

ОБГРУНТУВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ З НАСІННЯМ РІПАКУ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ

Бандура В.М., д-р. техн. наук, професор
Національний університет біоресурсів і природокористування Укаріни, м. Київ

В харчовій промисловості, в основному, використовуються технології конвективного сушіння зернових і олійних культур, що реалізовані в різноманітних за конструкціями сушарках: шахтних, стрічкових, барабанних, в яких передача теплоти до сировини реалізується за допомогою сушильного агента, нагрітого повітря. Перспективним способом при організації процесу сушіння є технологія мікрохвильової обробки насіння, що має цілий ряд відмінностей від традиційних методів зневоднення. Нагрів за рахунок мікрохвильового опромінення забезпечує підведення енергії до об'єму матеріалу, а температурою нагрівання легко керувати.

У статті представлені теоретичні та експериментальні дослідження діелектричного нагріву насіння ріпаку в процесі сушіння в мікрохвильовому полі. Проаналізовано математичні моделі тепломасообміну, розроблені для моделювання процесів мікрохвильового сушіння, і обговорені діелектричні властивості олійних культур в залежності від вологості та температури. Принцип перетворення НВЧ - енергії в теплоту заснований на ефективному поглинанні вологою продукту, що нагрівається, підведеної до нього НВЧ - енергії. При цьому теплота, що генерується в усьому об'ємі оброблюваного продукту, і що підводиться в робочу камеру НВЧ - енергія практично повністю поглинається насінням. Інтенсивність нагрівання насіння ріпаку залежить від його діелектричних властивостей і напруженості мікрохвильового поля, що створює випромінювач.

Коефіцієнт діелектричних втрат насіння ріпаку в значній мірі залежить від вологовмісту, тобто вода відіграє основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві. Нелінійна залежність коефіцієнта діелектричних втрат від вологості обумовлена різноманітністю форм зв'язку вологи в насінні ріпаку. Зменшення значення коефіцієнта діелектричних втрат, з підвищенням температури ріпаку можна пояснити активними втратами води при нагріванні насіння.

Ключові слова: насіння ріпаку, НВЧ-енергія, моделювання, сушіння, коефіцієнта діелектричних втрат.

Формулювання проблеми. Останніми роками в Україні на фоні прогресу в агротехніці і селекції спостерігається зростання посівних площ під ріпак. Якщо порівнювати ріпак, наприклад, з соняшником, то в цієї рослини дешевша собівартість і ширший спектр вживання. Ріпак зростає при відносно низькій температурі. Коротша сівозміна. Це коштвна кормова культура, як у вигляді зелених кормів, так і у вигляді шроту, який як компонент додається в комбікорми. Чудовий попередник для інших сільськогосподарських культур, який покращує агрофізичний і фіто санітарний склад ґрунту. Ріпакову соломку використовують як паливо і для господарських потреб або здають підприємствам целюлозно-паперової промисловості. Олія ріпаку поставляється для харчової промисловості, лакофарбового виробництва або для продажу населенню. Але найперспективніше використання ріпакової олії – для виробництва біопалива. Збільшення привабливості використання біодизельного палива обумовлене надмірно високими цінами на нафту і нафтопродукти, загрозою зниження запасів нафти і екологічними аспектами. Останніми роками виробництво біодизельного палива значно розвивається в Європі, у зв'язку з чим частина сировини йде на експорт. Саме тому виробництво біодизелю є рентабельним, а значить і післязбиральна обробка та сушіння насіння ріпаку є актуальним. До процесу сушіння і зерносушарок висуваються вимоги підвищення якості насіння, що висушується, енергоефективності та екологічності проведення процесу сушіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сушіння зерна – одна з найважливіших і одночасно найбільш енерговитратних технологічних операцій післязбиральної обробки і зберігання зерна [1]. Розвиток подальшого удосконалення сушильних установок можна досягти використанням принципів адресного підведення енергії безпосередньо до матеріалу без проміжних теплоносіїв або ж у комбінації з ними. Проте недостатньо відомостей про математичний опис тепло - і масообмінних процесів, що відбуваються під час сушіння. Недостатньо вивчені властивості насіння ріпаку, що значно впливають на процес сушіння.

Метод нагріву матеріалів в мікрохвильовому електромагнітному полі зарекомендував себе як високоефективний щодо швидкості, енерговитрат і якості кінцевої продукції в процесах нагрівання і сушіння, про що свідчать результати аналізу експериментальних даних. Подальше вивчення процесу мікрохвильового нагріву потребує і аналітичних досліджень. Одним з яких є температура продукту, яка є базовою для оцінки

ефективності дії мікрохвильового поля і впливу вхідних параметрів на технологічний процес. Складання математичних моделей, які адекватно відображають фізичну сутність протікають явищ під дією мікрохвильового поля, пов'язане з певними труднощами, пов'язаними з багатьма факторами взаємодії електромагнітного поля з полярними діелектриками. Аналіз моделей про взаємодію мікрохвильового опромінення з продуктом засвідчив, що найбільш прийнятними математичними моделями теплопровідності для даної галузі досліджень, можна отримати, ґрунтуючись на моделях А.В. Ликова, наведених в [2]. Об'ємна природа нагріву матеріалу в мікрохвильовому полі припускає досліджувати продукт як середовище, в якому діють внутрішні позитивні джерела теплоти [3].

В статті авторів [4] наведено моделювання тепломасопереносу сушіння сільськогосподарських матеріалів в мікрохвильовій установці. Реакція харчового продукту з втратами на діелектричний нагрів призводить до швидкого переходу енергії у вологу, і до швидкого нагрівання та сушіння. Значне скорочення часу сушіння при мікрохвильовому підведенні енергії часто супроводжується поліпшенням якості продукту. Процес сушіння у мікрохвильовому полі є перспективною технологією зневоднення харчових продуктів. Потреба в поліпшенні інженерного проектування та оптимізації процесу мікрохвильового сушіння стимулювала розвиток методів комп'ютерного моделювання для прогнозування температури і вологості, а також розподілу температури в продукті, що підлягає сушінню. Крім того, проаналізовано нерівномірний нагрів, викликаний геометрією і складом продукту, а також неоднорідним розподілом електромагнітного поля в мікрохвильовому резонаторі. Запропоновано як поліпшити однорідність мікрохвильового нагріву. Математичне моделювання основане на моделях тепломасообміну, розроблених протягом багатьох років для моделювання мікрохвильового сушіння. Математичне моделювання включає і спрощені моделі, засновані на теорії дифузії, а також на спільному аналізі тепломасообміну з теорією Філіпа і де Фріза, теорією Ликова, методом Уітакера, і двухрегіональною моделлю.

У технічній літературі [5 – 7] і наукових статтях [8, 9] приведено достатньо даних щодо особливостей теплових і масообмінних процесів у електромагнітному полі НВЧ, математичного описання процесів нагрівання і сушіння [10] харчових продуктів і зернових культур. Деякі особливості математичного моделювання процесів сушіння і визначені моделі наведено в статтях [10, 11]. Практичну реалізацію сушіння в електромагнітному полі НВЧ захищено в роботах [12, 13] де вказано, що інтенсивність нагрівання не залежить від агрегатного стану матеріалу – тільки від його діелектричних властивостей і напруженості мікрохвильового поля створюваного випромінювачем.

Авторами [14] вивчено тепломасообмін, що відбувається при сушінні суміші 1:1 двох сортів насіння ріпаку з використанням комбінованого мікрохвильового і конвективного сушіння. Математична модель була адаптована для моделювання сумісного фізичного процесу. Використання мікрохвильової енергії під час сушіння насіння ріпаку призвело до більш швидкого сушіння в поєднанні з конвективним сушінням при низькій відносній вологості. Показано, що діелектричне нагрівання від мікрохвильового поля може мати певні переваги в операціях сушіння, що містять високу енергетичну ефективність та однорідніший розподіл вологовмісту.

Також вченими [15] було проведено дослідження щодо моделювання тепло- та масообміну між зерном та навколишнім повітрям під час сушіння за допомогою мікрохвильової сушарки з гарячим повітрям при низькій щільності НВЧ 0,2 Вт/г. Була адаптована математична модель для імітації висушування однієї насінини ріпаку, сої та кукурудзи. Процес переносу води моделювали на основі впливу тиску пари на молекули води всередині насінини. Було помічено, що коли різниця між тиском пари всередині зерна та навколишнім повітрям була вищою, ніж швидкість сушіння, то це призводило до утворення тріщин зерна. Моделювання мікрохвильового сушіння в гарячому повітрі показали, що швидкість сушіння зменшувалася за рахунок збільшення температури повітря всередині порожнини мікрохвильової установки для всіх досліджених олійних культур, через знижений перепад тиску пари між зерном і навколишнім повітрям. З іншого боку, швидкість сушіння збільшувалася, якщо температура вхідного повітря була знижена через різницю між двома тисками. Контролюючи атмосферне повітря, в насінні не будуть утворюватись тріщини.

Незважаючи на наявні успіхи в математичному моделюванні процесів сушіння в мікрохвильовому полі, все ж таки залишаються відсутні відповіді щодо діелектричних характеристик сільськогосподарської продукції, які можна вирішити проводячи експериментальні дослідження з різними сортами матеріалів.

Метою статті є теоретичне та експериментальне обґрунтування взаємодії електромагнітного поля надвисокої частоти з насінням ріпаку в процесі сушіння.

Виклад основного матеріалу дослідження. Процес трансформації енергії електромагнітного поля (НВЧ) в теплоту прийнято називати діелектричним нагріванням.

При дії змінного електромагнітного поля харчові продукти, що є діелектричними матеріалами, унаслідок діелектричних втрат нагріваються, тобто енергія поля перетворюється в теплоту.

Ефективність перетворення енергії змінного електромагнітного поля в теплоту пропорційна значенню коефіцієнта діелектричних втрат (коефіцієнта поглинання енергії), частоті коливань електромагнітних хвиль і квадрату напруженості електричного поля в продукті [15].

Оскільки напруженість поля обмежена електричною міцністю діелектрика, то для збільшення швидкості нагрівання підвищують частоту коливань. Для теплової обробки харчових продуктів використовують елект-

ромагнітні поля дециметрового діапазону. Це дозволяє отримувати високу швидкість нагріву оброблюваних виробів.

Важливою перевагою НВЧ-нагріву є можливість здійснення і практичного використання нового виду нагрівання, наприклад виборчого, рівномірного, надчистого, саморегульованого.

Виборче нагрівання засноване на залежності втрат в діелектриці від довжини хвилі, тобто залежності тангенса кута діелектричних втрат δ як функції довжини хвилі λ . При цьому в багатокомпонентній суміші діелектриків будуть нагріватись лише ті частини, де високий $\operatorname{tg} \delta$.

Рівномірне нагрівання. Зазвичай передача тепла здійснюється за рахунок конвекції, теплопровідності і випромінювання. Звідси неминучий температурний градієнт від оболонки до центру насінини, причому тим більший, чим менша теплопровідність матеріалу. Сповільнити великий градієнт температур можливо за рахунок збільшення тривалості обробки. У багатьох випадках лише за рахунок повільного нагрівання вдається уникнути перегрівання поверхневих шарів оброблюваного матеріалу. Прикладами таких процесів є випалення кераміки, отримання полімерних з'єднань і тому подібне. З допомогою НВЧ-енергії можна не лише рівномірно нагрівати діелектрик за його об'ємом, але і одержувати визначений розподіл температур. Тому при НВЧ-нагріві відкриваються можливості багатократного прискорення ряду технологічних процесів.

При конвективному сушінні зернових та олійних культур, де проходить процес нагрівання повітря газовим полум'ям, а також за допомогою дугових пальників, проходить забруднення самого насіння продуктами горіння. А при застосуванні НВЧ-поля продукт нагрівається із середини матеріалу через захисні оболонки їх твердих діелектриків з малими втратами, тому таке нагрівання є надчисте. В результаті забруднення практично повністю усуваються. Крім того, поміщаючи матеріал, що нагрівається, в інертний газ, можна усунути окислення його поверхні. Забруднення від діелектрика, через який підводиться НВЧ – енергія, вельми малі, оскільки в разі малих втрат навіть при пропусканні великої НВЧ – потужності цей діелектрик залишається практично холодним.

Саморегулююче нагрівання. При нагріванні для цілей сушіння, якість отриманого матеріалу істотно покращується так як висушений матеріал не нагрівається і його сушіння автоматично призупиняється. Пояснюється це тим, що тангенс кута діелектричних втрат такого продукту співвідносний вологовмісту. Тому зі зниженням вологості в процесі сушіння насіння витрати НВЧ-енергії зменшуються, а нагрівання продовжується лише в тих ділянках насінини, де ще залишилася підвищена волога.

Діелектричне нагрівання засноване на зсуві зарядів і пов'язаних з ними молекул при дії на речовину (продукт) змінного електромагнітного поля. На переміщення заряджених часток витрачається робота, яка із-за наявності внутрішнього міжмолекулярного тертя перетворюється на теплоту.

Існує декілька видів зсувів зарядів (диполів) в змінному електричному полі [16].

Діелектричні втрати при частотах, використовуваних для теплової обробки харчових продуктів, обумовлені в основному полярними молекулами води. Оскільки харчові продукти містять в значній кількості воду, то їх певною мірою можна вважати полярними діелектриками.

Якщо для провідників характерна наявність вільних електронів, то в діелектриках вільних електронів теоретично немає. Всі вони пов'язані з ядрами і входять в атоми і молекули речовини. Залежно від розподілу зарядів усередині молекули діелектрики підрозділяють на неполярні і полярні.

У неполярних молекулах розміщення зарядів симетрично. У відсутності зовнішнього електричного поля їх електричний дипольний момент дорівнює нулю. А полярні молекули володіють деяким електричним дипольним моментом і у відсутності зовнішнього поля.

Полярність зв'язку характеризується дипольним моментом μ , який дорівнює твору заряду електрона (елементарного заряду) e на відстань між центрами тяжіння всіх негативних і позитивних зарядів.

Розрізняють електронну, іонну, дипольну і структурну поляризації діелектрика. У НВЧ - діапазоні найбільшу питому вагу мають дипольна і структурна поляризації діелектрика.

Дипольна поляризація має місце в речовинах, що складаються з полярних, або дипольних молекул. Центри тяжіння позитивних і негативних зарядів в таких молекул не збігаються і утворюють диполь. Дипольною є молекула води, що грає основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві харчових продуктів [16].

У молекулі води атом кисню з шістьма зовнішніми електронами має дві наполовину заповнені p -орбіти і може утворювати два p - зв'язки з двома атомами водню, створюючи ковалентну молекулу H_2O . Оскільки p зв'язки перпендикулярні, то валентний кут між атомами водню має бути рівний 90° . В результаті вимірів кут зв'язку рівний не 90° , а 104° . Це пояснюється тим, що атоми водню, заряджені частково позитивно, взаємно відштовхуються, утворюючи електричний момент.

Таким чином, дипольна молекула під дією зовнішнього електричного поля набуває обертового моменту (момент обертання), утвореного парою зарядів $+q$ і $-q$. Момент обертання пропорційний μE . Під дією моменту обертання диполь орієнтується у напрямі поля [16].

З макроскопічної точки зору виділення тепла за рахунок струмів провідності і поляризації невід'ємне один від одного. Математично цей факт можна виразити, записавши відносну діелектричну проникність ϵ у вигляді [11]:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - jtgd), \quad (1)$$

$$\text{де } \varepsilon' = \frac{\varepsilon_a'}{\varepsilon_0}, \varepsilon'' = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$$

$\varepsilon_a', \varepsilon_a''$ – дійсна і уявна частки абсолютної діелектричної проникності середовища;

σ – питома провідність середовища;

ω – кутова частота;

$$\varepsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$$

$$\text{tg } \delta = \text{tg } \delta_1 + \text{tg } \delta_2 = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_a'} + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a'}$$

$$t\delta_1 = \frac{\varepsilon_a''}{\varepsilon_a'}, \quad t\delta_2 = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a'} = \frac{\varepsilon_b''}{\varepsilon_a'}, \quad \varepsilon_b'' = \frac{\sigma}{\omega}$$

Так при граничних коливаннях звичайно оперують з середніми за період значеннями потужності, тоді потужність теплових втрат рівна:

$$P_{\text{п}} = \frac{1}{2} \int_{\text{об}} \sigma \vec{E} \vec{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_{\text{об}} \omega \varepsilon_a'' \vec{E} \vec{E}^* dV + \frac{1}{2} \int_{\text{об}} \omega \mu_a'' \vec{H} \vec{H}^* dV, \quad (2)$$

де зірочкою відмічені комплексно спряжені значення комплексних амплітуд векторів напружень електричного \vec{E} та магнітного \vec{H} полів.

Питому потужність теплових втрат з (2) можна представити у вигляді:

$$P_{\text{пит}} = \frac{\omega \varepsilon_b''}{2} |E|^2 + \frac{\omega \varepsilon_a''}{2} |E|^2 + \frac{\omega \mu_a''}{2} |H|^2. \quad (3)$$

Відповідно до закону Джоуля – Ленца величина $\frac{\omega \varepsilon_b''}{2} |E|^2$ виражає об'ємну щільність потужності, яка виділяється в середовищі при проходженні в ньому струмопровідності з щільністю $j = \sigma E$.

В ідеальному діелектрику $\sigma = 0$, і перший член в (3) рівний нулю. Другу та третю складові в (3) визначають за рахунок зміщення фази векторів електричної \vec{D} , магнітної \vec{B} індукції і векторів \vec{E} та \vec{H} . Відомо [11], що під дією зовнішнього магнітного поля електронна оболонка атома починає рухатись навколо напрямлення поля з певною кутовою швидкістю. В змінних магнітних полях до того ж відбувається переорієнтація магнітної осі атома. Ці явища в чомусь аналогічні «внутрішньому тертю», і приводять до виділення тепла в середовищі, яке описується третьою складовою в (3). Якщо $\mu_a' = 1, \mu_a'' = 0$, то третя складова рівна нулю. Але тоді при $\mu_a'' = 0$ співвідношення (3) матиме вигляд:

$$P_{\text{пит}} = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{2} |E|^2 = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon'' |E|^2, \quad (4)$$

або

$$P_{\text{пит}} = 0,556 \cdot 10^{-10} f \varepsilon'' |E|^2, \quad (5)$$

де $P_{\text{пит}}$ – питома потужність, Вт/м³;

f – частота, Гц;

E – напруженість електричного поля, В/м;

δ – кут діелектричних втрат.

За залежністю (4) і (5) чим вище \vec{E} , тим більша потужність втрат і, відповідно інтенсивніше нагрівання.

При виборі частоти f генератора варто мати на увазі, що зі збільшенням частоти зменшується глибина проникання електромагнітної хвилі в продукт.

Якщо визначити глибину проникання електромагнітної хвилі в продукт δ_E як відстань, на якій напруженість зменшується в еразів, отримаємо:

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon(\sqrt{1+\text{tg}^2\delta}-1)}}. \quad (6)$$

Якщо $\text{tg } \delta \ll 1$, то

$$\delta_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\varepsilon \text{tg } \delta}}. \quad (7)$$

Однак величина δ_E характеризує глибину термообробки лише в першому приближенні, так як електромагнітне поле існує і на великій відстані від поверхні об'єкта, а енергія цього поля може бути достатньою для здійснення необхідної теплової дії.

Насіння ріпаку є твердим діелектриком, діелектричні властивості якого визначаються наявністю радикалів жирних кислот, що входять до складу олії, що міститься в насінні: олеїновою, лінолевою, α -ліноленою. Радикали є найбільш полярними групами, тому їх орієнтація в електромагнітному полі обумовлює значно вищу поляризацію, ніж це має місце в неполярних діелектриках.

Існує безліч методів виміру діелектричних характеристик продуктів в діапазоні НВЧ. Загальноприйнятими методами є: резонансні, метод вільних хвиль і методи, засновані на використанні повільних хвиль [16]. Нами був використаний метод порівняння, що дозволяє визначити діелектричні характеристики, зокрема коефіцієнт діелектричних втрат ϵ'' , харчових продуктів з достатньою для практичного використання точністю. Всі виміри зводяться до порівняння швидкості нагріву досліджуваного зразка і еталону (води) за однаковий період часу з врахуванням ваги і теплоємності зразка, а також потужності, що вводиться в робочу камеру.

Виміри проводилися в мікрохвильовій печі з частотою 2450 МГц і потужністю 700 Вт. Як еталон використовувалася дистильована вода. Було проведено декілька серій дослідів по НВЧ - нагріву води і насіння ріпаку, узятого в рівному об'ємі, за фіксований проміжок часу. Температура нагріву еталону і зразка контролювалася за допомогою мультиметра М – 838. Датчиками виміру температури служили хромель - копельєві термопари з діаметром термоелектродів 0,2 мм.

Середня за деякий проміжок часу питома активна потужність, розсіяна в одиниці об'єму даного матеріалу у вигляді теплоти визначається згідно із законом Джоуля – Ленца (5) [11].

Теплову енергію, що генерується в матеріалі можна також визначити за формулою:

$$Q = cm\Delta T, \quad (8)$$

де Q – кількість теплоти в матеріалі, Дж;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

m – маса матеріалу;

ΔT – різниця температур між кінцевою T_k та початковою T_n .

Порівняння швидкості нагріву dT/dt еталону і зразка, а також спільне вирішення рівнянь (5) і (8) дозволяє визначити залежність значень коефіцієнта діелектричних втрат насіння ріпаку від різних чинників.

Залежність зміни коефіцієнта діелектричних втрат ϵ'' ріпаку при частоті електромагнітного поля $f=2450$ МГц від вологовмісту W при різних температурах представлена в таблиці 1.

Визначення коефіцієнта діелектричних втрат ріпаку проведено в інтервалі вологовмістів 0,06...0,30 кг/кг. До певної вологості ріпак підсушували на лабораторній сушарці. З метою зняття температурних залежностей ϵ'' досліди проводилися при різних температурах в інтервалі 298...348°К. Для цього продукт заздалегідь термостатувався в шафі з автоматичним регулюванням температури.

Таблиця 1

Зміна коефіцієнта діелектричних втрат ϵ'' ріпаку від вологовмісту при різних температурах і частоті електромагнітного поля $f=2450$ МГц

Коефіцієнт діелектричних втрат ϵ'' насіння ріпаку при різних температурах	Вологовміст насіння ріпаку								
	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
T=298 °К	1,1	1,3	2,3	4,0	6,2	7,0	7,3	7,7	7,8
T=323 °К	0,9	1,2	1,8	2,9	5,8	6,6	7,0	7,4	7,5
T=348 °К	0,8	0,9	1,5	2,1	4,5	6,0	6,8	7,2	7,3

Як видно з табл.1 значення ϵ'' в значній мірі залежить від вологості матеріалу.

При вологовмісті 0,06...0,12 кг_{вол}/кг_{с.реч.} коефіцієнт діелектричних втрат ϵ'' збільшується майже в два рази, оскільки волога в досліджуваному об'єкті має досить сильний адсорбційний зв'язок на молекулярному рівні, і загальна частка вологи в продукті невелика. В інтервалі вологовмісту від 0,12 до 0,21 кг_{вол}/кг_{с.реч.} спостерігається різке збільшення коефіцієнта діелектричних втрат ϵ'' від 2,3 до 7,0. Це пояснюється збільшенням кількості осмотично зв'язаної вологи.

При підвищенні вологовмісту від 0,21 до 0,30 кг_{вол}/кг_{с.реч.} коефіцієнт діелектричних втрат ϵ'' зростає незначно з 7,0 до 7,8, що обумовлене підвищенням вологовмісту ріпаку за рахунок механічно зв'язаної вологи, а також вологи, що міститься в капілярах поверхневого шару і має невисоку енергію зв'язку з продуктом. При цьому відносна доля міцно зв'язаної вологи в досліджуваному об'єкті матеріалу, зменшується.

Висновки з даного дослідження і перспективи. Коефіцієнт діелектричних втрат насіння ріпаку в значній мірі залежить від вологовмісту, тобто вода відіграє основну роль в процесі поглинання енергії при діелектричному нагріві. Нелінійна залежність коефіцієнта діелектричних втрат від вологості обумовлена різноманітністю форм зв'язку вологи в насінні ріпаку. Зменшення значення ϵ'' з підвищенням температури ріпаку можна пояснити активними втратами води при нагріванні насіння.

References

1. Stankevych, H.M., Strakhova, T.V., Atanazevich, K.K. (1997). *Sushinnya zerna [Grain drying]*. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
2. Lykov, A.V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]*. Moscow (in Russian).

3. Boshkova, I.L., Volhusheva, N.V. (2015). Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnogo polya v dielektricheskom materiale pri deystvii mikrovolnovogo polya [Mathematical modeling of the temperature field in a dielectric material under the action of a microwave field]. Proceedings from *Pervyye mezhdunarodnyye Lykovskiye nauchnyye chteniya*. (p.p. 109-111). Minsk (in Russian).
4. Feng, H., Yin, Y. & Tang, J. (2012). Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Eng Rev.*, 4. 89–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
5. Burdo, O.H. (2010). *Evolyutsiya sushil'nykh ustanovok [Evolution of drying plants]*. Odesa: Polihraf (in Russian).
6. Burdo, O. H. (2013). *Pishchevye nanoenergotekhnologii [Food nanoenergytechnologies]*. Kherson: Hryn' D.S. (in Russian).
7. Akulych P. V. (2002). *Termogidrodinamicheskiye protsessy v tekhnike sushki [Thermohydrodynamic processes in the drying technique]*. Mynsk: YTMO ym. Lykova. (in Russian).
8. Burdo, O. H. (2015). Tekhnologii napravlennogo energeticheskogo deystviya v APK [Technologies of directed energy action in the agro-industrial complex]. *Scientific Works*, 41(1). 42-46 (in Russian).
9. Burdo, O. H., Yarovoy, Y. Y., Ruzhytskaya, N. V., Borshch, A. A. (2012). Novyye printsipy obezvozhvaniya zernovogo syr'ya [New principles of dewatering of grain raw materials]. *Zernovi produkty I kombikorma*, 1. 42-46 (in Russian).
10. Burdo, O.H., Bandura, V. N., Yarovoy, Y. Y. (2015). Osobennosti modelirovaniya protsessov sushki pri elektromagnitnom podvode energii [Features of modeling of drying processes with electromagnetic energy supply]. *Scientific Works*, 39(2). 38-43 (in Russian).
11. Kotov, B.I., Bandura, V.M., Kalinichenko, R.A. (2018). Matematychnye modelyuvannya ta identyfikatsiya teplomasoperenosu v roslynydyispersnomu materialy pry sushinni y nahrivanni elektromagnitnim polem nadvisokoyi chastoty [Mathematical modeling and identification of heat and mass transfer in plant dispersed material during drying and heating by an ultrahigh frequency electromagnetic field.]. *Enerhetyka y avtomatyka*, 6. 35 – 50 (in Ukrainian).
12. Tuchnyy, V.P., Kalinin, L. H., Boshkova, I. L., Volhusheva, N. V. (2004). Sushka zerna v mikrovolnovom pole [Drying of grain in a microwave field]. *Zberihannya ta pererobka zerna*, 4. 33-34 (in Russian).
13. Kalinin, L. H., Boshkova, I. L., Volhusheva, N. V. (2004). Razrabotka mikrovolnovykh sushilok dlya zerna [Development of microwave dryers for grain]. *Zberihannya ta pererobka zerna*, 7. 34-35 (in Russian).
14. Hemis, M., Choudhary, R., Gariépy, Y., Raghavan, V. G. S. (2015). Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, 139(4). P.121–127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
15. Hemis, M, Choudhary, R, Becerra-Mora, N, Kohli, P, Raghavan, V. (2016). Modelling of microwave assisted hot-air drying and microstructural study of oilseeds. *Int J Agric&BiolEng.*; 9(6). 167–177. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2442>
16. Rohov, I.A. Nekrutman, C.B. (1986). *Sverkhvysokochastotnyy nagrev pishchevykh produktov [Ultra-high-frequency heating of food products]*. Moskva: Ahropromyzdat (in Russian).

SUBSTANTIATION OF INTERACTION OF ULTRAHIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD WITH RAPESEED DURING DRYING

Bandura V., Dr. Sci. Tech., Professor

National university of life and environmental sciences of Ukraine, Kyiv

The food industry mainly uses convective drying technologies for grain and oilseeds implemented in driers of various designs, i.e., towel, belt, and drum. Heat transfer to raw materials is realized here using heated air as a drying agent. The technology of microwave seed treatment is a promising way to organize the drying process, it has some differences from traditional methods of dehydration. Microwave heating provides energy to the volume of the material, and the heating temperature is easy to control.

The article presents theoretical and experimental research of rapeseed dielectric heating during drying in a microwave field. Mathematical models of heat and mass transfer developed for modelling microwave drying processes are analysed, and the dielectric properties of oilseeds depending on humidity and temperature are discussed. The principle of microwave energy conversion into heat is based on the effective absorption of moisture of the heated product, microwave energy supplied to it. Thus, the heat generated in the processed product and supplied to the working chamber of the microwave is almost completely absorbed by the seeds, regardless of its shape and weight. The intensity of heating of rapeseed depends on its dielectric properties and microwave field strength.

The coefficient of dielectric loss of rapeseed largely depends on the moisture content because water plays a major role in the process of energy absorption during dielectric heating. The nonlinear dependence of the dielectric

loss coefficient on moisture is due to the variety of moisture forms bond in rapeseed. The decrease in the value of the dielectric loss coefficient, with increasing rapeseed temperature can be explained by the active water loss when heating the seeds.

Keywords: rapeseed, microwave energy, modelling, drying, dielectric loss coefficient.

Список використаної літератури

1. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич К.К. Сушіння зерна: підручник. Київ: Либідь. 1997. 352 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности: монография. М. 1967. 559с.
3. Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Математическое моделирование температурного поля в диэлектрическом материале при действии микроволнового поля. *Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе*: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыков. науч. чтений, посвящ. 105-летию акад. А.В. Лыкова, Москва, 22-23 сент. 2015 г. Курск: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. С. 109-111.
4. Feng H., Yin Y. & Tang J. Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Eng. Rev.* 2012. Vol. 4. P.89–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
5. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368с.
6. Бурдо О. Г. Пищевые наноэнерготехнологии. Херсон: Гринь Д.С, 2013. 304 с.
7. Акулич П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки. Минск: ИТМО им. Лыкова, 2002. 268 с.
8. Бурдо О. Г. Технологии направленного энергетического действия в АПК. *Наукові праці ОНАХТ.* 2015. Вип.41, Т.1. С. 42-46.
9. Новые принципы обезвоживания зернового сырья / О. Г. Бурдо, И. И. Яровой, Н. В. Ружицкая, А. А. Борщ. *Зерновые продукты и комбикорма.* 2012. №1. С. 42-46.
10. Бурдо О.Г., Бандура В. Н., Яровой И. И. Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии. *Наукові праці ОНАХТ.* 2015. Вип.39, Т.2. С. 38-43.
11. Котов Б.І., Бандура В.М., Калініченко Р.А. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопеносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти. *Енергетика і автоматика*, №6, 2018. С.35 – 50.
12. Сушка зерна в микроволновом поле / В.П.Тучный, Л. Г. Калинин, И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева. *Хранение и переработка зерна.* 2004. №4. С. 33-34.
13. Калинин Л. Г., Бошкова И. Л., Волгушева Н. В. Разработка микроволновых сушилок для зерна. *Хранение и переработка зерна.* 2004. №7. С. 34-35.
14. Hemis M., Choudhary R., Gariépy Y., Raghavan V. G. S. Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, 2015.139(4),P.121–127. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.010>
15. Hemis M, Choudhary R, Becerra-Mora N, Kohli P, Raghavan V. Modelling of microwave assisted hot-air drying and microstructural study of oilseeds. *Int J Agric&BiolEng*, 2016; Vol.9. No.6. P. 167–177. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2442>
16. Рогов И.А. Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. Москва: Агропромиздат, 1986. 351 с.

Отримано в редакцію 03.04.2021
Прийнято до друку 06.07.2021

Received 03.04.2021
Approved 06.07.2021