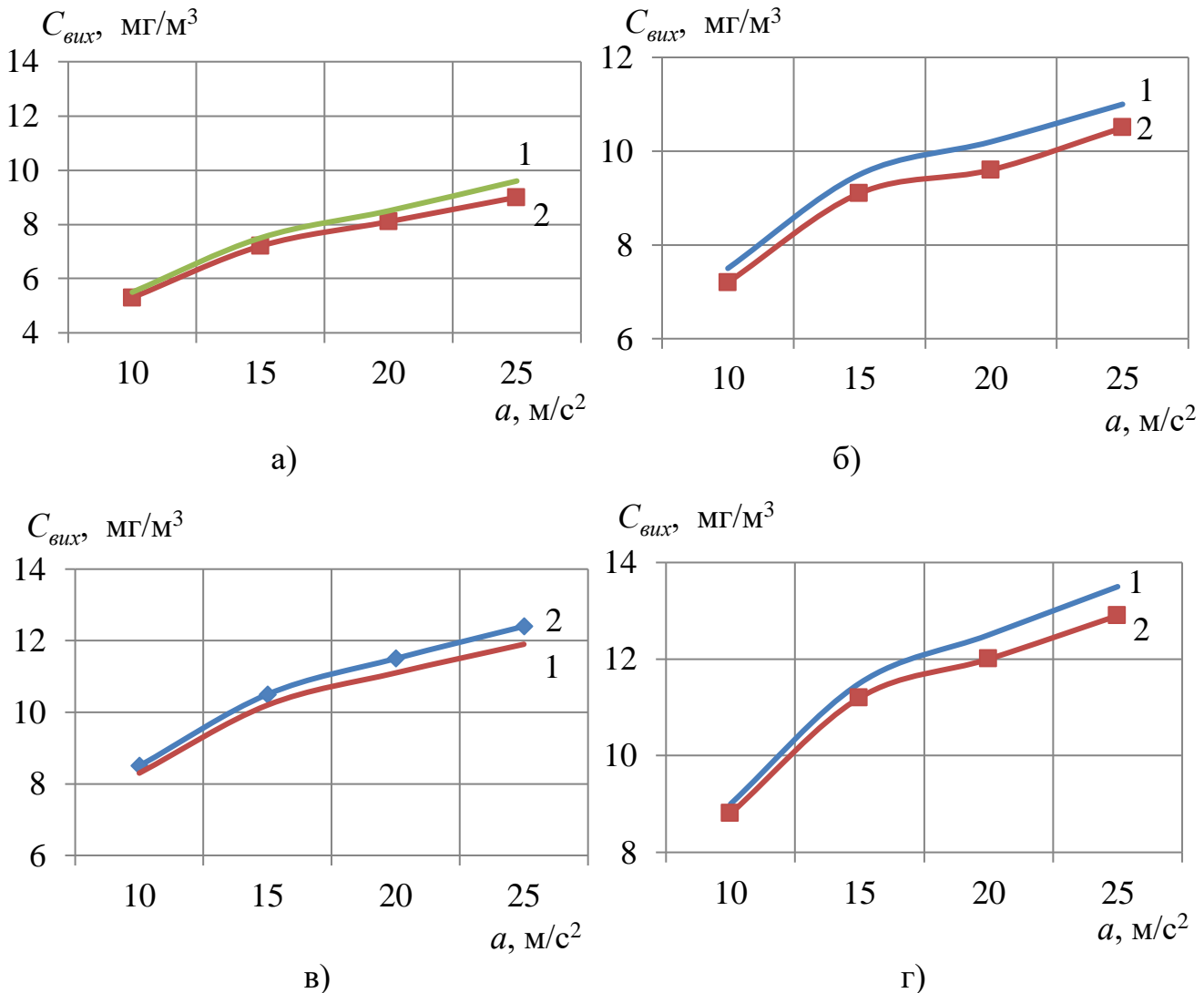
Рисунок 8 – Вплив параметрів процесу на кінцеву вологість зернового матеріалу W_k при обробці у віброозонуючому комплексі



а – температури сушильного агента T_{CA} та віброприскорення a ; б – концентрації озону N_{O_3} та віброприскорення a ; в – часу обробки t_0 та віброприскорення a ; г – концентрації озону N_{O_3} та температури сушильного агента T_{CA} ; д – часу обробки t_0 та температури сушильного агента T_{CA} ; е – часу обробки t_0 та концентрації озону N_{O_3} ; ф – часу обробки t_0 та концентрації озону N_{O_3}

Рисунок 9 – Вплив параметрів процесу на енерговитрати N віброозонуючого комплексу

Для встановлення адекватності отриманої математичної моделі розподілу концентрації озону по глибині шару зерна за вібраційного впливу побудовано серію експериментальних та теоретичних кривих (рис. 10).



1 – теоретична залежність; 2 – експериментальна залежність; а – при швидкості руху сушильного агенту $V_{CA} = 0,5$ м/с; б – при швидкості руху сушильного агенту $V_{CA} = 1,5$ м/с; в – при швидкості руху сушильного агенту $V_{CA} = 2,5$ м/с; г – при швидкості руху сушильного агенту $V_{CA} = 3,5$ м/с
Рисунок 10 – Залежність концентрації озону $C_{вих}$ в озоніповітряній суміші від віброприскорення сушильної камери a

Аналізуючи отримані залежності, зроблено висновок, що раціональним технологічним параметрам роботи віброозонуючого комплексу відповідає швидкість руху сушильного агенту $V_{CA} = 1,5$ м/с.

У п'ятому розділі «Оцінення ефективності розробленого віброозонуючого комплексу та його виробнича апробація» було виконано техніко-економічне оцінювання розробленого віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини. Впровадження такого комплексу у виробництво дає змогу отримати

річний економічний ефект 66690 грн./рік в порівнянні з існуючою зерносушаркою СБЦ-3М за середнього терміну окупності 2 роки.

Визначено місце розробленого віброозонуючого комплексу в технологічній схемі післязбиральної обробки зернової сировини та виконано апробацію результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено проблему підвищення ефективності і швидкості процесу сушіння зернової сировини із одночасним зменшенням енерговитрат на його виконання при використанні розробленого віброозонуючого комплексу.

1. Проведений аналіз особливостей виконання післязбиральної обробки зернової сировини виявив складність і високі вимоги як до самого процесу, так і до сировини, що обробляється. Огляд існуючих конструкцій серійних зернових сушарок дав змогу визначити недоліки сушильного обладнання, переважно пов'язані з неякісною обробкою зернової сировини, значними енерговитратами, складністю експлуатації, значною металоємністю та вартістю. Ґрунтуючись на сучасному рівні розвитку вібротехнологій і обладнання та використанні озону в різних галузях промисловості, було визначено ефективність їх використання для сушіння зернової сировини у процесі післязбиральної обробки.

2. Розроблена математична модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна під дією вібраційного впливу. Отримані графічні та теоретичні залежності вперше дають змогу визначати продуктивність озонатора та інтенсивність розподілу концентрації озону по глибині шару під дією вібраційного впливу в залежності від віброприскорення сушильної камери та швидкості руху сушильного агенту.

3. Розроблено перспективну схему та конструкцію віброозонуючого комплексу для реалізації технологічного процесу сушіння, в якому зернова сировина, що обробляється, піддається вібраційному впливу з одночасною подачею сушильного агенту, який є сумішшю підігрітого повітря та озону заданої концентрації.

4. У ході експериментальних досліджень було отримано раціональні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини: віброприскорення $a=15-20$ м/с², температура сушильного агенту $T_{CA}=50-55$ °С, концентрація озону $N_{O_3}=8-10$ мг/м³, час обробки $t_o=130-160$ хв. за швидкості руху сушильного агенту $V_{CA} = 1,5$ м/с.

5. Порівнянням результатів теоретичних та експериментальних досліджень встановлено розбіжність, яка становить 8-10% для робочого режиму. Це підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

6. За результатами досліджень розроблено технічну документацію на віброозонуючий комплекс, який впроваджено на виробничих потужностях ТОВ «ПК «Зоря Поділля», ФГ «Століпін», СТОВ «Надія». Результати техніко-економічного оцінювання розробленого віброозонуючого комплексу для реалізації сушіння зернової сировини засвідчили, що провадження такого комплексу у

виробництво дає змогу отримати річний економічний ефект 66690 грн./рік в порівнянні з існуючою зерносушаркою СБЦ-3М за середнього терміну окупності 2 роки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. та ін. Обґрунтування схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. Київ, 2016. № 6. Т. 22. С. 151-156. (Особистий внесок здобувача: запропоновано нову схему віброозонуючої сушарки).

2. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В., Герасимов О.О. та ін. Перспективи використання озону у післязбиральній обробці зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця, 2016. № 3 (95). С. 80-84. (Особистий внесок здобувача: розглянуто перспективи використання озону у складі сушильного агенту при сушінні зернової сировини).

3. Цуркан О.В., Величко Л.Д., Присяжнюк Д.В. Математична модель вібраційної сушарки з маятниковими механізмами вільного ходу. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2017. № 2 (85). С. 103-113. (Особистий внесок здобувача: побудовано розрахункову схему вібраційної сушарки).

4. Цуркан О.В., Пришляк В.М., Присяжнюк Д.В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця, 2017. № 2 (97). С. 99-103. (Особистий внесок здобувача: проаналізовано можливі методи інтенсифікації сушіння зерна).

5. Присяжнюк Д.В. Аналіз обладнання для сушіння зернової сировини при післязбиральній обробці. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2017. № 3 (86). С. 136-144. (Особистий внесок здобувача: проаналізовано обладнання для сушіння зернової сировини).

6. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Озонування як перспективний спосіб обробки зернової сировини. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук. праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*. Дослідницьке, 2017. Вип. 21 (35). С. 307-312. (Особистий внесок здобувача: розглянуто особливості озонування).

7. Присяжнюк Д.В. Озон як рушійний фактор для видалення зв'язаної вологи із зернової сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, 2018. № 2 (89). С. 94-97. (Особистий внесок здобувача: розглянуто процес видалення зв'язаної вологи із зернової сировини).

8. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Математична модель розповсюдження озону в шарі зерна при його сушінні із використанням віброозонуючого комплексу. *Machinery&Energetics*. Київ, 2018. С. 55-58. (Особистий внесок здобувача: побудовано графічні залежності розповсюдження озону в шарі зерна від віброприскорення сушильної камери).

Статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз

9. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В., Герасимов А.А. Особенности процесса и оборудования для сушки зернового сырья с использованием озона. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin-Rzeszov, 2016. Vol. 18. № 4. С. 37-45. *(Особистий внесок здобувача: проаналізовано традиційні схеми зерносушильного обладнання та запропоновано технологію інтенсифікації процесу сушіння зерна).*

Патенти України

10. Пат. КМ 115030 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 27.03.2017. *(Особистий внесок здобувача: проведено патентний пошук).*

11. Пат. КМ 122236 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 26.12.2017. *(Особистий внесок здобувача: запропоновано модернізацію вібраційної сушарки).*

12. Пат. КМ 122237 Україна. Віброозонуюча сушарка. Опубл. 26.12.2017. *(Особистий внесок здобувача: побудовано принципову схему модернізованої віброозонуючої сушарки).*

13. Пат. КМ 124005 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 12.03.2018. *(Особистий внесок здобувача: визначено недоліки існуючої вібраційної сушарки).*

14. Пат. КМ 124870 Україна. Вібраційна сушарка. Опубл. 25.04.2018. *(Особистий внесок здобувача: сформовано формулу корисної моделі при модернізації вібраційної сушарки).*

15. Пат. КМ 126546 Україна. Віброозонуюча сушарка. Опубл. 25.06.2018. *(Особистий внесок здобувача: подано принцип роботи модернізованої віброозонуючої сушарки).*

Матеріали конференцій і тези

16. Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Присяжнюк Д.В. та ін. Вібромеханічна інтенсифікація тепломасообмінних процесів при зневоложенні зерна. *Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: Матеріали міжнар. наук-техн. конф. (Київ, 8-10 лист. 2016).* Київ, 2016. С. 112-114.

17. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В., Скрипник М.В. та ін. Віброозонуючий комплекс для післязбиральної обробки зернової сировини. *Енерго- і ресурсозберігаючі технології та машини в аграрному виробництві: Матеріали всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Полтава, 15-17 груд. 2016).* Полтава, 2016. С. 87-89.

18. Присяжнюк Д.В., Яворський А.Я., Цуркан О.В. Збереження якості гарбузового насіння з використанням віброозонуючої технології обробки. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: Праці VII міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 27-28 квіт. 2017).* Київ, 2017. С. 319-320.

19. Цуркан О.В., Янович В.П., Полевода Ю.А., Присяжнюк Д.В. Розробка конструктивно-технологічної схеми віброозонуючого комплексу для енергозберігаючого сушіння насіння гарбуза. *Сучасний стан та перспективи розвитку овочівництва: Тези міжнар. наук.-практ. конф. (Селекційне, 26 лип. 2017).* Селекційне, 2017. С. 219-222.

20. Цуркан О.В., Янович В.П., Присяжнюк Д.В. Дослідження кінетики сушіння насіння соняшника у вібраційній сушарці. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Кропивницький, 1-3 лист. 2017). Кропивницький, 2017. С. 301-303.

21. Янович В.П., Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Використання механічних коливань у сільськогосподарському виробництві. *Молодіжний науковий форум*: Матеріали обл. наук.-практ. конф. (Ладижин, 12 бер. 2018). Ладижин, 2018. С. 3-5.

22. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Сушіння зерна з використанням віброозонуючого впливу. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування*: Матеріали всеукр. інтернет-конф. (Полтава, 29-30 бер. 2018). Полтава, 2018. С. 9-11.

23. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Планування багатофакторного експерименту у дослідженні процесу сушіння зерна пшениці. *Вібрації в техніці та технологіях*: Тези XVII міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 11-12 жов. 2018). Львів, 2018. С. 113-114.

24. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Граничні умови сушіння насіння гарбуза. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: Тези XIX міжнар. наук. конф. (Київ-Голосієво, 17-19 жов. 2018). Київ, 2018. С. 306-308.

АНОТАЦІЯ

Присяжнюк Д.В. Обґрунтування параметрів процесу та розробка віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної задачі інтенсифікації процесу сушіння зернової сировини та розробці нового віброозонуючого комплексу, що реалізує комплексний технологічний вплив на оброблюване середовище.

На основі аналізу закономірностей реалізації процесу сушіння, дії механічних коливань та озоноповітряної суміші на зернову сировину, обґрунтовано нові напрямки розвитку способу комплексної динамічної обробки сировини та його конструктивне впровадження у механічній коливній системі.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження моделі розподілу концентрації озону по глибині шару зерна за вібраційного впливу дозволили отримати аналітичні та емпіричні залежності для їх основних характеристик, та, як наслідок, обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри його роботи.

Сформовано основні положення теорії сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючого комплексу, який є перспективним для розвитку високопродуктивного зерносушильного обладнання, що розширює спектр високоефективної комплексної механічної обробки сільськогосподарської сировини.

Експериментально досліджено вплив режимних параметрів досліджуваного розробленого комплексу на показники продуктивності та енергоємності процесу сушіння зернової сировини, а також на показники якості отриманої продукції.

Базуючись на отриманих даних встановлено, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю $W_k=14$ % при початковій вологості $W_n = 20$ % становлять: за використання класичної технології з подачею сушильного агенту температурою 50 °С при тривалості обробки 240 хв. – 112,93 Вт·год./кг або 18,82 Вт·год./кг на 1% випаруваної вологи (406,54 КДж/кг або 67,75 КДж/кг на 1% випаруваної вологи); за використання комплексного теплофізичного впливу при тривалості обробки 160 хв. – 91,01 Вт·год./кг або 15,16 Вт·год./кг на 1% випаруваної вологи (327,63 КДж/кг або 54,6 КДж/кг на 1 % випаруваної вологи).

Результати проведених досліджень дозволили отримати практичні щодо рекомендації з інтенсифікації процесу сушіння зернової сировини і здійснити практичну апробацію розробленої машини, яку було впроваджено на підприємствах ТОВ «ПК «Зоря Поділля», ФГ «Столипін» та СТОВ «Надія».

Результати техніко-економічного оцінювання розробленого віброозонуючого комплексу для реалізації сушіння зернової сировини засвідчили, що провадження такого комплексу у виробництво дає змогу отримати річний економічний ефект 66690 грн./рік в порівнянні з існуючою зерносушаркою СБЦ-3М за середнього терміну окупності 2 роки.

Ключові слова: зернова сировина, післязбиральна обробка, сушіння, вібрація, озон, віброозонуючий комплекс, раціональні параметри, продуктивність, енерговитрати, показники якості.

АННОТАЦИЯ

Присяжнюк Д.В. Обоснование параметров процесса и разработка виброозонирующего комплекса для сушки зернового сырья. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства». – Винницкий национальный аграрный университет, Винница, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи интенсификации процесса сушки зернового сырья и разработке нового виброозонирующего комплекса, реализующего комплексное технологическое воздействия на обрабатываемую среду.

На основе анализа закономерностей реализации процесса сушки, физического взаимодействия озонозодушной смеси на зерновое сырье, обоснованы новые направления развития способа комплексной динамической обработки сырья и его конструктивное внедрение в механической колеблющейся системе.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования модели распределения концентрации озона по глубине слоя зерна под вибрационным воздействием разработанного виброозонирующего комплекса позволили получить аналитические и эмпирические зависимости для их основных характеристик, и

обосновать рациональные конструктивно-технологические параметры его работы.

Сформированы основные положения теории сушки зернового сырья с использованием виброозонирующего комплекса, который является перспективным развитием высокопроизводительного зерносушильного оборудования, расширяет спектр высокоэффективной комплексной механической обработки сельскохозяйственного сырья.

Разработана математическая модель распределения концентрации озона по глубине слоя зерна под вибрационным воздействием. Полученные графические и теоретические зависимости впервые позволяют определять производительность озонатора и интенсивность распределения концентрации озона по глубине слоя под вибрационным воздействием в зависимости от виброускорения сушильной камеры.

Экспериментально исследовано влияние режимных параметров исследуемого разработанного комплекса на показатели производительности и энергоемкости процесса сушки зернового сырья, а также на показатели качества полученной продукции.

Основываясь на полученных данных установлено, что удельные энергозатраты на единицу готовой продукции с влажностью $W_k = 14\%$ при начальной влажности составляют: при использовании классической технологии с подачей сушильного агента температурой $50\text{ }^\circ\text{C}$ при продолжительности обработки 240 мин. – 112,93 Вт·ч./кг или 18,82 Вт·ч./кг на 1% испаренной влаги (406,54 кДж/кг или 67,75 кДж/кг на 1% испаренной влаги); при использовании комплексного теплофизического воздействия при продолжительности обработки 160 мин. – 91,01 Вт·ч./кг или 15,16 Вт·ч./кг на 1% испаренной влаги (327,63 кДж/кг или 54,6 кДж/кг на 1% испаренной влаги).

В ходе экспериментальных исследований были получены рациональные технологические параметры исследуемого процесса сушки зернового сырья, которые составляют: виброускорение $a = 15\text{--}20\text{ м/с}^2$, температура сушильного агента $T_{CA} = 50\text{--}55\text{ }^\circ\text{C}$, концентрация озона $N_{O_3} = 8\text{--}10\text{ мг/м}^3$, время обработки $t_0 = 130\text{--}160$ мин. при скорости движения сушильного агента $V_{CA} = 1,5\text{ м/с}$.

По результатам многофакторного эксперимента получена математическую модель в виде множественной регрессии второго порядка, которая адекватно описывает исследуемый процесс сушки зернового сырья.

Результаты проведенных исследований позволили получить практические рекомендации по интенсификации процесса сушки зернового сырья и осуществить практическую апробацию разработанной машины, которая была внедрена на предприятиях ООО «ПК «Заря Подолья», ФХ «Столыпин» и СООО «Надежда».

Результаты технико-экономической оценки разработанного виброозонирующего комплекса для реализации сушки зернового сырья показали, что внедрение такого комплекса в производство позволяет получить годовой экономический эффект 66690 грн./год по сравнению с существующей зерносушилкой СБЦ-3М при среднем сроке окупаемости 2 года.

Ключевые слова: зерновое сырье, послеуборочная обработка, сушка, вибрация, озон, виброозонирующий комплекс, рациональные параметры, производительность, энергозатраты, показатели качества.

SUMMARY

Prysyazhnyuk D.V. Justification of the process parameters and the development of a vibro-ozone complex for grain feedstock drying. – On the right of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.05.11 «Machines and means of mechanization of agricultural production». – Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the actual practical problem of intensifying the drying process of grain raw materials and the development of a new vibrating plant complex, which implements a complex technological influence on the cultivated environment.

On the basis of the analysis of the laws of the drying process realization, the physical interaction of the ozone-air mixture on grain raw materials, new directions of the development of the method of integrated dynamic processing of raw materials and its constructive introduction in the mechanical vibrational system are substantiated.

The basic principles of the theory of drying of grain raw materials using the vibrating plant are formed, which is a promising for the development of high-performance grain drying equipment, which expands the spectrum of highly effective complex mechanical processing of agricultural products.

The influence of the regime parameters of the investigated complex on the parameters of productivity and energy intensity of the drying process of grain raw materials, as well as on the quality indices of the obtained products, was experimentally investigated.

Based on the obtained empirical data, it has been established that: that the specific energy consumption per unit of finished products with a humidity $W_k = 14\%$ at the initial humidity are: for the use of classical technology with the supply of a heat agent temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a processing time of 240 min. – 112,93 W·h./kg or 18,82 W·h./kg/1% evaporated moisture (406,54 KJ/kg or 67,75 KJ/kg per 1% evaporation moisture); for the use of complex thermophysical influence with a processing time of 160 min. – 91,01 W·h./kg or 15,16 W·h./kg/1% evaporated moisture (327,63 KJ/kg or 54,6 KJ/kg per 1% evaporation of moisture).

The results of the conducted studies allowed to get practical recommendations on the intensification of the drying process of grain and raw materials, and to carry out practical testing of the developed machine, which was introduced at the enterprises of LLC «PK «Zorya Podillya», F «Stolypin» and LLC «Nadiya».

The results of the feasibility study of the developed vibrating plant for the implementation of drying of grain raw materials showed that its introduction into production in comparison with existing analog (grain dryer SBC-3M) gives an opportunity to get an annual economic effect of 66690 UAH/year for the average payback period of 2 years.

Keywords: grain raw materials, post-harvest processing, drying, vibration, ozone, vibro-ozone complex, rational parameters, productivity, energy consumption, quality indicators.

Підписано до друку 06.11.2019 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк – лазер. Ум. друк. арк. 1,56.
Наклад 100 прим. Зам. № 776

Надруковано у редакційно-видавничому відділі
Вінницького національного аграрного університету
м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008.