

УДК 631.365:62 – 868 (043.3)

Д. В. Борисюк, к. т. н.; А. В. Спирін, к. т. н., доц.;
Д. В. Присяжнюк, к. т. н.; І. В. Твердохліб, к. т. н., доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРООЗОНОВОГО СУШІННЯ ЗЕРНА ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

Сушіння є одним з найважливіших етапів підготовки зерна до зберігання в сільськогосподарському виробництві. На сьогодні досить широкого поширення для виконання цього технологічного процесу знайшов конвективний метод сушіння. Але поряд зі своїми перевагами цей метод має і ряд вагомих недоліків, одним з яких є значна енергоємність. У зв'язку з цим досить інтенсивно здійснюється науковий пошук по розробці шляхів і методів зниження енергоємності конвективного способу обробки.

Процес післязбиральної обробки зерна, особливо, сушіння, є одним із найважливіших у технології виробництва сільськогосподарської продукції. Ця обробка сприяє одержанню високоякісної продукції, її тривалому та ефективному збереженню до збирання нового врожаю.

Для отримання зернової сировини кондиційної вологості та зниження енерговитрат у сільськогосподарському виробництві використовують різні прийоми інтенсифікації сушіння: вібраційне сушіння, рециркуляційне сушіння, попереднє нагрівання, вакуумне сушіння, сушіння із застосуванням інфрачервоного випромінювання, сушіння струмами високої частоти, сушіння зерна під впливом електричного поля та багато інших. Перспективним з точки зору енерговитрат та якості отриманої сировини є використання вібраційних сушарок у поєднанні із технологією озонування, яка виступає додатковим фактором інтенсифікації процесу сушіння.

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

Експериментально досліджено енергетичні параметри розробленого віброозонуючого комплексу в залежності від режимних параметрів досліджуваного процесу сушіння зернової сировини.

Ключові слова: зернова сировина, сушіння, вібрація, озон, віброозонуючий комплекс, показники якості, вологість зерна, схожість зерна, концентрація озону, віброприскорення, час обробки, енергетичні параметри.

Вступ

Сушіння є одним з найважливіших етапів підготовки зерна до зберігання в сільськогосподарському виробництві. На сьогодні досить широкого поширення для виконання цього технологічного процесу знайшов конвективний метод сушіння. Але поряд зі своїми перевагами цей метод має і ряд вагомих недоліків, одним з яких є значна енергоємність. У зв'язку з цим досить інтенсивно здійснюється науковий пошук по розробці шляхів і методів зниження енергоємності конвективного способу обробки.

Дієвими методами інтенсифікації сушіння зернової сировини є впровадження технології озонування в поєднанні з вібраційним впливом на оброблювану сировину.

Озон інтенсифікує швидкість сушіння зернових за рахунок безпосереднього хімічного і біохімічного впливу на сільськогосподарську сировину, покращує переміщення вологи з внутрішніх шарів і тепломасообмін в процесі сушіння в цілому.

При використанні озону економія становить близько 89 кг умовного палива на тону

отриманої сировини.

Сушіння з використанням озону викликає антибактерицидний вплив і підвищує показники якості зерна, унеможливорює процеси самозігрівання, зумовлює необхідний стан спокою в період зберігання, збереження об'єму обробленого матеріалу. Зникає необхідність в протравленні зерна та є можливість мінімізувати енерговитрати на процес сушіння.

Особливістю використання озону є те, що він не призводить до утворення шкідливих побічних речовин, оскільки озон розкладається до атомарного кисню.

Вібраційний вплив на зерно під час його сушіння у свою чергу забезпечує рівномірність обробки матеріалу з унеможливленням виникнення зон локального перегріву за рахунок постійного руху сировини.

Аналіз останніх досліджень

Корисність і актуальність використання вібротехнологій в процесі сушіння висвітлені в роботах [1, 2]. Теоретичним і експериментальним дослідженням процесу сушіння специфічної сільськогосподарської сировини присвячені роботи [3, 4]. Результати застосування фізичних ефектів з метою інтенсифікації процесу сушіння і подальшого зберігання сільськогосподарської продукції наведені в роботах [5, 6]. Детальний огляд і класифікація вібраційного і сушильного обладнання здійснені в роботі [7]. В роботах [5 – 7] детально наведені особливості впливу озоноповітряної суміші на характеристики зернової сировини при сушінні в залежності від концентрації озону, часу сушіння тощо.

Питання підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна та дослідження енергетичних параметрів сушильних машин досліджено в працях [4 – 8].

Мета дослідження

Виконавши аналіз робіт [1 – 8] можна встановити, що:

- наявні 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;
- підвищення енергоефективності процесу сушіння не зменшується, а навпаки збільшується у зв'язку з різким підвищенням цін на енергоносії;
- дослідження енергетичних параметрів сушильних машин, які використовують вібраційний вплив на оброблюваний матеріал з одночасною обробкою озоном у складі сушильного агенту для процесу сушіння зернової сировини недостатньо вивчені.

Отже, **метою дослідження** є підвищення ефективності і швидкості процесу сушіння зернової сировини із одночасним зменшенням енерговитрат на його виконання шляхом розробки віброозонуючого комплексу та визначення енергетичних параметрів віброозонуючого комплексу, призначеного для сушіння зернової сировини, що є актуальним науково-технічним завданням.

Результати теоретичних досліджень

Схожість насіння є одним з найважливіших показників продуктивності насіння і його якості. За схожості насіння можна прогнозувати майбутню врожайність. Тому важливою задачею є визначення впливу озоноповітряної суміші на схожість насінневого матеріалу. Можна припустити, що внутрішня енергія насіння є функцією від енергетичного балансу насіння:

$$Y = f(E), \quad (1)$$

де Y – схожість насіння досліджуваного виду; E – енергетичний баланс насіння.

Серед основних критеріїв оцінювання процесу сушіння зернової сировини було обрано кінцеву вологість останньої сировини W , %, та енерговитрати на привод віброозонуючого комплексу N , кВт·год, які характеризуються впливом чотирьох найвагоміших факторів, що визначають кінетику цієї обробки: віброприскорення a , м/с^2 як комплексний параметр динамічного стану системи; температуру сушильного агента T_{CA} , $^{\circ}\text{C}$; концентрацію озону N_{O_3} , мг/м^3 , час обробки t , с:

$$W = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t), \quad (2)$$

$$W = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t), \quad (3)$$

Як відомо, вплив озону при обробці насіння сільськогосподарських культур залежить від характеру розподілу та поглинання озону по всьому об'єму матеріалу, що обробляється.

При пропусканні через шар зернової сировини озоноповітряної суміші частина озону буде поглинатися, у зв'язку з чим вміст озону зменшиться. Відповідно частина зерна може бути необроблена при заданій концентрації озону.

Тому, для достовірного визначення впливу озоноповітряної суміші на обробку зерна потрібно виявити закономірності поглинання озону зерном.

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

Цю залежність можна описати рівнянням виду:

$$\frac{dC}{dt} = -K_c \cdot C \cdot S_z, \quad (4)$$

де C – концентрація озону, мг/м^3 ; K_c – коефіцієнт, який показує швидкість розповсюдження концентрації озону в шарі зерна по глибині, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; S_z – площа зернової маси, м^2 .

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

При початкових умовах: $t = 0$, $C = C_0$ зміна концентрації озону в озоноповітряній суміші може бути описана рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S_z}{V} [V_{CA}(C_0 - C) - K_c C V], \quad (5)$$

де V_{CA} – швидкість подачі сушильного агента, насиченого озоном, м/с ; V – об'єм оброблюваного зерна, м^3 ; C_0 – концентрація озону на вході, мг/м^3 ; C – концентрація озону на виході, мг/м^3 .

Розв'язок рівняння (5) має вигляд:

$$C = \frac{C_0 \cdot V_{CA}}{V_{CA} + K_c \cdot S_z \cdot V} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{CA} + K_c \cdot S_z \cdot V}{V} \cdot t\right) \right]. \quad (6)$$

З рівняння (6) при відомих параметрах V_{CA} , V , S_z , C можна визначити величину константи швидкості поглинання озону зерном. Оскільки рівняння (5) є трансцендентним відносно K_c і його рішення в елементарних функціях не може бути отримано, тому величину K_c можна знайти за рівнянням (6) методом ітерації.

Під час продування озоноповітряною сумішшю шару зерна деякої товщини відбувається поглинання озону.

Математичний опис розповсюдження озону по глибині шару зерна може бути оснований на прикладі руху озоноповітряного потоку в вигляді плоского фронту. Рівняння розповсюдження озону матиме вигляд:

$$\frac{dC}{dX} = \frac{K_c \cdot S(a) \cdot C}{V_{CA}}, \quad (7)$$

де C – концентрація озону, мг/м³; K_c – коефіцієнт, який показує швидкість розповсюдження концентрації озону в шарі зерна по глибині, 1/м²·с.

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 коливання сушильної камери, а саме від її віброприскорення a .

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

$$S(a) = n \exp\left(-\frac{m}{a}\right), \quad (8)$$

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

Наведені залежності дають змогу визначити інтенсивність розподілу концентрації озону по глибині шару під дією вібраційного впливу в залежності від віброприскорення сушильної камери та швидкості руху сушильного агента.

До енергетичних параметрів віброозонуючого комплексу можна віднести електричну потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агента з допомогою електричних елементів (тенів) N_1 ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу дебалансного валу N_2 ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу вентилятора N_3 та електронним пристроєм синтезу озону N_4 .

Електрична потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агента за допомогою електричних елементів (тенів) N_1 (кВт) визначається за формулою:

$$N_1 = k \cdot \left(\frac{Q}{t_p} + P_{em} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт оцінки запасу потужності (можна прийняти $k = 1.2 \dots 1.3$); Q – сумарна кількість тепла, необхідна для забезпечення теплового процесу, Дж; t_p – тривалість теплового процесу, с; P_{em} – суммарна потужність втрат тепла, Вт.

Потужність, яка витрачається електродвигуном приводу дебалансного валу N_2 (кВт) визначається за формулою:

$$N_2 = \frac{M \cdot n}{9550}, \quad (10)$$

де M – крутний момент, Н·м; n – частота обертання вала електродвигуна, об/хв.

Потужність, яка витрачається електродвигуном приводу вентилятора N_3 (кВт) визначається за формулою:

$$N_3 = \frac{9.81 \cdot L_g \cdot H}{3600 \cdot \eta_g \cdot \eta_n}, \quad (11)$$

де L_g – продуктивність вентилятора, м³/год; H – повний тиск, Па; η_g – ККД вентилятора (можна прийняти $\eta_g = 0.4 \dots 0.6$); η_n – ККД передачі (можна прийняти $\eta_n = 0.85 \dots 0.99$).

Потужність, яка витрачається електронним пристроєм синтезу озону N_4 (кВт) визначається за формулою:

$$N_4 = 4fC_d e_0 \left(e_{\max} - \frac{C_a}{C} e_0 \right) \cdot 10^{-3}, \quad (12)$$

де f – частота струму, Гц; C_d – ємність діелектрика, Ф; C_a – ємність розрядного зазору, Ф; C – середня ємність установки, Ф; e_0 – потенціал розряду через зазор, Ф; e_{\max} – максимальна напруга струму, що проходить через електроди, В.

Основним критерієм енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу є енерговитрати на привід віброозонуючого комплексу N , кВт·год, які характеризуються впливом чотирьох найвагоміших факторів, що визначають кінетику цієї обробки:

віброприскорення a , m/s^2 як комплексний параметр динамічного стану системи; температура сушильного агента T_{CA} , $^{\circ}C$; концентрація озону N_{O_3} , mg/m^3 , час обробки t , s :

$$N = f(a, T_{CA}, N_{O_3}, t). \quad (13)$$

Експериментальне обладнання

Для реалізації високоякісного сушіння зернової сировини було спроектовано та виготовлено дослідну модель віброозонуючого комплексу (рис. 1), в якому матеріал, що обробляється, піддається вібраційному впливу, який збільшує і оновлює поверхню теплообміну [9]. В результаті цього відбувається інтенсивне зняття вологи, збільшується швидкість сушіння. Процес сушіння відбувається рівномірно по всьому шару, не викликаючи місцевий перегрів матеріалу. Технічна характеристика дослідної моделі віброозонуючого комплексу наведена в таблиці 1.

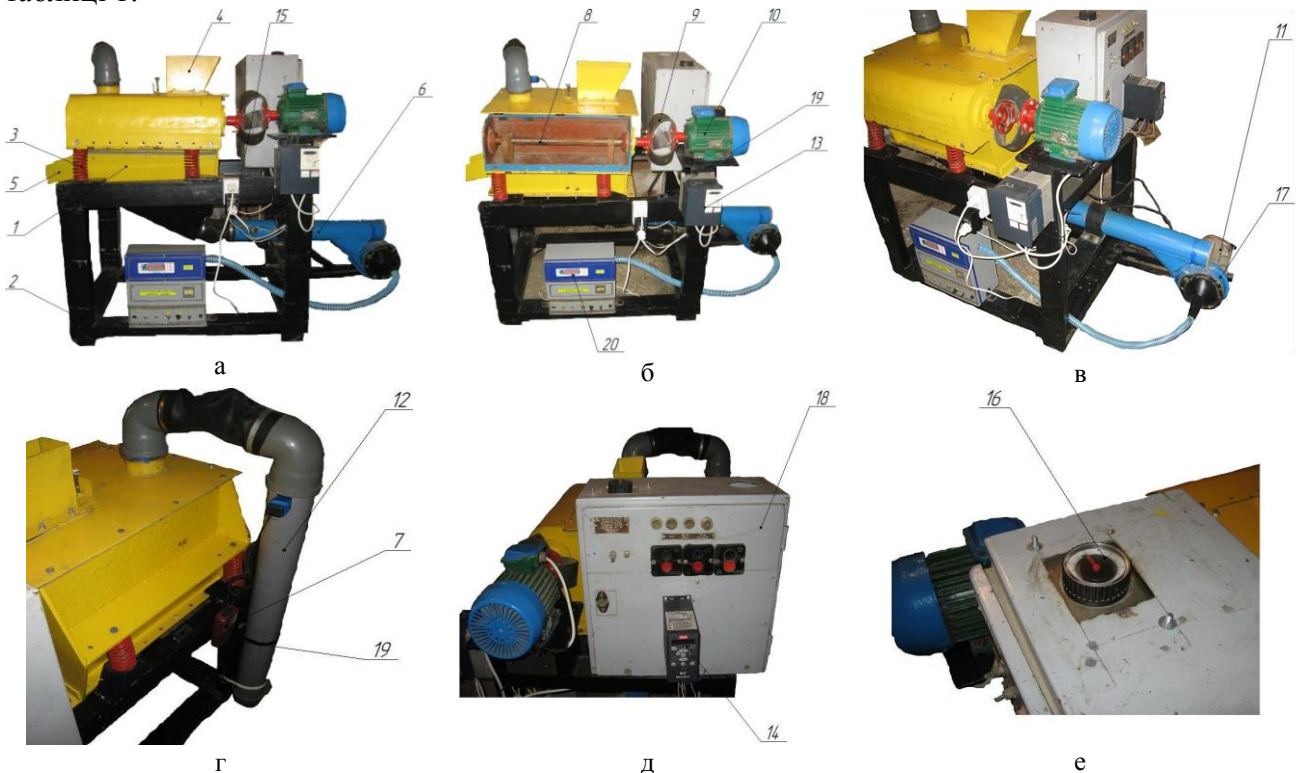


Рис. 1. Дослідна модель віброозонуючого комплексу:

- а, б – вигляд спереду; в, г, д – вигляд збоку; е – вигляд зверху; 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 привода дебалансного вала; 11 – електродвигун привода вентилятора; 13, 14 – частотні перетворювачі; 15 – терморегулятор; 16 – реле часу; 17 – вентилятор; 18 – блок керування; 19 – вологоміри; 20 – електронний пристрій синтезу озону

В якості сушильного агента використовується суміш підігрітого повітря та озону певної концентрації, який генерується за допомогою коронного розряду у електронному пристрої синтезу озону (рис. 2), електрична принципова схема блока живлення якого побудована на основі квазірезонансного перетворювача.

Віброозонуючий комплекс (рис. 1) являє собою герметичну U-подібну камеру, встановлену на рамі за допомогою пружин. Камера містить завантажувальний і розвантажувальний лотки, а також повітропровід для виведення відпрацьованого сушильного агента. Збоку камери розміщений вал з двома дебалансами, який через еластичну муфту з допомогою трифазного електродвигуна приводиться в обертовий рух.

В нижній частині камери є повітропровід з електричними нагрівальними елементами, через який надходить підігріте повітря і озон, що генерується озонатором, і подається вентилятором за

допомогою електродвигуна.



Рис. 2. Електронний пристрій синтезу озону:
а – загальний вигляд; б – робоча камера синтезу озону

Таблиця 1

Технічна характеристика дослідної моделі віброозонуючого комплексу

Показник	Значення
Встановлена загальна електрична потужність, кВт	5
– потужність електродвигуна приводу дебалансного валу, кВт	2,2
– потужність електродвигуна приводу вентилятора, кВт	0,75
– потужність нагрівальних електричних елементів, кВт	2
– потужність електронного пристрою синтезу озону, кВт	0,25
Частота обертання електродвигуна приводу дебалансного валу, хв ⁻¹ .	до 1500
Частота обертання електродвигуна приводу вентилятора, хв ⁻¹ .	до 3000
Температура сушильного агента, °С	до 75
Концентрація озону в озоноповітряній суміші, мг/м ³	до 18
Швидкість руху сушильного агента, м/с	до 5
Амплітуда коливань сушильної камери, мм	0,5-7,5
Продуктивність віброозонуючого комплексу по сухій зерновій сировині, кг/год.	до 25
Маса віброозонуючого комплексу, кг	265
Маса сушильної камери, кг	95
Габарити віброозонуючого комплексу, мм (довжина x ширина x висота)	1700×970×1300
Об'єм сушильної камери, м ³	0,06

Принцип роботи комплексу полягає в тому, що сушильний агент, який складається з підігрітого повітря та озону певної концентрації, подається за допомогою вентилятора, закріпленого на рамі, в U-подібну герметичну камеру, в якій знаходиться зернова сировина. Одночасно вмикається електропривод дебалансного валу. Сушильний агент, проходячи через шар зерна та знімаючи певний відсоток вологи, поступає у вихідний повітропровід, через який видаляється із сушильної камери.

Результати експериментальних досліджень

При експериментальних дослідженнях розробленого комплексу здійснено аналіз впливу комплексної теплофізичної дії на показники якості обробленої сировини, яку попередньо було зволожено та заражено спорами грибків головні і фузаріуму.

Отримана зернова сировина оцінювалася за такими показниками, як кінцева вологість, схожість, стан осіменіння грибками головні і фузаріуму в залежності від температури сушильного агента, концентрації озону в його складі та часу обробки.

Кінцева вологість зерна при технологічному завантаженні сушильної камери 50 % та 75 % від повного об'єму визначалась при обробці його сушильним агентом температурою 45 °С,

55 °С та 65 °С, у складі якого був присутній озон концентрацією $N_{O_3} = 10 \text{ мг/м}^3$ за рекомендаціями досліджень [10] (рис. 3). Тривалість обробки становила 9600 с при швидкості сушильного агента $V_{CA} = 1.5 \text{ м/с}$.

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни вологості зернової сировини в залежності від віброприскорення сушильної камери, мають вигляд:

– за температури сушильного агента 45 °С та завантаженні 75 % від повного об'єму камери (рис. 3, 1 а)

$$W = 17.905357 + 0.19775433 \cdot a - 0.042132576 \cdot a^2 + 0.001625757 \cdot a^3 - 1.8939394 \cdot 10^{-5} \cdot a^4; \quad (14)$$

– за температури сушильного агента 45 °С та завантаженні 50 % від повного об'єму камери (рис. 3, 2 а)

$$W = 18.210714 + 0.1659127 \cdot a - 0.047886364 \cdot a^2 + 0.001920202 \cdot a^3 - 2.2727273 \cdot 10^{-5} \cdot a^4; \quad (15)$$

– за температури сушильного агента 55 °С та завантаженні 75 % від повного об'єму камери (рис. 3, 1 б)

$$W = 17.994643 + 0.22007395 \cdot a - 0.050746212 \cdot a^2 + 0.001945959 \cdot a^3 - 2.2272727 \cdot 10^{-5} \cdot a^4; \quad (16)$$

– за температури сушильного агента 55 °С та завантаженні 50 % від повного об'єму камери (рис. 3, 2 б)

$$W = 19.560714 - 0.24747114 \cdot a - 0.018583333 \cdot a^2 + 0.0010313131 \cdot a^3 - 1.3030303 \cdot 10^{-5} \cdot a^4; \quad (17)$$

– за температури сушильного агента 65 °С та завантаженні 75 % від повного об'єму камери (рис. 3, 1 в)

$$W = 17.898214 + 0.23610209 \cdot a - 0.050541667 \cdot a^2 + 0.001918686 \cdot a^3 - 2.1969697 \cdot 10^{-5} \cdot a^4; \quad (18)$$

– за температури сушильного агента 65 °С та завантаженні 50 % від повного об'єму камери (рис. 3, 2 в)

$$W = 19.490179 - 0.22141324 \cdot a - 0.021585227 \cdot a^2 + 0.0011608586 \cdot a^3 - 1.4772727 \cdot 10^{-5} \cdot a^4. \quad (19)$$

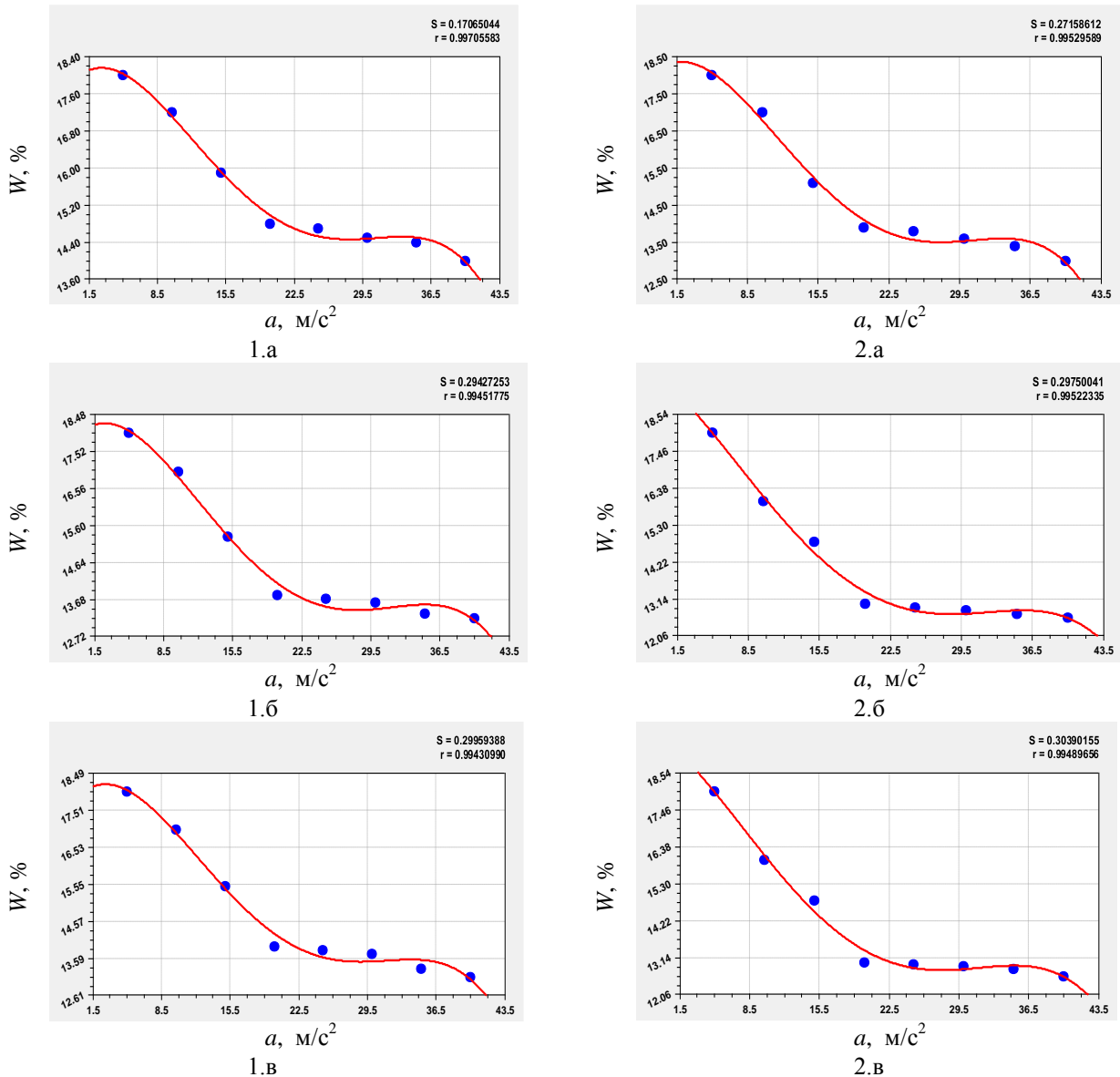


Рис. 3. Залежність зміни вологості зернової сировини в залежності від віброприскорення: а – за температури сушильного агенту $45^{\circ}C$; б – за температури сушильного агенту $55^{\circ}C$; в – за температури сушильного агенту $65^{\circ}C$;

1 – при технологічному завантаженні сушильної камери 75% від повного об'єму;

2 – при технологічному завантаженні сушильної камери 50% від повного об'єму

Базуючись на отриманих даних кінетики процесу сушіння зернової сировини при концентрації озону в складі сушильного агенту $N_{O_3} = 10 \text{ мг/м}^3$, очевидно, що підвищення його температури до $55^{\circ}C$ сприяє інтенсивному вологовиділенню, при чому температура вище зазначеного значення не дає суттєвих результатів і призводить до зайвих енерговитрат.

Крім того, найінтенсивніше волога із зернового матеріалу виділяється при віброприскоренні $a = 20 \dots 25 \text{ м/с}^2$, після чого істотно не змінюється. Звідси випливає, що підвищення віброприскорення сушильної камери понад вказаного значення є не ефективним, оскільки не сприяє істотному зниженню рівня вологи, а лише веде до зростання енерговитрат на привод дебалансного валу.

Порівнюючи криві сушіння зернової сировини за умови вібраційної та віброозонуючої дії умов, очевидно, що тривалість обробки з використанням озону у складі сушильного агенту $N_{O_3} = 10 \text{ мг/м}^3$ скорочує тривалість даного процесу на 4800 с, а отже знижує енерговитрати цієї технологічної операції (рис. 4).

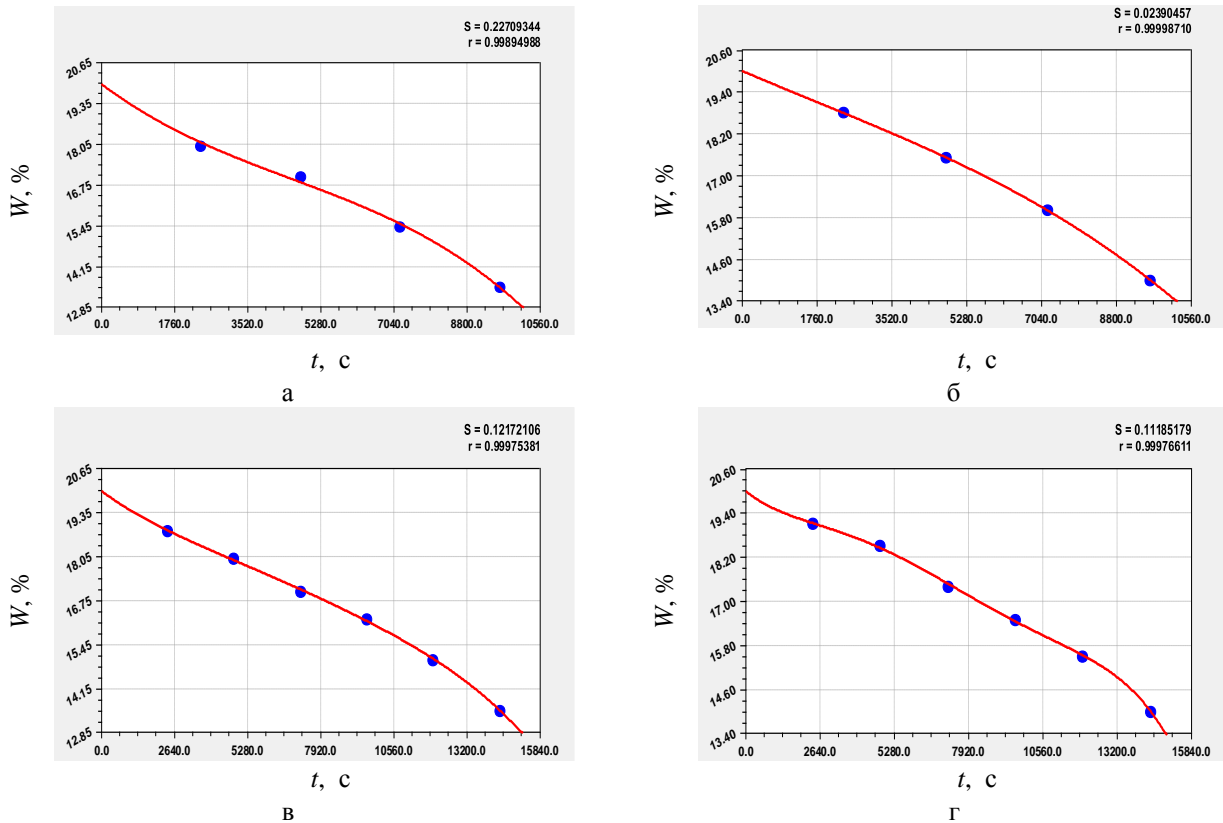


Рис. 4. Кінетика сушіння зернової сировини:

а, б – за використання озону у складі сушильного агента (при технологічному завантаженні сушильної камери 50 % та 75 % від повного об’єму відповідно); в, г – за використання вібраційного сушіння (при технологічному завантаженні сушильної камери 50 % та 75 % від повного об’єму відповідно)

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних кінетики сушіння зернової сировини, мають вигляд:

– за використання озону у складі сушильного агента та завантаженні 50 % від повного об’єму камери (рис. 4 а)

$$W = 19.972857 - 0.0009905754 \cdot t + 1.078869 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 7.8366127 \cdot 10^{-12} \cdot t^3; \quad (20)$$

– за використання озону у складі сушильного агента та завантаженні 75 % від повного об’єму камери (рис. 4 б)

$$W = 20.002857 - 0.0005218254 \cdot t + 1.2400794 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 2.4112654 \cdot 10^{-12} \cdot t^3; \quad (21)$$

– при використанні вібраційного сушіння та завантаженні 50 % від повного об’єму камери (рис. 4 в)

$$W = 19.995996 - 0.00061398359 \cdot t + 7.1384417 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 9.2203502 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 + 5.7655731 \cdot 10^{-16} \cdot t^4 - 1.5698343 \cdot 10^{-20} \cdot t^5; \quad (22)$$

– при використанні вібраційного сушіння та завантаженні 75 % від повного об’єму камери (рис. 4 г)

$$W = 19.99632 - 0.00061590909 \cdot t + 1.7545244 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 3.5949776 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 + 2.922746 \cdot 10^{-15} \cdot t^4 - 8.3724494 \cdot 10^{-20} \cdot t^5. \quad (23)$$

Визначено залежність схожості пшениці сорту «Царівна» від часу обробки та концентрації озону у складі сушильного агента (рис. 5).

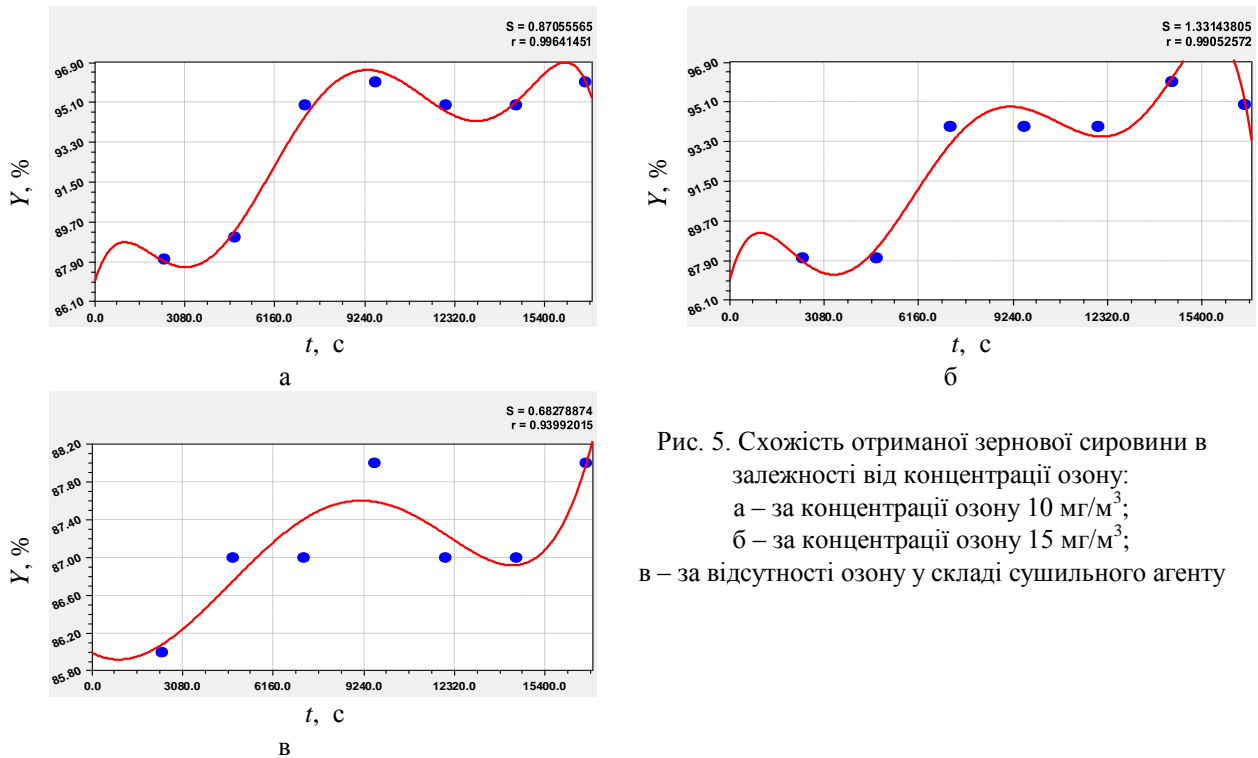


Рис. 5. Схожість отриманої зернової сировини в залежності від концентрації озону:
 а – за концентрації озону 10 мг/м³;
 б – за концентрації озону 15 мг/м³;
 в – за відсутності озону у складі сушильного агенту

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних схожості отриманої зернової сировини в залежності від концентрації озону, мають вигляд:

– за концентрації озону 10 мг/м³ (рис. 5 а)

$$Y = 87.01486 + 0.0041830929 \cdot t - 3.2343306 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 9.1419945 \cdot 10^{-10} \cdot t^3 - 1.0860033 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 + 5.7540463 \cdot 10^{-18} \cdot t^5 - 1.1265014 \cdot 10^{-22} \cdot t^6; \quad (24)$$

– за концентрації озону 15 мг/м³ (рис. 5 б)

$$Y = 87.022727 + 0.005142361 \cdot t - 3.9975492 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1.1124702 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 - 1.3333126 \cdot 10^{-13} \cdot t^4 + 7.2212376 \cdot 10^{-18} \cdot t^5 - 1.4535502 \cdot 10^{-22} \cdot t^6; \quad (25)$$

– за відсутності озону у складі сушильного агента (рис. 5 в)

$$Y = 85.988345 - 0.00016239316 \cdot t + 9.8136817 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 5.1639863 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 - 3.8642074 \cdot 10^{-16} \cdot t^4 + 2.4151296 \cdot 10^{-20} \cdot t^5 - 5.1553911 \cdot 10^{-34} \cdot t^6. \quad (26)$$

Експериментально отримані залежності показують, що озон позитивно впливає на схожість обробленої сировини. При чому, схожість зростає на 8 % порівняно з сушінням без озонування. Рациональною концентрацією озону є 10 мг/м³, оскільки вища концентрація не має істотного впливу на схожість обробленої озимі пшениці і становить в межах 0.5 %.

Також досліджувались знезаражувальні властивості озону в складі сушильного агента при дії на осіменіння грибків головні і фузаріуму (рис. 6, 7).

Відношення перевищення критичної щільності мікроорганізмів до одиниці маси зерна визначалась за виразом [9]:

$$C_n = \Delta n / m_3 \times 10^3,$$

де Δn – перевищення щільності мікроорганізмів; m_3 – одиниця маси зерна.

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних стану грибкової зараженості озимі пшениці спорами головні, мають вигляд:

– при тривалості обробки $t = 10800$ с (рис. 6 а)

$$C_n = 30.027195 - 5.0753885 \cdot N_{O_3} - 0.83060088 \cdot N_{O_3}^2 + 0.36592487 \cdot N_{O_3}^3 - 0.045862268 \cdot N_{O_3}^4 + 0.0025006677 \cdot N_{O_3}^5 - 5.0636574 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^6; \quad (27)$$

– при тривалості обробки $t = 9600$ с (рис. 6 б)

$$C_n = 30.015229 - 5.3068726 \cdot N_{O_3} - 0.030542282 \cdot N_{O_3}^2 + 0.096666181 \cdot N_{O_3}^3 - 0.010260862 \cdot N_{O_3}^4 + 0.00041800214 \cdot N_{O_3}^5 - 5.787037 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^6; \quad (28)$$

– при тривалості обробки $t = 8400$ с (рис. 6 в)

$$C_n = 29.989433 - 3.6338034 \cdot N_{O_3} - 0.74179908 \cdot N_{O_3}^2 - 0.27221979 \cdot N_{O_3}^3 - 0.039440883 \cdot N_{O_3}^4 - 0.0023410791 \cdot N_{O_3}^5 + 4.9189815 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^6. \quad (29)$$

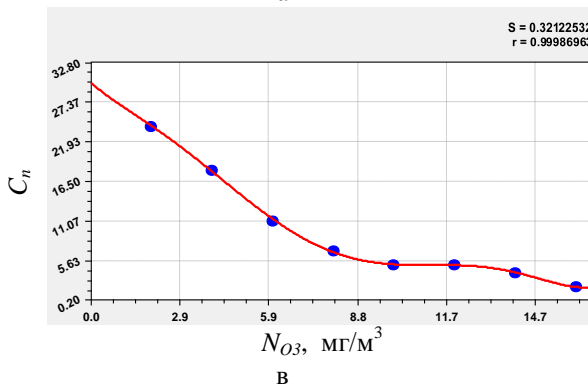
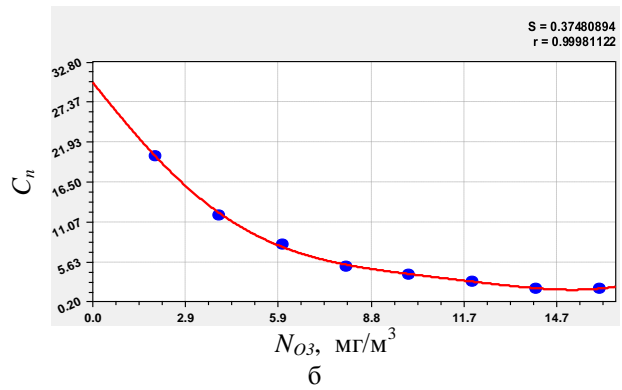
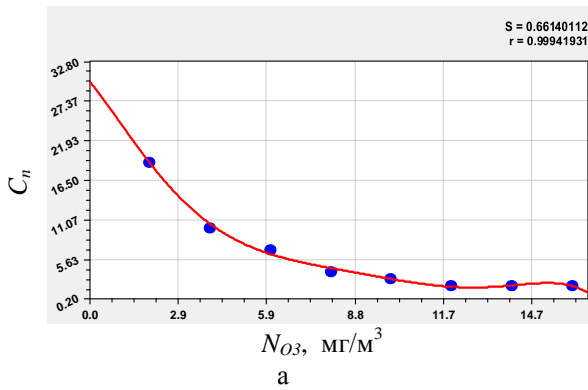


Рис. 6. Стан грибкової зараженості озимої пшениці спорами головні:

- а – при тривалості обробки $t = 10800$ с;
- б – при тривалості обробки $t = 9600$ с;
- в – при тривалості обробки $t = 8400$ с

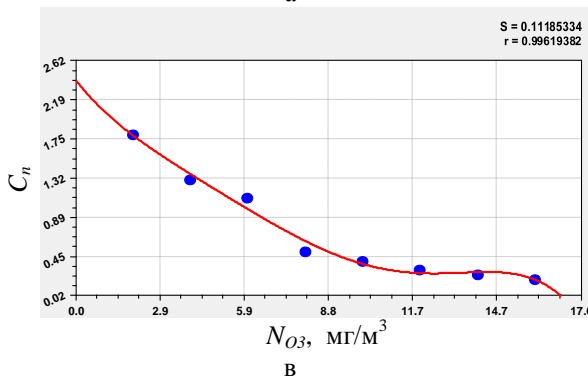
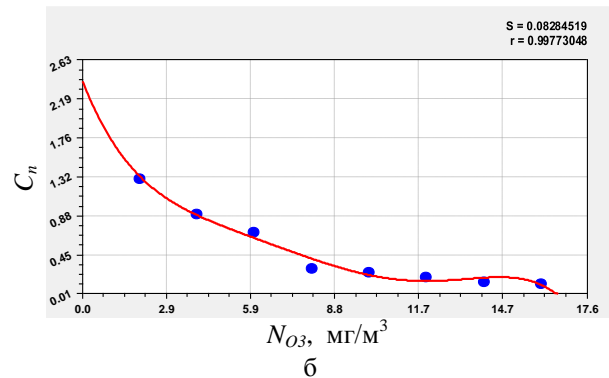
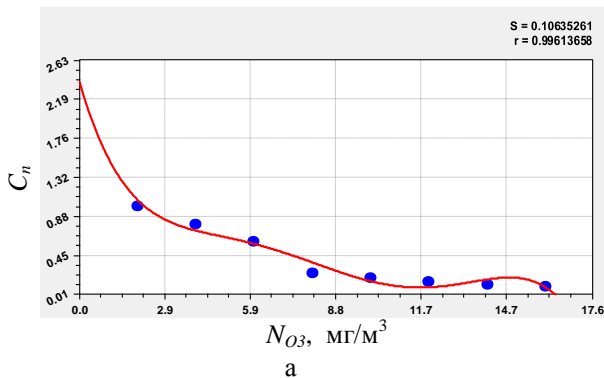


Рис. 7. Стан грибкової зараженості озимої пшениці спорами фізаріуму:

- а – за тривалості обробки $t = 10800$ с;
- б – за тривалості обробки $t = 9600$ с;
- в – за тривалості обробки $t = 8400$ с

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних стану грибкової зараженості озимої пшениці спорами фізаріуму, мають вигляд:

- за тривалості обробки $t = 10800$ с (рис. 7 а)

$$C_n = 2.3844755 - 1.1223759 \cdot N_{O_3} + 0.30336466 \cdot N_{O_3}^2 - 0.040846445 \cdot N_{O_3}^3 + 0.0025234921 \cdot N_{O_3}^4 - 5.7291667 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^5; \quad (30)$$
- за тривалості обробки $t = 9600$ с (рис. 7 б)

$$C_n = 2.3928671 - 0.81853263 \cdot N_{O_3} + 0.18388986 \cdot N_{O_3}^2 - 0.023568619 \cdot N_{O_3}^3 + 0.0014517774 \cdot N_{O_3}^4 - 3.3253205 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^5; \quad (31)$$

– за тривалості обробки $t = 8400$ с (рис. 7 в)

$$C_n = 2.4002331 - 0.403412 \cdot N_{O_3} + 0.066619318 \cdot N_{O_3}^2 - 0.010501348 \cdot N_{O_3}^3 + 0.00078944493 \cdot N_{O_3}^4 - 2.0532853 \cdot 10^{-5} \cdot N_{O_3}^5. \quad (32)$$

Аналізуючи отримані залежності, можна зробити висновок, що озон у складі сушильного агента знижує стан осіменіння спорами головні і фузаріуму найоптимальніше за концентрації $N_{O_3} = 8 \dots 10$ мг/м³ та тривалості обробки $t = 9600$ с, оскільки більші значення концентрації і часу обробки не призводять до істотних змін.

В якості енергетичних параметрів розробленого віброозонуючого комплексу досліджувались: електрична потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агента за допомогою електричних елементів N_1 ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу дебалансного валу N_2 ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу вентилятора N_3 та електронним пристроєм синтезу озону N_4 .

На рис. 8 зображено зміну споживаної потужності електричними нагрівальними елементами в залежності від температури сушильного агента за швидкості руху сушильного агента 1.5 м/с.

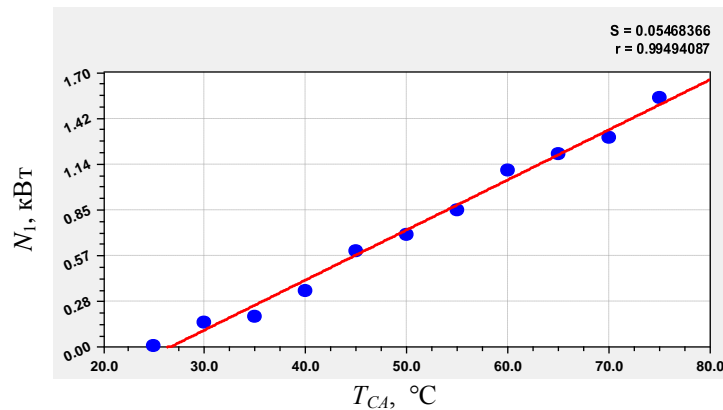


Рис. 8. Зміна споживаної потужності електричними нагрівальними елементами в залежності від температури сушильного агента

Рівняння, яке отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни споживаної потужності електричними нагрівальними елементами в залежності від температури сушильного агента (рис. 8), має вигляд:

$$N_1 = -0.8209 + 0.0309 \cdot T_{CA}. \quad (33)$$

З наведеної залежності видно, що із зростанням температури сушильного агента T_{CA} споживана потужність N_1 нагрівальними електричними елементами збільшується, практично, пропорційно.

Також під час аналізу енергетичних характеристик досліджуваного віброозонуючого комплексу було виявлено збільшення споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу залежно від загального об'єму завантаження сушильної камери, що за робочої кутової швидкості $\omega = 90$ рад/с становить: $N_2 = 480$ Вт за 75 % завантаження (рис. 9 а); $N_2 = 450$ Вт за 50 % завантаження (рис. 9 б).

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу в залежності від кутової швидкості та ступеня технологічного завантаження сушильної камери, мають вигляд:

– за завантаження 75 % від повного об'єму камери (рис. 9 а)

$$N_2 = 0.0982 + 0.0040 \cdot \omega; \quad (33)$$

– за завантаження 50 % від повного об'єму камери (рис. 9 б)

$$N_2 = 0.0838 + 0.0038 \cdot \omega. \quad (34)$$

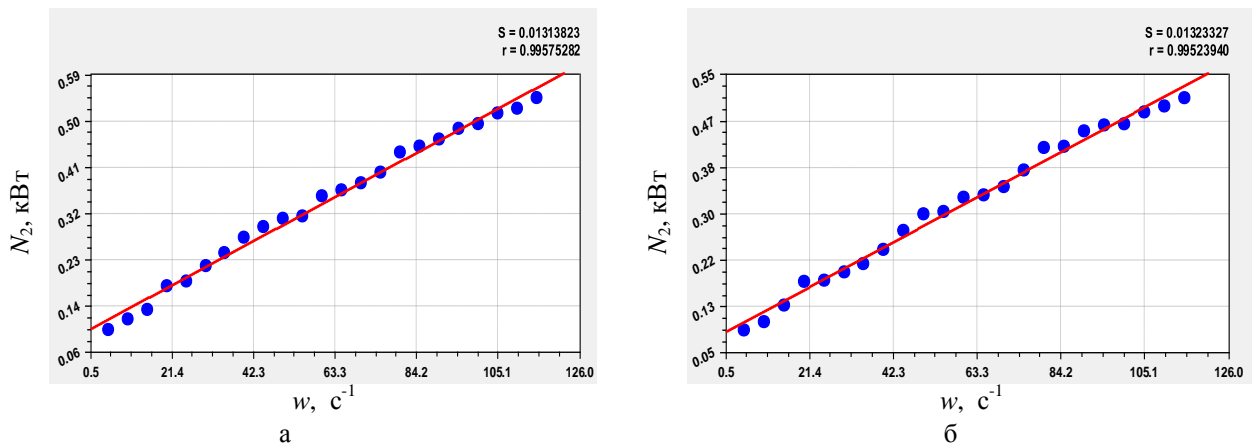


Рис. 9. Зміна споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу в залежності від кутової швидкості та ступеня технологічного завантаження сушильної камери:
 а – за завантаження 75 % від повного об’єму камери
 б – за завантаження 50 % від повного об’єму камери

При визначенні енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу досліджувались зміни спожитої потужності в залежності від частоти обертання електродвигуна приводу вентилятора (рис. 10).

Із експериментально отриманої кривої можна зробити висновок, що із збільшенням частоти обертання електродвигуна зростає споживана ним потужність. Крім того, на максимальних обертах електродвигуна $n = 3000$ об/хв споживана ним потужність становить $N_3 = 0.115$ кВт за швидкості сушильного агенту 3 м/с і завантаженні 50 % від повного об’єму сушильної камери та за швидкості сушильного агенту 2.5 м/с і завантаженні 75 % від повного об’єму сушильної камери.

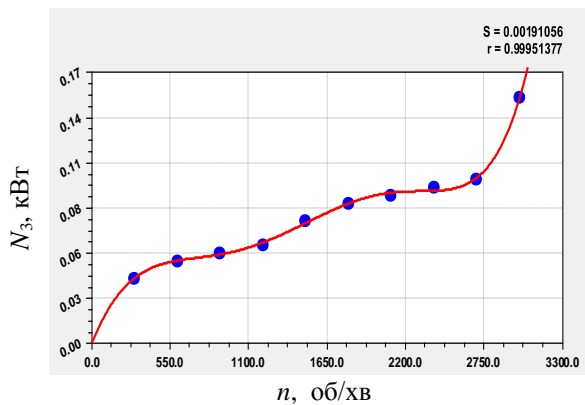


Рис. 10. Залежність зміни спожитої потужності електродвигуна приводу вентилятора від частоти обертання

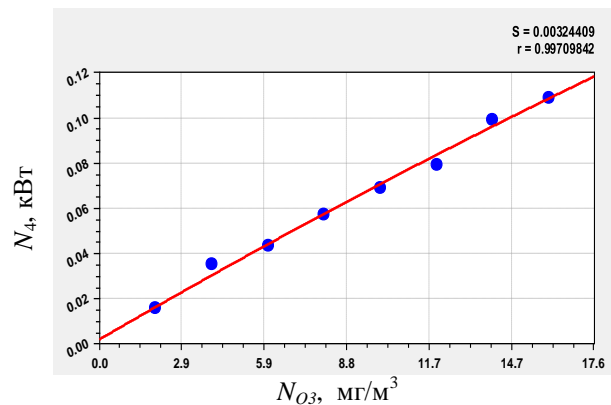


Рис. 11. Зміна спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону в залежності від згенерованої ним концентрації озону

Рівняння, яке отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни спожитої потужності електродвигуна приводу вентилятора від частоти обертання (рис. 10), має вигляд:

$$N_3 = 5.1419 \cdot 10^{-5} + 0.0002 \cdot n - 3.4807 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 2.5394 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 - 6.5128 \cdot 10^{-14} \cdot n^4 - 2.8901 \cdot 10^{-18} \cdot n^5 + 2.4095 \cdot 10^{-21} \cdot n^6. \quad (35)$$

На рис. 11 зображено зміну спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону N_4 в залежності від згенерованої ним концентрації озону N_{O_3} .

Як видно із експериментально отриманої кривої, із збільшенням концентрації озону N_{O_3} споживана потужність N_4 зростає, практично, прямо пропорційно.

Рівняння, яке отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону в залежності від згенерованої ним концентрації озону (рис. 11), має вигляд:

$$N_4 = 0.0020 + 0.0072 \cdot N_{O_3} - 3.6255 \cdot N_{O_3}^2. \quad (36)$$

На основі визначених енергетичних характеристик розробленого віброозонуючого комплексу отримуємо залежність загальних енерговитрат N від тривалості обробки t без озону в складі сушильного агенту (рис. 12) та з озоном в складі сушильного агенту (рис. 13).

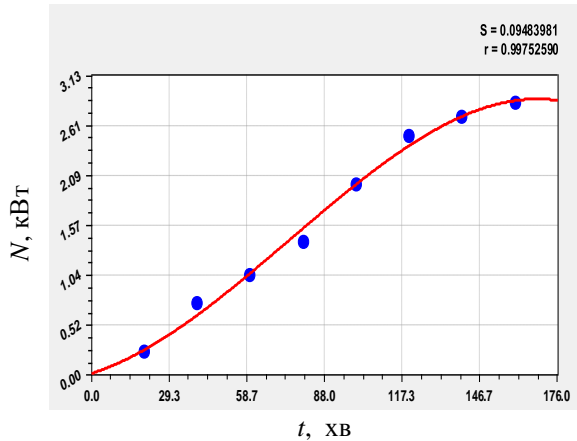


Рис. 12. Зміна загальних енерговитрат розробленою машиною без озону в складі сушильного агенту

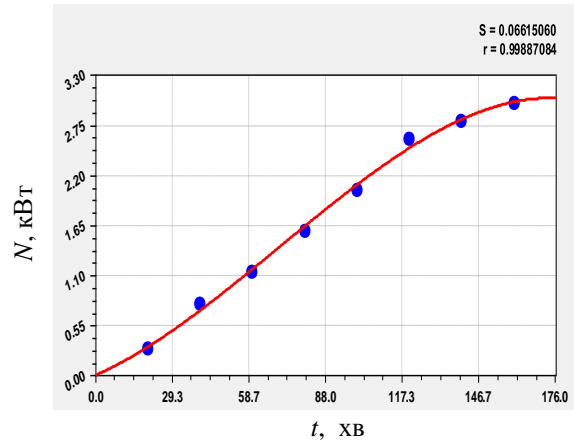


Рис. 13. Зміна загальних енерговитрат розробленою машиною з озоном в складі сушильного агенту

Рівняння, які отримано на основі регресійного аналізу експериментальних даних зміни загальних енерговитрат розробленою машиною, мають вигляд:

– без озону в складі сушильного агенту (рис. 12)

$$N = 0.0080 + 0.0127 \cdot t + 0.0001 \cdot t^2 - 7.3653 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (37)$$

– з озоном в складі сушильного агенту (рис. 13)

$$N = 0.0196 + 0.0086 \cdot t + 0.0002 \cdot t^2 - 8.9962 \cdot 10^{-7} \cdot t^3. \quad (38)$$

Аналіз рис. 12 та рис. 13 засвідчив, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю 14 % при початковій вологості 20 % становлять: за використання класичної технології з подачею теплоагента температурою 50 °С за тривалості обробки 240 хв. – 112.93 Вт·год/кг або 18.82 Вт·год/кг на 1 % випаруваної води (406.54 кДж/кг або 67.75 кДж/кг на 1 % випаруваної води); за використання комплексного теплофізичного впливу за тривалості обробки 160 хв. – 91.01 Вт·год/кг або 15.16 Вт·год/кг на 1 % випаруваної води (327.63 кДж/кг або 54.6 кДж/кг на 1 % випаруваної води).

Після обробки експериментальних даних у статистичному середовищі «STATISTICA 10.0» були отримані коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовано такі залежності:

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

$$W_k = 33.23 + 0.22 \cdot a - 0.134 \cdot T_{CA} - 0.627 \cdot N_{O_3} - 0.074 \cdot t - 0.001 \cdot a^2 - 0.001 \cdot T_{CA}^2 - 0.015 \cdot N_{O_3}^2 - 0.011 \cdot a \cdot N_{O_3} + 0.01 \cdot T_{CA} \cdot N_{O_3} + 0.002 \cdot N_{O_3} \cdot t; \quad (39)$$

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

$$N = 11.828 - 0.005 \cdot a - 0.303 \cdot T_{CA} - 0.335 \cdot N_{O_3} - 0.011 \cdot t + 0.001 \cdot a^2 + 0.003 \cdot T_{CA}^2 + 0.01 \cdot N_{O_3}^2 + 0.001 \cdot N_{O_3} \cdot t. \quad (40)$$

На основі отриманих експериментальних даних побудовано карти Парето ефектів для оцінки впливу факторів на кінцеву вологість зернової сировини (рис. 14) та споживані

енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу (рис. 15).

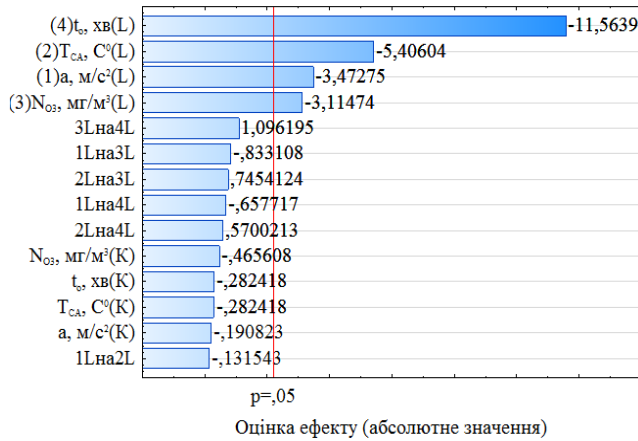


Рис. 14. Карта Парето ефектів для оцінки впливу факторів на кінцеву вологість зернової сировини

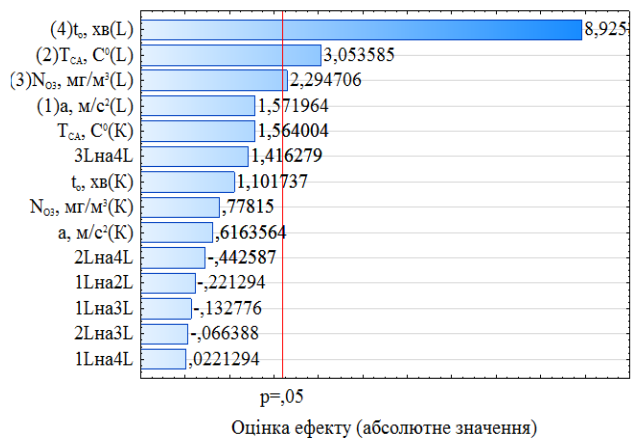


Рис.15. Карта Парето ефектів для оцінки впливу факторів на споживані енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу

Згідно отриманих карт, на кінцеву вологість зернової сировини та споживані енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу найбільше впливають час обробки t та температура сушильного агенту $T_{сa}$.

Отже, якісні характеристики процесу сушіння набувають своїх раціональних значень при кінцевій вологості зернової сировини 13...14 % та енерговитратах на привод віброозонуючого комплексу 3...3.2 кВт.

Висновок

1. Наявні технології не повністю вичерпують можливості використання вібрації і озону, хоча свідчать про доцільність їх застосування і поєднання не тільки в аграрному виробництві, а й у інших галузях з метою інтенсифікації процесів і отримання якісної продукції.

2. Розроблена математична модель розподілу концентрації озону по глибині шару зерна під дією вібраційного впливу.

3. Запропоновано та розроблено віброозонуючий комплекс для реалізації технологічного процесу сушіння зернової сировини, в якому продукція, що обробляється, піддається вібраційному впливу з одночасною подачею сушильного агенту, який є сумішшю підігрітого повітря та озону певної концентрації.

4. У ході експериментальних досліджень було отримано компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини, які становлять: віброприскорення $a = 15...20$ м/с², температура сушильного агенту $T_{сa} = 50...55$ °С, концентрація озону $N_{O_3} = 8...10$ мг/м³, час обробки $t = 7800...9600$ с за швидкості руху сушильного агенту $V_{сa} = 1.5$ м/с.

5. В ході виконання експериментальних досліджень енергетичних параметрів віброозонуючого комплексу:

– встановлено, що із зростанням температури сушильного агента T споживана потужність N_1 нагрівальними електричними елементами збільшується, практично, пропорційно;

– було виявлено збільшення споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу залежно від загального об'єму завантаження сушильної камери, що за робочої кутової швидкості $\omega = 90$ рад/с становить: $N_2 = 480$ Вт за 75 % завантаження та $N_2 = 450$ Вт за 50 % завантаження;

– можна зробити висновок, що із збільшенням частоти обертання електродвигуна зростає споживана ним потужність. Крім того, на максимальних обертах електродвигуна ($n = 3000$ об/хв) споживана ним потужність становить $N_3 = 0.115$ кВт за швидкості сушильного агенту 3 м/с і завантаженні 50 % від повного об'єму сушильної камери та за швидкості сушильного

агенту 2.5 м/с і завантаженні 75 % від повного об'єму сушильної камери;

– встановлено, що із збільшенням концентрації озону N_{O_3} споживана потужність електронним пристроєм синтезу озону N_4 зростає, практично, прямо пропорційно.

6. Базуючись на отриманих даних встановлено, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю 14 % за початкової вологості 20 % становлять:

– під час використання класичної технології з подачею сушильного агента температурою 50 °С за 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);

– під час використання комплексного теплофізичного впливу за 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).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берник П. С. Оптимізація ресурсозберігаючої технології вібраційного сушіння високовологого насіння / П. С. Берник, О. В. Цуркан, О. О. Герасимов // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – 2006. – Вип. 44. – С. 3 – 10.
2. Гапонюк І. І. Удосконалення технології сушіння зерна : монографія / І. І. Гапонюк. – Одеса : Поліграф, 2009. – 182 с.
3. Цуркан О. В. Аналіз вібраційних технічних засобів для сушіння насіння гарбуза / О. В. Цуркан // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 4 (103). – С. 5 – 14.
4. Цуркан О. В. Обґрунтування раціонального способу та обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур / О. В. Цуркан // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки». – 2022. – № 1 (103). – С. 240 – 246.
5. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation / В. Kotov, А. Spirin, R. Kalinichenko [et al.] // Research in Agricultural Engineering. – 2019. – № 1 (65). – Р. 20 – 24.
6. Цуркан О. В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки / О. В. Цуркан, В. М. Пришляк, Д. В. Присяжнюк // Техніка енергетики, транспорт АПК. – 2017. – № 2 (97). – С. 99 – 104.
7. Станкевич Г. М. Сушіння зерна : підручник / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, В. І. Атаназевич. – К. : Либідь, 1997. – 352 с.
8. Енергетичні ресурси і потоки / А. К. Шидловська, Ю. О. Віхорєєв, В. О. Гінайло [та ін.] ; під заг. ред. А. К. Шидловського. – К. : Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
9. Research of the process of vibroozone drying of grain / O. Tsurkan, D. Prysiazhniuk, A. Spirin [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – № 12. – Р. 329 – 333.
10. Research of the energy parameters of the vibro-ozonation complex / O. Tsurkan, D. Prysiazhniuk, A. Spirin [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2023. – № 6. – Р. 39 – 44.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2023.

Стаття пройшла рецензування 27.05.2023.

Борисюк Дмитро Вікторович – к. т. н., старший викладач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

Спирін Анатолій Володимирович – к. т. н., доцент, в.о. завідувача кафедри інженерії та електро-технічних систем в АПК.

Присяжнюк Дмитро Володимирович – к. т. н., заступник директора з навчальної роботи.

Відокремлений структурний підрозділ «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету».

Твердохліб Ігор Вікторович – к. т. н., доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці.

Вінницький національний аграрний університет.