

УДК621.37:538.956

А.О. ТУРОВСЬКИЙ, Ю.Ф. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, Ю.К. СИДОРУК
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"**МЕТОДИ ЕФЕКТИВНОГО ОПРОМІНЕННЯ
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ**

У роботі запропоновано принцип побудови пристроїв електромагнітного опромінення сипучих матеріалів, що передбачає багаторазове проходження енергії через оброблюваний матеріал, завдяки чому досягається формування рівномірного розподілу електромагнітного поля у камері із сипучим матеріалом для його обробки. Розроблено два методи формування розподілу електромагнітного поля у камері обробки, які реалізовано у моделях зустрічнорефлекторної та роторефлекторної камер. Для зменшення рівня стоячої хвилі у сировині забезпечено ортогональне повертання площини поляризації хвилі та просторове складання хвиль від несинхронізованих між собою джерел. Відповідно до запропонованого принципу розроблені комп'ютерні моделі, за якими виконано їх моделювання, та приведено результати розрахунку.

Ключові слова: електромагнітне поле, формування, опромінення, рівномірність поля, сипучі матеріали, надвисокі частоти, багатократне проходження хвиль, камера обробки.

A.O.TUROVSKYY, YU. F. ZINKOVSKYY, YU.K. SYDORUK
National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute"**METHODS OF EFFECTIVE EXPOSURE OF DIELECTRIC MATERIAL WITH ELECTROMAGNETIC FIELD**

In the paper, the principles of construction of devices for bulk materials treatment with electromagnetic field in order to form a uniform distribution of the electromagnetic field in the processing chamber, based on multiple energy passing through the material, are proposed. Two methods of forming of the electromagnetic field distribution in the processing chamber, implemented in the designed chambers, are developed. In order to reduce the standing wave ratio the rotation of the polarization plane is provided. In order to reduce the standing wave ratio in the material the orthogonal rotation of the wave polarization plane and spatial summation of waves from unsynchronized sources are proposed. In accordance with the proposed principles, the numerical models are developed and the simulation results of the calculated field profiles distribution are given.

Keywords: electromagnetic field, forming, irradiation, uniform field, bulk materials, microwaves, multiple passing of waves, processing camera.

Стан проблеми

Формування розподілу електромагнітного поля (ЕМП) надвисоких частот (НВЧ) в об'ємі оброблюваного матеріалу є важливою задачею при побудові пристроїв опромінення діелектричних матеріалів з метою, наприклад, опромінення аграрної сировини (зерна, насіння), спікання композитів у промисловості, при гіпертермії у медицині тощо.

Основним елементом усіх пристроїв для електромагнітного опромінення сипучої сировини є робоча камера, у якій розташовуються випромінювачі енергії, і через яку пропускається сировина для обробки. Залежно від побудови робочої камери і поширення ЕМ-енергії їх конструкції можна розділити на резонаторні, камери з біжучою хвилею та камери, у яких енергія до середовища підводиться шляхом вільного випромінювання. У свою чергу залежно від характеру розподілу поля у камері можна виділити одномодові та багатомодові робочі камери. Принциповою характеристикою камер зі стоячою хвилею є значна нерівномірність розподілу поля внаслідок створення режиму стоячої хвилі. Це в свою чергу призводить до нерівномірного нагріву сировини.

Для різних задач, що вирішуються за допомогою опромінення сипучих матеріалів електромагнітним полем НВЧ, одним із основних показників якості процесу є рівномірність нагрівання оброблюваного матеріалу [1, 2]. Можна вважати, що температура у кожній точці опроміненого матеріалу визначається безпосередньо щільністю потоку енергії ЕМ-поля, як єдиного стороннього джерела енергії, та електрофізичними параметрами матеріалу [3]. Рівномірність розподілу температури має ключове значення при опроміненні сировини. Для визначення температурного профілю у оброблюваному матеріалі необхідна інформація про розподіл ЕМ-енергії по об'ємі оброблюваного матеріалу. При цьому забезпечуючи рівномірність поля у камері обробки важливим є збереження високої ефективності процесу з низьким рівнем втрат на відбивання та розсіювання енергії стінками пристрою. При цьому залежно від нерівномірності розподілу напруженості електричного поля по камері обробки, у якій розміщений продукт, розподіл температури продукту характеризується дисперсією σ^2 . Відповідно, для недопущення перегріву сировини вище допустимої температури t_{max} , середня температура продукту не повинна перевищувати $(t_{max} - \sigma)$.

Методи підвищення рівномірності обробки

При традиційному підході до проектування камери опромінення сипучих матеріалів, відповідно до якого електромагнітна хвиля (ЕМХ) один раз проходить крізь шар сировини, після чого розсіюється на стінках або інших елементах установки ([4]), одночасне забезпечення високої ефективності поглинання енергії хвиль і високої рівномірності розподілу напруженості електричного поля в камері є суперечливими вимогами. Це пов'язано з тим, що забезпечення високої енергоефективності пристрою потребує збільшення

товщини шару матеріалу для ефективного згасання хвилі, при цьому рівномірність поля буде погіршуватись внаслідок згасання хвилі (рис.1, а). Відповідно, важливою задачею є забезпечення рівномірного розподілу щільності ЕМПу об'ємі сировини при збереженні високої ефективності поглинання підведеної енергії.

Для підвищення ефективності поглинання енергії ЕМП необхідно забезпечувати умови, щоб хвиля, потрапляючи у камеру обробки, проходила через неї кілька разів, віддаючи свою енергію. Покращити ефективність можна, якщо забезпечити відбивання ЕМХ від протилежної стінки, що, однак, викличе утворення стоячої хвилі (рис.1, б) [5]. Для зниження рівня стоячої хвилі авторами запропоновано використовувати відбивач із повертанням площини поляризації хвилі (роторефлектор), що дає можливість енергетичного складання падаючої і відбитої хвиль та знизити рівень інтерференції.

Розроблений авторами метод багатократного проходження хвиль, як альтернатива використання резонаторних камер, реалізується на основі зустрічно рефлекторного або роторефлекторного принципів побудови камери обробки [6, 7].

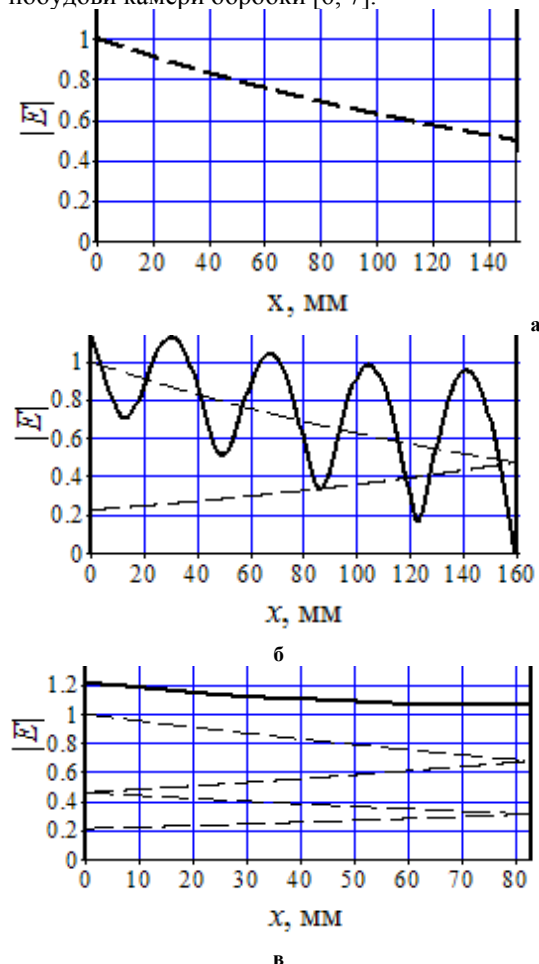


Рис 1. Затухання хвилі у шарі сировини, $\epsilon=2,65$, $\text{tg}\delta=0,11$.

— Сумарна хвиля,
 ---- Падаюча хвиля

дозволяє певним чином вирівняти профіль розподілу поглинутої у ньому енергії. Однак певну проблему для описаної конфігурації становить те, що відбита від протилежного ПД хвиля є поляризованою у тій же площині, що й падаюча, і, на жаль, сприятиме підвищенню коефіцієнта стоячої хвилі вздовж напрямку її поширення, а, відповідно, і нерівномірному розподілу потужності енергії у матеріалі.

Роторефлекторний принцип реалізується моделлю рис.2, б. Принциповою відмінністю від попередньої моделі тут є ефект зміни площини поляризації поля завдяки використанню роторефлектора (трансполіризаційного відбивача) 4. Переваги такої моделі полягають у тому, що випромінена решіткою 1 хвиля, вільно пройшовши крізь ПД, проходить камерою обробки 2 віддаючи частину енергії, після чого відбивається від роторефлектора 4, який повертає площину поляризації хвилі на 90° ; як наслідок, при другому проходженні хвилі крізь матеріал не утворюється стояча хвиля, оскільки хвилі, що поширюються у протилежних напрямках, поляризовані у ортогональних площинах. Після другого проходження хвилі осі поляризації її та ПД 3 є взаємно паралельними, і хвиля відбивається назад, проходить камерою обробки, набуває початкової поляризації і ще раз проходить камерою обробки. Такий підхід при правильному виборі товщини шару матеріалу та відстаней між іншими елементами дає змогу значно зменшити нерівномірність розподілу поля (рис. 1, в).

Зустрічнорефлекторний принцип побудови камери опромінення сипучих діелектричних матеріалів базується на основі моделі камери, зображеної на рис. 2, а, і полягає у тому, що камера з матеріалом опромінюється з протилежних боків джерелами ЕМ енергії, площини поляризації яких взаємно перпендикулярні. Вздовж верхньої та нижньої екрануючих стінок розміщені решітки випромінювачів 1а та 1б, які для зменшення рівня взаємодії поляризовані у ортогональних площинах і відділені від камери обробки 2 узгоджувальними пластинами б, призначенням яких є зниження рівня відбитих хвиль. Паралельно до узгоджувальних пластин розміщені поляризаційні дзеркала (ПД) 3, осі поляризації яких співпадають з поляризацією прилеглих до них випромінювачів. ПД являють собою систему паралельних провідників, що виконують функцію поляризаційного фільтра, пропускаючи хвилі, площина поляризації яких ортогональна до їх осі поляризації. Завдяки тому, що протилежні випромінювачі мають взаємно ортогональну поляризацію, ЕМ-енергія, пройшовши шаром матеріалу, відбивається від протилежного ПД і проходить повторно крізь матеріал, частково вирівнюючи профіль розподілу поля та знижуючи величину непоглинутої енергії, що розсіюється на елементах камери.

Сутність представленої моделі полягає у тому, що випромінена джерелом 1 хвиля вільно проходить крізь прилегле до випромінювача ПД, оскільки площина її поляризації перпендикулярна осі поляризації дзеркала, проникає у камеру обробки і віддає їй частину енергії, а пройшовши товщу матеріалу і вийшовши за її межі, хвиля відбивається від протилежного ПД, поширюється у зворотному напрямі, повторно проходячи крізь матеріал. Таким чином, в описаній моделі електромагнітна хвиля двічі проходить крізь оброблюваний матеріал, що

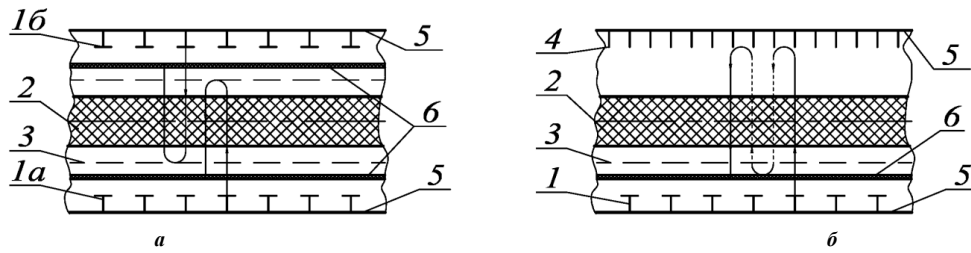


Рис 2. Моделі камер опромінення

Основна проблема робочих камер з плоскопаралельним розташуванням її елементів (див рис. 2) полягає у складності забезпечення рівномірного розподілу напруженості поля у центральній та периферійній частинах внаслідок спадання напруженості електричного поля на краях камери.

Для подолання цієї проблеми доцільно використовувати робочу камеру (рис. 2), виконану у формі циліндра, як наслідок, принципова нерівномірність опромінення матеріалу залишається лише вздовж його осі, що не створює значних проблем, оскільки весь матеріал у поперечному перетині камери обробки при цьому може опромінюватися з однаковою інтенсивністю.

Моделі, що відповідають запропонованим технічним рішенням, зображені на рис. 3. Запропоновано також метод підвищення рівномірності поля по перетину камери обробки, що пов'язаний з використанням циліндричної робочої камери, полягає у тому, що опромінюючи сировину хвилями від кількох частотно несинхронізованих незалежних джерел, у областях, що перебувають у зоні дії окремих випромінювачів, сумарний розподіл поля визначається як сума щільностей енергії, створених кожним джерелом, оскільки такі коливання накладатимуться без утворення інтерференції.

Згідно першої моделі (рис. 3, а) джерела електромагнітних хвиль 1 розміщуються навколо камери обробки 2 і представлені лінійними хвилеводними випромінювачами; взаємна поляризаційна розв'язка протилежних джерел забезпечується завдяки тому, що поляризація елементів випромінювання і поляризаційних дзеркал, розташованих по протилежні сторони камери обробки, орієнтовані під кутом 45° до осі структури і є взаємно ортогональними. Таким чином, хвиля, що пройшла крізь оброблюваний матеріал, відбивається від протилежної стінки поляризованого дзеркала і повторно опромінює об'єм камери обробки.

Для забезпечення високої щільності потоку енергії через оброблюваний матеріал і побудови установок більшої продуктивності запропонована модель, зображена на (рис. 3, б), яка за принципом функціонування еквівалентна плоско-паралельному варіанту (рис. 2, а), оскільки матеріал опромінюється з обох боків. Продуктивність такої установки може бути забезпечена на довільному рівні і визначається діаметром структури.

Суттєвого підвищення рівномірності напруженості електричного поля у камері обробки можна досягнути за допомогою моделі, приведеної на рис. 3, в, яка є циліндричним аналогом плоскої роторефлекторної камери (рис. 2, б).

Суттєвою перевагою таких конструкцій є можливість реалізації модульного підходу до проектування, за якого окремі модулі можуть з'єднуватися у одну систему, забезпечуючи необхідну продуктивність.

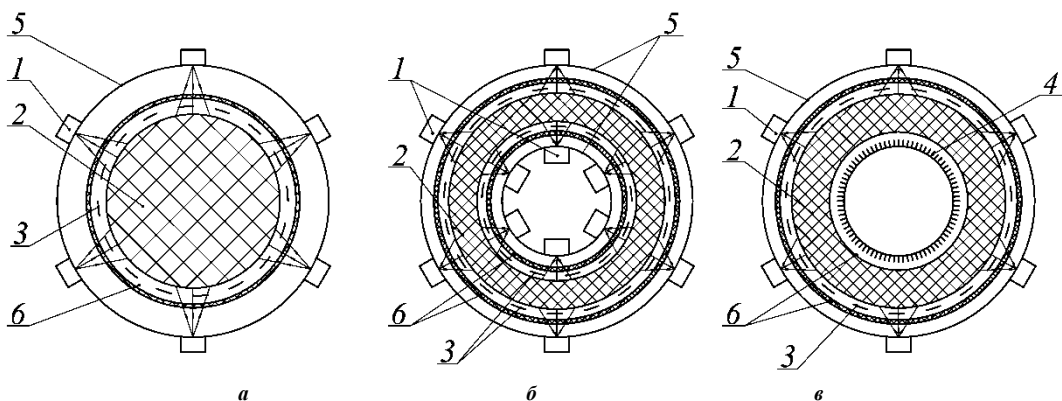


Рис 3. Моделі циліндричних камер опромінення сипучих матеріалів електромагнітним полем.

1 — лінійний опромінювач, 2 — оброблюване середовище, 3 — поляризаційне дзеркало, 4 — роторефлектор, 5 — зовнішній екран, 6 — узгоджувальна стінка

Моделювання розроблених структур

З метою дослідження і перевірки запропонованих ідей виконувалось комп'ютерне моделювання розроблених моделей та аналіз отриманих результатів. Моделювання виконувалось у середовищі HFSS [8]. Моделі робочих камер відповідно до ескізних моделей (див. рис. 3, а, б) розроблені у середовищі HFSS і зображені на рис. 4, а, б. Зустрічнорефлекторна модель (рис. 4, а) сформована n -гранником 1, кожна грань якого представляє широку стінку прямокутного хвилеводу з виконаними на ній щілинами 2. Живлення

щілин здійснюється синфазно і з однаковими амплітудами. Збудження щілин забезпечено виконанням на їх поверхні хвилеводних портів (*waveport*), потужністю живлення яких забезпечується необхідний розподіл поля вздовж випромінювача. В центрі робочої камери 1 паралельно до її стінок розташована циліндрична камера опромінення 3, діелектричні характеристики матеріалу якої відповідають еквівалентним властивостям матеріалу, що підлягає опроміненню. Камера опромінення оточена циліндричною діелектричною узгоджувальною стінкою 4, на зовнішній поверхні якої нанесене поляризаційне дзеркало 5 у вигляді спіралеподібної сітки, провідники якої орієнтовані під кутом 45° до осі камери.

Модель роторефлекторної камери з виконаним діаметральним перетином зображена на рис. 4, б; зовнішні стінки камери 1 утворюють n -гранник, на бокових гранях якого розташовані випромінювальні щілинні решітки 2. Матеріал, що підлягає обробці, знаходиться у порожнистій циліндричній камері 3, в центрі якої розташований циліндричний роторефлектор 6. Пластини роторефлектора орієнтовані перпендикулярно до осі камери, а вісь поляризації поляризаційного дзеркала співпадає з поляризацією випромінювальних щілин, таким чином, при відбитті ЕМХ від роторефлектора відбувається повертання площини її поляризації на 90° . Оскільки опромінення виконується одночасно всіма випромінювачами, картина розподілу інтенсивності поля по перетину сировини ідентична для усіх ділянок оброблюваного матеріалу в межах усіх секторів робочої камери, що спираються на стінку n -кутника з випромінювачем, тому аналіз поля виконувався для одного сектора як частини камери обробки.

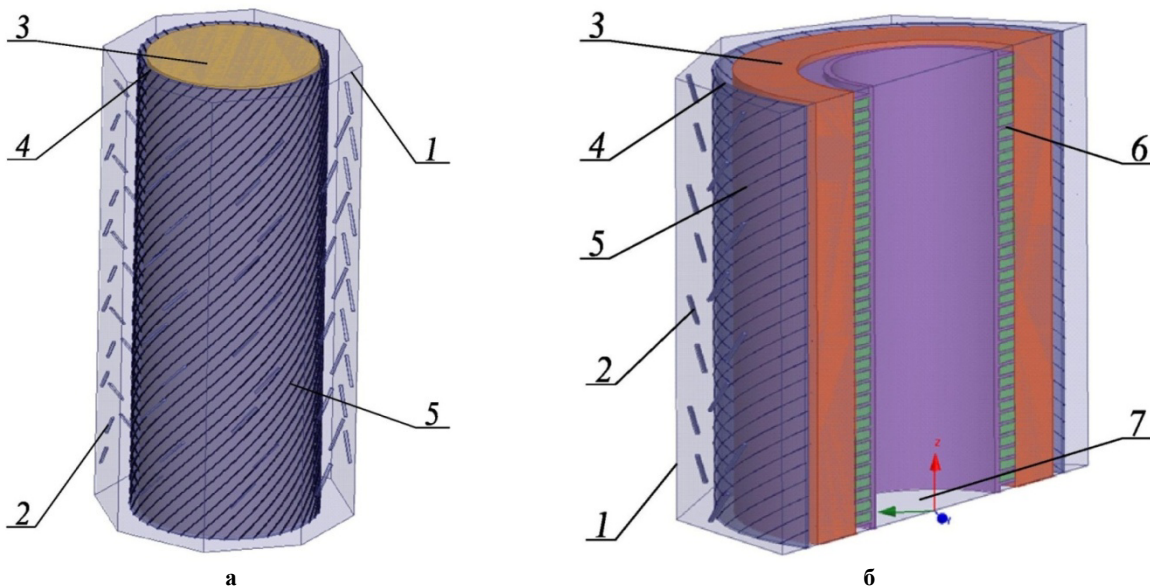


Рис. 4. Моделі зустрічнорефлекторної (а) та роторефлекторної (б) робочих камер

Так як живлення випромінювачів здійснюється від окремих не синхронізованих між собою генераторів НВЧ коливачів, а діючим фактором на оброблюване середовище є не миттєве значення напруженості поля, а його середнє значення [9], то це дає можливість розраховувати інтенсивність електромагнітного поля у камері опромінення шляхом скалярного складання інтенсивностей (щільностей енергії) поля, створених кожним випромінювачем. Відповідно, модуль напруженості електричного поля, створеного N випромінювачами, розташованими навколо робочої камери, у певній точці M у камері обробки, визначається виразом

$$|E(M)| = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_a} |E_n(M)|^2},$$

де $E_n(M)$ — напруженість електричного поля у точці M , створеного випромінювачем з номером n , N_a — кількість граней з опромінювачами у робочій камері.

Діаметр камери опромінення визначався з огляду на інтенсивність затухання хвилі у матеріалі, що її заповнює, і кількість опромінювачів навколо камери обробки так, щоб сумарна інтенсивність поля в центрі камери була близькою до інтенсивності поля на периферії камери опромінення. Як об'єкт обробки розглядався матеріал із відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r=2,65$ і тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta=0,11$, що відповідає зерну пшениці з вологістю 14% [10].

Визначальною характеристикою рівномірності обробки є розподіл інтегральної поглинутої енергії по площі перетину сировини після проходження нею вздовж камери обробки (або одного її періоду). Нерівномірність вказаного розподілу характеризується коефіцієнтом нерівномірності σ_r , який визначається як відносне (відносно середнього) стандартне відхилення дискретного розподілу щільності енергії поля P_i :

$$\sigma_r = \frac{1}{\bar{P}} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (P_i - \bar{P})^2}{N}}$$

де \bar{P} — його математичне очікування, N — кількість точок, у яких досліджувалася щільність енергії поля.

Опромінення зустрічорефлекторної робочої камери відбувалося вісьмома розташованими навколо щільними решітками, роторефлекторна камера містила дванадцять випромінювачів. Діаметр камери з сировиною у зустрічорефлекторній моделі становив 300 мм, для роторефлекторної моделі зовнішній діаметр становив 600 мм, внутрішній — 400 мм; для усіх випадків випромінювачі розташовувались на відстані 100 мм від поверхні сировини. Результати моделювання електромагнітного поля у зустрічорефлекторній та роторефлекторній камерах обробки приведені на рис. 5, а, б, де відповідно показані нормовані профілі розподілу інтегральної поглинутої сировиною енергії. На рис. 5, б приведений профіль розподілу для одного сектора з центральним кутом, рівним $360^\circ/12$.

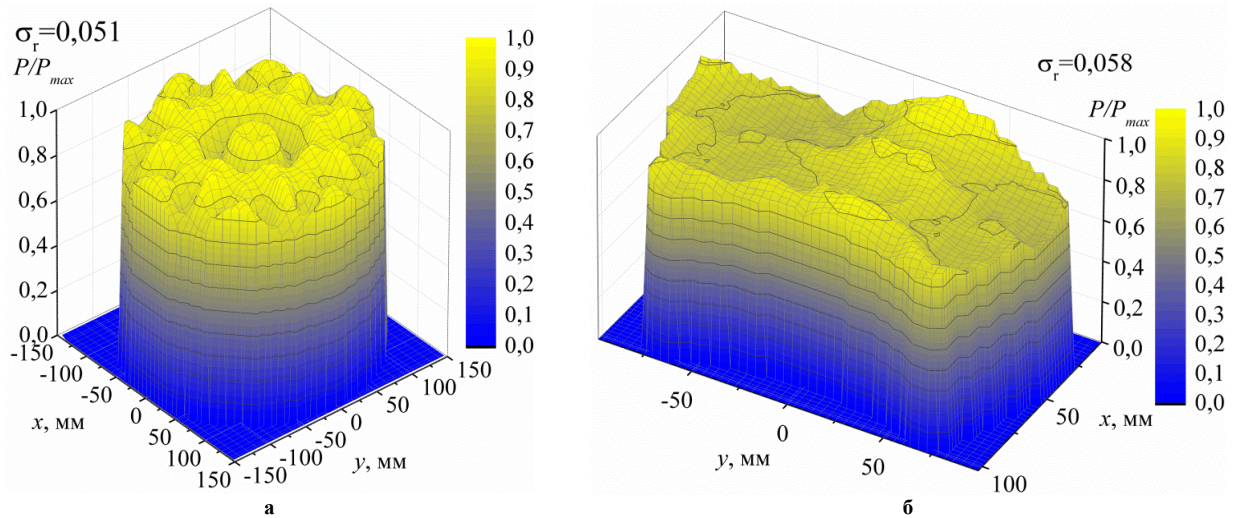


Рис.5. Нормований розподіл щільності енергії

Значення коефіцієнта відбиття енергії R_p випромінювача і коефіцієнт нерівномірності щільності енергії у зустрічорефлекторній та роторефлекторній камерах наведені відповідно у табл. 1 і табл. 2., звідки видно, що роторефлекторна камера характеризується вищою, порівняно з зустрічорефлекторною, стійкістю характеристик при варіюванні параметрів оброблюваної сировини.

Таблиця 1

Коефіцієнт відбиття і нерівномірності щільності енергії поля для зустрічно рефлекторної камери							
F, ГГц	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
$\epsilon_r; \text{tg}\delta$	2,65; 0,11	2,65; 0,11	2,4; 0,08	2,65; 0,11	2,65; 0,15	3,1; 0,11	3,1; 0,15
R_p	0,08	0,045	0,086	0,057	0,084	0,113	0,12
σ_r	0,089	0,065	0,085	0,052	0,12	0,079	0,12

Таблиця 2

Коефіцієнт відбиття і нерівномірності щільності енергії поля для роторефлекторної камери								
F, ГГц	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
$\epsilon_r; \text{tg}\delta$	2,65; 0,11	2,65; 0,11	2,4; 0,08	2,65; 0,11	2,65; 0,15	3,1; 0,11	3,1; 0,15	3,5; 0,18
R_p	0,062	0,04	0,068	0,048	0,067	0,084	0,1	0,12
σ_r	0,046	0,047	0,058	0,047	0,061	0,051	0,068	0,082

Висновки

Запропонований принцип побудови пристроїв опромінення сипучих матеріалів з багаторазовим проходженням електромагнітної енергії через оброблюваний матеріал забезпечує значне підвищення рівномірності поля у камері обробки порівняно із резонаторними структурами. Побудова циліндричних камер обробки за зустрічорефлекторним і роторефлекторним принципами дає змогу досягнути нерівномірності розподілу щільності енергії по поперечному розподілу камери обробки в межах 6%, при цьому роторефлекторна камера допускає варіювання діелектричної проникності сировини на 10—15%, зустрічорефлекторна — не більше 5%.

Виконані дослідження за приведеними моделями показали, що роторефлекторна камера

характеризується вищою стабільністю характеристик при зміні параметрів оброблюваної сировини. Так, у діапазоні діелектричної проникності ϵ_r від 2,4 до 3,1 і тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ від 0,08 до 0,15 коефіцієнт нерівномірності щільності енергії у роторефлекторній камері змінюється в межах 0,047...0,082, а у зустрічорефлекторній — 0,052...0,12, коефіцієнт відбиття енергії випромінювача при цьому знаходився у межах 0,04...0,084 і 0,045...0,12 відповідно.

Література

1. Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перераб-е и доп-е. — М.: Энергия, 1968. — 472 с., с илл.
2. Nathazi F. I. Solution for using the microwave energy in order to improve the quality for agricultural seeds. generation and processing microwave system / F.I. Nathazi, V.D. Soproni, M.N. Arion et al. // Journal of Electrical and Electronics Engineering. — 2009. — № 1. — p. 56—59.
3. Kent S. Microwave heating of dielectric lossy objects / S. Kent, E. F. Kent // JMPEE. — 2002. — Vol. 37. — No.2. — P. 63—71.
4. Пат. 4468865 США, МПК А23L 3/54. Cold air microwave drying apparatus [Text] / Inagaki M. — № 06/304985; заяв. 23.09.1981; опубл. 4.09.1984.
5. Патент України 97763. Установа для передпосівної обробки насіння електромагнітним полем надвисоких частот / Сидорук Ю.К.; заяв 01.03.2011, опубл. 12.03.2012, Бюл.№ 5, 2012 р.
6. Патент України 65629 Н05В 6/64. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів / Сидорук Ю.К.; заяв. 20.05.2011, опубл. 12.12.2011, Бюл.№ 23, 2011 р.
7. Патент України на корисну модель 93402, (2014.01): а01с 1/00, f26b 3/34 (2006.01), h05b 6/64 (2006.01). Пристрій для сушіння і обробки зерноподібних матеріалів електромагнітним полем надвисоких частот / Ю.Ф. Зінковський, А.О. Туровський. — № U201405106; заявл. 14.05.2014; опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18/2014.
8. Банков С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft / С.Е. Банков, А.А. Курушин. — М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. — 256 с.
9. Юсупова Г.Г. Методология комплексной системы обеззараживания зерна и продуктов его переработки: дис. ...докт. техн. наук: 03.00.16 / Г.Г. Юсупова. — Красноярск, 2004. — 239 с.
10. Nelson S. O. Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials / S. O. Nelson // J. of Food Engineering. — 1994. — Vol. 21. Pp. 365—384.

References

1. Lykov A.V. Teoriya sushki. Izd. 2-e, pererab-e i dop-e. — M.: Energiya, 1968. — 472 s., s ill.
2. Nathazi F. I. Solution for using the microwave energy in order to improve the quality for agricultural seeds. generation and processing microwave system / F.I. Nathazi, V.D. Soproni, M.N. Arion et al. // Journal of Electrical and Electronics Engineering. — 2009. — № 1. — p. 56—59.
3. Kent S. Microwave heating of dielectric lossy objects / S. Kent, E. F. Kent // JMPEE. — 2002. — Vol. 37. — No.2. — P. 63—71.
4. Pat. 4468865 SSHA, MPK A23L 3/54. Cold air microwave drying apparatus / Inagaki M. — № 06/304985; zayav. 23.09.1981; opubl. 4.09.1984.
5. Patent Ukrainy 97763. Ustanovka dlia peredposivnoi obrobky nasinnia elektromahnitnym polem nadvysokykh chastot / Sydoruk Iu.K.; zaiav 01.03.2011, opubl. 12.03.2012, Biul.№ 5, 2012 r.
6. Patent Ukrainy 65629 H05B 6/64. Mikrokhvylivyi prystrii dlia peredposivnoi obrobky nasinnia, sushinnia zerna ta inshykh sypuchykh materialiv / Sydoruk Iu.K.; zaiav. 20.05.2011, opubl. 12.12.2011, Biul.№ 23, 2011 r.
7. Patent Ukrainy na korysnu model 93402, (2014.01): a01c 1/00, f26b 3/34 (2006.01), h05b 6/64 (2006.01). Prystrii dlia sushinnia i obrobky zernopodibnykh materialiv elektromahnitnym polem nadvysokykh chastot / Iu.F. Zinkovskyi, A.O. Turovskyi. — № U201405106; zaiavl. 14.05.2014; opubl. 25.09.2014. Biul. № 18/2014.
8. Bankov S.E. Raschet antenn i SVCH struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft / S.E. Bankov, A.A. Kurushin. — M.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. — 256 s.
9. YUsupova G.G. Metoda logiya kompleksnoy sistemy obezzarazhivaniya zerna i produktov ego pererabotki: dis. ...dokt. tekhn. nauk: 03.00.16 / G.G. YUsupova. — Krasnoyarsk, 2004. — 239 s.
10. Nelson S. O. Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials / S. O. Nelson // J. of Food Engineering. — 1994. — Vol. 21. Pp. 365—384.

Рецензія/Peer review : 27.9.2015 р.

Надрукована/Printed : 19.10.2015 р.