



Присяжнюк Д. В.

К.Т.Н.

*Відокремлений
структурний підрозділ
«Ладизинський фаховий
коледж ВНАУ»*

Prysiazhniuk D.

Ph.D.

*Separated structural unit
«Ladyzhyn Professional
College of Vinnytsia
National Agrarian
University»*

УДК 631.365:62 – 868 (043.3)

DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-14

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

У системі технологічних операцій післязбиральної обробки зерна найважливіше місце належить сушінню. Якісне сушіння не тільки забезпечує зберігання зібраного урожаю, запобігає його втратам, але у деяких випадках і підвищує якість готового продукту.

Саме на цій стадії витрачається до 80% всієї енергії післязбиральної обробки зерна, а корисне використання енергії в самих зерносушарках складає до 40-45%. Напрямом удосконалення зерносушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення екологічної безпеки висушуваного продукту, розробка високоефективної зерносушильної техніки.

Значної інтенсифікації процесу сушіння зерна можна досягти за рахунок використання вібраційного впливу на оброблюваний матеріал з одночасною обробкою озonom у складі сушильного агента, що додатково знижує енерговитрати операції і дозволяє отримати кінцевий матеріал високої якості.

В статті експериментально досліджено енергетичну ефективність сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючого комплексу в залежності від режимних параметрів досліджуваного процесу та отримано раціональні параметри розробленого обладнання.

Базуючись на отриманих даних визначено, 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 теплоагенту температурою $50\text{ }^\circ\text{C}$ при тривалості обробки 240 хв. – $112,93\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ або $18,82\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ на 1% випаруваної вологи ($406,54\text{ КДж/кг}$ або $67,75\text{ КДж/кг}$ на 1% випаруваної вологи); за використання комплексного теплофізичного впливу при тривалості обробки 160 хв. – $91,01\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ або $15,16\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ на 1% випаруваної вологи ($327,63\text{ КДж/кг}$ або $54,6\text{ КДж/кг}$ на 1% випаруваної вологи).

Експериментальні дослідження дали змогу отримати компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини із використанням віброозонуючого комплексу, які становлять: віброприскорення $a=15-20\text{ м/с}^2$, температура сушильного агента $T_{CA}=50-55\text{ }^\circ\text{C}$, концентрація озону $N_{O_3}=8-10\text{ мг/м}^3$, час обробки $t_o=130-160\text{ хв.}$ за швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 1,5\text{ м/с.}$

Ключові слова: зернова сировина, післязбиральна обробка, сушіння, віброозонуючий комплекс, енергозатрати, раціональні параметри.



Постановка проблеми. На сучасному етапі, в умовах ринкової економіки в Україні з утворенням фермерських і орендних підприємств, виникли нові вимоги до техніки, яка використовується для післязбиральної обробки, і зокрема, сушіння зернових та олійних культур. Переважна більшість існуючого зерносушильного обладнання не влаштовує дрібних та середніх фермерів через свою велику продуктивність і уніфікацію, значні енерговитрати та низьку якість отриманої продукції. У зв'язку з цим виникла проблема по виконанню всього комплексу зерновиробництва, в тому числі і сушіння, оскільки в країні даному виду обробки піддається близько 20-35 % всього зерна. Особливо на півночі і заході України сушіння зерна є гострою необхідністю.

Напрямом удосконалення сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення екологічної безпеки висушеного продукту, розробка високоєфективної зерносушильної техніки.

Значної інтенсифікації процесу сушіння зерна можна досягти за рахунок використання вібраційного впливу на оброблюваний матеріал з одночасною обробкою озonom у складі сушильного агента, що додатково знижує енерговитрати операції і дозволяє отримати кінцевий матеріал високої якості.

Тому, впровадження нових методів сушіння зернової сировини шляхом розробки та дослідження віброозонуючого комплексу, в якому оброблюваний матеріал перебуває у постійному коливному русі, у поєднанні із технологією озонування є перспективним напрямком розвитку зерносушильного обладнання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [1-5] встановлено перспективу застосування комплексного вібраційного впливу для інтенсифікації процесу сушіння насіння сільськогосподарських культур. Обробка зернової сировини може ефективно проводитися у вібраційних установках, оскільки вони забезпечують інтенсивні та енергоощадні режими обробки з одночасною щадною дією на оброблюваний матеріал та забезпечують гнучкість виконання технологічного процесу сушіння.

Аналіз робіт [6-9] засвідчує, що одним із способів підвищення ефективності окремих технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві, в тому числі і зерносушіння, є використання озонopовітряної суміші. Це обумовлено участю озону в багатьох біохімічних процесах, що є основою обміну речовин та енергій у сільськогосподарських біологічних об'єктах.

Підсумком такого застосування озонopовітряної суміші є підвищення продуктивності, зниження енергоємності, зменшення бактеріологічного зараження сировини, підвищення врожайності та збережуваності зернової сільськогосподарської продукції.

Поєднання позитивних якостей вищеписаних технологій дало змогу отримати принципово новий спосіб та обладнання для виконання процесу сушіння зерна з метою підвищення продуктивності та зниження енерговитрат його післязбиральної обробки із використанням віброозонуючого комплексу.

Мета дослідження. Мета роботи – дослідження енергетичної ефективності сушіння зернової сировини з використанням віброозонуючого комплексу в залежності від режимних параметрів досліджуваного процесу з метою отримання раціональних параметрів розробленого обладнання.

Виклад основного матеріалу дослідження. До енергетичних параметрів розробленого віброозонуючого комплексу [10] можна віднести електричну потужність, яка витрачається на нагрів сушильного агента з допомогою електричних елементів (тенів) N_{HE} ; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу дебалансного валу $N_{ДДВ}$; потужність, яка витрачається електродвигуном приводу вентилятора $N_{ПВ}$ та електронним пристроєм синтезу озону $N_{ПСО}$.

На рис. 1 зображено зміну споживаної потужності електричними нагрівальними елементами в залежності від температури сушильного агента при діапазоні швидкостей руху сушильного агента $V_{CA} = 1,5 \text{ м/с}$.

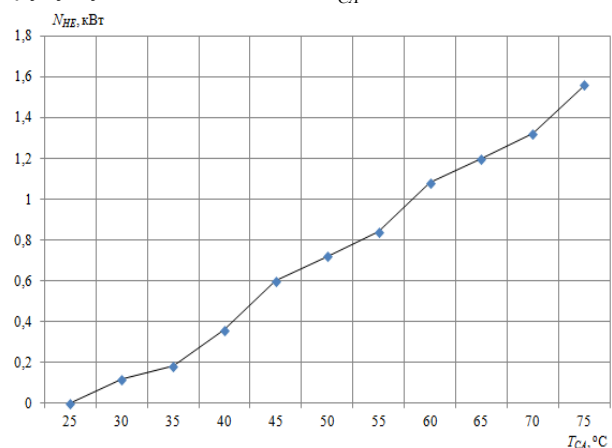


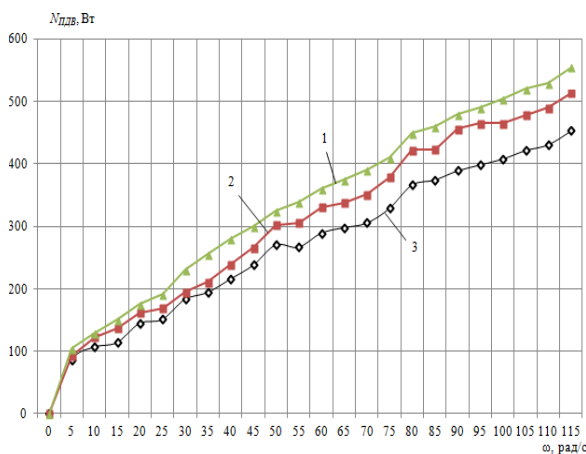
Рис. 1. Зміна споживаної потужності електричними нагрівальними елементами в залежності від температури сушильного агента

З поданої залежності видно, що зі зростанням температури сушильного агента



T_{CA} споживана потужність N_{HE} нагрівними електричними елементами збільшується, практично, пропорційно.

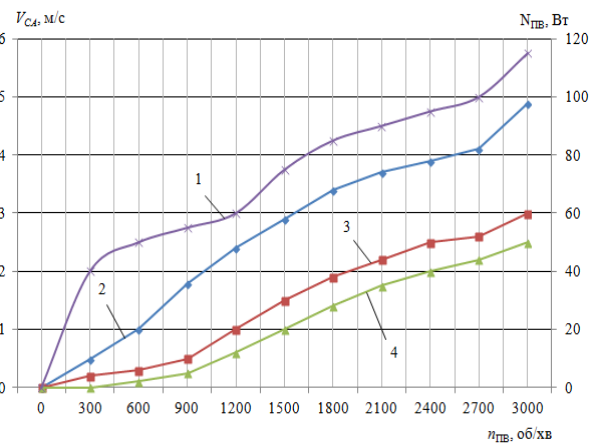
Також під час аналізу енергетичних характеристик досліджуваного віброозонуючого комплексу було виявлено збільшення споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу залежно від загального об'єму завантаження сушильної камери, що при робочій кутовій швидкості $\omega=90$ рад/с становить: $N_{ПДВ}=480$ Вт при 75 % завантаження; $N_{ПДВ}=450$ Вт при 50 % завантаження; $N_{ПДВ}=390$ Вт при відсутньому технологічному навантаженні (рис. 2).



1 – при завантаженні 75 % від повного об'єму камери; 2 – при завантаженні 50 % від повного об'єму камери; 3 – при відсутності технологічного завантаження

Рис. 2. Зміна споживаної потужності електродвигуном приводу дебалансного валу в залежності від кутової швидкості та ступеня технологічного завантаження сушильної камери

При визначенні енергетичних характеристик віброозонуючого комплексу встановлено зміни спожитої потужності та швидкості сушильного агенту в залежності від частоти обертання електродвигуна приводу вентилятора (рис. 3).



1 – залежність зміни спожитої потужності від частоти обертання; 2 – залежність зміни швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при відсутності технологічного завантаження сушильної камери; 3 – залежність зміни швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при завантаженні 50 % від повного об'єму сушильної камери; 4 – залежність зміни швидкості руху сушильного агента від частоти обертання електродвигуна при завантаженні 75 % від повного об'єму сушильної камери

Рис. 3. Енергетичні характеристики електродвигуна приводу вентилятора

Із експериментально отриманої кривої можна зробити висновок, що зі збільшенням частоти обертання електродвигуна зростає споживана ним потужність. Крім того, на максимальних обертах електродвигуна $n_{ПВ}=3000$ об/хв споживана ним потужність $N_{ПВ}=115$ Вт при швидкості сушильного агенту $V_{CA}=4,9$ м/с (за відсутності технологічного завантаження сушильної камери); $V_{CA}=3$ м/с (при завантаженні 50 % від повного об'єму сушильної камери); $V_{CA}=2,5$ м/с (при завантаженні 75 % від повного об'єму сушильної камери).

На рис. 4 зображено зміну спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону $N_{ПСО}$ в залежності від згенерованої ним концентрації озону N_{O_3} .

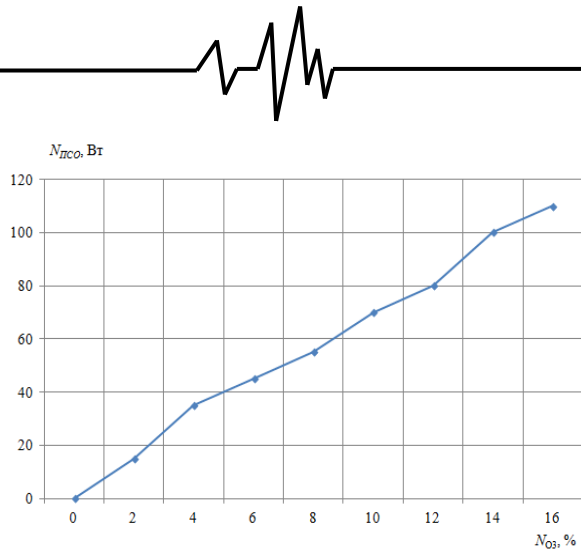
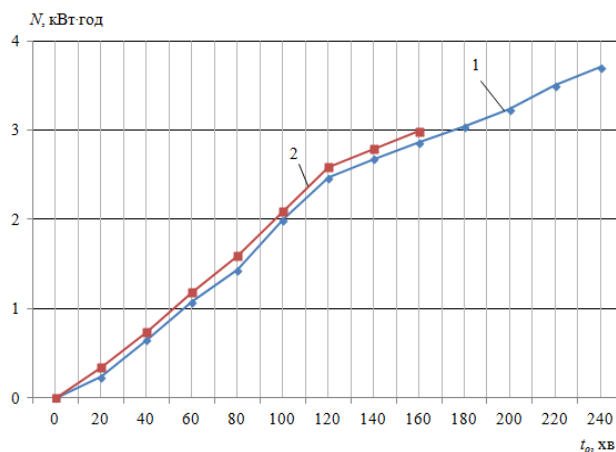


Рис. 4. Зміна спожитої потужності електронним пристроєм синтезу озону в залежності від згенерованої ним концентрації озону

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

На основі визначених енергетичних характеристик розробленого віброозонуючого комплексу отримано залежність загальних енерговитрат від тривалості обробки t_o (рис. 5).



1 – без озону в складі сушильного агенту;
2 – з озоном в складі сушильного агенту

Рис. 5. Зміна загальних енерговитрат розробленою машиною в залежності від типу обробки

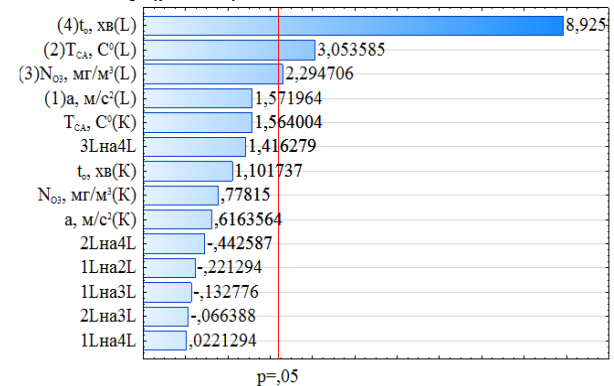
Аналіз рис. 5 засвідчив, що питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю $W_k=14\%$ при початковій вологості $W_n=20\%$ становлять: за використання класичної технології з подачею теплоагенту температурою $50\text{ }^\circ\text{C}$ при тривалості обробки 240 хв . – $112,93\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ або $18,82\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ на 1% випаруваної води ($406,54\text{ КДж/кг}$ або $67,75\text{ КДж/кг}$ на 1% випаруваної води); за використання комплексного теплофізичного

впливу при тривалості обробки 160 хв . – $91,01\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ або $15,16\text{ Вт}\cdot\text{год./кг}$ на 1% випаруваної води ($327,63\text{ КДж/кг}$ або $54,6\text{ КДж/кг}$ на 1% випаруваної води).

Після обробки експериментальних даних у статистичному середовищі STATISTICA 10.0 [11] було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та залежність енерговитрат на привод віброозонуючого комплексу від віброприскорення камери, температури сушильного агента, концентрації озону та часу обробки:

$$N = 11,828 - 0,005a - 0,303T_{CA} - 0,335N_{O_3} - 0,011t_o + 0,001(a)^2 + 0,003(T_{CA})^2 + 0,01(N_{O_3})^2 + 0,001N_{O_3} \cdot t_o \quad (1)$$

На основі отриманих експериментальних даних побудовано карти Парето ефектів для оцінки впливу факторів споживані енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу (рис. 6).



$p=,05$

Оцінка ефекту (абсолютне значення)

Рис. 6. Карта Парето ефектів для оцінки впливу факторів на споживані енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу

Згідно отриманих карт, на споживані енерговитрати розробленого віброозонуючого комплексу найбільше впливають час обробки t_o та температура сушильного агента T_{CA} .

За результатами проведених експериментів досліджень та випробувань розробленого віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини на основі побудованих поверхонь відгуку досліджуваних процесів (рис. 7) визначено раціональні технологічні параметри його роботи (табл. 1), компромісне значення яких отримано методом Крамера в математичному середовищі «Mathcad 15» [12].

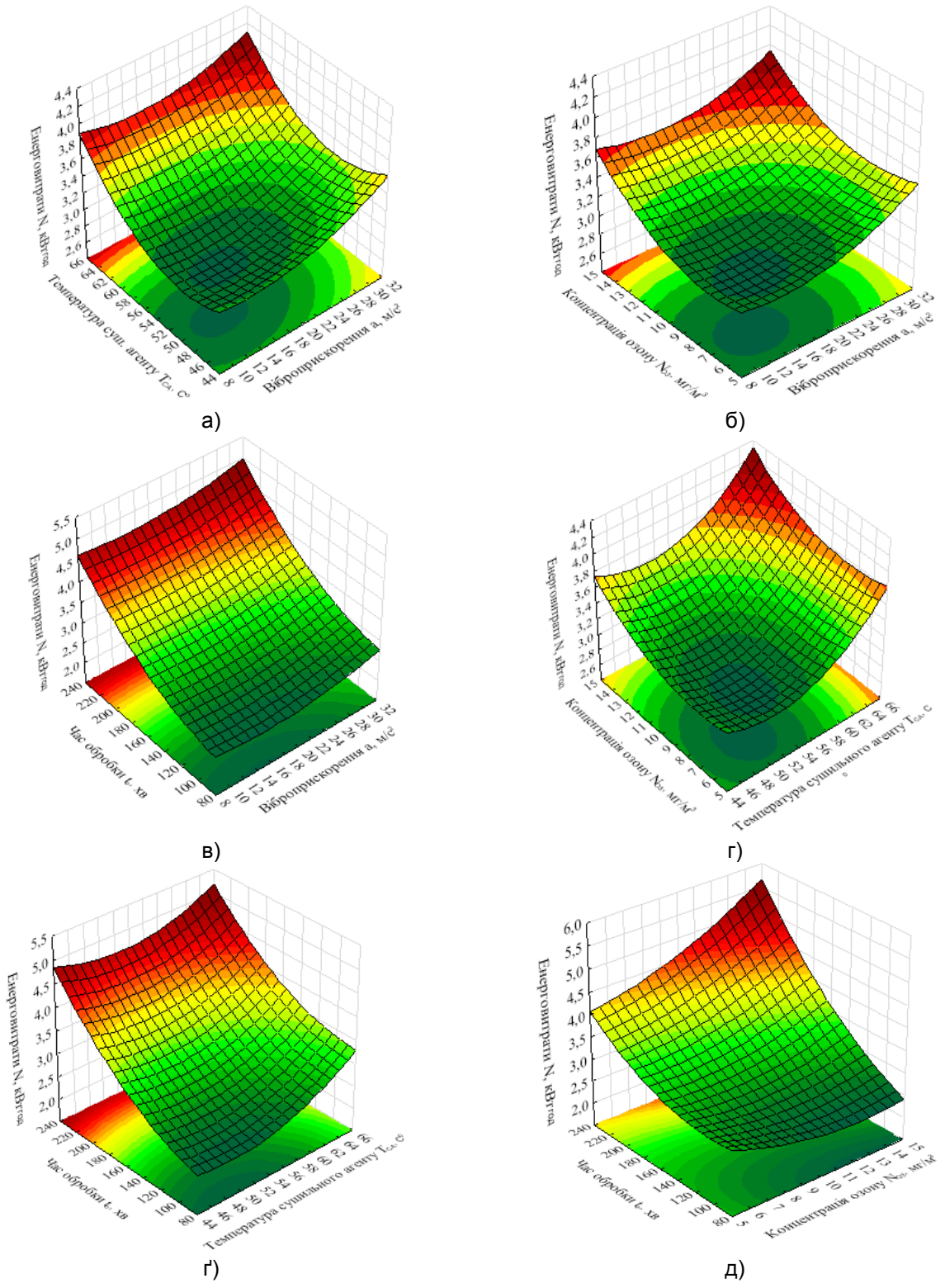
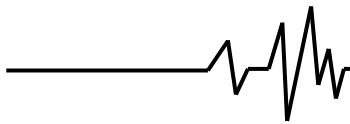


Рис. 7. Вплив параметрів процесу на енерговитрати N віброозонуючого комплексу

Таблиця 1
Компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини

Технологічний параметр	Рациональне 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



Також визначено, що за цих параметрів якісні характеристики процесу сушіння набувають своїх раціональних значень: кінцева вологість зернової сировини $W_k = 13-14\%$, енерговитрати на привод віброозонуючого комплексу $N = 3-3,2$ кВт.

Висновки:

1. Питомі енерговитрати на одиницю готової продукції з вологістю $W_k=14\%$ при початковій вологості $W_n = 20\%$ становлять: за використання класичної технології з подачею теплоагенту температурою $50\text{ }^\circ\text{C}$ 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).

2. У ході експериментальних досліджень було отримано компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу сушіння зернової сировини із використанням віброозонуючого комплексу, які становлять: віброприскорення $a=15-20$ м/с², температура сушильного агента $T_{CA}=50-55\text{ }^\circ\text{C}$, концентрація озону $N_{O_3}=8-10$ мг/м³, час обробки $t_o=130-160$ хв. за швидкості руху сушильного агента $V_{CA} = 1,5$ м/с.

Список використаних джерел

1. Пазюк О.Д., Паламарчук І.П., Пазюк В.М. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності процесу сушіння зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4 (60). С. 115-122.
2. Калетнік Г.М., Цуркан О.В. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високоволової насінневої сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 5-13.
3. Sardarov A., Mayak O., Shershnev G. Research of structural characteristics and kinetics of drying process raw material in vibration vacuum dryer. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 24. № 6. С. 110-118.
4. Химич Г.М., Куцевський М.О. Вібрація як джерело динамічних навантажень. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2014. №1 (209). С. 36-40.
5. Иосифов А.И., Щербakov С.Ю., Криволапов И.П. Совершенствование процесса сушки семян в виброкипящем слое. *Наука и образование*. 2021. Т. 4. № 3. С. 1-6.
6. Ксенз Н.В., Шабанов Н.И., Сидорцов И.Г.

и др. Энергосбережение в электрифицированных технологиях на основе активации взаимодействующих сред. *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. № 4 (44). С. 16-20.

7. Васильев А.Н., Будников Д.А. Применение критерия электроактивации при описании процесса сушки зерна с использованием электротехнологий. *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2012. № 3. С. 9-12.

8. Сигачева М.А., Пинчук Л.Г. Урожайность яровой мягкой пшеницы и ее структура при предпосевном озонировании семян в лесостепи кузнецкой котловины. *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 7. С. 24-26.

9. Казаченко С.Ю., Безруких Е.Г., Хохлова А.И. и др. Установка для озонирования сухосыпучих материалов. *Вестник КрасГАУ*. 2009. № 2. С. 184-189.

10. Цуркан О.В., Пришляк В.М., Присяжнюк Д.В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 2 (97). С. 99-104.

11. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на Statistica. Москва, 2018. 354 с.

12. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. Санкт-Петербург, 2012. 432 с.

References

1. Paziuk O.D., Palamarchuk I.P., Paziuk V.M. (2010). Vibratsiini zernosusharky yak sposib intensyfikatsii ta pidvyshchennia ekonomichnosti protsesu sushinnia zerna. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 4 (60). S. 115-122. [in Ukrainian].
2. Kaletnik H.M., Tsurkan O.V. (2021). Osoblyvosti konstruksii vibratsiinoho obladdannia dlia sushinnia vysokovolohei nasinnievoi syrovyny. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 1 (100). S. 5-13. [in Ukrainian].
3. Sardarov A., Mayak O., Shershnev G. (2018). Research of structural characteristics and kinetics of drying process raw material in vibration vacuum dryer. *Naukovi pratsi NUKhT*. Т. 24. № 6. S. 110-118. [in English].
4. Khymych H.M., Kushchevskiy M.O. (2014). Vibratsiia yak dzherelo dynamichnykh navantazhen. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. №1 (209). S. 36-40. [in Ukrainian].
5. Iosifov A.I., Shcherbakov S.Yu., Krivolapov I.P. (2021). Sovershenstvovanie processa sushki semyan v vibrokipyashchem sloe. *Nauka i obrazovanie*. Т. 4. № 3. S. 1-6. [in Russian].
6. Ksenz N.V., Shabanov N.I., Sidorcov I.G. i dr. (2018). Ehnergosberezhenie v ehlektrificirovannykh tekhnolohiyakh na osnove aktivacii vzaimodejstvuyushchikh sred. *Vestnik agrarnoj nauki Dona*. № 4 (44). S. 16-20. [in



Russian].

7. Vasil'ev A.N., Budnikov D.A. (2012). Primenenie kriteriya ehlektroaktivacii pri opisani processa sushki zerna s ispol'zovaniem ehlektrotekhnologij. *Vestnik FGOU VPO MGAU*. № 3. S. 9-12. [in Russian].

8. Sigacheva M.A., Pinchuk L.G. (2014). Urozhajnost' yarovoj myagkoj pshenicy i ee struktura pri predposevnom ozonirovanii semyan v lesostepi kuzneckoj kotloviny. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. № 7. S. 24-26. [in Russian].

9. Kazachenko S.Yu., Bezrukikh E.G., Khokhlov A.I. i dr. (2009). Ustanovka dlya ozonirovaniya sukhosypuchikh materialov. *Vestnik KraSGAU*. № 2. S. 184-189. [in Russian].

10. Tsurkan O.V., Pryshliak V.M., Prysiazhniuk D.V. (2017). Intensyfikatsiia sushinnia zerna u protsesi yoho pisliazbyralnoi obrobky. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 2 (97). S. 99-104. [in Ukrainian].

11. Borovikov V.P. (2018). Populyarnoe vvedenie v sovremennyj analiz dannykh i mashinnoe obuchenie na Statistica. Moskva. 354 s. [in Russian].

12. Kir'yanov D.V. (2012). Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. Sankt-Petereburg. 432 s. [in Russian].

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF GRAIN RAW MATERIALS DRYING USING VIBRO-OZONE COMPLEX

In the system of technological operations of postharvest processing of grain the most important place belongs to drying. Quality drying not only ensures the storage of the harvested crop, prevents its loss, but in some cases also improves the quality of the finished product.

It is at this stage that up to 80% of the total energy of post-harvest grain processing is consumed, and the useful use of energy in the grain dryers themselves is up to 40-45%. The direction of improvement of grain drying technologies are:

reduction of energy costs for moisture removal, ensuring environmental safety of the dried product, development of highly efficient grain drying equipment.

Significant intensification of the grain drying process can be achieved by using vibration on the processed material with simultaneous ozone treatment as part of the drying agent, which further reduces the energy consumption of the operation and allows to obtain a high quality final material.

In the article the energy efficiency of drying of grain raw materials with the use of vibro-ozone complex depending on the mode parameters of the studied process is experimentally investigated and rational parameters of the developed equipment are received.

Based on the obtained data, it was determined that the specific energy consumption per unit of finished product with moisture content $W_f=14\%$ at initial moisture content is: when using the classical technology with the supply of a heat agent at a temperature of 50 °C with a processing time of 240 minutes – 112,93 Wh/kg or 18,82 Wh/kg per 1% of evaporated moisture (406,54 kJ/kg or 67,75 kJ/kg per 1% of evaporated moisture); when using a complex thermophysical effect with a processing time of 160 minutes – 91,01 Wh/kg or 15,16 Wh/kg per 1% moisture evaporated (327,63 kJ/kg or 54,6 kJ/kg per 1% moisture evaporated).

Experimental studies made it possible to obtain compromise technological parameters of the investigated process of drying grain raw materials using a vibro-ozone complex, the following components: vibration acceleration $a=15-20$ m/s², drying agent temperature $T_{DA}=50-55$ °C, ozone concentration $N_{O_3} = 8-10$ mg/m³, processing time $t_p=130-160$ minutes with the speed of the drying agent $V_{CA} = 1,5$ m/s.

Keywords: grain raw materials, post-harvest processing, drying, vibro-ozone complex, energy consumption, optimal characteristics.

Відомості про автора

Присяжнюк Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент за сумісництвом кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, заступник директора з навчальної роботи Відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. П. Кравчика, 5, м. Ладизин, Вінницька обл., 24321, Україна, e-mail: dima061992@yahoo.com).

Prysiazhniuk Dmytro – Ph.D., part-time associate professor of the Department of Machinery and Equipment for Agricultural Production of Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University, deputy director for academic affairs of Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University» (5, P. Kravchyka St., Ladyzhyn, Vinnytsia region, 24321, Ukraine, e-mail: dima061992@yahoo.com).