

УДК 631.363

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ОЗОНУ У ШАРІ ЗЕРНА ПРИ ЙОГО СУШІННІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

О. В. Цуркан, Д. В. Присяжнюк

Ладизинський коледж Вінницького національного аграрного університету, Україна.

Кореспонденція авторів: dima061992@yahoo.com.

Історія статті: отримано – вересень 2018, акцентовано – листопад 2018.

Бібл. 12, рис. 1, табл. 0.

Анотація: в роботі описана математична модель розповсюдження та поглинання озону у складі сушильного агенту при післязбиральній обробці зернової сировини із використанням віброозонуючого комплексу.

Ключові слова: зернова сировина, післязбиральна обробка, сушіння.

Постановка проблеми

Сушіння є одним з найважливіших етапів підготовки зерна до зберігання в сільськогосподарському виробництві. В даний час досить широкого поширення для виконання даного технологічного процесу знайшов конвективний метод сушіння. Але поряд зі своїми перевагами даний метод має і ряд вагомих недоліків, одним з істотних яких є значна енергоємність. У зв'язку з цим досить інтенсивно здійснюється науковий пошук по розробці шляхів і методів зниження енергоємності конвективного способу обробки [1].

Інтенсивними 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.

Тому, 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 [2].

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.

Тому на кафедрі ПОПХВ ім. проф. П.С. Берника Вінницького національного аграрного університету було розроблено віброозонуючий комплекс, робота якого заснована на комплексній дії озону та вібротехнологій на оброблювану зернову сировину.

Як відомо, вплив озону при обробці насіння сільськогосподарських культур, залежить від характеру розподілу та поглинання озону по всьому об'ємові обробки [3].

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

У зв'язку з цим для достовірного визначення впливу суміші озону та повітря на обробку зерна, потрібно виявити закономірності поглинання озону зерном.

Аналіз останніх досліджень

Корисність і актуальність використання вібротехнологій в процесі сушіння висвітлені в роботах [4, 5].

Теоретичним і експериментальним дослідженням процесу сушіння специфічної сільськогосподарської сировини присвячені роботи [6, 7].

Результати застосування фізичних ефектів з метою інтенсифікації процесу сушіння і подальшого зберігання сільськогосподарської продукції наведені в роботах [8, 9].

Детальний огляд і класифікація вібраційного і сушильного обладнання здійснені в роботах [10, 11].

В роботі [12] детально наведені особливості впливу озоноповітряної суміші на характеристики зернової сировини при сушінні в залежності від концентрації озону, часу сушіння тощо.

Встановлено залежність між зміною зараження зерна спорами грибків (фузаріум, аспергілос) і концентрацією озону в складі сушильного агенту.

Мета досліджень

Метою досліджень є визначення залежності розповсюдження та поглинання озону у складі сушильного агента від морфологічних особливостей матеріалу, швидкості руху сушильного агента, товщини шару зернової сировини, продуктивності генератора озону тощо.

Результати досліджень

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

Цю залежність можна описати рівнянням виду [3]:

$$\frac{dC}{dt} = -K_c \cdot C \cdot S, \quad (1)$$

де C – концентрація озону, мг/м³;

K_c – константа швидкості поглинання озону одиницею об'єму зерна мг/м³с;

S – площа зернової маси, м².

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

Зміна концентрації озону в озоноповітряній суміші може бути описана рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S}{V} [V_{CA}(C_0 - C) - K_c C V], \quad (2)$$

де V_{CA} – швидкість подачі сушильного агента, насиченого озonom, м/с;

V – об'єм оброблюваного зерна, м³;

C_0 – концентрація озону на вході, мг/м³;

C – концентрація озону на виході, мг/м³.

Розв'язок рівняння (2) має вигляд:

$$C = \frac{C_0 \cdot V_{CA}}{V_{CA} + K_c \cdot S \cdot V} \left[1 - \exp \left(- \frac{V_{CA} + K_c \cdot S \cdot V}{V} \cdot t \right) \right], \quad (3)$$

З рівняння (3) при відомих параметрах V_{CA} , V , S , C можна визначити величину константи швидкості поглинання озону зерном. Оскільки рівняння (2) є трансцендентним відносно K_c та його рішення в елементарних функціях не може бути отримано, тому величину K_c можна знайти за рівнянням (3) методом ітерації за допомогою ЕВМ.

При продуванні озоноповітряною сумішшю шару зерна деякої товщини відбувається поглинання озону.

Математичний опис розповсюдження озону по глибині шару зерна може бути основане на прикладі руху озоноповітряного потоку в вигляді плоского фронту. В стаціонарному режимі рівняння розповсюдження озону матиме вигляд:

$$\frac{dC}{dX} = \frac{K_c \cdot S(X) \cdot C}{V_{CA}}, \quad (4)$$

де C – концентрація озону, мг/м³;

V_{CA} – швидкість руху сушильного агента,

насиченого озonom, через шар насіння, м/с;

K_c – константа швидкості поглинання озону одиницею площі поверхні насіння мг/м³с;

$S(X)$ – площа взаємодії поверхні насіння з озonom у фронті розповсюдження озоноповітряної суміші, м².

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

$$K_c = -K_0 \cdot \exp[-\beta C], \quad (5)$$

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 розв'язок рівняння (2) з урахуванням (3) можна зобразити в наступному вигляді:

$$\int_{C_{ex}}^{C_{enx}} \frac{e^{\beta C}}{C} \cdot dC = -\frac{K_0}{V_{CA}} \int_0^h S(X) dX, \quad (6)$$

де C_{ex} , C_{enx} – концентрація озону в газовій суміші на вході та виході шару насіння;

h – товщина шару насіння.

Розв'язок рівняння (6) буде мати вигляд:

$$\int_{C_{ex}}^{C_{enx}} \frac{e^{\beta C}}{C} dC = \int_{C_{ex}}^{C_{enx}} \frac{1}{C} \left(1 + \frac{\beta C}{1} + \frac{\beta^2 C^2}{2} + \frac{\beta^3 C^3}{6} \right) dC = \ln |C| \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} + \beta C \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} + \frac{\beta^2 C^2}{6} \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} + \frac{\beta^3 C^3}{24} \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} = \ln C_{enx} - \ln C_{ex} - C_{ex} K_c + b \cdot (C_{enx} - C_{ex}) + \frac{\beta^2}{6} \cdot (C_{enx}^2 - C_{ex}^2) + \frac{\beta^3}{24} \cdot (C_{enx}^3 - C_{ex}^3); \quad (7)$$

$$\frac{\beta^2 C^3}{6} \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} + \frac{\beta^3 C^4}{24} \Big|_{C_{ex}}^{C_{enx}} = \ln C_{enx} - \ln C_{ex} - C_{ex} K_c + b \cdot (C_{enx} - C_{ex}) + \frac{\beta^2}{6} \cdot (C_{enx}^2 - C_{ex}^2) + \frac{\beta^3}{24} \cdot (C_{enx}^3 - C_{ex}^3);$$

$$\frac{K_0}{V_{CA}} \int_0^h S(X) dX = \frac{K_0}{V_{CA}} \cdot S(X) \cdot h. \quad (8)$$

З лівої частини рівняння (8) беремо перші два члена, тоді отримаємо:

$$\ln \frac{C_{enx}}{C_{ex}} = -\frac{1}{V_{CA}} K_0 \cdot S(X) \cdot h. \quad (9)$$

З цього слідує, що:

$$C_{enx} = C_{ex} \cdot \exp \left[-\frac{K_0}{V_{CA}} \cdot S(X) \cdot h \right]. \quad (10)$$

Необхідну продуктивність озонатора визначимо із співвідношення:

$$\Phi = N_v \cdot C_{enx}, \quad (11)$$

де N_v – продуктивність вентиляційної установки, м³/год;

C_{enx} – концентрація озону на виході в шарі насіння, мг/м³.

Відповідно, концентрація озоноповітряної суміші на вході в сушильну камеру з зерном, що обробляється, визначається як:

$$C_{ex} = \frac{C_{enx}}{\exp \left[-\frac{K_0}{V_{CA}} \cdot S(X) \cdot h \right]}, \quad (12)$$

Виразимо площу потоку:

$$S(X) = \frac{L_0}{V_{CA}} \quad (13)$$

Тоді:

$$C_{ex} = \frac{C_{вих}}{\exp \left[-\frac{K_0}{V_{CA}^2} \cdot L_0 \cdot h \right]} \quad (14)$$

Швидкість сушильного агенту, насиченого озonom:

$$V_{CA} = \sqrt{\frac{2Rd}{\lambda \rho}}, \quad (15)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя;

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

d – діаметр отвору, м.;

R – опір шару зерна, Па.

Відповідно:

$$C_{ex} = \frac{C_{вих}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \right]} = \frac{C_{ex}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{S(X)}{\pi}}}} \right]}.$$

Згідно рівняння для опору шару зерна:

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

де A та n – коефіцієнти, що залежать від морфологічних властивостей зерна.

Продуктивність генератора озону:

$$\Phi = N_v \cdot \frac{C_{вих}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \right]} = N_v \cdot \frac{C_{ex}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{S(x)}{\pi}}} \right]}.$$

З урахуванням зниження продуктивності електроозонуючого пристрою при збільшенні температури та вологості повітря, що надходить до генератора:

$$\Phi = K_{\text{тп}} \left(N_v \cdot \frac{C_{вих}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \right]} \right) = K_{\text{тп}} \left(N_v \cdot \frac{C_{ex}}{\exp \left[-\frac{K_0 \cdot L_0 \cdot h \cdot \lambda \cdot \rho}{2R \cdot d} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{S(x)}{\pi}}} \right]} \right),$$

де $K_{\text{тп}}$ – емпіричний коефіцієнт, який враховує зниження продуктивності від вологості та температури повітря:

$$K_{\text{тп}} = (1 - 0,0077t - 0,008\varphi),$$

де t – температура повітряного потоку, °C;

φ – вологість повітря, %.

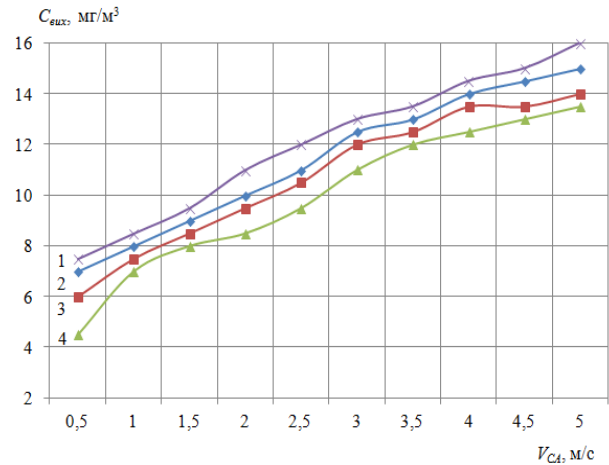


Рис. 1. Залежність концентрації озону $C_{вих}$ в озоноповітряній суміші від швидкості руху сушильного агента V_{CA} : 1 – при товщині шару зерна в сушильній камері $h=0,3$ м; 2 – при товщині шару зерна в сушильній камері $h=0,4$ м; 3 – при товщині шару зерна в сушильній камері $h=0,5$ м; 4 – при товщині шару зерна в сушильній камері $h=0,6$ м.

Знаючи значення константи швидкості поглинання озону можна визначити відношення між товщиною шару зерна та необхідною швидкістю сушильного агента, насиченого озonom, яка повинна забезпечувати допустиме значення концентрації озону на виході потоку.

Висновки

1. Технологічний процес сушіння зернової сировини вимагає розробку і впровадження нових прогресивних методів та технологій, які б забезпечували отримання високоякісного кінцевого матеріалу з мінімальними витратами часу та енергоресурсів.

2. Поєднання технології озонування разом із вібраційним впливом на оброблювану сировину під час її обробки є перспективним напрямком розвитку технології зерносушіння.

3. Аналітичний та чисельний розв'язок складених рівнянь надасть можливість перевірити адекватність розробленої математичної моделі отриманим експериментальним даним та вибрати раціональні робочі параметри віброозонуючого комплексу для виконання операції сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки.

Список літератури

1. Цуркан О. В., Присяжнюк Д. В., Герасимов О. О., Коломієць А. С. Особенности процесса и оборудования для сушки зернового сырья с использованием озона.

MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 18. No 4. 2016. С. 37–44.

2. Ермакова В. А., Ермаков П. П. Озонирование зерна. Днепропетровск. 2017. 125 с.

3. Ксенз Н. В., Симонов М. Н., Симонова Е. Н. Предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур электроактивированной водой. АЧГАА. Зерноград, 1998. 6 с.

4. Куцакова В. Е., Богатирьев А. Н. Интенсификация тепло-массообмена при сушке пищевых продуктов. Москва. Агропромиздат. 1987. 236 с.

5. Членов В. А., Михайлов Н. В. Виброкипящий слой. Москва. Стройиздат. 1967. 224 с.

6. Голубович А. В. Теория и технология сушки семян овощных и бахчевых культур. Москва. Агропромиздат. 1987. 140 с.

7. Берник П. С., Цуркан О. В., Герасимов О. О. Оптимізація ресурсозберігаючої технології вібраційного сушіння високовологого насіння. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Мелітополь. ТДАТА. 2006. Вип. 44. С. 3–10.

8. Тарушкин В. И., Лубников С. И., Дашиников В. Н. Новая конкурентоспособная автоматизированная технология сушки семян. Вестник семеноводства в СНГ. № 3. 1999. С. 26–32.

9. Хлист Е. Б., Литвинчук А. А., Троцька Т. М. Озоновые технологии в производстве. Москва. МГУ имени Ломоносова. 2003. 27 с.

10. Зимин Е. М., Крутов В. С. Усовершенствование конструктивно-технологических схем установок для сушки зерна в кипящем слое. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1999. №2-3. 1999. С. 10–12.

11. Калиновська О. П. Применение вибрационной сушки в комбикормовой промышленности. Москва. 1979. 42 с.

12. Ксенз Н. В., Попандухало К. Х. Повышение качества зерна на основе использования озонородных смесей. Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия, Зерноград. 2009. 130 с.

References

1. Tsurcan, A. V., Prisyazhnyuk, D. V., Gerasimov, A. A., Kolomiets, A. S. (2016). Features of the process and equipment for drying of grain raw materials using ozone. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 18. No 4. 37–44.

2. Ermakova, V. A., Ermakov, P. P. (2017). Ozonation of grain. Dnepropetrovsk. 125.

3. Ksenz, N. V., Simonov, M. N., Simonova, E. N. (1998). Presowing treatment of seeds of agricultural crops electroactivated water. ACHGAA. Zernograd. 6.

4. Kutsakova, V. E., Bogatyrev, A. N. (1987). Intensification of heat-mass transfer during drying of food products. Moscow. Agropromizdat. 236.

5. Chlenov, V. A., Mikhailov, N. V. (1967). Vibration layer. Moscow. Stroyizdat. 224.

6. Golubovic, V. A. (1987). Theory and technology of drying of seeds of vegetable and melon crops. Moscow. Agropromizdat. 140.

7. Bernik, S. P., Turcan, A. V., Gerasimov, A. A. (2006). Optimization of resource-saving technologies of vibratory drying vysokopolnogo seeds. Works of Tavria state agrotechnical Academy. Melitopol. TDATA. Vol. 44. 3-10.

8. Taruskin, V. I., Lesnikov, S. I., Gasnikov, V. N. (1999). New competitive automated technology of drying of seeds. Bulletin of seed in the CIS. No 3. 26-32.

9. Hlist, E. B., Litvinchuk, A. A., Trotskaya, T. M. (2003). Ozone production technology. Moscow. Lomonosov Moscow state University. 27.

10. Zimin, E. M., Krutov, V. S. (1999). Improvement of technological schemes of installations for grain drying in fluidized bed. Mechanization and electrification of agriculture. No 2-3. 10-12.

11. Kalinovskiy, E. P. (1979). Application of vibratory drying in the feed industry. Moscow. 42.

12. Ksenz, N. V., Popanduhalo, K. K. (2009). Improving the quality of grain based on the use of ozone-air mixtures. The Azov-black Sea State Agroengineering Academy, Zernograd. 130.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЗОНА В СЛОЕ ЗЕРНА ПРИ ЕГО СУШКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРООЗОНИРУЕМОГО КОМПЛЕКСА

О. В. Цуркан, Д. В. Присяжнюк

Аннотация. В работе описана математическая модель распространения и поглощения озона в составе сушильного агента при после уборочной обработке зернового сырья с использованием виброозонируемого комплекса.

Ключевые слова: зерновое сырье, послеуборочная обработка, сушка.

MATHEMATICAL MODEL OF DISTRIBUTION OF OZONE IN LAYER OF GRAIN DURING DRYING WITH USE OF VIBRATING ZONEREMOVE COMPLEX

Tsurkan O. V., Prisyazhnyuk D. V.

Abstract. The paper describes the mathematical model of the propagation and absorption of ozone in the composition of the drying agent after spiraling processing of grain raw materials with use of vibrating zoneremove complex.

Key words: raw grain, after harvest processing, drying.