

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка

Федюшко Олександр Юрійович

УДК 631.371

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД І ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ
ЗАХИСТУ ПЛОДІВ ВІД ГРИБКОВИХ ХВОРОБ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

Автореферат
дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор Косуліна Наталія Геннадіївна, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, завідувач кафедри біомедичної інженерії та теоретичної електротехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Піротті Євген Леонідович, національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних;

доктор технічних наук, професор Аврунін Олег Григорович, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедичної інженерії

Захист відбудеться « 25 » 10 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засідання спеціалізованої вченої ради Д64.832.01 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий « 18 » вересня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

О. Д. Черенков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення населення плодовою продукцією визначається не лише рівнем виробництва, але й ефективною організацією зберігання. Практичний досвід показує, що для зберігання плодово-ягідної продукції широкого розповсюдження набув метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем (РГС). Застосування РГС дозволяє значно збільшити вихід стандартної продукції в порівнянні із звичайним холодильним зберіганням на 10...15%, зменшити втрати в 2...3 рази без помітного зниження якості плодів. Існуюча система зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем поряд з перевагами характеризується і рядом недоліків. До основного недоліку слід віднести те, що надлишковий вміст вуглекислого газу в атмосфері зберігання здатне викликати порушення обміну речовин і розвиток побуріння тканин перикарпія, навіть у сортах, стійких до цих захворювань. Із-за надлишкового накопичення продуктів анаеробного обміну різко знижуються смакові якості, підвищується чутливість до низькотемпературних пошкоджень, знижується стійкість до мікроорганізмів. Значна доля втрат плодів (до 30%) в період зберігання доводиться на поразку їх фізіологічними розладами і хворобами (цвіль, стрептококи, грибки, спорові бактерії та ін.). Літературний аналіз показує, що сучасна технологія зберігання плодів в газовому середовищі є не завжди ефективною та дорогавартісна. У зв'язку з чим виникає необхідність в розробці нових, доступніших і менш витратних технологій зберігання. Ефективна, недорога і доступна технологія зберігання плодів може бути здійснена за допомогою використання низькоенергетичної електромагнітної технології і електронних систем для знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні для їх тривалого зберігання. Проте, знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні може бути отримане лише при оптимальному поєднанні біотропних параметрів впливаючого ЕМП (частота випромінювання, щільність потоку потужності, експозиція та ін.). Таким чином, дослідження і розробка низькоенергетичних електромагнітних методів і джерел ЕМВ для знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи пов'язана із загальними Українськими

науковими програмами: постановою Кабінету Міністрів України від 23.08.2016 р. № 556 «Перелік пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року»; постановою Кабінету Міністрів України від 08.09.2015 р. № 684 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року». За планами НДР ХНТУСГ були виконані наступні роботи: номер ДР0110U002505 «Електромагнітні технології і технічні системи підвищення продуктивності біологічних об'єктів рослинництва»; номер ДР0109U003721 «Результати експериментальних досліджень з впливу ЕМП КВЧ діапазону на біологічні об'єкти»; номер ДР 0118U003311 «Використання електромагнітних технологій для зберігання сільсько-господарської продукції».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка низькоенергетичних електромагнітних методів і джерел ЕМВ для знищення фізіологічних і грибкових хвороб на плодах яблунь в процесі їх тривалого зберігання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- обґрунтувати біофізичну дію низькоенергетичних випромінювань КВЧ діапазону для знищення фізіологічних і грибкових хвороб на плодах яблунь в процесі їх тривалого зберігання;

- на основі теоретичних досліджень визначити діапазон змін біотропних параметрів низькоенергетичного випромінювання (частота випромінювання, щільність потоку потужності, експозиція та ін.) для знищення фізіологічних і грибкових хвороб на поверхні яблук;

- розробити джерело ЕМВ КВЧ діапазону для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні плодів;

- провести експериментальні дослідження енергетичних характеристик генератора електромагнітного випромінювання КВЧ діапазону;

- провести багатофакторний експеримент з уточнення біотропних параметрів ЕМВ для знищення мікроорганізмів на поверхні плодів;

- провести виробничі дослідження збереження плодів яблунь оброблених перед закладкою на зберігання ЕМВ.

Об'єкт дослідження. Процес впливу низькоенергетичних ЕМВ на мікроорганізми, які викликають фізіологічні і грибкові хвороби на плодах яблунь в процесі їх тривалого зберігання;

Предмет дослідження. Низькоенергетичний електромагнітний метод і електронна система ЕМВ для знищення мікроорганізмів, що викликає грибкові хвороби на плодах яблунь.

Методи дослідження. Для досліджень були використані методи математичної фізики; теоретичні положення електродинаміки, біофізики; основи електроніки і схемотехніки; методи планування повнофакторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в даній роботі:

- на основі розробленої моделі вперше досліджений процес взаємодії низькоенергетичних ЕМП з мікроорганізмами, викликаючих хвороби плодів яблунь;

- вперше, на основі теоретичних досліджень були визначені параметри низькоенергетичних ЕМВ для знищення грибної мікрофлори на плодах яблунь;

- отримала подальший розвиток теорія досліджень, пов'язана з розробкою високостабільного, перебудовуваного по частоті генератора для знищення мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні, яка відрізняється від відомих тим, що в ній НВЧ система побудована на основі ФАПЧ, а у вихідному каскаді використана система на основі відкритого бочкоподібного резонатора з лавино-пролітними діодами;

- вперше математично інтерпретований вплив параметрів низькоенергетичного ЕМП по знищенню грибних мікроорганізмів на поверхні плодів при їх тривалому зберіганні.

Практична вартість отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних та експериментальних досліджень, розроблений низькоенергетичний електромагнітний метод і генераторна система електромагнітних коливань для знищення грибних мікроорганізмів на поверхні плодів яблунь. Застосування даної технології дозволяє повністю зберегти якість і товарний вигляд плодів, понизити витрати на зберігання до 40%...60% в порівнянні з існуючою технологією зберігання плодів, збільшити тривалість зберігання до 5....6 місяців. Результати досліджень апробовані в 2017, 2018 роках. Прибуток від вживання інформаційного електромагнітного методу склав 10000 грн. на тонну яблук.

Особистий вклад пошукача в наукових роботах, написаних в співавторстві, полягає в наступному:

- в роботі [5] обґрунтував параметри генератора на основі двохкільцевої підстройки частоти.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на: міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (Україна), (Київ, НУБіП-2016 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, ХНТУСГ, 2016 р.); міжнародній науковій конференції (Росія), (Белгород, БГСХА, 2016 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Енергозбереження – найважливіша умова інноваційного розвитку АПК» (Мінськ, БДАТУ, 2016 р.); науково-практичній студентській конференції (Харків, ХНТУСГ, 2017 р. науково-технічній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів та вчених (м. Кам'янець-Подільський, ПДАТУ 2016 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 4 статтях науково-технічних збірників, двох статтях в науково-технічних журналах та 3 тезах на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Вона містить 138 сторінки, 41 рисунок, 8 таблиць, 2 додатка на 7 сторінках, список використаних джерел нараховує 139 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, формулюється наукове завдання, що розв'язується, розкривається сутність і стан цього завдання, висвітлюється зв'язок роботи з програмами, планами та темами НДР, формулюються напрямки та наукові задачі дослідження, розв'язання яких забезпечує цінність одержаних результатів, визначається наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі розглянуті особливості хвороб фруктів та овочів при їх тривалому зберіганні. До грибкових мікроорганізмів відносяться: плодова гнилизна, чорна гнилизна, пеницильоз,

антрактоз, фузаріоз, ботритіоз, парша, альтернаріоз, кладоспоріоз, стемфіліоз та ін. Основними втратами об'ємів фруктів при зберіганні є втрати, пов'язані з хворобами грибкового характеру; їх об'єм важко піддається прогнозам, але у разі масового поширення може досягати 100%. До основних заходів, обмежуючих виникнення і розвиток грибкових мікроорганізмів в період зберігання відноситься комплекс хімічних препаратів та інших заходів боротьби з шкідниками і хворобами, схильними до зараження плодів на дереві; ретельне відбракування хворих і пошкоджених яблук при сортуванні і упаковці. Практичний досвід показує, що для зберігання плодово-ягідної продукції широкого поширення набув метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем (РГС). Застосування РГС дозволяє значно збільшити вихід стандартної продукції в порівнянні із звичайним холодильним зберіганням на 10...15%, зменшити втрати в 2...3 рази без помітного зниження якості плодів, збільшити лежкоздатність багатьох сортів до чотирьох місяців в порівнянні із звичайним зберіганням.

Економічний ефект від зберігання плодів в РГС в порівнянні із звичайним зберіганням складає додатковий прибуток до 60%. Існуюча система зберігання плодів поряд з достоїнствами характеризується і рядом недоліків. З проведеного аналізу виходить, що надлишковий вміст вуглекислого газу в атмосфері зберігання здатний викликати порушення обміну речовин і розвиток побурення тканин перикарпія, навіть у сортів, стійких до цих захворювань.

Аналіз експериментальних й теоретичних досліджень з впливу електромагнітних полів на фізико-хімічні процеси в біологічних об'єктах, що проводяться: у Харківському НТУСГ ім. П. Василенка під керівництвом О. Черенкова, Ю. Мегеля, М. Лисиченка, Н. Косуліної; у ІРЕ РАН під керівництвом Н. Д. Дев'яткова; у Новосибірську під керівництвом О. П. Казначеева; у ТулДу під керівництвом Нефедова Є. І. показують, що найбільший вплив на процеси в біологічних об'єктах слід чекати від інформаційних ЕМП міліметрового діапазону. Проте, знищення фізіологічних і грибкових хвороб плодів яблуні може бути отримане лише при оптимальному поєднанні біотропних параметрів впливаючого ЕМП (частота випромінювання, потужність, експозиція та ін.).

Визначення оптимальних параметрів ЕМП міліметрового діапазону для знищення грибкових мікроорганізмів на поверхні яблук

вимагає проведення як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Застосування КВЧ випромінювання в медицині і тваринництві показало, що ефект від дії електромагнітних випромінювань для знищення мікроорганізмів залежить від використання високостабільних по частоті генераторів з високими вимогами по спектрально-флуктаційним характеристикам.

Аналіз генераторів КВЧ діапазону, що випускаються серійно, по таких параметрах, як нестабільність частоти, похибка встановлення вихідної частоти, діапазон перебудови, показав, що вони не можуть бути використані для знищення мікроорганізмів.

Отже, необхідні дослідження з створення високостабільних джерел ЕМП КВЧ діапазону, що відповідають високим вимогам з спектру вихідних сигналів, діапазону перебудови частоти і потужності вихідного сигналу.

У розділі 2 для визначення біотропних параметрів ЕМП (частота, потужність, експозиція), що викликають пригніченість патогенних мікроорганізмів на поверхні яблук, були проведені дослідження з розподілу електричного поля усередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами на основі моделі, яка представлена кулею, заповненою ізотропним однорідним середовищем з діелектричною і магнітною проникністю. Завдання полягає у визначенні цього поля як усередині так і поза біооб'єктом.

Оскільки біооб'єкт (яблука) має сферичну симетрію, то розглядатимемо задачу про дифракцію в сферичній системі координат з початком в центрі біооб'єкту (рис. 1).

Для вирішення даної задачі були використані потенціали Дебая і метод розділення змінних в сферичній системі координат.

Загальне рішення системи рівнянь по розподілу електричного поля усередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами було зведене до вирішення двох скалярних рівнянь Гельмгольца для електричного і магнітного потенціалів Дебая.

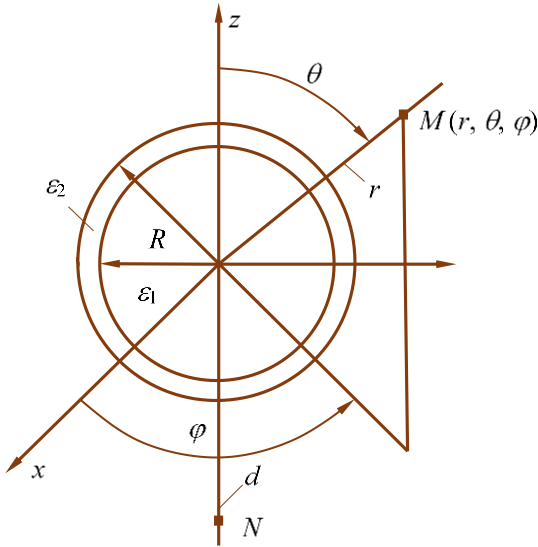


Рис. 1. Електродинамічна модель яблука з шаром мікроорганізмів

$$\Delta U_1 + k_1^2 U_1 = 0, \quad \Delta U_2 + k_1^2 U_2 = 0, \quad \Delta U_3 + k_1^2 U_3 = 0, \quad (1)$$

де Δ – оператор Лапласа в сферичній системі координат

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right),$$

U_1, U_2, U_3 – електричні потенціали Дебая.

U_1 – описує поле дифракції усередині біооб'єкту при $r < R$; U_2 – описує поле дифракції усередині прошарку мікроорганізмів при $R < r < R+h$ и U_3 – описує поле дифракції поза біооб'єктом і прошарком мікроорганізмів при $r > R+h$. Тоді компоненти поля дифракції в цих трьох областях простору можна представити в наступному вигляді:

$$E_r^1 = \frac{1}{k_1} \left[\frac{\partial^2(rU_1)}{\partial r^2} + k_1^2 rU_1 \right], \quad E_\theta^1 = \frac{1}{k_1 r} \frac{\partial^2(rU_1)}{\partial r \partial \theta}$$

при $r < R$ (2)

$$E_\varphi^1 = 0, \quad H_r^1 = H_\theta^1 = 0, \quad H_\varphi^1 = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_1)}{\partial \theta},$$

$$E_r^2 = \frac{1}{k_2} \left[\frac{\partial^2(rU_2)}{\partial r^2} + k_2^2 rU_2 \right], \quad E_\theta^2 = \frac{1}{k_2 r} \frac{\partial^2(rU_2)}{\partial r \partial \theta},$$

при $R < r < R+h$ (3)

$$E_\varphi^2 = 0, \quad H_r^2 = H_\theta^2 = 0, \quad H_\varphi^2 = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_2)}{\partial \theta},$$

$$E_r^3 = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial^2(rU_3)}{\partial r^2} + k^2 rU_3 \right], \quad E_\theta^3 = \frac{1}{k r} \frac{\partial^2(rU_3)}{\partial r \partial \theta},$$

при $r < R+h$ (4)

$$E_\varphi^3 = 0, \quad H_r^3 = H_\theta^3 = 0, \quad H_\varphi^3 = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_3)}{\partial \theta},$$

де $k_1 = k\sqrt{\varepsilon_1}$, $k_2 = k\sqrt{\varepsilon_2}$.

Отже, вихідне векторне завдання дифракції зведене до рівнянь Гельмгольца для потенціалів Дебая. Рішення цієї задачі можна побудувати за допомогою методу розділення змінних. Цей метод полягає в тому, що спочатку будуються окремі вирішення рівнянь (1) що є добутком функцій, кожна з яких залежить лише від однієї змінної (r чи θ). Такі рішення добре відомі і мають вигляд:

$$V_n(r_1, \theta) = P_n(\cos\theta) R_{n+1/2}(k_p r), \quad n = 0, 1, 2, \dots, p = 1, 2, \quad (5)$$

де $P_n(\cos\theta)$ – ортонормовані поліноми Лежандра,

$R_{n+1/2}(\dots)$ – циліндрові функції напівцілового індексу.

За допомогою цих окремих рішень можна побудувати загальні вирішення рівнянь (1) у вигляді нескінченних рядів по поліномах Лежандра. Ці рішення для кожної з трьох областей ($r < R$, $0 < \theta < \pi$), ($R < r < R+h$, $0 < \theta < \pi$), ($r > R+h$, $0 < \theta < \pi$) можна представити у вигляді області $r < R$:

$$U_1 = \frac{1}{k_1 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) a_n \psi_n(k_1 r) P_n(\cos \theta), \quad (6)$$

область $R < r < R+h$

$$U_2 = \frac{1}{k_2 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (b_n \psi_n(k_2 r) + c_n \eta_n(k_2 r)) P_n(\cos \theta); \quad (7)$$

область $r > R$

$$U_3 = \frac{1}{kr} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) d_n \eta_n(kr) P_n(\cos \theta). \quad (8)$$

Інтегральний ефект від дії збуджуючого поля на шар мікроорганізмів можна оцінити за допомогою усередненої за об'ємом шару напруженості електричного поля. В результаті перетворень для розрахунку середнього електричного поля було отримано рівняння:

$$E_{\text{сеп}} = \sqrt{|E_r^{\text{сеп}}|^2 + |E_{\theta}^{\text{сеп}}|^2}, \quad (9)$$

де
$$E_r^{\text{сеп}} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{k_2 R \bar{A}_0} [\bar{D}_0 (1 + ik_2 R) + \cos(k_2 R) - k_2 R \sin(k_2 R)], \quad (10)$$

$$E_{\theta}^{\text{сеп}} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{4k_2 R \bar{A}_1} [\sin(k_2 R) - i \bar{D}_1]. \quad (11)$$

$$\bar{D}_0 = \frac{\sin(k_2 R) \cos(k_1 R) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sin(k_1 R) + i \cos(k_1 R)}. \quad (12)$$

$$\bar{D}_1 = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) \sin(k_2 R) - \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{i \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) + \sin(k_1 R)}. \quad (13)$$

$$\bar{A}_0 = i \bar{D}_0 e^{ik_2 h} \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} - 1 \right) - i \cos(k_2 (R + h)) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \sin(k_2 (R + h)). \quad (14)$$

$$\bar{A}_1 = i \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right) e^{ik_2 h} \bar{D}_1 - \sin(k_2 (R + h)) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cos(k_2 (R + h)). \quad (15)$$

На підставі (9) були проведені чисельні розрахунки величини $E_{сер}$ нормованою на E_0 – величину напруженості електричного поля збуджуючої сферичної хвилі. Розрахунки проводилися в діапазоні частот $50 \text{ ГГц} \leq f \leq 90 \text{ ГГц}$. Вибір цього діапазону частот обумовлений тим, що при таких частотах електромагнітне поле збуджуючої хвилі практично не проникає в середину біооб'єкту. На рис. 2. приведені результати розрахунків залежності величини $E_{сер} / E_0$ від частоти збуджуючої електромагнітної хвилі.

Як видно з рис. 2, частотна залежність середнього поля має резонансну поведінку. Максимальне значення середнього поля досягається на частоті $f = 75 \text{ ГГц}$.

Для знищення шкідливих мікроорганізмів на поверхні яблук необхідними параметрами є не лише частота ЕМП, але і наведений потенціал на мембрані клітин. В результаті розрахунків було встановлено, що експозиція складає $t = 78 \text{ с}$, напруженість $E_{сер} = 10,56 \text{ В/м}$, наведений потенціал $\varphi_{нав} = 185 \text{ мВ}$, а $E_0 = 6,26 \text{ В/м}$. Результати чисельного аналізу показали, що для знищення шкідливих мікроорганізмів на половині поверхні яблук слід використовувати

джерело електромагнітного випромінювання в КВЧ діапазоні з потужністю 0,7 Вт на 1 м².

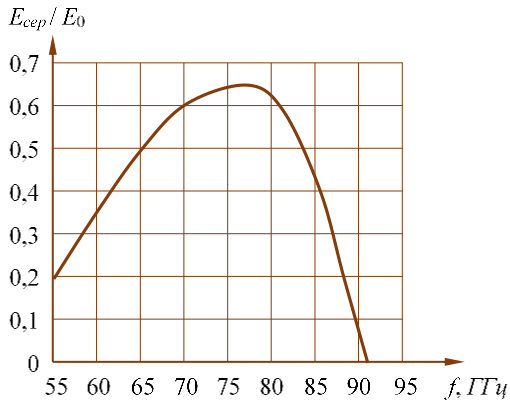


Рис. 2. Залежність нормованої середньої напруженості електричного поля від частоти збуджуючої хвилі

Розділ 3. «Теоретичне обґрунтування по створенню джерела електромагнітної енергії для знезараження яблук» присвячений розробці спеціального джерела КВЧ діапазону на основі фазового автопідстроювання частоти автогенератора по частоті кварцового генератора. Теоретичний аналіз показав, що для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук слід проводити з використанням ЕМВ в діапазоні частот 73 – 77 ГГц, експозицією 60...80 с, потужністю 650...750 мВт і відносною нестабільністю частоти 10^{-7} ... 10^{-8} . Рішення задачі, пов'язане з визначенням структурної схеми високостабільного електромагнітного джерела в діапазоні частот на основі ФАПЧ, зводиться до визначення елементів системи перенесення спектру від кварцового генератора в міліметровий діапазон. Система ФАПЧ може розглядатися як фільтр низьких частот (ФНЧ) відносно шумів коливач опорної частоти і як фільтр верхніх частот (ФВЧ) відносно шумів підстроюваного генератора. Причому постійна фільтру одна і та ж. Застосування системи ФАПЧ дозволить забезпечити необхідне відношення сигнал/шум на виході генератора при мінімальному значенні дисперсії фази вихідного сигналу. Оптимальні параметри схеми генератора КВЧ діапазону визначаються

по критерію мінімуму дисперсії частоти (фази) коливань вихідного сигналу генератора, що синхронізується, з врахуванням характерних особливостей спектрів всіх елементів схеми:

$$\sigma_{\varphi_0}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi_0}(\Omega) \frac{1}{1+(0,5\Omega\tau)^2} d\Omega, \quad (15)$$

де $S_{\varphi_0}(\Omega)$ – енергетичний спектр зміни частоти генератора, що синхронізується; τ – інтервал часу виміру; $\sigma_{\varphi_0}^2$ – дисперсія відхилень частоти генератора, що синхронізується.

Показники системи перетворення частоти цілком визначаються показниками ФАПЧ: смугами захоплення і утримання, стійкістю, здатністю, що фільтрує, числом кілець ФАПЧ. На характеристики ФАПЧ роблять великий вплив: коефіцієнт помноження частоти $N_{\text{ломн}}$, запізнювання в трактах підсилювача, помножувача і синтезатора частот, застосування пропорційно-інтегруючого фільтру після фазового детектора.

Функціональна схема двохкільцевої системи фазового автопідстроювання частоти вихідного автогенератора, що стабілізується, по частоті кварцового генератора представлена на рис. 3.

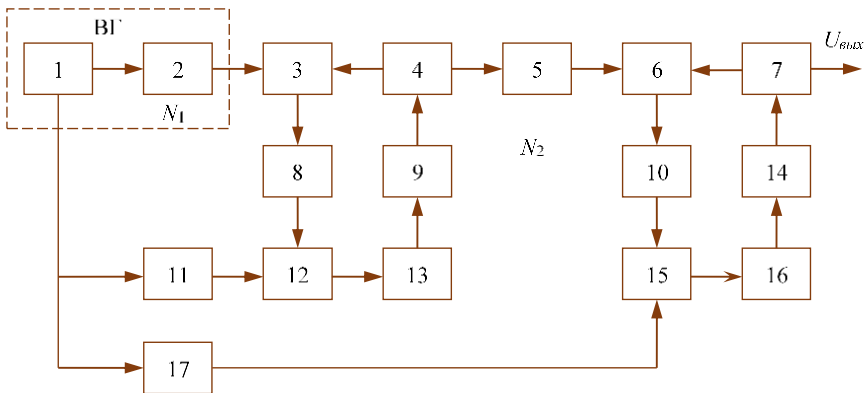


Рис. 3. Структурна схема генератора з двома кільцями ФАПЧ:

1 – кварцовий генератор; 2, 5 – помножувачі частоти; 3,6 – змішувачі; 4 – підстроюваний проміжний генератор; 8, 10 – підсилювачі проміжної частоти; 12,15 – ФД; 11, 17 – синтезатори; 13, 16 – ФПЧ; 9, 14, 16 – УПС.

Відповідно до функціональної схеми (рис. 3) спектральна потужність фазових флуктуацій на виході двохкільцевої системи визначатиметься виразом:

$$S_{\varphi\Gamma}(\Omega) = S_{\varphi\Gamma}^0(\Omega) \left| \frac{1}{1+W_2(j\Omega)} \right|^2 + S_{\varphi OC}(\Omega) \left| \frac{W_2(j\Omega)}{1+W_2(j\Omega)} \right|^2, \quad (16)$$

де $S_{\varphi\Gamma}^0(\Omega)$ – спектральна потужність фазових флуктуацій вихідного автогенератора; $W_2(j\Omega)$ – передавальна функція розімкненого другого кільця системи ФАПЧ;

$$S_{\varphi OC}(\Omega) = \{S_{\varphi_0}(\Omega) + S_{\varphi VM2}(\Omega)\} N_2^2 - \quad (17)$$

спектральна потужність фазових флуктуацій сигналу зовнішнього кільця ФАПЧ; $S_{\varphi_0}(\Omega)$ – спектральна потужність фазових флуктуацій першого кільця; $S_{\varphi VM2}(\Omega)$ – спектральна потужність фазових флуктуацій помножувача частоти другого кільця ФАПЧ. Коефіцієнт множення N_2 визначається співвідношенням $N_2 = N_2 / N_1$, де N – коефіцієнт помноження частоти системи переносу спектру. Таким чином, вираз для спектральної потужності фазових флуктуацій генератора КВЧ діапазону (73...77 ГГц) визначатиметься виразом:

$$S_{\varphi\Gamma}(\Omega) = S_{\varphi\Gamma}^0(\Omega) \left| \frac{1}{1+W_2(j\Omega)} \right|^2 + S_{\varphi_0}(\Omega) N_2^2 \left| \frac{W_2(j\Omega)}{1+W_2(j\Omega)} \right|^2 + S_{\varphi VM2}(\Omega) N_2^2 \left| \frac{W_2(j\Omega)}{1+W_2(j\Omega)} \right|^2. \quad (18)$$

Як впливає з аналізу отриманих результатів найбільш прийнятними параметрами двохкільцевої системи ФАПЧ, при яких нестабільність частоти генератора, що синхронізується, складе 10^{-8} , будуть параметри: $T_V = 10^{-6}$ с; $T_{\phi d} = 10^{-3}$ с; $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$ с; $T_3 = 10^{-4}$ с; $T_4 = 10^{-5}$ с; $\omega_{y0} = 10^5$ рад; $N_1 = 150$; $N_2 = 10$; пригнічення

побічних гармонік вхідної частоти не менше 40 дБ; рівень фазових шумів $W_\varphi = 100...110$ дБ/Гц; а відношення потужності сигналу до потужності шумів $P_c/P_{ш}$ склало 67,3 дБ.

Для аналізу стійкості системи ФАПЧ по критерію Гурвіця було використаний запис процесів за допомогою диференційного рівняння

$$\begin{aligned}
 & P^5(T_y + T_{\phi Д} + T_1 + T_4) + P^4(T_y T_{\phi Д} T_1 + T_1 T_y T_4 + T_y T_{\phi Д} T_4 + T_{\phi Д} T_1 T_4) + \\
 & + P^3(T_1 T_y + T_y T_{\phi Д} + T_{\phi Д} T_1 + T_y T_4 + T_{\phi Д} T_4 + T_1 T_4) + \\
 & + P^2(T_y + T_{\phi Д} + T_1 + T_4 + \Omega_{вД} T_2 T_3) + P(1 + \Omega_{вД} T_2 + \Omega_{вД} T_3) + \Omega_{вД}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Розрахунки показують, що система ФАПЧ має запас стійкості.

У четвертому розділі приведені схеми і параметри елементів генератора КВЧ діапазону: кварцового генератора; помножувачів; генератора, що синхронізується. Кварцовий резонатор типу КХ-9В працює на першій механічній гармоніці з частотою 50 МГц. З отриманих залежностей виходить, що потужність на виході кварцового генератора складає 25...28 мВт, відносна нестабільність частоти за $\tau = 10^{-3}$ с дорівнює 10^{-8} , а спектральна потужність фазових шумів сигналу на виході кварцового генератора складає -134 дБ/Гц при частоті настроєні від несучої $F = 10$ кГц. Далі експериментально були розглянуті помножувачі і підсилювачі в кільцях ФАПЧ генератора. У діапазоні до 300 МГц застосовувалися помножувачі з КСХ по входу 2 одиниці, а по виходу не більше 2,5. ККД множників складає від 23 до 25%. На частоті 500 МГц було розглянуто балансний підсилювач на транзисторах 2Т918Б з параметрами: потужність входу 500 мВт; коефіцієнт посилення по потужності 4; ККД 28%. У другому кільці ФАПЧ застосований помножувач на 10, зібраний на лавино-пролітному діоді типу 2А762А з вхідною потужністю 250 мВт і вихідною 50 мВт. Рівень побічних складових в помножувачі нижче за рівень несучої не менше 22 дБ. У якості каскаду, що синхронізується, на виході генератора був застосований відкритий бочкоподібний резонатор на трьох діодах 2А762А. У даній конструкції на частоті 75 ГГц була отримана потужність 750 мВт при ККД підсумовування потужності 80%. Короткочасна відносна нестабільність частоти на виході склала 10^{-8} за час вимірів 10^{-3} с, а міра пригнічення дискретних складових у вихідному сигналі не менше 48 дБ. Електронна перебудова частоти здійснюється варікапом з кругістю перебудови

600 МГц/В. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що для обробки яблук ЕМВ перед їх зберіганням слід використовувати джерело КВЧ випромінювання з параметрами:

- діапазон перебудови частоти 73 – 77 ГГц; вихідна потужність 650...750 мВт;

- пригнічення побічних гармонік в спектрі вихідного сигналу не менше 48 дБ;

- короткочасна відносна нестабільність частоти генератора 10^{-8} за 10^{-3} с.; електронна перебудова частоти 600 МГц/В.

Для уточнення біотропних параметрів ЕМП, якими повинні опромінювати яблука для тривалого зберігання, було проведено лабораторний експеримент. Для здобуття залежності, що зв'язує знищення мікроорганізмів на поверхні яблук з параметрами ЕМП міліметрового діапазону за наявності адитивної перешкоди випадкового характеру, було застосовано повнофакторне планування другого порядку. Після проведення вимірів і розрахунків отримано рівняння регресії, пов'язане із знищенням мікроорганізмів на поверхні яблук ЕМВ КВЧ діапазону:

$$Y = 307 - 300X_1 + 239X_2 + 249X_3 + 150X_1X_2 + \\ + 200X_1X_3 + 100X_2X_3 + 800X_1^2 + 100X_2^2 + 112X_3^2,$$

де Y – вихідний параметр (кількість мікроорганізмів на поверхні яблук); X_1 – частота електромагнітного випромінювання; X_2 – потужність джерела ЕМВ; X_3 – час опромінення мікроорганізмів на поверхні яблук.

В результаті проведених перетворень були отримані наступні значення факторів в оптимальній точці: $X_{1оп} = 0,4$; $X_{2оп} = -1,0$; $X_{3оп} = -1,0$, що відповідає таким значенням натуральних параметрів: частота ЕМП $75,8 \pm 0,1$ ГГц, потужність джерела – $650 \pm 0,5$ мВт, час дії на мікроорганізми 60 ± 5 с. Застосування ЕМП з оптимальними параметрами дозволило майже повністю знищити мікроорганізми на поверхні яблук в лабораторних умовах.

У виробничих умовах було використано 250 кг яблук сорту «Голден» в чотирьох повторях. У досліді перед зберіганням яблука оброблялися ЕМВ зі встановленими параметрами. У контролі яблука не опромінювалися ЕМВ. Результати електромагнітної технології для

тривалого зберігання яблук в умовах навколишнього середовища приведені в табл. 1.

Виробничі дослідження показали, що для тривалого зберігання яблук їх слід опромінювати ЕМВ з параметрами: частота 75,8 ± 0,1 ГГц; потужність на поверхні яблук 650 ± 0,5 мВт; час експозиції 60 ± 5,0 с, температура довкілля 18...20°C.

Таблиця 1

Результати зберігання яблук після електромагнітної обробки

| Варіант досліджу | Дослідні партії, кг | | | | Загальна кількість, кг. | Строк зберігання, днів | Вихід стандартної продукції,% |
|------------------|---------------------|-----|-----|-----|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Контроль | 250 | 250 | 250 | 250 | 1000 | 60 | 56 |
| Дослід №1 | 250 | 250 | 250 | 250 | 1000 | 60 | 100 |
| Дослід №2 | 250 | 250 | 250 | 250 | 1000 | 80 | 100 |
| Дослід №3 | 250 | 250 | 250 | 250 | 1000 | 100 | 100 |
| Дослід №4 | 250 | 250 | 250 | 250 | 1000 | 120 | 92 |

Застосування ЕМВ міліметрового діапазону для обробки яблук дозволило знищити мікроорганізми на їх поверхні і збільшити термін зберігання яблук до 120 діб при температурі 18...20°C в умовах зовнішнього середовища. Економічна ефективність від вживання електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук складає біля 10000 грн. на 1 т. продукції.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень створена інформаційна електромагнітна технологія і електронна система ЕМВ в міліметровому діапазоні довжин хвиль для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук з метою збільшення термінів їх зберігання в умовах зовнішнього середовища.

1. На підставі узагальнення фактичного матеріалу вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій можна зробити висновок, що для збільшення термінів зберігання яблук в умовах зовнішнього середовища необхідно знищувати мікроорганізми на поверхні яблук інформаційними ЕМВ довжин хвилі міліметрового діапазону.

2. Для дослідження процесу взаємодії монохроматичних електромагнітних хвиль з мікроорганізмами на поверхні яблук слід використовувати модель у вигляді кулі покритого тонким сферичним прошарком, який моделює прошарок мікроорганізмів.

3. Для руйнування мембрани патогенних мікроорганізмів на поверхні яблук необхідний потенціал на мембрані не менше 185 мВ, наведений зовнішнім електромагнітним джерелом потужністю 650...750 мВт.

4. Встановлено, що для вирішення поставленого завдання необхідне створення генератора КВЧ коливань з нестабільністю частоти 10^{-8} ... 10^{-7} на основі двохкільцевого фазового автопідстроювання частоти потужного генератора, що синхронізується, частотою 73...77 ГГц по кварцовому генератору, який працює на частоті 50 МГц.

5. Для здобуття потужності на виході генератора 650...750 мВт необхідно використовувати суматор потужності з трьох лавино-пролітних діодів (2A762A) на основі відкритого бочкоподібного резонатора з геометричними параметрами: $a_0 = 20$ мм; $r_0 = 120$ мм; $L = 20$ мм; $D_1 = 1$ мм; $D_2 = 1$ мм.

6. Для перебудови частоти у відкритому бочкоподібному резонаторі слід використовувати варікап типу 3A617 з крутістю перебудови 600 МГц/В, а величин потужності регулювати струмом на одному з діодів.

7. В установці для обробки яблук ЕМВ слід використовувати стрічковий транспортер з фторопласту-4 з характеристиками: відносна діелектрична проникність 1,9; тангенс кута діелектричних втрат на частоті 75,8 ГГц $(1...2) \times 10^{-4}$.

8. Обробка яблук перед зберіганням електромагнітним випромінюванням з параметрами: робоча частота 75,8 ГГц; короткочасна відносна нестабільність частоти 10^{-8} ; вихідна потужність 650 мВт; експозиція 60с. дозволяє зберегти яблука на протязі 120 діб в умовах зовнішнього середовища при температурі 18...20°C. Економічна ефективність від вживання електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук складає 10000 грн. на 1 т. продукції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ

[1] А. Федюшко, «Анализ технологии хранения фруктоплодов», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, вип.175, с. 160 – 162, 2016.

[2] А. Федюшко, «Биофизические предпосылки для уничтожения вредных микроорганизмов на плодах яблонь электромагнитной энергией», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, вип. 176. с. 93 – 95, 2016.

[3] А. Федюшко, «Анализ распределения электрического поля на поверхности яблок со слоем микроорганизмов», *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». б. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*, № 16 (1238), с. 141 – 146, 2017.

[4] А Федюшко, «Определение параметров электромагнитного излучения для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, вип. 187, с. 105 – 107, 2017.

[5] А. Ю. Федюшко та Н. Г. Косуліна, «Определение параметров генератора на основе двухкольцевой фазовой подстройки частоты», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, вип. 187, с. 142 – 144, 2017.

[6] А. Федюшко, «Опыт длительного хранения яблок, обработанных перед хранением электромагнитным излучением», *Науково-технічний журнал. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. № 1(6), с. 67 –73.

Опубліковані праці апробаційного характеру

[7] А. Федюшко А, «Требования к источникам КВЧ диапазона для уничтожения вредной микрофлоры на фруктоплодах», на *III Всеукраїнській науково-технічній конференції*. Актуальні проблеми автоматики та приладобудування, Харків, 201, с. 76 – 77.

[8] О. Федюшко, «Інформаційна електромагнітна технологія підвищення збереження фруктоплодів при їх тривалому зберіганні», на *IV міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених. Відроджувальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК*, Київ, 2016, с 59 – 60.

[9] О. Федюшко, «Електромагнітна технологія фруктоплодів при зберіганні», на *XIII-му міжнародному форумі молоді. Молодь і сільськогосподарська техніка в XXI сторіччі*, Харків, 2017, с. 236.

АНОТАЦІЯ

Федюшко О. Ю. Електромагнітний метод і технічні системи захисту плодів від грибкових хвороб. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2018.

Літературний аналіз показує, що сучасна технологія зберігання плодів в газовому середовищі є не завжди ефективною та на додаток дорогою. У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових, більш доступних і менш витратних технологій зберігання. У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень створено інформаційна електромагнітна технологія і електронна система електромагнітного випромінювання довжин хвиль в міліметровому діапазоні для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук з метою збільшення термінів їх зберігання в умовах зовнішнього середовища. Експериментальні дослідження показали, що для тривалого зберігання яблук їх слід опромінювати електромагнітним випромінюванням з параметрами: частота $75,8 \pm 0,1$ ГГц; потужність на поверхні яблук $650 \pm 0,5$ мВт; час

експозиції 60±5,0 с, температура навколишнього середовища 18...20°C. Застосування ЕМП міліметрового діапазону для обробки яблук дозволило знищити мікроорганізми на їх поверхні і збільшити термін зберігання яблук до 120 діб при температурі 18...20°C в умовах зовнішнього середовища. Економічна ефективність від застосування електромагнітної технології для тривалого зберігання яблук складає близько 10000 грн. на 1 т. продукції.

Ключові слова: електромагнітне поле; грибкові мікроорганізми; тривале зберігання яблук.

АННОТАЦІЯ

Федюшко А. Ю. Электромагнитный метод и технические системы защиты плодов от грибковых болезней. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 – биологические и медицинские приборы и системы. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко. – Харьков, 2018.

Литературный анализ показывает, что современная технология хранения плодов в газовой среде является не всегда эффективной и дорогостоящей. Из-за избыточного накопления продуктов анаэробного обмена резко снижаются вкусовые качества, повышается чувствительность к низкотемпературным повреждениям, снижается устойчивость к микроорганизмам. Значительная доля потерь плодов (до 30%) в период хранения приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями (плесень, стрептококки, грибки, споровые бактерии и др.). В связи с чем возникает необходимость в разработке новых, более доступных и менее затратных технологий хранения. В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований создана информационная электромагнитная технология и электронная система электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок с целью увеличения сроков их хранения в условиях внешней среды. В результате исследований был разработан генератор для уничтожения грибковых микроорганизмов на поверхности яблок. перестраиваемый по частоте с нестабильностью частоты $10^{-8}...10^{-7}$ на основе

двухкольцевой фазовой автоподстройки частоты мощного синхронизируемого генератора частотой 73...77 ГГц по кварцевому генератору, который работает на частоте 50 МГц. Экспериментальные исследования показали, что для длительного хранения яблок их следует облучать электромагнитным излучением с параметрами: частота $75,8 \pm 0,1$ ГГц; мощность на поверхности яблок $650 \pm 0,5$ мВт; время экспозиции $60 \pm 5,0$ с., температура окружающей среды $18...20^\circ\text{C}$. Применение ЭМИ миллиметрового диапазона для обработки яблок позволило уничтожить микроорганизмы на их поверхности и увеличить срок хранения яблок до 120 суток при температуре $18...20^\circ\text{C}$ в условиях внешней среды. Экономическая эффективность от применения электромагнитной технологии для длительного хранения яблок составить около 10000 грн. на 1 т продукции.

Ключевые слова: Электромагнитное поле; грибковые микроорганизмы; длительное хранения яблок.

Summary

Fedyushko O. Y. Electromagnetic method and technical for protection of fruits from fungal diseases. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences by specialty 05.11.17 – biological and medical devices and systems. - Kharkov National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko. – Kharkov, 2018.

Source analysis has shown that modern technology of storing fruits in the gas environment is not always effective and in addition rather costly. Thus there is a need to develop new more affordable and less expensive storage technologies. In the dissertation based on theoretical and experimental researches an information electromagnetic technology and an electronic system was created. Developed system and technology are based on electromagnetic radiation in the millimeter wavelength range. Such radiation allows to destroy microorganisms on the surface of apples. Consequently it allows to increase the periods of fruit storage in the conditions of the external environment. Experimental studies have shown that for long-term storage of apples they should be irradiated with electromagnetic radiation with following parameters: frequency $75,8 \pm 0,1$ GHz; power on the surface of apples $650 \pm 0,5$ мВт; exposure time $60 \pm 5,0$ с.,

ambient temperature 18-20⁰C. The use of EMP millimeter range for processing apples allowed to destroy microorganisms on their surface and extend the shelf life of apples to 120 days at temperature 18-20⁰C in the conditions of ambient environment. Economic efficiency from the use of electromagnetic technology for long-term storage of apples is about 10000 UAH per one ton of products.

Keywords: electromagnetic field; fungal microorganisms; long-term storage of apples.

Підписано до друку –15.05. 2018 р
Комп'ютерний набір та верстка Полянова Н. В.
Формат паперу 60x84 1/16. Папір офсетний.
Ум. друк.0,765
Замовлення № 44/032017. Наклад 100 прим.

Друкарня ФОП Олейникова Ю. В.

м. Харків, вул. Різдвяна (Енгельса) 29А,
Тел.: +38(057) 7-529-729.

Свідоцтво про реєстрацію:
Серія ХК, №163 від 20.12.2005 р.