

УДК 631.365

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-4

Гевко І. Б., Довбуш Т. А., Бучинський В. М., Никитюк А. Г., Брикса А. О.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

РОЗРОБЛЕННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З МІКРОХВИЛЬОВИМИ ОБ'ЄМНИМИ НАГРІВАЧАМИ ОСНАЩЕНОЇ ШНЕКАМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ, ПЕРЕМІШУВАННЯ ТА РОЗПУШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Сушіння є серйозним етапом післязбиральної обробки зернової сировини, оскільки безпосередньо детермінує збереження її якісних показників та забезпечує перспективу довготривалого зберігання. Тому, з метою забезпечення ефективності даного процесу, було проведено розроблення конструкції сушильної установки, інтегрованої з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами та оснащеної гвинтовими елементами, функціонально призначеними для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів, що реалізується шляхом проведення структурно-схемного синтезу із застосуванням морфологічного аналізу. При побудові моделі системи сушильної установки з морфологічної таблиці до першого ієрархічного рівня були віднесені пріоритетні ознаки, що максимально детермінують ефективність та реалізацію технологічного процесу сушіння зернових матеріалів. До пріоритетних ознак (першого ієрархічного рівня) були віднесені: тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном та діелектричний патрубков. Слід зазначити, що об'єм камери нагріву має пряму кореляційну залежність від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, у зв'язку з чим ці елементи інтегровано в одну підгрупу ієрархічного рівня. Крім того, критичним технологічним аспектом функціонування установки є забезпечення ефективного видалення вологи. Вентиляторну систему охолодження було віднесено до другого ієрархічного рівня. Усі інші структурні елементи класифіковано як третій ієрархічний рівень. На підставі проведеного дослідження було розроблено та запатентовано дві конструкції сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами.

Ключові слова: мікрохвильовий об'ємний нагрівач, НВЧ резонатор, магнетрон, морфологічний аналіз, структурно-схемний синтез, гвинтовий

Постановка проблеми. Процес сушіння є критичною стадією післязбиральної обробки зернової сировини, оскільки він детермінує збереження її якісних показників та перспективу довготривалого зберігання. Традиційні методи конвективного або комбінованого сушіння, незважаючи на їхнє багаторічне вдосконалення, характеризуються значною енергоємністю та пролонгованою тривалістю. Крім того, ці методи часто спричиняють локальний термічний вплив (перегрів) на зернову масу. Такий термічний стрес ініціює деградацію структурно-механічних властивостей зернівки, редукує її схожість та знижує харчову цінність кінцевого продукту. В контексті сучасних викликів, що обумовлені енергетичною нестабільністю та підвищенням вимог до економічної ефективності агропромислового комплексу, актуалізується необхідність пошуку та імплементації інноваційних технологій сушіння. Першочерговими завданнями для альтернативних методів є забезпечення гомогенності прогріву матеріалу, мінімізація енергетичних витрат та оптимізація (скорочення) часових параметрів технологічного процесу.

Одним із перспективних напрямів у сфері підвищення ефективності сушіння є імплементація технології мікрохвильового (НВЧ) об'ємного нагріву. Цей метод забезпечує безпосередню передачу енергії в об'єм зернового матеріалу, що детерміновано його діелектричними властивостями. Зазначений підхід сприяє прискореній десорбції вологи, зокрема з внутрішніх шарів зернівки, і здатен суттєво підвищити загальну енергоефективність процесу сушіння. Таким чином, виникає необхідність у проведенні комплексних досліджень, спрямованих на пошук технологічних параметрів сушіння зернової сировини під впливом НВЧ випромінювання.

Аналіз останніх досліджень. В контексті сучасних умов, що характеризуються підвищеною енергоємністю традиційних технологій сушіння, актуальною науково-технічною проблемою залишається пошук та розроблення методів, які забезпечують інтенсифікацію процесу при одночасній мінімізації питомих енергетичних витрат та запобіганні деградації біологічних властивостей зернової сировини.

Класичні (конвективні) методи сушіння зернового матеріалу характеризуються низкою суттєвих недоліків, зокрема: низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) сушильних установок, ускладненим контролем технологічного процесу та проблемою запобігання локальному перегріву зерна [1]. Додатково слід акцентувати увагу на проблемі недостатньої гомогенності прогріву матеріалу, що сприяє формуванню та активізації шкідливої мікрофлори [2].

Технологія використання НВЧ–випромінювання є предметом активного наукового дослідження впродовж останніх років у різноманітних секторах промисловості, включно з агропромисловим комплексом. Зокрема, у працях Волгушевої Н. В. та Угольнікова О. П. [3] досліджувалися процеси сушіння щільного шару зернових культур (пшениці, ячменю, вівса, гречки) при мікрохвильовому нагріванні. У рамках цих досліджень аналізувалося як безперервне, так і переривчасте підведення мікрохвильової енергії. Також дослідженню кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі присвячена праця Бурдо О. Г., Ярового І. І. та Ружицької Н. В. [4].

Міжнародні дослідження також верифікують перспективність застосування мікрохвильової енергії в процесах сушіння. Зокрема, Hemis, Choudhary та Watson [5] розробили математичну модель одночасного мікрохвильового та конвективного сушіння насіння пшениці, яка дозволяє здійснити точний опис процесів тепломасообміну. Схожі порівняльні дослідження, що охоплювали мікрохвильове та інфрачервоне сушіння, були виконані Chua і Chou [6]. Ними продемонстровано перевагу переривчастого мікрохвильового режиму в контексті збереження якісних показників біопродуктів. Комплексне узагальнення фізичних основ, моделей тепломасообміну та практичних аспектів застосування мікрохвильової енергії для харчових та аграрних матеріалів представлено у монографії Feng, Yin та Tang [7].

Крім того, при сушінні зерна широко використовуються різні типи шнекових механізмів необхідних для його транспортування та перемішування і розпушування при видаленні вологи. Проблематиці створення, дослідження та оптимізації гвинтових механізмів, що виконують функції транспортування, змішування та інші технологічні операції, присвячено значний масив наукових праць. Науковці зосереджували свою увагу як на розробленні та впровадженні методик для синтезу нових конструктивних рішень гвинтових механізмів [8–13], так і на теоретичному та експериментальному аналізі аспектів їх функціонування [14–25]. Відтак, проблематика розроблення, дослідження аспектів функціонування, розрахунку та визначення раціональних параметрів гвинтових механізмів знайшла своє відображення у працях таких науковців, як Б. Гевко [17], Р. Рогатинський [17–19, 20, 25], О. Ляшук [11, 12, 18, 20–25], В. Гудь [10, 18–24], О. Дмитрів [16, 19, 22] та низки інших дослідників. Проте незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, актуальність розроблення та вивчення нових конструктивних рішень зазначених механізмів залишається високою. Це детерміновано тим, що різні сектори економіки, зокрема сільськогосподарське виробництво, висувають специфічні вимоги до виконання технологічних операцій, що зумовлює необхідність адаптації та модернізації існуючих, а також синтезу принципово нових конструкцій.

Резюмуючи результати аналізу наукових джерел, правомірно стверджувати, що тематика сушіння зернового матеріалу із застосуванням мікрохвильових (НВЧ) об'ємних нагрівачів характеризується високим ступенем актуальності. Ця актуальність обумовлена необхідністю розроблення енергоефективних та технологічно досконалих методів післязбиральної обробки, здатних мінімізувати термічну деградацію сировини.

Метою роботи. Метою роботи є розроблення конструкцій сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами оснащених гвинтовими елементами для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів шляхом проведення структурно–схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Сушіння зернових матеріалів є однією з обов'язкових і пріоритетних операцій під час збору врожаю у сільському господарстві, бо інакше при зберіганні вологе зерно спарюється і втрачає свою придатність до подальшого зберігання та використання. Операцію сушіння зернового матеріалу проводять із застосуванням різноманітних типів установок. Ці установки у якості енергетичних засобів споживають природний газ, мазут та солярку, що є досить дорого і енерговитратно для великих та малих фермерських господарств. Крім того, вони також є досить дорогими у закупівлі, монтажі та обслуговуванні, що часто робить їх недосяжними для дрібних фермерів та с/г підприємств.

Технологічний процес із використанням сушильної установки, оснащеної мікрохвильовим об'ємним нагрівачем, реалізується у кілька ключових етапів, як показано на

рисунку 1. На початковому етапі процесу зерно з бункера 1 через перевантажувальний патрубок 2 самопливом надходить до мікрохвильового об'ємного нагрівача 3. Далі здійснюється мікрохвильова обробка з допомогою мікрохвильового об'ємного нагрівача 3, який містить НВЧ-резонатор 4, діелектричний патрубок 5 та магнетрон 6. Блок управління 7 задає режим роботи магнетрона 6, який генерує НВЧ-хвилі. Під дією цих хвиль відбувається об'ємне нагрівання зерна. При цьому температура нагрітого зерна постійно контролюється давачем температури 8, встановленим у перевантажувальному патрубку 9. Швидкість проходження зерна через об'ємний нагрівач регулюється шнековим дозатором 11. Це забезпечує відповідну модель транспортування матеріалу та необхідний час реалізації основної операції сушіння [7, 8]. Далі нагріте зерно після нагрівача спрямовується до камери попереднього охолодження 10, у якій розташовано лопатевий чи іншої конструкції шнек (на рисунку не показаний) для розпушування та перемішування матеріалу при його охолодженні (обдуві) вентилятором 16. З камери попереднього охолодження 10 зерно потрапляє до шнекового дозатора 11, з якого через перевантажувальний патрубок 12 надходить у камеру кінцевого охолодження 13 для подальшого охолодження (обдуву) вентилятором 15. Камера кінцевого охолодження 13 також оснащена лопатевим чи іншої конструкції шнеком (на рисунку не показаний) для розпушування та перемішування матеріалу при його охолодженні (обдуві) вентилятором 15. Швидкість переміщення зерна шнековим дозатором 11 регулюється частотою обертання шнека з електронного приводу шнекового дозатора 17. Далі зерно вивантажується через перевантажувальний патрубок 14, або, при потребі подальшого сушіння за визначенням його вологості вологоміром, може шнеком перевантажуватись до бункера 1 для повторного оброблення. Запропонована технологія дозволяє забезпечити дешевий та високоефективний процес сушіння зернового матеріалу.

Головним структурно-функціональним компонентом мікрохвильової сушильної системи є камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву. Зазначена НВЧ-камера являє собою основний робочий вузол сушильної установки, що призначений для здійснення об'ємного електромагнітного нагрівання матеріалу. Це нагрівання реалізується за рахунок впливу мікрохвильового випромінювання у визначеному діапазоні частот 300 МГц...300 ГГц. У контексті технології дегідратації зернових культур, НВЧ-камера забезпечує гомогенне (рівномірне) прогрівання всієї зернової маси в об'ємі. Цей ефект досягається завдяки глибокому проникненню електромагнітного поля у внутрішні шари матеріалу, що, відповідно, призводить до інтенсифікації процесу вологовидалення (сушіння) порівняно з традиційними конвективними методами.

Принцип дії камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву базується на фізичному явищі діелектричних втрат, які виникають у вологому діелектричному матеріалі під впливом змінного електромагнітного поля. Коли мікрохвильове випромінювання проходить крізь зернову масу, полярні молекули води прагнуть до орієнтації відповідно до вектора змінного електричного поля. Зважаючи на високу частоту цього поля (типово 2,45 ГГц), молекули не встигають завершити повну переорієнтацію, що спричиняє внутрішнє молекулярне тертя. Це тертя, у свою чергу, призводить до ефективного перетворення електромагнітної енергії на теплову. Таким чином, енергія поглинається об'ємно – по всьому внутрішньому об'єму матеріалу, що є відмінним від поверхневого нагріву, характерного для конвективних методів.

Для підвищення ефективності технологічного процесу конструктивне рішення камери нагріву передбачає низку функціональних вимог:

1. Гомогенний (рівномірний) розподіл електромагнітного поля у робочому об'ємі. Цей розподіл досягається шляхом застосування спеціалізованих елементів: хвилеводів, розсіювачів або систем механічного чи електродинамічного мішання поля.

2. Регулювання інтенсивності випромінювання. Контроль параметрів випромінювання здійснюється за допомогою керованого магнетрона та інтегрованого високовольтного модулятора.

3. Забезпечення радіаційної безпеки шляхом екранування робочої зони. Екранування необхідне для запобігання несанкціонованому витоку НВЧ-випромінювання за межі конструкції камери.

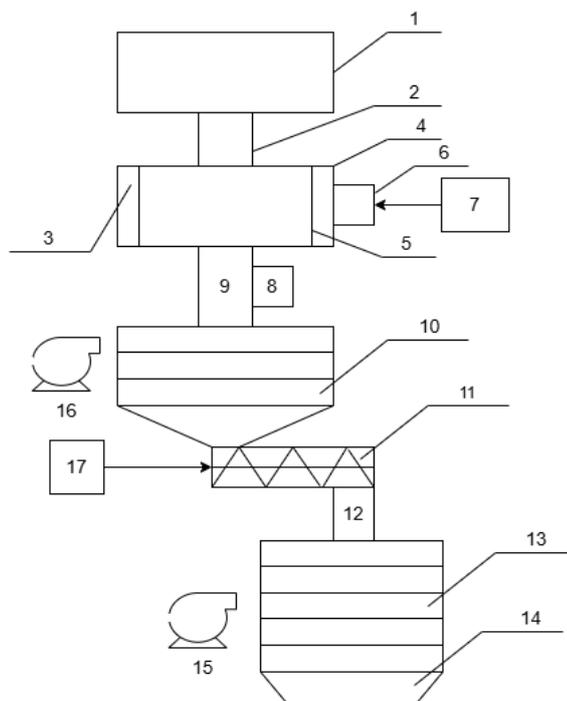


Рисунок 1 – Загальна схема мікрохвильової сушильної установки:

- 1 – бункер; 2, 9, 12, 14 – перевантажувальні патрубки; 3 – мікрохвильовий об'ємний нагрівач;
 4 – магнетрон з НВЧ-резонатором; 5 – діелектричний патрубок; 6 – магнетон;
 7 – блок управління магнетроном; 8 – датчик температури; 10 – камера попереднього охолодження; 11 – шнековий дозатор; 13 – камера кінцевого охолодження; 15, 16 – вентилятори;
 17 – електропривід шнекового дозатора з електронним керуванням

У типовій НВЧ-сушильній системі генерація мікрохвильового випромінювання здійснюється за допомогою магнетрона, після чого енергія транспортується у робочу камеру нагріву через хвилевід. Електромагнітна енергія поглинається матеріалом (у нашому випадку зерно), що ініціює підвищення її температури та процес пароутворення (випаровування вологи). Утворені пари необхідно відводити з робочої зони шляхом застосування примусової конвекції (поток повітря) або використання вакуумної системи. Обсяг теплової енергії, що генерується безпосередньо у матеріалі, визначається питомими діелектричними втратами.

На рисунку 2 зображено спрощену схему камери нагріву НВЧ. Основними її елементами є: магнетрон 1, який генерує електромагнітні коливання надвисокої частоти; камера нагріву 2, де розміщується об'єкт сушіння (наприклад, зерно); хвилі НВЧ 3, що багаторазово відбиваються від стінок камери, забезпечуючи рівномірний розподіл енергії; діелектричний патрубок 4, який слугує каналом для подачі мікрохвильового випромінювання від магнетрона до робочого об'єму.

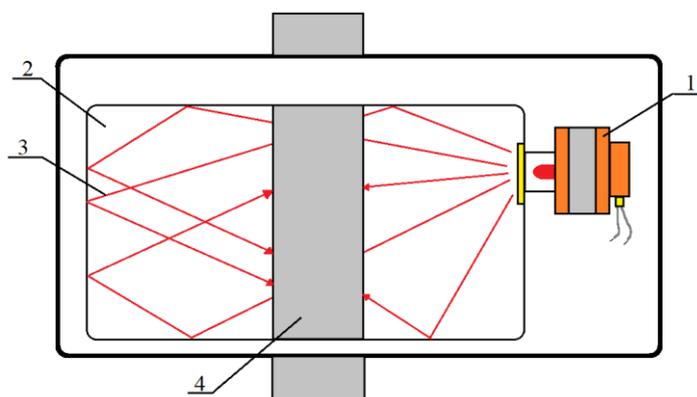


Рисунок 2 – Камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву:

- 1 – магнетрон; 2 – камера нагріву; 3 – НВЧ хвилі; 4 – діелектричний патрубок

Відтак, з метою здешевлення даного процесу, нами розроблено технологічний процес сушіння зернових культур в сушильних камерах з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами і для його реалізації проведено пошук конструкцій відповідних систем шляхом їх генерування за допомогою вдосконаленого метод синтезу за допомогою морфологічного аналізу [9–13].

За результатами експертної оцінки впливу багатофакторних чинників на ефективність операцій технологічного процесу термічної обробки (сушіння) зернових культур в сушильних камерах, оснащених мікрохвильовими об'ємними нагрівачами, було ідентифіковано ключові морфологічні ознаки конструктивних елементів сушильних установок, а також встановлено їхні міжсистемні корелятивні зв'язки. Дана ідентифікація забезпечила емпіричну основу для побудови морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів (табл. 1). На базі зазначеної таблиці було, відповідно, синтезовано модель системи (рис. 3), що репрезентує «Сушильну установку з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами». В процесі структурно-схемного синтезу сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами, на основі детального експертного аналізу, було обрано та зафіксовано наступні основні морфологічні ознаки конструктивних елементів системи: тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок, термодатчик (діапазон вимірювання, тип показів), вентиляторна система охолодження, гвинтовий робочий орган (профіль спіралі, конструкція спіралі, конструкція патрубку), бункер (профіль, об'єм, наявність додаткових елементів, принцип вивантаження), механізм розвантаження, опорно-руховий механізм.

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів сушильних установок з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами

1. Тип приводу	2. Камера нагріву	3. Магнетрон з НВЧ-резонатором	4. Блок керування магнетроном	5. Діелектричний патрубок
1.1. Електропривід нерегульований 1.2. Електропривід регульований	2.1. Мала (до 32 л) 2.2. Середня (до 100 л) 2.3. Велика (більше 100 л)	3.1. Малий (500...700 Вт) 3.2. Середній (700...900Вт) 3.3. Великий (більше 900 Вт)	4.1. Трансформа-торний 4.2. Інверторний 4.3. Імпульсний	5.1. Пластмасовий 5.1. Скляний 5.3. Текстолітовий
Термодатчик		8. Вентиляторна система охолодження		
6. Діапазон вимірювання	7. Тип показів			
6.1. 0–120 °С 6.2. +40–+120 °С 6.3. –50–+150 °С	7.1. Механічний 7.2. Аналоговий 7.3. Стрілочний 7.4. Електричний (резистивний)	8.1. Вертикальна (повітря подається знизу вгору через шар зерна) 8.2. Горизонтальна (повітря подається збоку або з торця сушильної камери) 8.3. Комбінована (поєднання вертикального і горизонтального напрямків)		
Гвинтовий робочий орган				
9. Профіль спіралі		10. Конструкція спіралі	11. Конструкція патрубку	
9.1. Суцільна 9.2. Стрічкова 9.3. Лопатева без регулювання отворів 9.4. Лопатева з регулюванням отворів 9.5. Гофрована 9.6. З розрізами, отворами чи вирізами 9.7. Вузькострічкова 9.8. Широкострічкова 9.9. Еластична 9.10. Із загинами на зовнішній кромці спіралі 9.11. Пружинна (кругла) 9.12. Зі змінними додатковими елементами		10.1. З одним кроком 10.2. З різним кроком 10.3. Однозахідна 10.4. Багатозахідна 10.5. Однакова 10.6. Різна 10.7. З валом 10.8. Безвальна 10.9. Циліндрична 10.10. Конічна 10.11. Лівостороння 10.12. Правостороння	11.1. U-подібний 11.2. Круглий 11.3. Конічний 11.4. Оригінальної форми	

Бункер			
12. Профіль	13. Об'єм	14. Наявність додаткових елементів	15. Принцип вивантаження
12.1. Суцільний	13.1. Постійний	14.1. Використовуються	15.1. Гравітаційний
12.2. Секційний	13.2. Змінний	14.2. Не використовуються	15.2. Активний
16. Механізм розвантаження		17. Опорно-руховий механізм	
16.1. Розвантажувальний отвір з шибером		17.1. Без можливості зміни розташування конструкції	
16.2. Розвантажувальний патрубок з шибером		17.2. З можливістю зміни розташування конструкції	

При побудові моделі системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» з морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів до першого ієрархічного рівня були віднесені найголовніші ознаки, від яких максимально залежить виконання технологічного процесу сушіння зернових. Це зокрема тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок. При чому об'єм камери нагріву напряму залежить від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, а, тому, їх віднесено до одної підгрупи ієрархічного рівня. Також важливим аспектом у діяльності установки є видалення вологи. Відтак, вентиляторну систему охолодження ми віднесли до другого ієрархічного рівня. Усі інші елементи були віднесені до третього ієрархічного рівня. Це, зокрема, діапазон вимірювання і тип показів термодатчика, профіль спіралі, конструкція спіралі та конструкція патрубку гвинтового робочого органу, профіль, об'єм, наявність додаткових елементів та принцип вивантаження бункера, механізм розвантаження та опорно-руховий механізм.

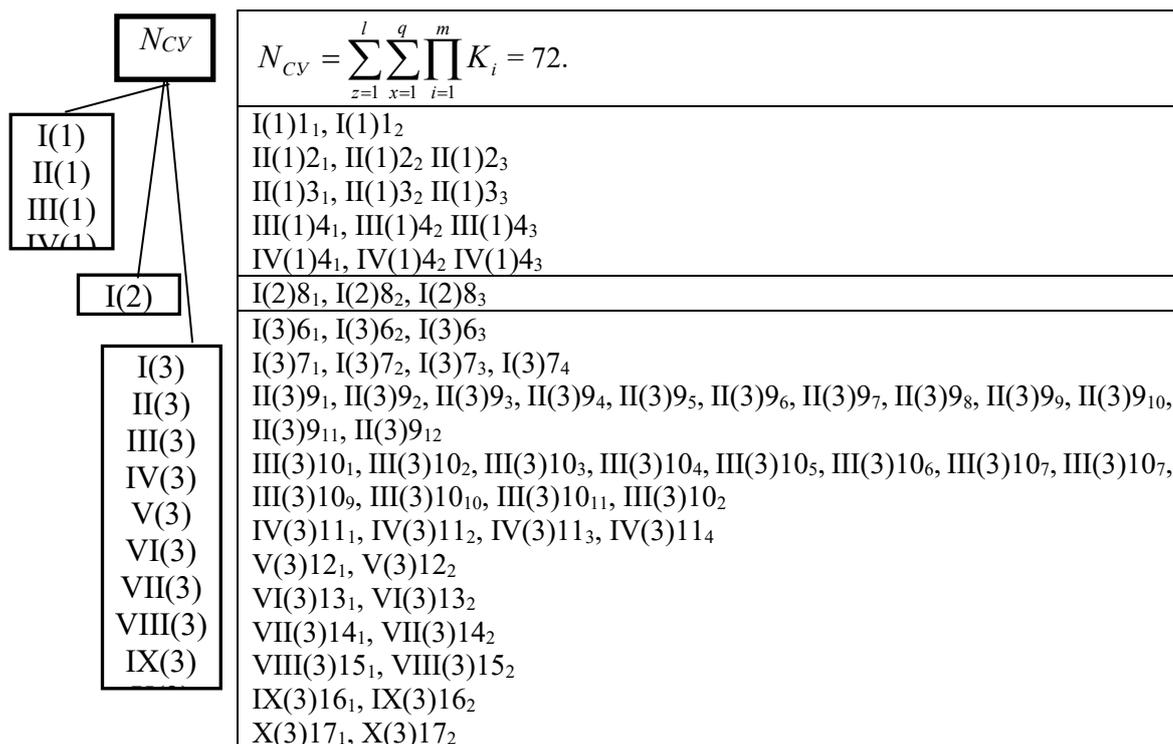


Рисунок 3 – Модель системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами»: I-X – підгрупи ієрархічного рівня; (1)-(3) – відповідні ієрархічні рівні

На основі проведеного дослідження нами розроблено конструктивну схему мікрохвильової сушильної установки (рис. 4), а також подано заявки на отримання патентів на корисну модель України та отримано патенти на корисну модель України «Сушильна камера з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» [26] та «Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» [27]. Розроблена мікрохвильова сушильна установка (рис. 4) включає бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу 1, з якого зернова сировина потрапляє у діелектричний патрубок 2 камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3, де завдяки магнетрону з НВЧ-резонатором 4, який генерує електромагнітні коливання

надвисокої частоти, зерно нагрівається і випаровує вологу. Температура нагрівання зерна контролюється термодатчиком 5 з блоку управління елементами установки 21. Тривалість проходження зерна у камері надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3 регулюється шнековим дозатором 11, частота обертання якого також визначається електронним керуванням електроприводу шнекового дозатора 12 з блоку управління елементами установки 21. З камери надвисокочастотного (НВЧ) нагріву 3 зерно з діелектричного патрубку 2 потрапляє до камери (бункера) попереднього охолодження 6, де зерно піддається обдуву вентиляторами 8 і завдяки гвинтовому робочому органу для змішування та розпушування сипкого матеріалу 7 інтенсивно переміщується та осушується. Далі через перевантажувальний патрубок 10 зерно потрапляє до шнекового дозатора 11, а з нього через перевантажувальний патрубок 13 до камери (бункера) кінцевого охолодження 14, де проводиться аналогічна процедура, як і в камері (бункері) попереднього охолодження 6. З камери (бункера) кінцевого охолодження 14 зерно через перевантажувальний патрубок 15 потрапляє до вивантажувального шнека 16. Якщо при заборі проб на вологість зерно відповідає встановленим нормам, то проводиться його вивантаження у відповідну ємність через розвантажувальний отвір з шибром 18. Якщо існує потреба у його подальшому просушуванні, то його з допомогою перевантажувального гнучкого шнека 19 пересипають у бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу 1 для повторного проведення процесу сушіння. Електроприводи гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу 9 та вивантажувального шнека 17 керуються з блоку управління елементами установки 21.

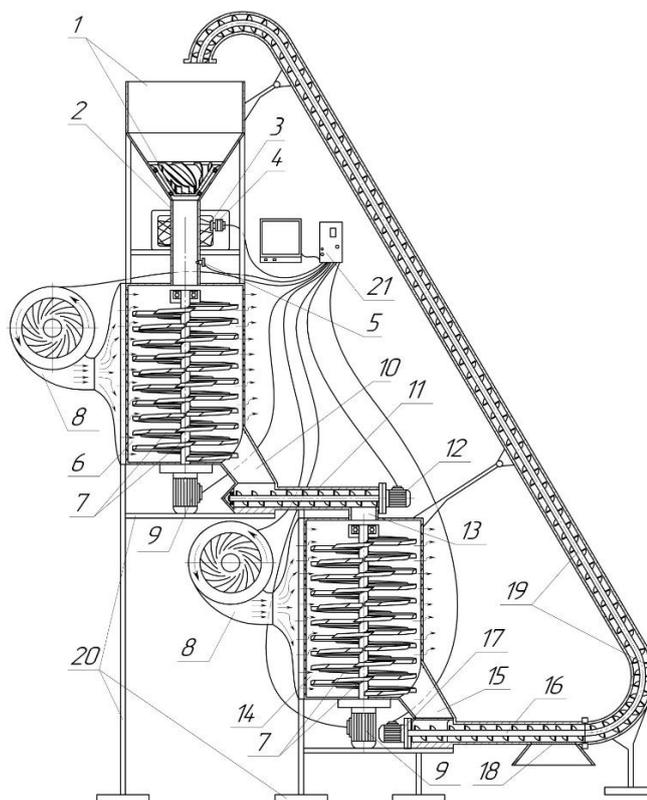


Рисунок 4 – Конструктивна схема розробленої мікрохвильової сушильної установки: 1– бункер з механізмом розпушування сипкого матеріалу; 2 – діелектричний патрубок; 3 – камера надвисокочастотного (НВЧ) нагріву; 4 – магнетрон з НВЧ–резонатором; 5 – термодатчик; 6 – камера (бункер) попереднього охолодження; 7 – гвинтові робочі органи для змішування та розпушування сипкого матеріалу; 8 – вентилятори; 9 – електроприводи гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу; 10, 13, 15 – перевантажувальні патрубки; 11 – шнековий дозатор; 12 – електропривід шнекового дозатора з електронним керуванням; 14 – камера (бункер) кінцевого охолодження; 16 – вивантажувальний шнек; 17 – електропривід вивантажувального шнека; 18 – розвантажувальний отвір з шибром; 19 – перевантажувальний гнучкий шнек; 20 – опорно–руховий механізм; 21 – блок управління елементами установки

Перевагами гвинтових робочих органів для змішування та розпушування сипкого матеріалу (рис. 5) є можливість регулювання величини зазору між лопатями спіралей для інтенсифікації процесу змішування і розпушування зернових матеріалів різних фракцій. В конструкції розробленої мікрохвильової сушильної установки (рис. 4) їхньою функцією є переміщення зернового матеріалу при його осушенні (обдуві) в камерах (бункерах) попереднього і кінцевого охолодження знизу вгору, де зерно проковзуючи по спіралях попадатиме в зазор між лопатями спіралей і просипається донизу, забезпечуючи можливість його кращого осушення (обдув).

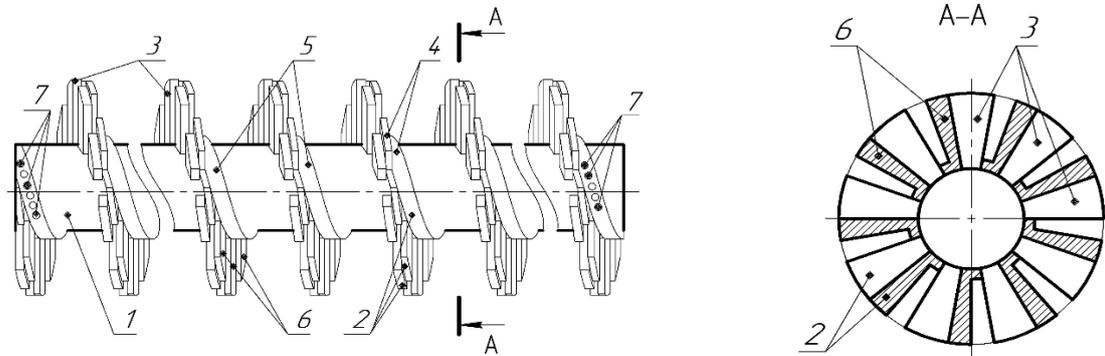


Рисунок 5 – Гвинтовий робочий орган для змішування та розпушування сипкого матеріалу [28]:
1 – вал; 2 – гвинт; 3 – базова лопатева спіраль; 4 – спіраль Г-подібної форми; 5 – внутрішня частина спіралі Г-подібної форми; 6 – зовнішня частина спіралі Г-подібної форми

Висновок. Проведено розроблення конструкції сушильної установки з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами оснащеної гвинтовими елементами для транспортування, перемішування та розпушування матеріалів шляхом проведення структурно-схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу. При побудові моделі системи «Сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами» з морфологічної таблиці ключових ознак конструктивних елементів до першого ієрархічного рівня були віднесені найголовніші ознаки, від яких максимально залежить виконання технологічного процесу сушіння зернових. Це зокрема тип приводу, камера нагріву, магнетрон з НВЧ-резонатором, блок керування магнетроном, діелектричний патрубок. При чому об'єм камери нагріву напряму залежить від потужності магнетрона з НВЧ-резонатором, а тому, їх віднесено до одної підгрупи ієрархічного рівня. Також важливим аспектом у діяльності установки є видалення вологи. Вентиляторну систему охолодження віднесено до другого ієрархічного рівня. Усі інші елементи були віднесені до третього ієрархічного рівня. Це, зокрема, діапазон вимірювання і тип показів термодатчика, профіль спіралі, конструкція спіралі та конструкція патрубку гвинтового робочого органу, профіль, об'єм, наявність додаткових елементів та принцип вивантаження бункера, механізм розвантаження та опорно-руховий механізм. На основі проведеного дослідження розроблено і запатентовано конструкції сушильної камери з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами та Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами.

Інформаційні джерела

1. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Борта А. В. Сушіння зерна. Одеса: Видавництво «Одеса», 2021. 348 с.
2. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Янюк Т. І., Рибчинський Р.С. Сушіння та зберігання зерна: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 395 с.
3. Волгушева Н. В., Угольніков О. П. Кінетика мікрохвильового сушіння зерна в нерухомому шарі. *Холодильна техніка та технологія*. 2023. № 59. С. 128-135. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>
4. Дослідження кінетики сушіння нерухомого шару зерна в електромагнітному полі / О. Г. Бурдо, І. І. Яровий, Н. В. Ружицька // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2010. Вип. 38(1). С. 101-105. Режим доступу: URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np201038%281%2927>

5. Hemis M., Choudhary R., Watson D.G. A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds. *Biosystems Engineering*. 2012. Vol. 111. P. 220-227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.002>
6. Chua K.J., Chou S.K. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science and Technology*. 2005. Vol. 40. P. 23-39. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.00903.x>
7. Hao Feng, Yun Yin, Juming Tang. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*. 2012. Vol. 4, Iss. 2. P. 89-106. URL: <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
8. Васильків В. В., Гевко І. Б., Бабарика С. Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ. 2009. №2. С. 170-173.
9. Гевко І. Б. Структурний синтез імпульсних запобіжних муфт і шнеків методом морфологічного аналізу. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль. 2012. № 3(67). С. 121-134.
10. Гевко І. Б., Гудь В. З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Технічні науки. 2019. Вип. 2(33). С. 25-33. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).25-33](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).25-33)
11. Гевко І. Б., Ляшук О.Л., Клендій В.М. Синтез гвинтових конвеєрів з гнучкими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. Львів. 2014. № 18. С. 112-121.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Пік А. І., Марчук Н. М., Маруніч О. П. Синтез гвинтових транспортерів–змішувачів. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*. Випуск 45. Луцьк. 2020. С. 35-44. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.380>
13. Гевко І. В., Довбуш Т., Цьонь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*. Вип. 47. Луцьк. 2021. С. 63-72. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.649>
14. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. Тернопіль. 2011. Том 16. № 1. С. 69-77.
15. Гевко І. Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, спец.: 05.20.01. Луцьк, 1997. 18 с.
16. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
17. Гевко Б. М., Данильченко Б. М., Рогатинський Р. М., та ін. Механізми з гвинтовими пристроями. Львів: Світ. 1993, 208с.
18. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
19. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дмитрів Д. В., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами–змішувачами. *Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей*. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93. URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.381>
20. Hud V., Rogatynskyy R., Hevko I., Lyashuk O., Pic A., Huryk O. Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest, 2020. Vol. 60, № 1. P. 29-36. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-03>
21. Lyashuk O. L., Hevko I. B., Hud V. Z., Tkachenko I. G., Hevko O. V., Sokol M. O., Tson O.P., Kobelnyk V.R., Shmatko D.Z., Stanko A.I. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw – fluid medium" system. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Bucharest. 2022. Vol. 68. № 3. P. 499-510. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-68-49>
22. Hud V., Hevko, I., Lyashuk O., Hevko O., Sokil M., Shust I. Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations. *Karaganda*. 2020. № 2 (98). P. 119–126. URL: <https://doi.org/10.31489/2020ph2/119-126>

23. Hevko, I., Lyashuk, O., Sokil M., Hud V., Solobodian L., Vovk Yu. Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. *Karaganda State University Publishing house*. Karaganda. 2019. № 2 (94). P. 73–81. URL: <https://doi.org/10.31489/2019Ph2/73-81>

24. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.–V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. № 4. P. 870. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>

25. Rogatinskiy R., Hevko I., Dyachun A., Skyba O., Melnychuk A. Feasibility study of improving the transport performance by means of screw conveyors with rotary casings. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra. 2019. № 4. P. 140–145. URL: <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0025>

26. Сушильна камера з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами. Пат. на корисну модель 154022 Україна. № u202301515; заявл. 07.04.2023р.; опубл. 28.09.2023р., Бюл.№39.

27. Мобільна автомобільна сушильна установка з мікрохвильовими об'ємними нагрівачами. Пат. на корисну модель 155884 Україна. № u202303608; заявл. 26.07.2023р.; опубл. 18.04.2024р., Бюл.№16.

28. Гвинтовий робочий орган змішувача. Пат. на корисну модель 153774 Україна. №u202301002; заявл. 13.13.2023р.; опубл. 24.08.2023р., Бюл.№34.

Hevko I., Dovbush T., Buchinsky V., Nikityuk A., Briksa A.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

DEVELOPMENT OF A DRYING UNIT WITH MICROWAVE VOLUME HEATERS EQUIPPED WITH SCREWS FOR TRANSPORTING, MIXING AND DISSOLVING MATERIALS

Drying is a serious stage of post-harvest processing of grain raw materials, as it directly determines the preservation of its quality indicators and ensures the prospect of long-term storage. Therefore, in order to ensure the efficiency of this process, a design of a drying unit integrated with microwave volumetric heaters and equipped with screw elements functionally designed for transporting, mixing, and loosening materials was developed. This is implemented by conducting structural-schematic synthesis using morphological analysis. When building a model of the system "Drying unit with microwave volumetric heaters" using a morphological table of key features of structural elements, priority features that maximally determine the efficiency and implementation of the technological process of drying grain materials were assigned to the first hierarchical level. The priority features (of the first hierarchical level) included: drive type, heating chamber, magnetron with microwave resonator, magnetron control unit, and dielectric nozzle. It should be noted that the volume of the heating chamber has a direct correlation with the power of the magnetron with a microwave resonator, and therefore these elements are integrated into one subgroup of the hierarchical level. In addition, a critical technological aspect of the plant's operation is ensuring effective moisture removal. The fan cooling system was assigned to the second hierarchical level. All other structural elements are classified as the third hierarchical level. It includes the measurement range and type of indication of the temperature sensor, the profile and design of the spiral, the design of the screw working body nozzle, the profile, the volume, the presence of additional elements and the principle of unloading the hopper, the unloading mechanism and the supporting and moving mechanism. Based on the research conducted, the designs "Drying chamber with microwave volumetric heaters" and "Mobile automobile drying unit with microwave volumetric heaters" were developed and patented (registration certificate).

Key words: *microwave volume heater, microwave resonator, magnetron, morphological analysis, structural-schematic synthesis, screw.*

Дата першого надходження
статті до видання
06.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
15.11.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.