

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Левченко Олена Володимирівна**

УДК 621.35.035:621.365

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОЇ  
ДІЇ НА МІКРООРГАНІЗМИ  
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ**

Спеціальність 05.09.13 - Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків – 2005**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерної електрофізики  
Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти  
і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Михайлов Валерій Михайлович**,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
професор кафедри інженерної електрофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Подольцев Олександр Дмитрович**  
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,  
провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Юферов Володимир Борисович**  
Національний науковий центр  
“Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, м. Харків,  
начальник відділу криогенної електрофізики  
інституту плазмової електроніки і нових методів прискорення.

Провідна установа: Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут”  
Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “10” листопада 2005 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний  
інститут” за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету  
“Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “7” жовтня 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В останні роки в провідних наукових закладах різних країн (наприклад, в Інституті харчових технологій (США), Технічному університеті (Німеччина, м. Берлін)) проводяться дослідження нової електрофізичної технології обробки рідких продуктів харчування сильними електричними полями з метою інактивації мікроорганізмів, що зменшують термін їх зберігання. Позитивною якістю цієї технології в порівнянні із традиційною тепловою є більш висока ефективність інактивації при менших енерговитратах. В науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) “Молнія” Національного технічного університету “ХПІ”, м. Харків розроблені технологічні установки, засновані на інактивуєчій дії імпульсного електричного поля напруженістю приблизно 100 кВ/см.

Імовірними факторами інактивації мікроорганізмів є електричний пробій мембрани, що настає при нарузі на ній приблизно 1 вольт, і вплив на внутрішній вміст клітини. Тому досить актуальним є дослідження розподілу імпульсного електричного поля в системі середовище - біологічна клітина. Також недостатньо розроблені методи вибору параметрів імпульсу, що забезпечує ефективну дію. Крім того, необхідно дослідити розподіл електричного поля в робочій камері імпульсної електроустановки для інактивації мікроорганізмів з метою одержання даних щодо однорідності поля і основних розмірів електродів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалася відповідно до держбюджетної теми МОН України № 14662 “Розробка та дослідження нових методів високовольтних імпульсних дій при обробці продуктів та генеруванні озону” (реєстр. № 0103U003749, 2003 – 2005 рр.), в котрій здобувач була виконавцем та запропонувала алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багатопарній сферичній діелектричній оболонці, отримала перехідні функції спаду напруги на оболонці та електричного поля усередині оболонки з неідеального діелектрика, дослідила вплив параметрів імпульсів зовнішнього електричного поля на проникнення поля в клітину, спад напруги на мембрані, а також вплив форми електродів на розподіл електричного поля в робочій камері високовольтної установки, запропонувала рекомендації щодо параметрів імпульсу та основних розмірів електродів робочої камери установки для інактивації мікроорганізмів.

**Мета й задачі дослідження.** Ціль роботи - удосконалення електротехнологічної дії сильного імпульсного електричного поля на мікроорганізми, що зменшують строк зберігання рідких продуктів харчування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих конструкцій установок для обробки харчових продуктів електричним полем і моделей дії електричного поля на біологічну клітину;

- розробити математичну модель системи середовище - біологічна клітина, що враховує електрофізичні параметри елементів клітини та вплив імпульсного електричного поля;

- дослідити за допомогою математичної моделі вплив параметрів імпульсів на розподіл електричного поля в біологічній клітині, зокрема на спад напруги на мембрані та напруженість поля, що проникає;

- дослідити електричне поле в робочій камері високовольтної установки для обробки рідких продуктів харчування та вплив основних геометричних розмірів електродів на його розподіл;

- розробити рекомендації щодо параметрів імпульсів сильного електричного поля та розмірів елементів робочої камери електрофізичної установки для інактивації мікроорганізмів у рідких продуктах харчування.

*Об'єкт дослідження* – електрофізичний технологічний процес дії сильного імпульсного електричного поля на мікроорганізми в рідких продуктах харчування.

*Предмет дослідження* – розподіл електричного поля в біологічній клітині та у робочій камері високовольтної технологічної установки для обробки рідких продуктів харчування.

*Методи дослідження.* Для аналізу розподілу електричного поля в біологічній клітині використані методи теорії електромагнітного поля, математичної фізики (формулювання крайових задач і поділ змінних у сферичних координатах, перетворення Лапласа), а для аналізу поля в робочій камері установки - чисельні методи рішення інтегральних рівнянь.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Розроблено алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багат шаровій сферичній діелектричній оболонці. Уперше отримані перехідні функції напруженості електричного поля, що проникає в сферичну оболонку з неідеального діелектрика, і спаду напруги на ній, за допомогою яких виконано моделювання дії імпульсного електричного поля на біологічну клітину. Показано, що параметри імпульсів електричного поля, що діє, необхідно вибирати залежно від сталих часу перехідних функцій  $\tau_1$  й  $\tau_2$ , які повністю визначаються розмірами та електрофізичними характеристиками елементів біологічної клітини. Розроблено рекомендації щодо вибору параметрів імпульсу, що діє, та геометричних розмірів електродів у робочій камері установки для інактивації мікроорганізмів у рідких продуктах харчування.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати, отримані в роботі, знайшли практичне застосування в удосконаленні технологічного процесу обробки продуктів харчування сильними імпульсними електричними полями в НДПКІ “Молнія” НТУ “ХП”.

Результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХП” для підготовки фахівців зі спеціальності “Техніка і електрофізика високих напруг” у дисциплінах: “Теоретичні основи електротехніки”, “Методи моделювання електричних і магнітних полів”, “Сильні електричні поля в техніці”.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем особисто зроблений аналіз електрофізичних технологій та установок для інактивації мікроорганізмів у продуктах харчування та моделей дії електричного поля на біологічну клітину; запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багат шаровій сферичній діелектричній оболонці, отримані перехідні функції спаду напруги на оболонці та електричного поля усередині оболонки з неідеального діелектрика; досліджений вплив параметрів імпульсів зовнішнього електричного поля на проникнення поля в клітину та спад напруги на мембрані; досліджений вплив форми електродів на розподіл електричного поля в робочій камері високовольтної установки; отримані практичні рекомендації щодо параметрів імпульсу, що діє, і геометричних розмірів робочої камери.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були докладені на науково-технічних конференціях: “Проблеми вдосконалення електричних машин й апаратів” (Харків, 2002 р., 2003 р.); “Проблеми сучасної електротехніки” (Київ, 2002 р., 2004 р.).

**Публікації.** Результати дисертації надруковані в 7 публікаціях, які входять до фахових видань ВАК України.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків та одного доповнення. Повний об'єм дисертаційної роботи становить 119 сторінок, 31 ілюстрація по тексту; 28 таблиць по тексту; список використаних літературних джерел з 50 найменувань на 5 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі дослідження.

**У першому розділі** проведений огляд установок для інактивації мікроорганізмів у продуктах харчування та моделей дії електричного поля на біологічну клітину.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про необхідність дослідження дії електричного поля на біологічну клітину та розподілу електричного поля у робочій камері установки для обробки мікроорганізмів у рідких продуктах харчування конструкції НДПКІ “Молнія” з метою розробки рекомендацій щодо параметрів імпульсів зовнішнього поля та розмірів електродів камери.

**У другому розділі** описані математичні моделі дії імпульсного електричного поля на біологічну клітину. Була використана сферична модель біологічної клітини з постійними питомими електропровідностями  $\gamma_k$  й абсолютними діелектричними проникностями  $\epsilon_k$  окремих елементів (рис. 1).

Прийнято, що зовнішнє середовище ( $k=1$ ) має електрофізичні характеристики оброблюваного продукту, сферична оболонка ( $k=2$ ) відповідає мембрані біологічної клітини, а середовище усередині оболонки ( $k=3$ ) – внутрішньому вмісту клітини.

Рис. 1. Сферична оболонка з неідеального діелектрика у декартових  $(x, y, z)$  і сферичних  $(r, \theta, \psi)$  координатах

Розглянуто дію однорідного імпульсного електричного поля напруженістю  $\vec{E}_{at}(t)$ , орієнтованого уздовж негативного напрямку осі  $z$ , на сферичну оболонку з неідеального діелектрика. Використано “квазістатичне” наближення процесу, відповідно до якого вплив зміни магнітного поля на електричне поле не враховуємо. Для потенціалу результуючого плоскомеридіанного електричного поля в сферичних координатах  $\varphi^{(k)}(r, \theta, t)$  використане таке формулювання задачі:

$$\Delta\varphi^{(k)} = 0, k = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\varphi^{(k)}\Big|_{r=R_m} = \varphi^{(l)}\Big|_{r=R_m}, \quad (2)$$

$$\left(\gamma_k + \varepsilon_k \frac{\partial}{\partial t}\right) E_r^{(k)}\Big|_{r=R_m} = \left(\gamma_l + \varepsilon_l \frac{\partial}{\partial t}\right) E_r^{(l)}\Big|_{r=R_m} \quad (3)$$

$$k = \overline{1, n-1}, l = k+1;$$

$$\varphi^{(k)}(r, \theta, 0) = 0, \quad (4)$$

де  $E_r^{(k)}$  – радіальна проекція вектора напруженості результуючого електричного поля  $\vec{E}^{(k)}$  в сферичних координатах;

$R_m$  – радіус граничної сферичної поверхні;

$n$  – число областей системи з різними електрофізичними характеристиками (для системи, показаної на рис. 1,  $n=3, m=2$ ).

Додаткові умови: 1) потенціал результуючого електричного поля в центрі системи (рис. 1,  $r=0$ ) обмежений; 2) при видаленні від оболонки на значну відстань ( $r \gg R_1$ ) потенціал результуючого електричного поля наближається до потенціалу зовнішнього електричного поля.

Попередньо були розглянуті дві допоміжні задачі: 1) дія однорідного електростатичного поля на систему, елементи якої є ідеальними діелектриками ( $\gamma_k=0$ ); 2) дія постійного електричного поля на систему, елементи якої мають тільки провідні властивості ( $\varepsilon_k=0$ ). Отримано аналітичні розв'язки допоміжних задач, зроблений аналіз розподілу поля у відповідних моделях системи залежно від співвідношення електрофізичних характеристик її елементів, запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багатошаровій сферичній діелектричній оболонці.

Формулювання першої допоміжної задачі складається з виразів (1), (2), додаткових умов і граничної умови

$$\varepsilon_k \left. \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial n} \right|_{r=R_m} = \varepsilon_l \left. \frac{\partial \varphi^{(l)}}{\partial n} \right|_{r=R_m}, \quad (5)$$

в яких потенціал уже не є функцією часу.

Рішення цієї задачі містить  $2n$  постійних  $A_k, B_k$ . Із граничних умов (2) і (5) одержана система з  $2n-2$  однорідних лінійних алгебраїчних рівнянь

$$CX = 0, \quad (6)$$

де  $C$  - прямокутна матриця розміром  $(2n-2) \times 2n$ ;

$X$  - вектор невідомих постійних  $A_k, B_k$ .

Система (6) недовизначена. Число невідомих зменшено до необхідного числа  $2n-2$  за допомогою додаткових умов, відповідно до яких  $A_1 = \pm E_0, B_n = 0$ .

Таким чином, система рівнянь (6) перетворено до виду

$$C_1 X_1 = F, \quad (7)$$

де  $C_1$  - квадратна матриця розміром  $(2n-2) \times (2n-2)$ , що отримана з матриці  $C$ ;

$X_1$  - вектор невідомих постійних  $A_k, B_k$ , що отримані з вектора  $X$ ;

$F$  - вектор правих частин.

Алгоритм визначення постійних  $A_k, B_k$  складається з наступних основних кроків. На першому кроці формуємо матрицю  $C$ . Для тришарової оболонки елементи матриці показані в табл. 1 ( $s$  - показник, що залежить від форми оболонки; для сферичної форми  $s = 2$ , для циліндричної -  $s = 1$ ).

Вектор  $X_1$ , що відповідає табл. 1, має таку структуру:

$$X_1 = B_1; A_2; B_2; A_3; B_3; A_4; B_4; A_5.$$

При збільшенні (зменшенні) числа шарів оболонки для кожного нового (що виключається) шару додаються (виключаються) два невідомі коефіцієнти  $A_k, B_k$  і відповідно два рядки і два стовпці в матриці  $C$ .

На другому кроці алгоритму формуємо матрицю  $C_1$  (табл. 2) і вектор правих частин  $F$ . Матриця  $C_1$  утворюється з матриці  $C$  викреслюванням першого і  $2n$ -ого стовпців останньої. Вектор правих частин  $F$  має тільки перші два ненульових елементи й утворюється множенням першого стовпця матриці  $C$  на  $(-1)$ .

На третьому кроці алгоритму перетворюємо систему рівнянь (7) так, щоб її матриця стала трьохдіагональною. Для цього виключаємо з кожної пари рівнянь одне невідоме (коефіцієнт  $A_k$  або  $B_k$ ), елемент матриці при якому випадає з необхідної конфігурації (у табл. 2 такі елементи позначені \*). У результаті перетворень з (7) одержуємо таку систему рівнянь:

$$C_2 X_1 = F, \quad (8)$$

де  $C_2$  – трьохдіагональна матриця розміром  $(2n-2) \times (2n-2)$ .

Розташування ненульових елементів матриці  $C_2$  показано в знаменниках табл. 2.

На четвертому кроці алгоритму вирішували (8) методом прогону.

Для розв'язання задачі (1) - (4) використане інтегральне перетворення Лапласа та уведена операторна питома електропровідність

$$X_1 B_1; A_2; B_2; A_3; B_3; A_4; B_4; A_5 \dots,$$

де  $p$  – параметр перетворення Лапласа.

Зображення по Лапласу всіх величин, що характеризують модель, отримані формальною заміною в результатах рішення допоміжних задач величини  $\epsilon_k$  або  $\gamma_k$  на операторну питому електропровідність  $\gamma_k(p)$ . Після обернення перетворення Лапласа розв'язок задачі (1) - (4) отримано в такому вигляді:

$$\varphi^{(k)}(r, \theta, t) = \left[ A_k(t)r + \frac{B_k(t)}{r^2} \right] \cos \theta, \quad (9)$$

де  $A_k(t)$ ,  $B_k(t)$  – коефіцієнти – функції часу, що залежать від характеристик системи середовище – оболонка й закону зміни зовнішнього поля.

Для одержання цих коефіцієнтів, а також для аналізу електричного поля в системі середовище - оболонка, були введені перехідні функції коефіцієнтів, напруженості електричного поля усередині оболонки  $E_1^{(3)}(t)$  та спад напруги на мембрані  $U_{m1}(\theta, t)$ . Перехідні функції  $E_1^{(3)}(t)$  й  $U_{m1}(\theta, t)$  – це напруженість електричного поля та спад напруги, обумовлені дією одиничного імпульсу зовнішнього поля, які визначаються в такий спосіб:



Таблица 1

Елементи матриці  $C$  для тришарової діелектричної оболонки

	l=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
i=1	1	$\frac{1}{R_1^{s+1}}$	-1	$-\frac{1}{R_1^{s+1}}$	0	0	0	0	0	0
2	1	$-\frac{2^{s-1}}{R_1^{s+1}}$	$-\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$	$2^{s-1} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{1}{R_1^{s+1}}$	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	$\frac{1}{R_2^{s+1}}$	-1	$-\frac{1}{R_2^{s+1}}$	0	0	0	0
4	0	0	1	$-\frac{2^{s-1}}{R_2^{s+1}}$	$-\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}$	$2^{s-1} \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} \frac{1}{R_2^{s+1}}$	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	$\frac{1}{R_3^{s+1}}$	-1	$-\frac{1}{R_3^{s+1}}$	0	0
6	0	0	0	0	1	$-\frac{2^{s-1}}{R_3^{s+1}}$	$-\frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_3}$	$2^{s-1} \frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_3} \frac{1}{R_3^{s+1}}$	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	$\frac{1}{R_4^{s+1}}$	-1	$-\frac{1}{R_4^{s+1}}$
8	0	0	0	0	0	0	1	$-\frac{2^{s-1}}{R_4^{s+1}}$	$-\frac{\varepsilon_5}{\varepsilon_4}$	$2^{s-1} \frac{\varepsilon_5}{\varepsilon_4} \frac{1}{R_4^{s+1}}$

Таблиця 2

Розташування ненульових елементів у матриці  $C_1$  для тришарової оболонки  
(у знаменниках показане розташування ненульових елементів матриці  $C_2$ )

$\frac{c_{11}}{a_{11}}$	$\frac{c_{12}}{a_{12}}$	$c_{13}^*$	0	0	0	0	0
$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	0	0	0	0	0
0	$\frac{c_{32}}{a_{32}}$	$\frac{c_{33}}{a_{33}}$	$\frac{c_{34}}{a_{34}}$	$c_{35}^*$	0	0	0
0	$c_{42}^*$	$\frac{c_{43}}{a_{43}}$	$\frac{c_{44}}{a_{44}}$	$\frac{c_{45}}{a_{45}}$	0	0	0
0	0	0	$\frac{c_{54}}{a_{54}}$	$\frac{c_{55}}{a_{55}}$	$\frac{c_{56}}{a_{56}}$	$c_{57}^*$	0
0	0	0	$c_{64}^*$	$\frac{c_{65}}{a_{65}}$	$\frac{c_{66}}{a_{66}}$	$\frac{c_{67}}{a_{67}}$	0
0	0	0	0	0	$c_{76}$	$c_{77}$	$c_{78}$
0	0	0	0	0	$c_{86}^*$	$\frac{c_{87}}{a_{87}}$	$\frac{c_{88}}{a_{88}}$

$$E_1^{(3)}(t) = 9 \left[ \frac{\gamma_2}{\gamma_1 C_0} + \sum_{k=1}^{k=2} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 p_k^2 + (\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1) p_k + \gamma_1 \gamma_2}{\varepsilon_1 p_k (2\varepsilon_1 C_2 p_k + \gamma_1 C_1)} e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right]; \quad (10)$$

$$U_{m1}(\theta, t) = U_{m1}(\theta, \infty) + 3(R_1 - R_2) \cos \theta \sum_{k=1}^{k=2} \gamma_1(p_k) \left\{ \gamma_3(p_k) + 2\gamma_2(p_k) - \frac{R_2}{R_1} * \right. \\ \left. * \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \gamma_2(p_k) - \gamma_3(p_k) \right\} e^{-\frac{t}{\tau_k}} / \varepsilon_1 p_k (2\varepsilon_1 C_2 p_k + \gamma_1 C_1); \quad (11)$$

$$\text{де } U_{m1}(\theta, \infty) = 3(R_1 - R_2) \left[ \gamma_3 + 2\gamma_2 - \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) (\gamma_2 - \gamma_3) \right] \cos \theta / (\gamma_1 C_0) \approx \frac{3}{2} R_1 \cos \theta; \quad (12)$$

$C_0, C_1, C_2$  – функції, складним образом залежні від електрофізичних характеристик і геометричних розмірів елементів системи середовище – оболонка;

$p_k$  – корінь квадратного рівняння  $\varepsilon_1^2 C_2 p_k^2 + \varepsilon_1 \gamma_1 C_1 p_k + \gamma_1^2 C_0 = 0, k=1,2;$

$\tau_1, \tau_2$  – стали часу,  $\tau_k = |p_k^{-1}|.$

Були розраховані перехідні функції для таких характеристик системи середовище – оболонка, які відповідають біологічній клітині:  $\epsilon_1=\epsilon_3=81\epsilon_0$ ,  $\epsilon_2=(2-10)\epsilon_0$ ,  $\gamma_1=0,1$ ,  $\gamma_2=10^{-7}$ ,  $\gamma_3=1$  См/м (рис. 2, 3). Перехідна функція  $E_1^{(3)}(t)$  спочатку швидко убуває до відносно невеликих значень, а потім повільно зменшується до граничного значення (рис. 2). Перехідна функція  $U_{m1}(\theta, t)$  при різних діелектричних проникностях оболонки наближається до однієї й тій же величині  $U_{m1}(0, \infty)$  (12) (рис. 3).

Рис. 2. Перехідна функція напруженості електричного поля усередині сферичної оболонки з неідеального діелектрика при  $R_2=0,99R_1$ : 1 -  $\epsilon_2=2\epsilon_0$ , 2 -  $5\epsilon_0$ , 3 -  $10\epsilon_0$ .

Аналіз показав, що поведження перехідних функцій визначається двома сталими часу  $\tau_1$  й  $\tau_2$  (рис. 2, 3), причому  $\tau_1 \gg \tau_2$  (табл. 3). Стала часу  $\tau_2$  має порядок декількох нс і характеризує тривалість ділянки найбільш інтенсивного проникнення поля усередину оболонки. Зі зміною величини діелектричної проникності оболонки  $\epsilon_2$  і співвідношення  $R_2/R_1$  стала  $\tau_2$  змінюється на десяті частки нс. Стала часу  $\tau_1$  має порядок десятків – сотень нс і характеризує час досягнення перехідною функцією  $U_{m1}(\theta, t)$  значення, близького до величини  $U_{m1}(0, \infty) \approx 1,5R_1$  ( $t \approx 3\tau_1$ ).

Відома модель біологічної клітини Коула, у якій вважають мембрану ідеальним діелектриком, а середовище поза кліткою і цитоплазму - ідеальним провідником. Показано, що за допомогою цієї моделі не можна правильно розрахувати поле, що проникає усередину біологічної клітини, оскільки не враховується діелектрична проникність цитоплазми. Стала часу, що характеризує модель Коула, дорівнює

$$\tau_c = \left( \frac{1}{2\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_3} \right) \frac{\epsilon_2}{R_1 - R_2} R_1. \quad (13)$$

Рис. 3. Перехідна функція спаду напруги на сферичній оболонці з неідеального діелектрика при  $R_2=0,99R_1$ : 1, 4 -  $\epsilon_2=2\epsilon_0$ , 2, 5 -  $5\epsilon_0$ , 3, 6 -  $10\epsilon_0$  для  $\theta = 0$  (криві 4-6 – модель Коула).

Таблиця 3

Стали часу системи середовище - оболонка

$\epsilon_2/\epsilon_0$	$R_2/R_1=0,98$			$R_2/R_1=0,99$			$R_2/R_1=0,999$		
	$\tau_1$ , нс	$\tau_2$ , нс	$\tau_c$ , нс	$\tau_1$ , нс	$\tau_2$ , нс	$\tau_c$ , нс	$\tau_1$ , нс	$\tau_2$ , нс	$\tau_c$ , нс
2	11,879	1,2287	5,3100	16,998	1,4184	10,620	112,19	1,7406	106,20
5	19,462	1,4795	13,275	32,601	1,6128	26,550	271,23	1,7716	265,50
10	32,378	1,6212	26,550	58,842	1,7005	53,100	536,35	1,7823	531,01

Показано, що стала часу Коула  $\tau_c$ , може служити оцінкою величини сталої  $\tau_1$ . При більших значеннях  $R_2/R_1$  розбіжності між значеннями  $\tau_1$  й  $\tau_c$  не перевершують декількох відсотків. Зі зменшенням  $R_2/R_1$  ці розбіжності різко зростають і при  $\varepsilon_2/\varepsilon_0=2$  досягає десятків відсотків. Перехідні функції спаду напруги на оболонці  $U_{m1}(\theta, t)$  сильно відрізняються на початку процесу (рис. 3). Тому використання моделі Коула у випадку імпульсів зовнішнього поля, тривалість яких менше  $\tau_c$ , може приводити до погрішностей. При  $t \gg \tau_c$  розбіжності між перехідними функціями, що зіставляють, невеликі. Модель Коула застосовна для імпульсів, тривалість яких значно більше  $\tau_c$ .

Відношення  $\varepsilon_2/(R_1 - R_2)$ , що входить множником у формулу (13), має фізичний сенс ємності оболонки (мембрани), що доводиться на одиницю площі її поверхні. Тому зі збільшенням цієї ємності (через збільшення  $\varepsilon_2$  або зменшення товщини оболонки  $R_1-R_2$ ) сталі  $\tau_1$  й  $\tau_c$  зростають.

**У третьому розділі** розглянута детально дія імпульсу, котрий був створений на установці для інактивації мікроорганізмів у НДПКІ “Молнія”

$$E_{\text{вн}}(t) = E_0 \left[ e^{-\frac{t}{\tau_u}} - e^{-\frac{t}{\tau_\phi}} \right], \quad (14)$$

де  $\tau_u, \tau_\phi$  – сталі.

Розраховано напруженість електричного поля усередині сферичної оболонки й спаду напруги на оболонці (рис. 4, 5). При цьому використані перехідні функції (10), (11) та інтеграл Дюамеля.

Рис. 4. Напруженість електричного поля усередині сферичної оболонки з неідеального діелектрика при  $\tau_1=216$  нс: 1-  $\tau_\phi=6,2$  нс, 2 – 3,1 нс.

Зі зменшенням тривалості фронту імпульсу щодо сталої  $\tau_2$  значення напруженості електричного поля усередині оболонки зростає. Спад напруги на оболонці збільшується зі збільшенням тривалості імпульсу зовнішнього поля щодо величини  $\tau_1$ . Зміна тривалості фронту імпульсу при незмінній тривалості імпульсу незначно впливає на величину максимального значення напруги.

**У четвертому розділі** досліджений вплив форми електродів на розподіл електричного поля в робочій камері високовольтної установки, створеної в НДПКІ “Молнія”, розрахункова конструкція якої показана на рис. 6. Прийнято наступні основні допущення: електричне поле розглядаємо в електростатичному наближенні; поле вважаємо плоскомеридіанним; вплив отворів у головних електродах, діелектричних елементів і руху продукту на досліджуване поле не враховуємо.

За допомогою інтегрального рівняння першого роду був розрахований розподіл електричних зарядів на поверхнях електродів робочої камери, а потім розраховані радіальна ( $E_r$ ) і осьова ( $E_z$ ) проекції вектора напруженості електричного поля в безрозмірній формі  $E^* = \frac{ER}{U}$  (рис. 7, 8).

Рис. 5. Вплив тривалості імпульсу зовнішнього поля на спад напруги на оболонці: 1 -  $\tau_i=28,8$  нс,  $\tau_\phi=0,31$  нс; 2 -  $\tau_i=216$  нс,  $\tau_\phi=3,1$  нс; 3 -  $\tau_i=216$  нс,  $\tau_\phi=6,2$  нс.

Рис. 6. Розрахункова конструкція робочої камери високовольтної установки для інактивації мікроорганізмів

Був досліджений вплив отвору в дисковому електроді  $d$ , діаметра головного електрода  $D$  і відстані між дисковим і головним електродом  $h$ . Розглянуто наступні варіанти співвідношень геометричних розмірів  $D/h/d$  (мм): 1 – 38/5/6; 2 – 38/3/6; 3 – 38/7/6; 4 – 30/5/6; 5 – 45/5/6; 6 – 38/5/4; 7 – 38/5/8; 8 – 38/5/0.

Розрахунки показали, що в робочій камері можна виділити область, у якій електричне поле є практично однорідним. Ця область обмежена поверхнями головного та дискового електродів і двома концентричними циліндрами. Про це свідчать нульова величина радіальної проекції вектора електричного поля (рис. 7) і мало змінювана величина осьовий проекції вектора (рис. 8). Це дозволило дати практичні рекомендації щодо розмірів електродів камери установки. Діаметр головного електрода повинен бути не менш 38 мм, а діаметр отвору в дисковому не більше 6 мм.

Рис. 7. Розподіл  $E_r$  уздовж головного електрода

Рис. 8. Розподіл  $E_z$  уздовж головного електрода

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена аналізу розподілу імпульсного електричного поля в біологічній клітині та електричного поля в робочій камері для удосконалення електротехнологічної дії сильного імпульсного електричного поля на мікроорганізми за рахунок вибору параметрів імпульсів і основних розмірів робочої камери високовольтної електрофізичної технологічної установки для інактивації мікроорганізмів. Теоретично підтверджена ідея обробки рідких продуктів харчування за допомогою аперіодичних імпульсів з коротким фронтом 1-10 нс і тривалістю 100 нс – 1 мкс, що реалізована в технологічних установках НДПКІ “Молнія”. Основні висновки.

1. Проведений аналіз існуючих конструкцій установок для обробки харчових продуктів електричним полем і моделей дії електричного поля на біологічну клітину показав, що в відомих джерелах недостатньо досліджений вплив параметрів імпульсу зовнішнього електричного поля на розподіл поля в клітині, спад напруги на мембрані. Крім того, відсутні моделі, що враховують всі електрофізичні характеристики елементів клітини та дію імпульсного електричного поля.

2. Розроблено математичну модель дії імпульсного електричного поля на систему зовнішнє середовище – біологічна клітина, засновану на використанні перехідних функцій з урахуванням електрофізичних характеристик елементів біологічної клітини. Перехідні функції напруженості електричного поля в клітині та спад напруги на мембрані характеризуються сталими часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ . Стала часу  $\tau_1$  дорівнює приблизно 100 нс – 1 мкс і визначає час досягнення спаду напруги на мембрані максимального значення, а стала часу  $\tau_2$  має порядок 1 нс і визначає час проникнення електричного поля усередину клітини.

3. За допомогою математичної моделі системи зовнішнє середовище – біологічна клітина досліджено вплив параметрів імпульсу зовнішнього електричного поля у формі різниці двох експонент на розподіл імпульсного електричного поля в біологічній клітині. Показано, що зі зменшенням тривалості фронту імпульсу щодо сталої  $\tau_2$  зростає максимальне значення напруженості поля, що проникнуло, а зі збільшенням тривалості імпульсу щодо сталої  $\tau_1$  збільшується максимальне значення спаду напруги на мембрані.

4. Рекомендовано в електрофізичних технологічних установках для інактивації мікроорганізмів створювати імпульси електричного поля із тривалістю фронту менш 1 нс і тривалістю імпульсу, рівної декільком значенням сталої  $\tau_1$ .

5. Досліджено електричне поле в робочій камері електрофізичної технологічної установки конструкції НДПКІ “Молнія” для інактивації мікроорганізмів у рідких продуктах харчування. Установлено форму області практично однорідного поля та вплив на розміри цієї області діаметра головних електродів, діаметра отвору в дисковому електроді і відстані між електродами. Рекомендується вибрати діаметр головного електрода не менш 38 мм, а діаметр отвору в дисковому електроді не більше 6 мм.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бойко М.І., Бондіна Н.М., Левченко О.В., Михайлов В.М. Использование потока для анализа воздействия полей на поляризующиеся тела// Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. -2001. - №6. - С. 6-10.

*Здобувач запропонувала алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля за допомогою потоку, проаналізувала результати моделювання проникнення поля в біологічну клітину.*

2. Бойко М.І., Бондіна Н.М., Левченко О.В., Михайлов В.М. Моделирование воздействия электрического поля на объекты, имеющие многослойную структуру// Електронне моделювання. - Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці НАНУ. - 2002. - №1. том 24.- С. 70 - 82.

*Здобувач запропонувала алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багаточаровій сферичній діелектричній оболонці.*

3. Бойко М.І., Бондіна Н.М., , Донець С.Е., Левченко О.В., Михайлов В.М. Поляризация сферических оболочек и распределение электрического поля в биологической клетке// Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. -2002. - №6. - С. 13-19.

*Здобувач одержала розподіл поляризаційних зарядів, потенціали електричного поля та спаду напруги на сферичній оболонці з ідеального діелектрика, обумовлені поляризаційними зарядами.*

4. Левченко О.В. Сферическая оболочка из реального диэлектрика в постоянном электрическом поле// Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. - Харків: НТУ “ХПІ”. - 2002. - Вип.14. - С. 43-48.

5. Левченко О.В. Распределение зарядов и электрического поля в рабочей камере установки для инактивации микроорганизмов// Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. - Харків: НТУ “ХПІ”. - 2003. - Вип.11. - С. 82-88.

6. Бойко М.І., Бондіна Н.М., Левченко О.В., Михайлов В.М. Переходные процессы и моделирование проникновения импульсного электрического поля в биологическую клетку// Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. –2004. - №2. - С. 7-12.

*Здобувач застосувала перехідні функції для аналізу розподілу імпульсного електричного поля, побудувала картини силових ліній імпульсного електричного поля.*

7. Левченко О.В., Михайлов В.М. Моделирование воздействия импульсного электрического поля на биологическую клетку// Електронне моделювання. - Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці НАНУ. - 2004. - №5. том 26. - С. 99 - 110.

*Здобувач одержала перехідні функції спаду напруги на оболонці та напруженості електричного поля усередині оболонки з недосконалого діелектрика, дослідила вплив параметрів імпульсів зовнішнього електричного поля на проникнення поля в клітку та спаду напруги на мембрані, визначила практичні рекомендації щодо параметрів імпульсу.*

## АНОТАЦІЇ

**Левченко О.В. Удосконалення електротехнологічної дії на мікроорганізми на основі аналізу електричного поля. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних і магнітних полів. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2005.

Дисертація присвячена удосконаленню електротехнологічної дії на мікроорганізми на основі аналізу електричного поля в біологічній клітині та у робочій камері установки для інактивації мікроорганізмів.

Розроблено математичну модель дії імпульсного електричного поля на систему зовнішнє середовище – біологічна клітина, засновану на використанні перехідних функцій з урахуванням електрофізичних характеристик елементів біологічної клітини. Розраховано стали часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , котрі характеризують перехідні функції напруженості електричного поля в клітині та спад напруги на мембрані. За допомогою математичної моделі системи зовнішнє середовище – біологічна клітина досліджено вплив параметрів імпульсу зовнішнього електричного поля у формі різниці двох експонент на розподіл імпульсного електричного поля в біологічній клітині. Сформульовано критерії щодо вибору параметрів імпульсів. Запропоновано алгоритм визначення коефіцієнтів розв'язку задачі розрахунку поля в багат шаровій сферичній діелектричній оболонці. Досліджено електричне поле в робочій камері електрофізичної технологічної високовольтної установки конструкції НДПКІ “Молнія” для інактивації мікроорганізмів у рідких продуктах харчування. Сформульовано практичні рекомендації щодо параметрів імпульсів і основних розмірів робочої камери.

*Ключові слова:* імпульсне електричне поле, математична модель системи середовище – біологічна клітина, високовольтна установка для інактивації мікроорганізмів.

**Левченко Е. В. Усовершенствование электротехнологического воздействия на микроорганизмы на основе анализа электрического поля. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2005. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2005.

Диссертация посвящена усовершенствованию электротехнологического воздействия на микроорганизмы на основе анализа электрического поля в биологической клетке и в рабочей камере установки для инактивации микроорганизмов.

Разработана математическая модель воздействия импульсного электрического поля на систему среда – биологическая клетка, основанная на использовании переходных функций. Рассмотрены вспомогательные задачи: воздействие однородного электростатического поля на систему, элементы которой являются идеальными диэлектриками; воздействие постоянного электрического поля на систему, элементы которой имеют только проводящие свойства. Получены аналитические решения вспомогательных задач, сделан анализ распределения поля в соответствующих моделях системы в зависимости от соотношений электрофизических характеристик её элементов. Предложен универсальный алгоритм для нахождения коэффициентов



решения задачи расчета поля в многослойной сферической диэлектрической оболочке, который не зависит от числа слоев. Получены переходные функции напряженности электрического поля в клетке и падения напряжения на мембране, которые характеризуются постоянными времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Эти постоянные времени полностью определяются с помощью электрофизических и геометрических характеристик элементов биологической клетки. Сформулированы критерии для определения параметров воздействующих импульсов внешнего поля. С помощью математической модели системы среда – биологическая клетка исследовано влияние параметров импульса внешнего электрического поля, представляемого в виде разности двух экспонент, на распределение импульсного электрического поля в биологической клетке. Теоретически показано, что с уменьшением длительности фронта импульса относительно постоянной  $\tau_2$  возрастает максимальное значение напряженности проникшего поля, а с увеличением длительности импульса относительно постоянной  $\tau_1$  увеличивается максимальное значение падения напряжения на мембране. Определены границы применимости “высокочастотной” и “низкочастотной” моделей воздействия импульсного электрического поля на биологическую клетку.

Рассчитано электрическое поле в рабочей камере электрофизической технологической высоковольтной установки конструкции научно-исследовательского и проектно-конструкторского института “Молния” для инактивации микроорганизмов в жидких продуктах питания. Установлены форма области практически однородного поля и влияние на размеры этой области диаметра главных электродов, диаметра отверстия в дисковом электроде и расстояния между электродами.

Сформулированы рекомендации для выбора параметров импульсов и основных размеров рабочей камеры высоковольтной электрофизической технологической установки для инактивации микроорганизмов.

*Ключевые слова:* импульсное электрическое поле, математическая модель системы среда – биологическая клетка, высоковольтная установка для инактивации микроорганизмов.

### **Levchenko H. V. Improvement of electrotechnological effect on microorganisms on the basis of the analysis of electric field.**

The thesis is for technical science candidate's degree, specialty 05.09.13 – technics of strong electrical and magnetic fields. – National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkov, 2005.

The thesis is devoted to refinement of an electrotechnological action on microorganisms on the basis of the analysis electric fields in a biological cell and in the working chamber of setup for an inactivation of microorganisms.

The mathematical model of action of an impulse electric field on a system a medium – the biological cell developed. Transitional functions of electric field strength in a cell and voltage on a membrane are

obtained. These functions are characterized by time constants  $\tau_1$  and  $\tau_2$ . These time constants are defined with electrophysical and geometrical characteristics of biological cell elements. Measures for definition of parameters of acting impulses of external field are obtained. With mathematical model of a system a medium – a biological cell the effect of the exterior electric field impulse parameters on allocation of an impulse electric field in a biological cell is explored. Reduction of pulse front duration concerning the constant  $\tau_2$  results in increase in the maximal value of an electric field intensity inside a biological cell. The increase in duration of a pulse concerning constant  $\tau_1$  results in increase in a voltage at a membrane. The algorithm for a determination of coefficients of a solution of a field task in a multilayered spherical dielectric environment is offered.

The electric field in the working chamber of electrophysical technological setup of construction Research and Design Institute "Molniya" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" for an inactivation of microorganisms in fluid food stuffs is counted. The effect on sizes of area homogeneous field of diameter of main electrodes, diameter of an orifice in a disk electrode and interelectrode distance are established.

Recommendations for a choice of impulses parameters and the basic sizes of the working chamber of high-voltage electrophysical technological high voltage setup for an inactivation of microorganisms are formulated.

*Keywords:* pulse electric field, the mathematical model of a system a medium – the biological cell, high voltage setup for an inactivation of microorganisms.