

ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ ФРУКТІВ

Яковлев В. Ф., Савойський О. Ю.

Сумський національний аграрний університет

Викладений матеріал передбачає теоретичне обґрунтування основних рівнянь зв'язку параметрів дії електромагнітного поля на біологічний об'єкт рослинного походження з його біофізичними та електрофізичними характеристиками, підготовки теоретичної бази проведення експериментальних досліджень і можливості технічної реалізації електротехнологічних систем обробки сільськогосподарської продукції по необхідному параметру.

Постановка проблеми. Отримання продукції рослинництва високої якості вимагає забезпечення сільськогосподарського виробництва (а саме, продуктів її переробки) інноваційними технологіями та відповідною енергозберігаючою технічною оснасткою технологічних процесів.

Для обробки сільськогосподарської продукції, як біологічного об'єкту рослинного походження, застосовуються різні фізичні методи (теплові, гелію, електричні, акустичні та ін.), з великого числа яких особливе місце займають електричні методи (зокрема, методи з використанням енергії електромагнітного поля), що дуже інтенсивно розвиваються нині. Однією з причин широкого поширення електричних методів полягає в тому, що властивості продуктів (як біологічних об'єктів), які визначають дію і поширення електромагнітних хвиль, тісно пов'язані з їх анатомічною структурою, біохімічними та електрофізичними характеристиками. У застосуванні електромагнітних полів, для дії на сільськогосподарську продукцію, одним з основних напрямів є розробка електротехнічних систем обробки продукції, а саме, електротехнологічних систем сушіння фруктів та овочів з метою скорочення тривалості процесу та його енергозбереження [1].

Аналіз останніх публікацій та досліджень.

В технічній літературі описані різні способи зневоднення сировини рослинного і тваринного походження. Стосовно сільського господарства і харчових галузей промисловості це пов'язано з загальною задачею підвищення зберігання плодоовочевої та іншої сільськогосподарської продукції, для чого в останні десятиліття були створені численні технології сушіння різних продуктів [2]. Причому ці технології знаходять все більш широке застосування. Однак, вирішення проблеми інтенсифікації процесу сушіння вимагає розробки і впровадження нових високоєфективних методів і технологій сушки з оптимальним технічним рішенням.

Мета статті. Робота направлена на теоретичне обґрунтування основних рівнянь зв'язку параметрів дії електромагнітного поля на біологічні об'єкти рослинного походження в технологічному процесі сушіння з їх біофізичними ознаками, підготовки теоретичної бази проведення експериментальних досліджень і можливості технічної реалізації електротех-

нологічних технічних засобів обробки сільськогосподарської продукції.

Основні матеріали дослідження. Оброблюваний продукт, згідно з його хімічною структурою [3], представляє собою колоїдну капілярно-пористу біологічну систему рослинного походження, що включає в себе електроліти, до складу яких входять білкові молекули, що характеризуються діамагнітними та парамагнітними властивостями, електричною провідністю, визначеним дипольним моментом (молекули води, органічних кислот та ін.). Крім того в цих системах на поверхні часток дисперсної фази можуть бути присутні вільні електричні заряди, які додатково посилюють електричну провідність біосистеми. Із вище сказаного слідує, що біологічне середовище складається із атомів і молекул, які в свою чергу, можуть бути полярними та неполярними, і що під дією електромагнітного поля в цьому середовищі можуть виникати процеси поляризації та наскрізної провідності. Тому дану систему можна розглядати, як полу провідну, тобто, яка має властивості і діелектрика і провідника (рисунок 1).

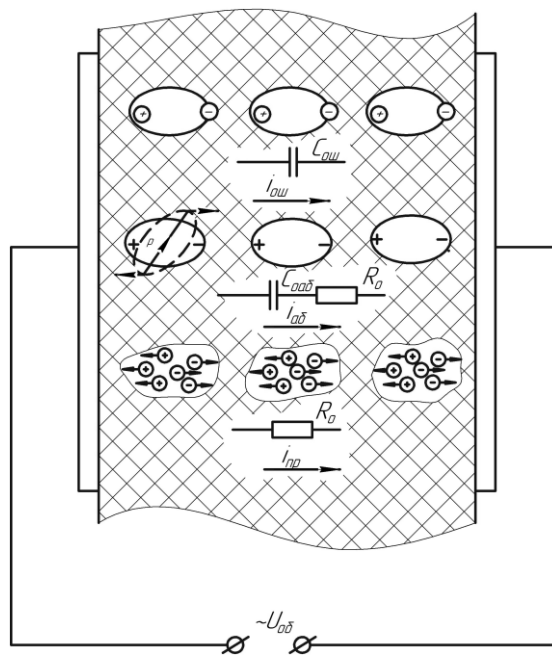


Рисунок 1 - Фізична модель біологічного продукту при дії електромагнітного поля

В процесі прямого способу електронагріву заданого об'єму V , в електротехнологічній системі, оброблюваний продукт розміщують між двома металевими пластинами (електродами) визначених розмірів (площею $S = \pi r^2$) через які подається напруга обробки $U_{об}(t)$.

З точки зору фізичного моделювання, дана система являє собою конденсатор, обкладинками якого є електроди, а діелектриком служить сам оброблюваний продукт зі своїми електричними параметрами: діелектричною ϵ_r і магнітною μ_r проникністю, провідністю γ_r та товщиною d (рисунок 1). Крім того, прийнято припущення, що зразок має однорідні та ізотропні властивості.

Електромагнітні процеси в електротехнологічній системі з продуктом описуються за допомогою основних рівнянь Максвелла, які для миттєвих значень функцій мають наступний вигляд [4]:

$$\left. \begin{aligned} rot H &= J_e + \frac{\partial D}{\partial t} \\ rot E &= -J_m - \frac{\partial B}{\partial t} \\ B &= \mu_r H \\ D &= \epsilon_r E \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де H, E, D – відповідно миттєві значення векторів напруженості магнітного, електричного поля та електричного зміщення;

J_e, J_m – відповідно, миттєві значення векторів густини електричного і магнітного струмів;

μ_r, ϵ_r – відповідно, абсолютні діелектрична і магнітна проникності.

Так як продукти рослинництва взагалі створюють незначні магнітні струми під дією поля, то можна прийняти, що $J_m = 0$. Тоді $rot E = 0$ і система (1) буде мати вигляд:

$$rot H = J_e + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

У всякій електротехнологічній системі, що описуються наведеними рівняннями (1) та (2), в якій одним із елементів є оброблюваний продукт, електрофізичний процес буде функціонувати до тих пір, поки система збуджується електричним струмом:

$$I_e = \int_s J_e dS \quad (3)$$

де S – площа поверхні оброблюваного біопродукту, m^2 .

Згідно закону повного струму і враховуючі, що $J_e = \gamma_0 E$, основне інтегральне рівняння зв'язку електромагнітного поля з оброблюваним продуктом має вигляд:

$$\int_s rot H dS = \int_s \gamma_0 E dS + \int_s \epsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} dS \quad (4)$$

де H – напруженість магнітного поля, A/m ;
 E – напруженість електричного поля, V/m ;

γ_0 – провідність зразка, Sm ;

ϵ_r – абсолютна діелектрична проникність зразка, Φ/m .

Як було відмічено вище, під дією електромагнітного поля в оброблюваному продукті виникають процеси, які пов'язані з переміщенням електричних зарядів, тобто виникненню електричних струмів:

1) струму, що обумовлений *пружною поляризацією* (електронною і іонною) неполярних часток, який називається *струмом* швидкої поляризації $i_{ш}$ (рисунок 1). Цей струм через $10^{-15} \dots 10^{-13}$ с припиняється, а тому практично не викликає розсіяння енергії в біооб'єкті і є чисто реактивним;

2) струму, що виникає в результаті *непружної поляризації* (дипольно-релаксаційній, іонно-релаксаційній, міграційній) полярних часток, який називається *струмом абсорбції* i_a . Струм абсорбції викликає розсіяння енергії в біооб'єкті, а тому має дві складових: активним $i_{аа}$ і реактивну $i_{абр}$. Процес непружної поляризації протікає значно повільніше ($10^{-8} \dots 1$ с);

3) струму *наскрізної провідності* i_{np} , що обумовлено наявністю в біоматеріалі каналів суцільної провідності, який продовжується до повного видалення вологи і викликає значні втрати енергії та є чисто активним струмом.

Таким чином, *сумарний* струм i_{Σ} , що протікає через біологічний об'єкт, представляє собою суму струмів *зміщення, абсорбції та наскрізної провідності*.

Слід відмітити, що при змінній напрузі усі три струми мають місце на протязі всього часу перебування біооб'єкту під дією електромагнітного поля. Враховуючи вище викладене, рівняння повного струму (4) буде мати вигляд:

$$\int_s rot H dS = \int_s \gamma_0 E dS + \int_s \gamma_{оаб} E dS + \int_s \epsilon_{роаб} \frac{\partial E}{\partial t} dS + \int_s \epsilon_{rou} \frac{\partial E}{\partial t} dS \quad (5)$$

Помноживши рівняння (5) на елемент довжини відстані між електродами $dl = n^o dl$ та враховуючи, що $S = n^o S$, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} E_o dl &= \frac{i_o}{\gamma_o S_o} dl; & E_{оаб} dl &= \frac{i_{оаб}}{\gamma_{оаб} S_o} dl; \\ E_{оабр} dl &= \frac{i_{оабр}}{d(\epsilon_{роаб} S_o)} dl; & E_{ou} dl &= \frac{i_{ou}}{d(\epsilon_{rou} S_o)} dl; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Інтегрування (6) по довжині i -ої ділянки та після складання, згідно з рівнянням (5), отримаємо:

$$\int_{l_o} E_o dl + \int_{l_{oa\delta}} E_{oa\delta} dl + \int_{l_{oa\delta p}} E_{oa\delta p} dl + \int_{l_{ou}} E_{ou} dl =$$

$$= i_o \int_{l_o} \frac{dl}{\gamma_o S_o} + i_{oa\delta} \int_{l_{oa\delta}} \frac{dl}{\gamma_{oa\delta} S_o} + i_{oa\delta p} \int_{l_{oa\delta p}} \frac{dl}{\epsilon_{roa\delta} S_o} +$$

$$i_{ou} \int_{l_{ou}} \frac{dl}{\epsilon_{rou} S_o} \quad (7)$$

Виконавши відповідні дії та перетворення, отримаємо:

$$u(t) = \frac{i_{\Sigma}}{Y_{\Sigma}} = \frac{i_o}{\gamma_o} + \frac{i_{oa\delta}}{\gamma_{oa\delta}} + \frac{1}{C_{oa\delta}} \int i_{oa\delta p} dt +$$

$$\frac{1}{C_{ou}} \int i_{ou} dt \quad (8)$$

де $u(t)$ - напруга, яка підведена до оброблюваного продукту, В;
 Y_{Σ} - сумарна провідність оброблюваного біопродукту, См.

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{R_o} + j\omega C_{ou} + \frac{1}{\frac{1}{R_o} + j\omega C_{oa\delta}} \quad (9)$$

В основу методів розрахунку втрат енергії електромагнітного поля (ЕПМ) в біологічному матеріалі закладено фізичні процеси, які відбуваються в продукті під дією прикладеної до нього напруги $u(t)$. В зв'язку з цим, фізичну модель (рисунок 1) можна представити у вигляді еквівалентної схеми заміщення, кола якої складаються із електричних елементів, що забезпечують протікання по них тих або інших струмів поляризації. Така заміна є чисто формальною, але у ряді випадків вона відображає фізичні процеси, які відбуваються у біоматеріалі. Ця схема складається із трьох основних кіл:

1) коло, по якому протікає струм зміщення i_{ou} , який обумовлено процесом пружної поляризації. Так як струм зміщення є чисто реактивним та не викликає розсіювання енергії в біодіелектрику, то це коло можна представити еквівалентною електричному колу з геометричною ємністю C_{ou} ;

2) коло, по якому протікає струм абсорбції $i_{oa\delta}$, який обумовлено зміщенням та переорієнтацією полярних часток в процесі пружної поляризації і що викликає розсіювання енергії у біодіелектрику. У зв'язку з цим абсорбційний струм включає до себе як реактивну $i_{oa\delta p}$, так і активну $i_{oa\delta a}$ складові. Тому дане коло може бути еквівалентне колу з послідовно з'єднаними абсорбційною ємністю $C_{oa\delta}$ та активного опору R_o .

3) коло, по якому протікає струм наскрізної провідності i_o , що обумовлений переміщенням вільних зарядів в біодіелектрику і викликає значні

втрати енергії, аналогічним втратам в провідниках. Так як струм наскрізної провідності є чисто активним, то це коло можна представити у вигляді активного опору R_o .

Враховуючи те, що напруга, яка прикладена до біодіелектрика викликає одночасно усі види струмів, то повну еквівалентну схему можна представити, як паралельне з'єднання розглянутих вище окремих кіл (рисунок 2).

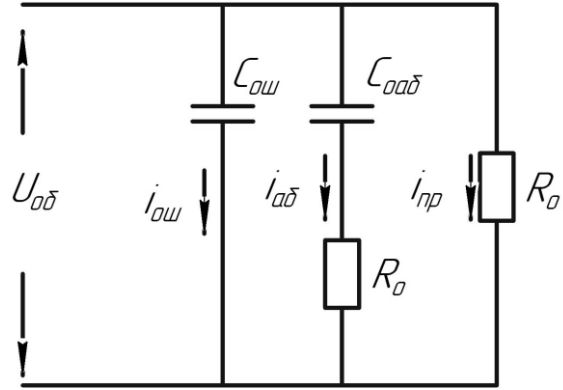


Рисунок 2 – Схема заміщення діелектрику (досліджуваного біоматеріалу)

Після перетворення (9), отримаємо:

$$Y_{\Sigma} = \frac{1 + \omega^2 \tau_{a\delta}^2 (R_{oa\delta} + R_o)}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{a\delta}^2)} + j \frac{\omega (\tau_{a\delta} + R_o C_{ou} + \omega^2 \tau_{a\delta}^2 R_o C_{ou})}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{a\delta}^2)} \quad (10)$$

де $\tau_{a\delta}$ - постійна часу абсорбційного кола зразка, с;

$$\tau_{a\delta} = R_{oa\delta} C_{oa\delta};$$

C_{ou} - ємність кола швидкої поляризації зразка, Ф;

$$C_{ou} = \frac{\epsilon_{rou} \epsilon_o S_o}{d};$$

$C_{oa\delta}$ - ємність абсорбційного кола зразка, Ф;

$$C_{oa\delta} = \frac{\epsilon_{roa\delta} \epsilon_o S_o}{d}$$

R_o - активний опір кола провідності зразка, Ом;

$$R_o = \frac{d}{\gamma_o S_o};$$

$R_{oa\delta}$ - активний опір абсорбційного кола зразка, Ом;

$$R_{oa\delta} = \frac{d}{\gamma_{a\delta} S_o};$$

$\epsilon_{roa\delta}$ - абсолютна діелектрична проникність зразка при абсорбційній поляризації, Ф/м;

ε_{rou} - абсолютна діелектрична проникність зразка при швидкій поляризації, Ф/м;
 $S_{ou} = S_{oab} = S_o$ - площа зразка, м²; $S_o = \pi r^2$;
 r - радіус зразка, м;
 d - відстань між електродами, м.

$$R_o = \frac{d}{\gamma_o S_o},$$

$$R_{oab} = \frac{d}{\gamma_{oab} S_o}$$

З урахуванням (8) та (10), сумарний струм I_Σ усієї схеми (рисунок 2) буде дорівнювати:

$$I_\Sigma = U \frac{1 + \omega^2 \tau_{oab}^2 (R_{oab} + R_o)}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{oab}^2)} + jU \frac{\omega(\tau_{oab} + R_o C_{ou} + \omega^2 \tau_{oab} R_o C_{ou})}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{oab}^2)} \quad (11)$$

Ступінь нагріву матеріалу визначається дійсною частиною рівняння (11), тобто його активною складовою:

$$I_a = U \frac{1 + \omega^2 \tau_{oab}^2 (R_{oab} + R_o)}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{oab}^2)} \quad (12)$$

Відповідно, реактивна складова сумарного струму має наступний вигляд:

$$I_p = jU \frac{\omega(\tau_{oab} + R_o C_{ou} + \omega^2 \tau_{oab} R_o C_{ou})}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{oab}^2)} \quad (13)$$

При цьому, потужність, яка витрачається на відповідне нагрівання продукту, з урахуванням (11), визначається за виразом:

$$P_a = I_a U = U^2 \frac{1 + \omega^2 \tau_{oab}^2 (R_{oab} + R_o)}{R_o (1 + \omega^2 \tau_{oab}^2)} \quad (14)$$

В свою чергу, кількість тепла, яка витрачається на нагрів матеріалу та випаровування вологи дорівнює [5]:

$$Q_e = \rho_o R_v r \frac{dU}{dt} \left(1 + \frac{Cd\vartheta}{r_o dU} \right) \quad (15)$$

де $Cd\vartheta$ – кількість тепла, яке витрачено на нагрівання, кДж/кг;
 $r_o dU$ – кількість тепла, яке витрачено на випаровування вологи з матеріалу, кДж/кг.

Якщо прирівняти (14) і (15) $P_a dt = Q_e$, та розв'язати отриманий вираз відносно t , отримаємо рівняння залежності часу сушіння від зміни електрофізичних та теплофізичних параметрів.

Крім того, з урахуванням (10), із (11) маємо: $I_\Sigma = U \Upsilon_\Sigma$. З урахуванням того, що:

$$C_{ou} = \frac{\varepsilon_{rou} \varepsilon_o S_o}{d},$$

$$C_{oab} = \frac{\varepsilon_{rou} \varepsilon_o S_o}{d};$$

після деяких перетворень і приймаючи те, що $\varepsilon_{rou} = \varepsilon_{rou} = \varepsilon_{ro}$; $\gamma_o = \gamma_{oab} = \gamma$, отримаємо:

$$I_\Sigma = U \Upsilon_\Sigma = U \left(\frac{\gamma_o S_o}{d_o} + \frac{\omega^2 \varepsilon_{ro}^2 \varepsilon_o^2 S_o}{\gamma_o d_o (1 + \omega^2 \left(\frac{\varepsilon_{ro} \varepsilon_o}{\gamma_o} \right)^2)} \right) + jU \left(\frac{\omega \varepsilon_{ro} \varepsilon_o S_o}{d_o} + \frac{\omega \varepsilon_{ro} \varepsilon_o S_o}{d_o (1 + \omega^2 \left(\frac{\varepsilon_{ro} \varepsilon_o}{\gamma_o} \right)^2)} \right) \quad (16)$$

Із (14) маємо:

$$P_a = I_a U = U^2 \left(\frac{\gamma_o S_o}{d_o} + \frac{\omega^2 \varepsilon_{ro}^2 \varepsilon_o^2 S_o}{\gamma_o d_o (1 + \omega^2 \left(\frac{\varepsilon_{ro} \varepsilon_o}{\gamma_o} \right)^2)} \right) \quad (17)$$

Отримані рівняння (11), (14), (16), (17), зв'язують параметри електромагнітного поля (ЕМП), електрофізичні, теплові, фізико-механічні характеристики біопродукту та геометричні розміри первинного перетворювача (робочого органу електротехнологічної установки), створюють передумови проведення експериментальних досліджень та визначають шлях структурної побудови і розробки алгоритму створення електротехнологічних систем обробки продуктів рослинного походження, а саме, електротехнологічних систем сушки фруктів.

Як видно із наведених теоретичних залежностей, для розрахунку параметрів електро-технологічного технічного засобу обробки біо-продуктів необхідно знання їх електрофізичних характеристик: діелектричної проникності ε_{ro} , електричної провідності γ_o , значення діелектричних втрат $tg\delta$ при різних параметрах дії ЕМП, напруги обробки U , частоти ω , значення яких можна отримати на підставі проведення експериментальних досліджень.

Для визначення кількісних показників оброблюваного продукту нами були проведені експериментальні дослідження по взаємодії ЕМП з біопродуктом з застосуванням вірогіднісно-статистичних методів оцінки досліджуваних параметрів. Дослідження проводилися для яблук сорту "Мантет" і абрикосу сорту "Любава".

Вимірювання проводилися для трьох «нарізок» одного і того ж сорту з трьохкратною повторністю, при сумісній дії конвективного та прямого електронагріву, при різних значеннях температури конвективного нагріву v (25, 40, 55 °С) та різних

значеннях прикладеної змінної та постійної напруги U (10,15,20 В) при прямому електронагріві.

При цьому вимірювалися вихідні параметри післядії теплового і електричного нагріву змінного струму I_3 та постійного струму I_n , які протікають

скрізь зразок, а також масу зразка m_3 та його температуру ν_3 через визначені проміжки часу τ . Результати експериментальних досліджень наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 - Конвективний + Прямий електронагрів. Параметри: $U_{EH} = 15$ В; $t_{н.с.} = 40$ °С; $h_{зр} = 5$ мм; $\varnothing_{зр} 28$ мм; Абрикос, сорт "Любава"

τ , хв	0	5	9	15	30	45	60	75	90
I_Σ , mA	25	510	580	390	130	45	23	12	5
I_n , mA	24	250	270	240	50	10	7,1	3,3	2,3
m , г	3,69	3,52	2,89	1,92	1,52	1,20	1,08	1,01	0,95
$\Delta m = m_n - m_i$, г	0	0,77	0,80	1,77	2,17	2,49	2,61	2,68	2,74
$\cos \varphi = I_n / I_\Sigma$	0,96	0,49	0,466	0,615	0,385	0,222	0,309	0,275	0,460
$\sin \varphi$	0,259	0,866	0,891	0,788	0,921	0,974	0,951	0,96	0,883
$Z = U_{EH} / I_\Sigma$, Ом	700	129,4	125,9	138,5	215,4	433,3	752,2	1250	3000
$R = Z \cos \varphi$, Ом	576	14,4	12,1	23,7	44,4	74,1	201,3	343,8	1380
$X_c = Z \sin \varphi$, Ом	155,3	25,5	23,1	30,3	106,2	324,8	620,3	1202	2649
$I_p = I_\Sigma \sin \varphi$, mA	6,5	441,7	516,8	307,3	119,7	43,8	21,9	11,5	4,4

За результатами експериментальних досліджень побудовані залежності струмів та опорів від зміни маси зразка в процесі нагріву (рисунки 3 та 4).

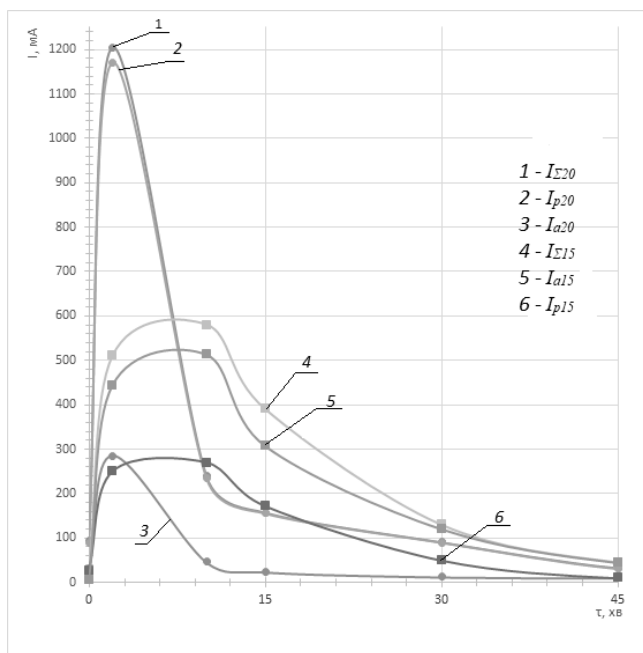


Рисунок 3 – Залежності струмів від зміни вологості в процесі сушіння абрикосу сорту «Любава» при: $U_{EH} = 15$ В, $U_{EH} = 20$ В, $t_{н.с.} = 40$ °С

Із аналізу залежностей, які наведено на рисунках 3 і 4 слід визначити, що: біопродукт рослинного походження має як активну так і реактивну складові струму, які протікають по продукту в ході процесу обробки (рисунку 3); в ході обробки, активний струм I_a (струм нагріву) постійно зменшувався, що пов'язано з випарюванням маси вологи.

Найбільша зміна струму спостерігається у початковий період процесу (рисунку 3; реактивний струм I_p на початку процесу зменшується до

визначеного значення, а потім декілька збільшується, що вказує на зміну діелектричної постійної біопродукту в ході сушки (рисунку 3); при збільшенні напруги обробки значно скорочується тривалість сушіння (рисунку 3); під дією електричного струму підвищується проникність клітин яблука, що приводить до збільшення соковіддачі, при цьому відмічається зниження електричного опору рослинної сировини (рисунку 4); в процесі обробки збільшується швидкість зміни реактивного опору по відношенню до активного, що вказує на значне зменшення вільної вологи у біоматеріалі (рисунку 4).

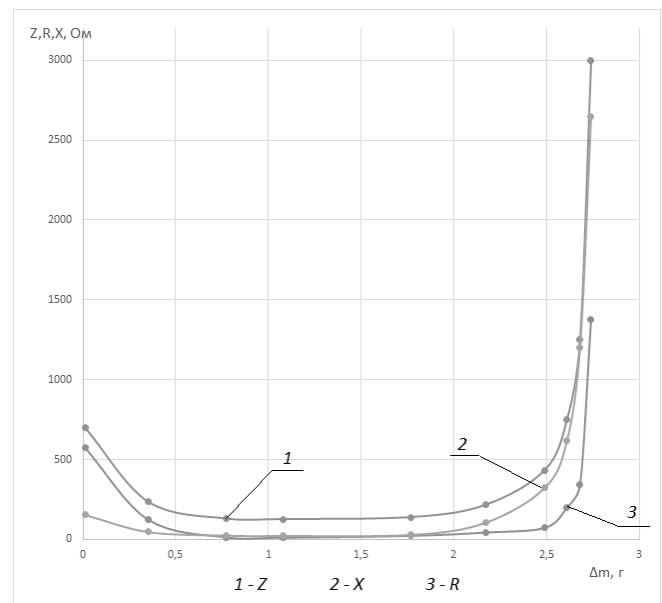


Рисунок 4 – Залежності опорів від зміни вологості в процесі сушіння абрикосу сорту «Любава» при: $U_{EH} = 15$ В, $U_{EH} = 20$ В, $t_{н.с.} = 40$ °С

Висновки:

1. В результаті досліджень анато-мічної і морфологічної структури розгляданого біопродукту встановлено, що він може бути змодульованим і прийнятим далі до теоретичного розгляду, як колоїдне капілярно-пористе тіло.

2. На основі прийнятих допущень по п.1 і застосованого методу обробки продукту, розроблено фізико-математичну модель біопродукту, що дозволяє теоретично визначити параметри дії електромагнітного поля на біопродукт і провести їх аналіз, а також вибрати оптимальні параметри ЕМП процесу електротехнологічної обробки і дати їх кількісну оцінку.

3. Проведені теоретичні дослідження дозволяють визначити зв'язок параметрів електромагнітного поля (ЕМП), електрофізичних, теплових, фізико-механічних характеристик біопродукту та геометричні розміри первинного перетворювача (робочого органу електротехнологічної установки), створюють передумови проведення експериментальних досліджень та визначають шлях структурної побудови і розробки алгоритму створення електротехнологічних систем обробки продуктів рослинного походження, а саме, електротехнологічних систем сушки фруктів.

4. Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що:

4.1) біопродукт рослинного походження має як активну так і реактивну складові струму, які протікають по продукту в ході процесу обробки, чим підтверджується правильність теоретичних досліджень;

4.2) в ході обробки, активний струм (струм нагріву) постійно зменшується, що пов'язано з випарюванням маси вологи. Найбільша зміна струму спостерігається у початковий період процесу;

4.3) реактивний струм на початку процесу зменшується до визначеного значення, а потім декілька збільшується, що вказує на зміну діелектричної постійної біопродукту в ході сушіння;

4.4) при збільшенні напруги обробки значно скорочується тривалість сушіння;

4.5) в процесі обробки, збільшується швидкість зміни реактивного опору по відношенню до активного, що вказує на значне зменшення вільної вологи у біоматеріалі;

4. в процесі обробки, при зміні його вологості, змінюється діелектрична проникність біоматеріалу.

5. В результаті досліджень визначені кількісні значення деяких електрофізичних характеристик досліджуваного біопродукту (активного та ємнісного опорів).

6. Встановлено, що даний метод дозволяє регулювати та підтримувати більш високу температуру всередині матеріалу, що забезпечує перетік тепла від центральних прошарків до периферії; прискорити процес сушіння.

7. Крім того, параметри процесу можуть служити інформативними ознаками якісного стану біопродукту, а саме, про його вологість, в один і той же час.

Список використаної літератури

1. Яковлев В. Ф. Взаємний вплив електричного та акустичного нагрівання біологічних продуктів у технологічному процесі сушіння. / В.Ф. Яковлев, О.Ю. Савойський // Вісник Сумського національного аграрного університету, серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів" – 2017. - Випуск 10 (32).- С. 131-134

2. Атаназевич, В. И. Сушка пищевых продуктов: Справочное пособие / В. И. Атаназевич. – М.: ДеЛи, 2000. – 296с.

3. Левина Р. Е. Морфология и экология плодов / Р. Е. Левина. – Ленинград: Наука, 1987. – 160 с.

4. Карпов Ю. О. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: Підручник / Ю. О. Карпов, Ю. І. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 407 с.

5. Білей П. В. Ідентифікація конвективного процесу сушіння деревини / П. В. Білей, І. А. Соколовський, Р. О. Рокунь // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2017. – Вип. 27(9). С. 64–67.

Анотация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЯМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ

Яковлев В. Ф., Савойский А. Ю.

Изложенный материал предполагает теоретическое обоснование основных уравнений связи параметров воздействия электромагнитного поля на биологический объект растительного происхождения с его биофизическими и электрофизическими характеристиками, подготовки теоретической базы проведения экспериментальных исследований и возможности технической реализации электро-технологических систем обработки сельскохозяйственной продукции по необходимому параметру.

Abstract

THE USE OF DIRECT ELECTRIC HEAT IN A TECHNOLOGICAL PROCESS OF COMBINED DRYING

V. Yakovlev, A. Savoiskyi

The presented material provides a theoretical substantiation of the basic equations of the parameters of the action of the electromagnetic field on the biological object of plant origin with their biophysical and electrophysical characteristics, the preparation of the theoretical basis for conducting experimental research and the possibility of technical realization of the electro-technological systems for processing agricultural products according to the required parameter.