

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ НАСІННЯ РІПАКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Бандура В.М. д.т.н., професор<sup>1</sup>, Безбах І.В. д.т.н., доцент<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

<sup>2</sup> Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

**Анотація.** Одним із нових методів сушіння є використання мікрохвильового випромінювання. Мета роботи – вивчити режими сушіння насіння ріпаку електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону в поєднанні з фільтрацією. Проведені дослідження показали, що температура насіння при максимальній потужності мікрохвиль підвищується в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при половинній потужності. Чим більша вологість насіння, тим підвищення температури збільшується швидше. Після кожного циклу продування, який становив 15 секунд, температура знижувалася на 8-12 °С і циклічно стабілізувалася. Експериментальні дані можуть бути враховані при розробці конструкцій малогабаритних сушарок для сільськогосподарських підприємств і фермерів.

**Ключові слова:** мікрохвильова енергія, конвективне продування, насіння ріпаку, температура сушіння.

**Вступ.** Ріпак є ключовим джерелом харчової рослинної олії та рослинного білка серед чотирьох основних світових олійних культур [1]. Насіння ріпаку багаті ліпідами, які можуть забезпечити організм енергією, незамінними жирними кислотами та різними пов'язаними ліпідами, такими як фітостероли, вітамін Е та сквален [2]. Ріпакова олія та ріпаківий шрот виробляються шляхом обробки насіння ріпаку, у якому ріпакова олія є важливим джерелом корисних для здоров'я сполук, таких як поліфеноли, фітостероли та токоферолі в раціоні людини [3], тоді як ріпаківий шрот є основний матеріал для різноманітних комерційних продуктів, таких як корми та добрива [5]. Основним технологічним процесом збереження властивостей насіння є сушіння [5]. Вирощений урожай ріпаку перед переробкою необхідно очистити і просушити.

Енергоспоживання, екологічні проблеми, якість продукції є актуальними проблемами, пов'язаними з процесами сушіння насіння. Необхідно звернути увагу на розробку нових конструкцій енергоефективних сушарок для насіння [6]. На підприємствах сушіння рослинної сировини здійснюється гарячим повітрям або димовими газами на конвективних сушильних установках. ККД конвективних сушарок становить 40%. Енергоспоживання конвективних сушарок досягає 8 МДж/кг видаленої вологи, що майже втричі перевищує фізично необхідний мінімум. Вміст канцерогенів у сушильному агенті та продукті не контролюється [7]. Але спеціального технологічного обладнання для сушіння ріпаку немає, тому процес ведеться на зерносушильному обладнанні. Існуючі зерносушарки не повністю відповідають вимогам до якості висушеного насіння. Недосконалість конструкції існуючих зерносушарок призводить до високих втрат (до 50%) і зниження якості насіння. Конвективний спосіб теплопостачання, який використовується в існуючих сушарках, обмежений високою температурою сушіння та інертністю процесу, що призводить до перегріву насіння, і не забезпечує рівномірність висушеного насіння. Температура сушарки повинна бути не вище +50 °С, щоб насіння не втратило життєздатність. Чим менше вологість, тим нижче повинна бути температура сушіння.

Одним із нових методів сушіння є використання інфрачервоного та мікрохвильового випромінювання [8, 9]. В роботі [10] теоретично обґрунтовано процеси радіаційно-конвективного тепломасообміну між усіма визначальними об'єктами всередині вібросушарки з ПЧ-живленням. На основі теплового та матеріального балансів визначено рівняння, що описують основні динамічні характеристики умов сушіння олійного зернового матеріалу в ПЧ-сушарці безперервної дії. У зв'язку з тим, що точного аналітичного розв'язку наведеної математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь у частинних похідних не існує, запропонований розв'язок дозволяє виявити залежності розподілу температури та вологості зерна та олійної сировини від довжина сушарки в будь-який час.

Коллективом авторів на чолі з Бурдо О.Г. запропоновано технології адресної доставки енергії для інтенсифікації тепломасообміну при переробці харчової сировини [11]. В основу висунутих гіпотез лягли хвильові технології комбінованої електромагнітної та вібраційної дії. Обґрунтовано механізми, ефекти та математичні моделі бародифузії та дії вібраційних полів. Запропоновано числа подібності хвиль, на основі яких узагальнено бази експериментальних даних по висиханню.

Використання мікрохвиль має багато переваг. Найважливішим аспектом є зменшення часу термічного процесу (навіть на 50%) і скорочення експлуатаційних витрат. Крім того, це дозволяє підвищити ефективність процесів при збереженні високої якості [12]. Використання мікрохвильової енергії залежить від різних факторів, включаючи структуру обладнання, умови сушіння (мікрохвильова енергія, частота, температура та швидкість повітря) і властивості матеріалу. Систему сушіння можна ефективно покращити, якщо ці параметри налаштовані належним чином і враховано споживання енергії на обробку [13]. Перспективним вважа-

ється сушіння насіння ріпаку енергією електромагнітного поля НВЧ-діапазону, оскільки під впливом енергії НВЧ-поля насіння прогрівається відразу у всьому об'ємі, в якому відбуваються градієнти тиску, температури та вологості. однакова спрямованість, що дозволяє значно інтенсифікувати процес сушіння та зменшити ризик тривалого впливу високих температур [14, 15]. Крім того, мікрохвильове нагрівальне обладнання дає можливість проектувати невеликі та мобільні сушильні установки, зручні для використання в невеликих сільськогосподарських підприємствах і фермерських господарствах.

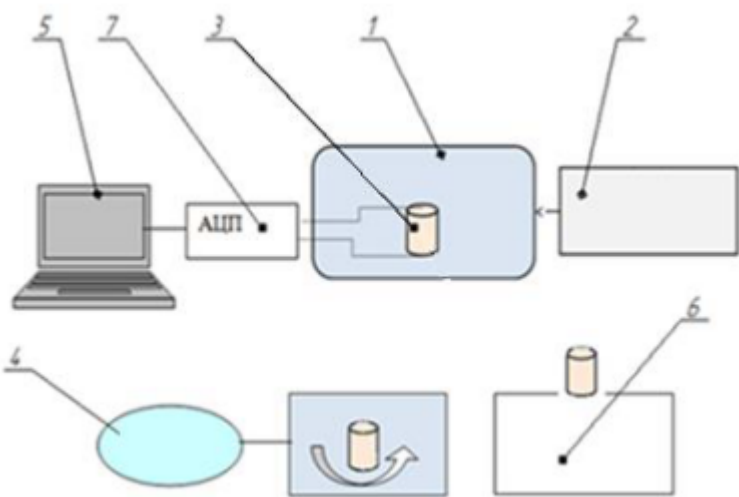
Автори [16] провели серією експериментів, аналізу та вимірювань, що насіння ріпаку з початковою вологістю 15%–30% можна висушити до безпечної вологості для зберігання шляхом зміни співвідношення потужності  $G$ , температури  $T$ , часу нагріву  $t$  і циклу навантаження  $D_c$ , відповідно. Польові випробування показали, що якість насіння залишилася незмінною, а сходи дещо зросли; сушіння в мікрохвильовій печі може активувати насіння ріпаку та підвищити його здатність до проростання.

Грунтуючись на рівняннях Максвелла, Олівейра та Франка змоделивали опромінення МВт увімкнення та вимкнення в поєднанні з обертанням зразка та виявили, що ця комбінація забезпечує більш рівномірні температурні профілі порівняно з кожним методом, застосованим окремо [17].

Основним недоліком мікрохвильового сушіння є його нерівномірне нагрівання, зокрема перегрів по краях зразка [18]. Через нерівномірний розподіл енергії в мікрохвильовій (МВт) установці, застосування мікрохвильового нагріву залишається значною перешкодою. Конвеєрна стрічкова сушарка MW з безперервним контролем потужності за допомогою кількох джерел MW 2,45 ГГц покращує рівномірність нагріву. Завдяки послідовному регулюванню вхідної потужності джерел НВЧ, електричного поля і коливань температури було значно зменшено гарячі та холодні точки в мікрохвильовому резонаторі. Експериментальні результати показують, що МВт-нагрівання за допомогою запропонованого безперервного методу з регульованою потужністю може досягти приблизно на 34% кращої рівномірності нагріву порівняно з одночасним методом кількох входів (звичайний режим) [19]. Дослідження [20] вказали, що насіння ріпаку можна безпечно сушити при температурі 55 °С, зберігаючи при цьому схожість до 90%. Для підвищення швидкості сушіння при збереженні життєздатності насіння в дослідженні використовували гібридну мікрохвильову (МВ) конвективну сушарку. Гібридні сушарки забезпечували більш рівномірний нагрів і швидкий перенос вологи в продукті, зберігаючи продукт холоднішим і більш життєздатним [20]. Аполінар і Хоакін (2012) розробили математичну модель сушіння зерна в безперервній вібраційній сушарці з киплячим шаром [21]. Для опису процесу використовували просте обладнання та моделі матеріалів. У моделі плунжерного обладнання досліджувався тонкий шар частинок, що рухалися вперед і добре перемішувалися в напрямку потоку газу, що створювало однорідний колір продукту під час нагрівання.

Для усунення перелічених недоліків, пропонується поєднувати сушіння в мікрохвильовій установці з іншими методами сушіння.

Таким чином, дослідження процесу сушіння насіння ріпаку з метою вирішення проблеми збереження якості продукції та підвищення ефективності процесу сушіння є актуальним науково-технічним завданням.



1 – камера мікрохвильової обробки, 2 – генератор електромагнітного поля, 3 – касета з продуктом, 4 – вентилятор, 5 – комп'ютер, 6 – ваги, 7 – модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

**Рис. 1 – Розрахункова схема для проведення досліджень установки з мікрохвильовим енергозабезпеченням у поєднанні з фільтраційною сушкою**

Водночас для розробки сучасного високопродуктивного обладнання для сушіння ріпаку та обґрунтування раціональних режимів сушіння необхідно досліджувати процес сушіння ріпаку як традиційними, так і новими, більш ефективними способами сушіння.

Метою роботи було дослідження режимів сушіння насіння ріпаку електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону в поєднанні з фільтрацією.

#### Матеріали і методи

Для дослідження кінетики процесу сушіння дисперсних систем та впливу мікрохвильового випромінювання на насіннюву сировину, створено експериментальний стенд. Схема експериментального стенду представлена на рис. 1.

Дослід проводили за періодичною схемою, спочатку проводили мікрохвильову обробку продукту, потім касету з насінням продували повітрям і зважували. За допомогою модуля АЦП і термопар вимірювали температуру продукту, тривалість мікрохвильової обробки та

швидкість повітря.

На дослідному стенді використовувалися магнетрони ЛГ 2М226 з такими характеристиками: магнетрон ЛГ 2М226; частота (при погодженому навантаженні): 2460 МГц; середня вихідна потужність (при погодженому навантаженні): 1500 Вт; розміри касети (д/ш/в): 140/129/96 мм; охолодження: повітряне, примусове.

Магнетрон ЛГ 2М226 є типовим пристроєм для використання в побутовій техніці, характеризується досить високою потужністю НВЧ-випромінювання (~1500 Вт) і невисокою вартістю (~350...500 грн.), яка у промислових використаннях дозволяє віднести його до витратних матеріалів.

Досліди з сушіння насіння ріпаку в установці з мікрохвильовим живленням наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Діапазон вимірюваних значень

Сировина	Тривалість нагріву НВЧ, с	Тривалість продувки повітрям, с	Потужність НВЧ, кВт	Вологість насіння, початкова, %
Ріпак	0...120	5-15	0,24...0,8	12...20

Потужність випромінювання встановлювалася за допомогою стандартних засобів пульта керування мікрохвильової нагрівальної камери, що дозволяє встановити потужність випромінювання у відсотках від максимальної потужності випромінювача. З урахуванням робочих характеристик обладнання були обрані значення 30, 50, 70 і 100% потужності, що відповідають 240, 400, 560 і 800 Вт НВЧ випромінювання генератора. Зміна показника потужності на максимальне значення та схему керування магнетроном забезпечували за допомогою широтно-імпульсної модуляції, а як засіб контролю під час експериментів хронометрували роботу випромінювача за показниками індикатора НВЧ-випромінювання з подальшим розрахунком співвідношення між часом роботи випромінювача і часом зупинок.

Зразки насіння ріпаку масою 200 г поміщали в касету, яка створювала питоме навантаження 5 кг·м<sup>-2</sup>. Потім касету поміщали в експериментальну установку з мікрохвильовим випромінювачем і негайно піддавали опроміненню.

Дослідження проводили за періодичною схемою, спочатку проводили вплив на продукт мікрохвильового випромінювання, потім касету з продуктом продували повітрям і зважували. За допомогою модуля АЦП і термопар вимірювали температуру продукту, тривалість мікрохвильової обробки та швидкість повітря.

Вологість зерна вимірювали цифровим вологоміром РМ-

600 та вологоміром типу Wile.

**Результати досліджень.** Як свідчать графіки, наведені на рис. 2 і 3, температура насіння при потужності НВЧ P = 800 Вт зростає в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при потужності P = 400 Вт. залежить від потужності електромагнітного випромінювання, що подається. Із збільшенням потужності електромагнітного випромінювання зростає і інтенсивність підвищення температури.

Відповідно до графіків, наведених на малюнку 3, коли потужність електромагнітного випромінювання зменшується, швидкість підвищення температури також зменшується. При потужності електромагнітного випромінювання P = 400 Вт температурні криві більш

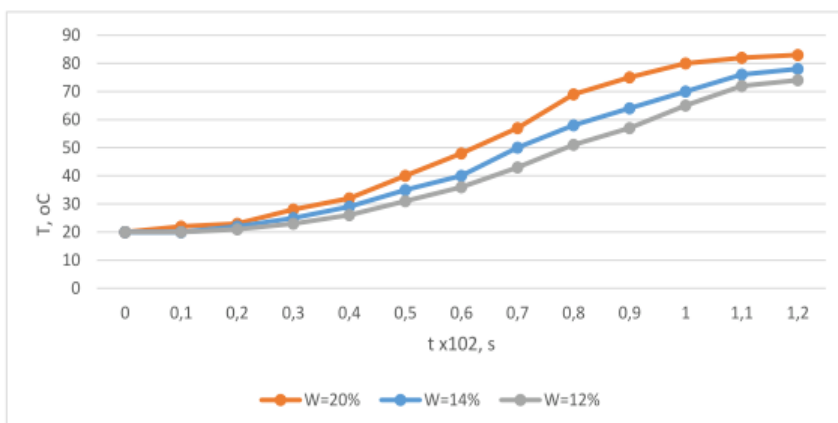


Рис. 2 – Динаміка нагрівання насіння ріпаку різної вологості під впливом електромагнітного випромінювача потужністю 800 Вт

сіння при потужності НВЧ P = 800 Вт зростає в цілому в 1,5...1,8 рази швидше, ніж при потужності P = 400

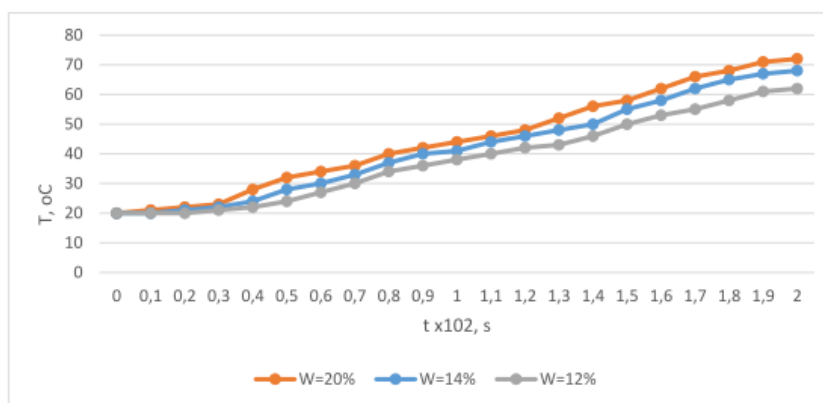


Рис. 3 – Динаміка нагрівання насіння ріпаку різної вологості під впливом електромагнітного випромінювача потужністю 400 Вт

пологі. Крім того, при такій потужності зниження інтенсивності підвищення температури починається при температурі 62...72°C.

На другому етапі дослідження насіння ріпаку опромінювали мікрохвильовим випромінюванням і продували повітрям.

Термограми під час сушіння ріпаку мають ступінчастий характер (рис. 4 і 5), що зумовлено тим, що продування шару матеріалу здійснювалося періодично.

Термограма нагріву насіння ріпаку (рис. 4) відповідає 5 с періоду обдування та 5 с впливу мікрохвиль. Термограма нагрівання насіння ріпаку (рис. 5) відповідає 15 с продування та 15 с впливу мікрохвиль.

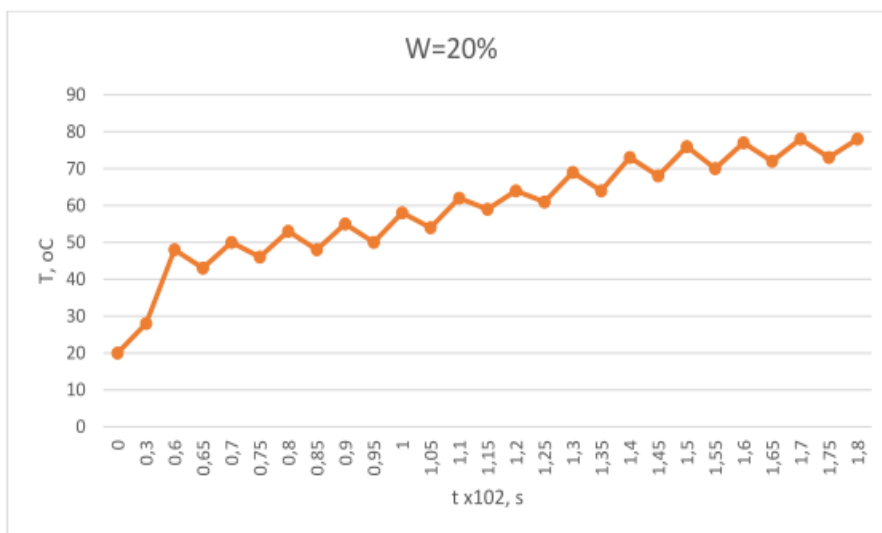


Рис. 4 – Зміна температури насіння ріпаку з вологістю 20% при потужності мікрохвиль 800 Вт і тривалості обдування 5 с

Температуру насіння підтримували близькою до технологічної на рівні 50 °С.

Температура насіння ріпаку на рис. 4 відповідає періоду обдування 5 с та впливу мікрохвиль 5 с, температура насіння ріпаку на рис. 5 – обдуву 15 с, впливу мікрохвиль 15 с. Аналіз показує, що тривалість продування суттєво впливає як на температуру нагрівання об'єму насіння, так і на швидкість сушіння.

Аналіз графіків, показаних на рисунку 4, показує, що зміна температури насіння неоднакова між циклами процесу сушіння. Після кожного циклу охолодження температура встановлюється вище, ніж у попередньому. А це означає, що часу продування насіння повітрям недостатньо для стабілізації температури, і тому при наступній подачі мікрохвильової енергії температура насіння підвищується.

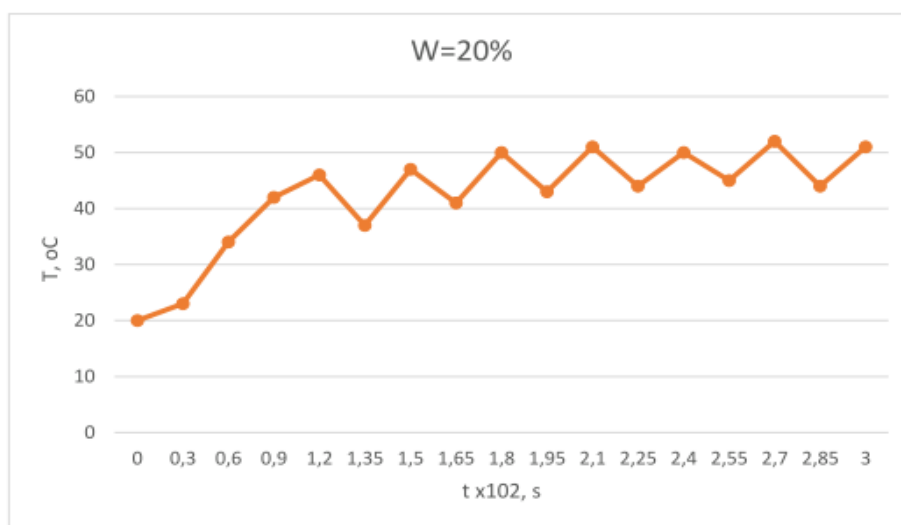
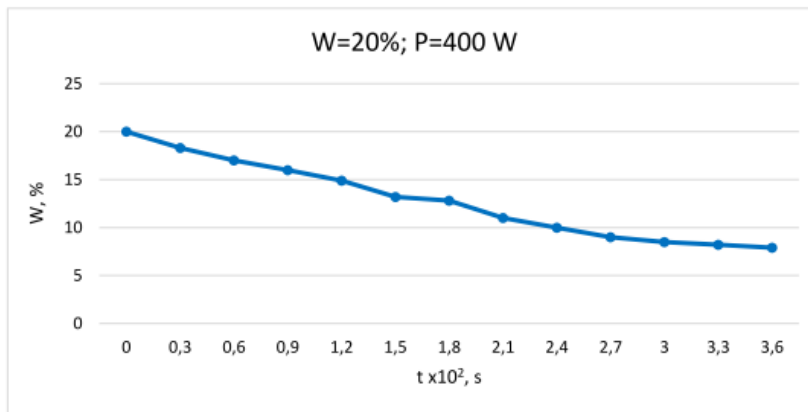


Рис. 5 – Зміна температури насіння ріпаку з вологістю 20% за потужності мікрохвильової енергії 400 Вт і періоду обдування 15 с

Крім того, спостерігалось поступове підвищення температури при подальшому подовженні стадії продування. Такий характер зміни температури також підтверджено результатами досліджень кінетики сушіння.



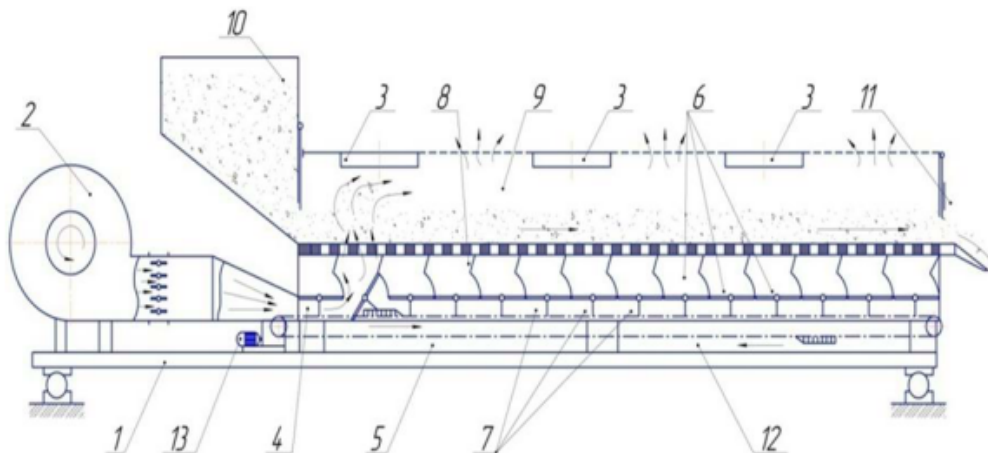
**Рис. 6 – Кінетика процесу сушіння насіння ріпаку за допомогою мікрохвильової енергії з періодичним охолодженням на 8-12 °С від температури сушіння при потужності 400 Вт і початковій вологості насіння 20%**

Дослідження кінетики сушіння, проведені за цією схемою, дозволили встановити раціональні співвідношення тривалості етапів сушіння, при яких на першому етапі здійснювався мікрохвильовий нагрів насіння до необхідної температури, а обдування з охолодженням – на 8 ...12°C від заданої температури сушіння проводилося на другому етапі. При охолодженні насіння до 3...5°C спостерігалось нерівномірне охолодження та перемішування насіння через недостатню подачу повітря вентилятором за короткий проміжок часу.

При обраних значеннях тривалість першої та другої ступенів приблизно однакова і становить 1,8...3 хв залежно від енергії НВЧ. Кондиційну вологість насіння 7...8% досягають за 8...12 циклів залежно від вихідної вологості.

Для забезпечення нормального процесу термічної обробки (прогрівання та сушіння) необхідне дотримання ряду умов: рівномірне підведення тепла до всієї площі посівного шару; постійне видалення вологи, що утворюється на поверхні зерна (постійна подача сухого і видалення вологого повітря). Виконання цих вимог (умов) безпосередньо пов'язане з параметрами установки: перш за все, з параметрами тепловіддачі елементів, які певним чином характеризують джерело тепла і визначають режими його роботи: температура, споживана потужність; характер розподілу температури за об'ємом зернового шару, товщиною зернового шару, витратою сушильного агенту та ін. Крім того, на процес сушіння впливає також стан навколишнього середовища, а саме температура і вологість.

На основі проведених досліджень авторами розроблено малогабаритну сушарку насіння. Конструктивно-технологічна схема запропонованої сушарки наведена на рис. 7. На підставі 1 встановлено напірний вентилятор 2, який у подальшому з'єднаний з газорозподільчим механізмом 5, який містить напірну камеру 4, ряд повітря. повітроводи з поворотними клапанами 7, що з'єднують напірну камеру з ділянками газорозподільних решіток 8 сушильної камери 9, поздовжній нахил яких регулюється. На початку сушильної камери встановлено бункер для сировини 10, а з протилежного боку — вихідний пристрій 11 для виходу підсушеного насіння. На зовнішній частині барокамери розташована ланцюгова передача 12, на якій закріплені виступи 14. Виступи служать для відкриття заслінок.



**Рис. 7 – Конструктивно-технологічна схема сушарки**

Сушарка працює наступним чином. Вологе насіння ріпаку з бункера 10 надходить на газорозподільні решітки 8 з певною товщиною шару. Сушильну камеру 9 встановлюють з необхідним нахилом. Одночасно вмикаються вентилятор 2, НВЧ-опромінювач 3 і ланцюгова передача 13. При переміщенні ланцюга 12 з виступами 14 по черзі відкриваються заслінки 7, при цьому нагріте повітря по чергово подається в повітروطоводи 6, звідки послідовно надходить у роз'єднані ділянки решіток газорозподільного ланцюга. В результаті насіннева маса набуває киплячого (киплячого) стану не на всій поверхні газорозподільної решітки, а на ділянці.

Далі стулки під дією виступу 14 відкриваються по черзі, і подача повітря йде в другу секцію. Цей процес відбувається послідовно по всій газорозподільчій решітці 8. В результаті виникає хвиля киплячого зернового матеріалу, який рухається і одночасно перемішує продукт. У процесі видування відбувається активна вентиляція, а висихання матеріалу відбувається під впливом мікрохвильової енергії. Рух насіння при сушінні, а отже, і тривалість сушіння, відбувається за рахунок поєднання нахилу газорозподільної решітки і дії псевдозрідження. Висушене насіння видаляється із сушарки через вихідний пристрій 11, а відпрацьоване повітря з сушильної камери 9 надходить у навколишнє середовище.

**Висновки.** Одним із нових методів сушіння ріпаку є використання мікрохвильової енергії в поєднанні з фільтрацією.

- Температура насіння ріпаку при максимальній потужності мікрохвиль 800 Вт підвищується загалом у 1,5...1,8 разів швидше, ніж при половинній потужності. Чим вище початкова вологість насіння, тим швидше буде підвищення температури.

- Продування ріпаку слід починати, коли температура ріпаку досягне 40-45 °С, проводити не менше 15 секунд, щоб підтримувати температуру насіння до 50 °С. Таких циклів має бути 10-12.

- Розроблено малогабаритну сушарку для ріпаку.

## References

1. Kaiser, F., Harbach, H., Schulz, C. (2022). Rapeseed proteins as fishmeal alternatives: A review. *Rev. Aquac.* 14, 1887-1911. <https://doi.org/10.1111/raq.12678>
2. De Oliveira, A.M.R.C.B., Yu, P. (2022). Research progress and future study on physicochemical, nutritional, and structural characteristics of canola and rapeseed feedstocks and co-products from bio-oil processing and nutrient modeling evaluation methods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 1-7. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033686>
3. Yang, R., Xue, L., Zhang, L., Wang, X., Qi, X., Jiang, J., Yu, L., Wang, X., Zhang, W., Zhang, Q., et al. (2019). Phytosterol Contents of Edible Oils and Their Contributions to Estimated Phytosterol Intake in the Chinese Diet. *Foods*, 8, 334. <https://doi.org/10.3390/foods8080334>
4. Lannuzel, C., Smith, A., Mary, A., Della Pia, E.; Kabel, M., de Vries, S. (2022). Improving fiber utilization from rapeseed and sunflower seed meals to substitute soybean meal in pig and chicken diets: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 285, 115213. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115213>
5. Paziuk, V.M., Liubin, M.V., Yaropud, V.M., Tokarchuk, O.A., Tokarchuk, D.M. (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 12, 39-48. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-33>
6. Bezbah, I., Zykov, A., Mordynskyi, V., Osadchuk, P., Phylipova, L., Bandura, V., Yarovy, I., Marenchenko, E. (2022). Designing the structure and determining the mode characteristics of the grain dryer based on thermosiphons. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 2(8 (116)), 54-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253977>
7. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Zykov, A., Yarovy, I., Gavrilov, A., Bandura, V., Mazurenko, I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11-101), 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
8. Bandura, V., Mazur, V., Yaroshenko, L., Rubanenko, O.(2019). Research On Sunflower Seeds Drying Process In A Monolayer Tray Vibration Dryer Based On Infrared Radiation. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 57(1), 233-242.
9. Bulgakov, V., Bandura, V., Arak, M., Olt, J. (2018). Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. *Agronomy Research*, 16(2), 349-356; <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>
10. Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., Spirin, A. (2018). Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-power supply, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8 (94), 50-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
11. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/11 (88), 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
12. Guzik, P., Kulawik, P., Zajac, M., Migdal, W. (2022). Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62:29, 7989-8008; <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>

13. An, N-n., Li, D., Wang, L.-j., Wang, Y. (2022). Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. DOI: 10.1080/10408398.2022.2124947. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
14. Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. (2014). Intermittent microwave drying of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2(1), 32-36. Available at: <http://www.jebas.org/wp-content/uploads/2014/09/Zhang-et-al-JEBAS1.pdf>
15. Zhao, Y., Jiang, Y., Zheng, B., Zhuang, W., Zheng, Y., & Tian, Y. (2017). Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds. *Food chemistry*, 228, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.141>
16. Qingxi L., Caixia S., Boping T. (2015). Effect of microwave drying on rapeseed's dehydrating characteristics and quality properties. *QUALITY, NUTRITION AND PROCESSING: Processing Technology*, 189-191.
17. Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. (2002). Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 53(4), 347-359; [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00176-5)
18. Li, Z. Y., Wang, R. F., Kudra, T. (2011). Uniformity Issue in Microwave Drying. *Drying Technology*, 29, 652-660. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.521963>.
19. Bae, S.-H., Jeong, M.-G., Kim, J.-H., Lee, W.-S. (2017). A Continuous Power-Controlled Microwave Belt Drier Improving Heating Uniformity. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(5), 527-529. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690849>
20. Hemis, M., Choudhary, R., Gariépy, Y., Raghavanc, V.G.S. (2015). Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, November, 139, 121-127 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
21. Apolinar, P., Joaquin, M.z (2012). Mathematical Modeling of a Continuous Vibrating Fluidized Bed Dryer for Grain. *Drying Technology*, 30(13), 1469-1481. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.690123>

## STUDY OF COMBINED RAPESEED SEED DRYING WITH THE USE OF MICROWAVE ENERGY

Bandura V.M. SciD, professor <sup>1</sup>, Bezbakh I.V. SciD, docent <sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Одеський національний технологічний університет, Odesa, Ukraine

**Abstract.** *Rapeseed has to be dried very carefully. This process is one of the most time-consuming and responsible in the technology of drying both grain and oil crops. This is primarily due to a high risk of spontaneous combustion of wet seeds, which contain a large percentage of oil and protein. In addition, it should be dried with special care so that the protein does not curdle. Rapeseed seeds with over 8% moisture content cannot be stored in containers for more than one day. The combination of high humidity and temperature during storage can lead to spoilage and self-heating. At a relative air humidity of 70%, rapeseed humidity of 8.3% and temperature of +25 °C, the development of mold fungi begins. The process is carried out on grain drying equipment. However, existing grain dryers do not fully meet the requirements for the quality of dried seeds. Imperfect designs of existing grain dryers lead to large losses (up to 50%) and a decrease in seed quality. The convective heat supply method used in existing dryers is limited by the high drying temperature and the inertia of the process, which leads to seed overheating, and does not ensure the uniformity of the dried seeds. Therefore, the modes of the drying process and the development of technological equipment are relevant.*

*The purpose of the work is to study the modes of drying rapeseed by electromagnetic radiation of the microwave range in combination with convective radiation. Conducted studies have confirmed that the temperature of seeds at maximum power of microwaves rises 1.5...1.8 times faster than at lower power. The design of a small-sized dryer, which combines two types of drying, has been developed. The application of microwave energy takes moisture from the inside of the seed and pushes it to the surface, while air blowing removes moisture from the surface of the seed and prevents it from overheating. In addition, microwave heating equipment makes it possible to design small and mobile drying units, convenient for the use in small agricultural enterprises and farms.*

**Key words:** microwave energy, convective blowing, rapeseed, drying temperature.

### Список використаної літератури

1. Kaiser F., Harbach H., Schulz C. Rapeseed proteins as fishmeal alternatives: A review. // *Rev. Aquac.* 2022. № 14. P. 1887-1911. <https://doi.org/10.1111/raq.12678>
2. De oliveira, A. M., Yu, P. Research progress and future study on physicochemical, nutritional, and structural characteristics of canola and rapeseed feedstocks and co-products from bio-oil processing and nutrient modeling evaluation methods // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2022. P. 1-7. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033686>

3. Phytosterol Contents of Edible Oils and Their Contributions to Estimated Phytosterol Intake in the Chinese Diet / Yang R. et al. // *Foods*. 2019. № 8. P. 334. <https://doi.org/10.3390/foods8080334>
4. Improving fiber utilization from rapeseed and sunflower seed meals to substitute soybean meal in pig and chicken diets: A review / Lannuzel C. et al. // *Anim. Feed Sci. Technol.* . 2022. № 285. P. 115-213. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115213>
5. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. / Paziuk V. M. et al. // *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. № 12. P. 39-48. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-33>
6. Designing the structure and determining the mode characteristics of the grain dryer based on thermosiphons. / Bezbah I. et al. // *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*. 2022., No. 8 Vol. 2. P. 54-61.
7. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. / Burdo O. et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, . 2019. № 5. P. 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
8. Research On Sunflower Seeds Drying Process In A Monolayer Tray Vibration Dryer Based On Infrared Radiation. / Bandura V. et al. // *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019., No. 1 Vol. 57. P. 233-242.
9. Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. / Bulgakov V. et al. // *Agronomy Research*, (2), ; 2018., No. 2 Vol. 16. P. 349-356. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>
10. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-power supply / Bandura V. et al. // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018., No. 8 Vol. 4. P. 50-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
11. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes, / Burdo O. et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017., No. 11 Vol. 4. P. 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
12. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments / Guzik P. et al. // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022., No. 29 Vol. 62. P. 7989-8008. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871>
13. An, N-n., Li, D., Wang, L.-j., Wang, Y. Factors affecting energy efficiency of microwave drying of foods: an updated understanding. // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022 DOI: 10.1080/10408398.2022.2124947. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2124947>
14. Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. Intermittent microwave drying of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. // *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 2014., 2(1), 32-36. Available at: <http://www.jebas.org/wp-content/uploads/2014/09/Zhang-et-al-JEBAS1.pdf>
15. Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds / Zhao Y. et al. // *Food chemistry*. 2017. № 228. P. 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.141>
16. Qingxi L., Caixia S., Boping T. Effect of microwave drying on rapeseed's dehydrating characteristics and quality properties. *QUALITY, NUTRITION AND PROCESSING: Processing Technology*. 2015., 189-191.
17. Oliveira, M.E.C., Franca, A.S. Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 2002., 53(4), P. 347–359; [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00176-5)
18. Li, Z. Y., Wang, R. F., Kudra, T. Uniformity Issue in Microwave Drying. *Drying Technology*, 2011., 29, P. 652-660. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.521963>.
19. A Continuous Power-Controlled Microwave Belt Drier Improving Heating Uniformity. / Bae S. H. et al. // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, . 2017. № 275. P. 527-529. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690849>
20. Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. / Hemis M. et al. // *Biosystems Engineering*, November. 2015. № 139. P. 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
21. Apolinar, P., Joaquin, M.Z. Mathematical Modeling of a Continuous Vibrating Fluidized Bed Dryer for Grain. *Drying Technology*, 2012., 30(13), 1469–1481. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.690123>

Отримано в редакцію 29.06.2023  
Прийнято до друку 29.11.2023

Received 29.06.2023  
Approved 29.11.2023