

ЛОКАЛЬНА ГЕНЕРАЦІЯ ОМІЧНОГО ТЕПЛА НА МЕМБРАНАХ КЛІТИН ПРИ ЕЛЕКТРООБРОБЦІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

Проведена оцінка дії процесів локальної генерації омичного тепла на мембранах клітин при електрообробці біологічних тканин. Дано розгляд загальної теплофізичної задачі для моделі лінійних ланцюжків. Встановлено два режими підвищення температури на мембрані під дією електричного поля: повільний, $\Delta T_m \sim t^{1/2}$, і швидкий, $\Delta T_m \sim t$. Час переходу від повільного до швидкого режиму дорівнює часу термічної релаксації на відстань порядку розміру клітини $t_0 \sim d_c^2/\chi$. Відзначено, що в реальних системах омичне локальне нагрівання може ефективно впливати на процеси плазмолізу тільки за умови попереднього термічного нагрівання середовища до температур порядку 40—50 °C та досить високих полів порядку $E = 0,5$ кВ/см.

На даний час електрообробка біологічних об'єктів знайшла широке наукове і практичне використання. Тут можна вказати на методи електротрансфекції і електропорації, що використовуються у біофізиці та біохімії для модифікації внутрішньої будови та складу окремих біологічних клітин [1—2], методи електроруйнування, що використовуються в промисловості для підвищення якісних характеристик харчових продуктів [3—5], та новітні перспективні методи безреагентної консервації, що використовуються для тривалого зберігання молока, соків тощо [6]. Незважаючи на значні зусилля різних наукових колективів, природа біофізичних та хімічних механізмів, що регулюють протікання процесів імпульсного електроруйнування біооб'єктів, все ще залишається нез'ясованою. Причиною цього є складність біологічних систем, зумовлена поєднанням процесів, що протікають у різних часових та просторових масштабах. Попередні експериментальні дослідження вказують на складну залежність ефективності від параметрів електрообробки (а саме, тривалості дії, амплітуди тощо). Для вирішення цієї проблеми окреслилось два напрями досліджень, пов'язаних з вивченням механізмів електроруйнувань: 1) окремих клітин, або індивідуальних мембран; 2) біологічних тканин, або біологічних суспензій, що об'єднують велику кількість клітин.

Одним з найбільш визнаних та фізично обґрунтованих механізмів руйнування окремих клітин є електропорація. Це явище, коли мембрана клітини при дії достатньо сильного електричного поля може втратити (упродовж певного періоду нестабільності) свою цілісність. Експеримен-

тально спостерігається зростання електропровідності мембран та її проникності, у мембрані тимчасово виникають дірки, через які молекули з зовнішнього середовища можуть проникати в клітину, і, при досягненні певного критичного потенціалу, відбувається її діелектричне руйнування. Важливим механізмом електроруйнування біологічних тканин можуть бути також ефекти омичного нагрівання середовища. Ці ефекти проявляються дуже сильно при застосуванні "м'яких" умов електроруйнування, коли використовуються поля невеликої напруженості та значної тривалості ($E = 0,1 \div 0,5$ кВ/см, $t_i \approx 10^{-3} \div 1$ сек). Такі умови широко використовуються для попередньої електрообробки харчових продуктів та сировини. Процеси електроплазмолізу при тривалій дії електричного поля призводять до значного омичного нагрівання середовища, супроводжуються великими втратами електроенергії і викликають небажану теплову деструкцію біологічної сировини, що визначає обмеження сфери використання цього методу.

При використанні більш "жорстких" умов електрообробки ($E = 20 \div 50$ кВ/см, $t_i \approx 1 \div 10$ мсек) клітини повинні незворотно руйнуватись у відповідності із механізмом електропорації. Даний метод вже знаходить практичне застосування при консервуванні харчових продуктів для знищення бактерій. Але механізм знищувальної дії високоімпульсних полів також не з'ясовано остаточно. Так, прямі електронно-мікроскопічні дослідження не завжди виявляють явні ознаки такого електропораційного руйнування клітин [6]. Механізм електропорації також не дозволяє пояснити всі експериментальні особливості за-

лежності ступеня знищення бактерій від значень E та t_i .

У даній праці ми розглядаємо прояв механізму омичного нагрівання середовища в "м'яких" умовах електроруйнування, пов'язаний з процесами локальної генерації тепла при протіканні струму через мембрани біологічних клітин. Ми враховуємо неоднорідність густини енерговиділення в околі мембрани та процеси теплообміну.

На рис. 1 представлена спрощена модель біологічної тканини в зовнішньому електричному полі, що буде використовуватися при розрахунках у даній праці. Тут кожна клітина представлена в формі куба зі стороною d_c , товщина мембранної оболонки дорівнює d_m , σ_c і σ_m — електропровідності внутрішньої рідини в клітині та мембранної оболонки відповідно. L — товщина зразка, j — густина струму, що протікає через зразок, U — зовнішня напруга, прикладена до зразка, $E = U/L$ — напруженість поля. Будемо вважати, що в системі відсутні зруйновані клітини. За таких умов в паралельних лінійних ланцюгах буде протікати однаковий струм, густина якого дорівнює:

$$j = E\sigma_{ef} \quad (1)$$

де σ_{ef} — ефективна електропровідність окремої клітини, або незруйнованої тканини.

$$\sigma_{ef} = \sigma_c \lambda / (\lambda + 1) \approx \sigma_c \lambda. \quad (2)$$

Тут

$$\lambda = d_c \sigma_m / d_m \sigma_c, \quad (3)$$

і за звичайних умов $d_c \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ м, $d_m \sim 10^{-8}$ м, $\sigma_c \sim 1$ См/м і $\sigma_m \sim 10^{-4} \div 10^{-5}$ См/м, $\lambda \ll 1$.

Омичне тепло, що виробляється струмом густиною j за одиницю часу в об'ємі W , дорівнює:

$$Q = \int_W dW j^2 / \sigma(r) = \int_W dW \sigma(r) E^2, \quad (4)$$

де $\sigma(r)$ — питома електропровідність середовища, що в загальному випадку залежить від просторової координати r .

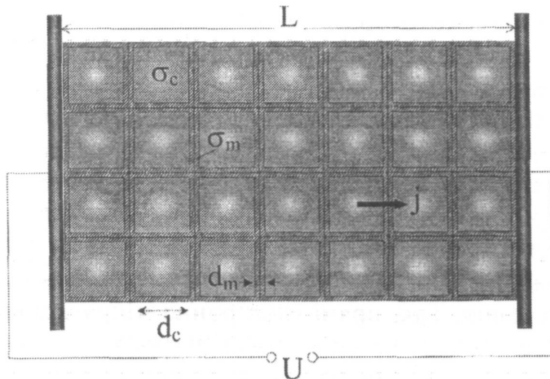


Рис. 1. Спрощена модель біологічної тканини в зовнішньому електричному полі. Пояснення позначень див. у тексті

За допомогою цієї формули неважко оцінити, що при використанні електричних полів напруженістю $E = 0,05 \div 0,3$ кВ/см нагрівання типової біологічної тканини до температури порядку 100°C відбувається за декілька хвилин. Детальні теоретичні і експериментальні дослідження процесів омичного нагрівання біологічних тканин описані в праці [7]. Теплове нагрівання загальної маси біологічних тканин до температур порядку $70 \div 80^\circ\text{C}$, як правило, призводить до руйнування мембран і пошкодження цілісності клітин (термоплазмоліз). При омичному нагріванні розподіл температур всередині біологічної тканини може бути дуже неоднорідним. Як випливає із співвідношення (4), при сталій густині струму j найбільше тепловиділення відмічається в місцях з мінімальними значеннями $\sigma(r)$. Таким чином, принаймні теоретично, можливою є ситуація, коли в біологічній тканині максимальне нагрівання відбувається в ділянках з мінімальними значеннями $\sigma(r)$ (наприклад там, де розташовані мембрани), а середня температура клітинного середовища при цьому залишається відносно невисокою. Про можливість прояву такого механізму вперше вказано ще в праці [8]. Тепло, що виробляється даним струмом за одиницю часу в об'ємі мембрани і об'ємі внутрішньоклітинної рідини, дорівнює відповідно:

$$Q_m = S j^2 d_m / \sigma_m, \quad (5.1)$$

$$Q_c = S j^2 d_c / \sigma_c, \quad (5.2)$$

де $S = d_c^2$ — площа перетину клітин, і отже:

$$Q_c / Q_m = \lambda \ll 1. \quad (6)$$

Звідси ми бачимо, що в об'ємі мембрани ($W_m \sim d_m S$) виділяється набагато більше тепла, ніж в об'ємі клітини ($W_c \sim d_c S$), і це навіть незважаючи на те, що $W_m / W_c < d_m / d_c \sim 10^{-3} \div 10^{-4} \ll 1$. Таким чином, мембрана в процесах електрообробки слугує підігрівним елементом, відповідальним за нагрів усієї клітини.

Швидкість підвищення температури можна оцінити за допомогою співвідношення:

$$V = \Delta T / t = Q / (C \rho W), \quad (7)$$

де C — питома теплоємність, ρ — густина і W — об'єм матеріалу, що нагрівається.

Тоді для мембрани і клітини маємо, відповідно:

$$V_m = \Delta T_m / t = j^2 / (C_m \rho_m \sigma_m), \quad (8.1)$$

$$V_c = \Delta T_c / t = j^2 / (C_c \rho_c \sigma_c), \quad (8.2)$$

і отже

$$\Delta T_m / \Delta T_c = (C_c \rho_c \sigma_c) / (C_m \rho_m \sigma_m) \sim \sigma_c / \sigma_m \sim 10^5 \gg 1. \quad (9)$$

Тобто підвищення температури на мембрані може на багато порядків перевищувати підвищення температури в об'ємі клітини.

Для оцінки реальних величин, характерних для біологічної сировини, будемо вважати, що $C = 3,4 \div 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ (що відповідає теплоємності бурякової тканини в інтервалі вологостей $70 \div 80 \%$ [8]), $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\sigma_{cr} = 10^{-1} \text{ См/м}$. При $E = 0,1 \text{ кВ/см} = 10^4 \text{ В/м}$ для швидкості підвищення температури ми маємо:

$$V_{cr} = \Delta T_{cr} / t = E^2 \sigma_{cr} / (C\rho) = (10^8 \cdot 10^{-1}) / (3 \cdot 10^3 \cdot 10^3) = 3 \text{ К/С.} \quad (10.1)$$

Тобто в даному полі середню температуру матеріалу можна підвищити на 3°К за 1 секунду, проте локальне підвищення температури мембран згідно з співвідношенням (9) теоретично може досягати дуже великих величин,

$$V_m = E^2 \sigma_{cr}^2 / (C_m \rho_m \sigma_m) = \frac{E^2 (d_c / d_m)^2 \sigma_m}{(1 + \lambda)^2 C_m \rho_m}, \quad (10.2)$$

а саме:

$$V_m \approx 10^8 \cdot 10^8 \cdot 10^{-5} / (3 \cdot 10^3 \cdot 10^3) \sim 3 \cdot 10^4 \text{ }^\circ \text{К/с при } E = 0,1 \text{ кВ/см, } d_c / d_m = 10^4, \sigma_m \sim 10^{-5} \text{ См/м, } \lambda \ll 1.$$

Однак це є максимально досяжне підвищення температури мембрани за ідеальної умови відсутності теплообміну між мембраною та оточуючою системою, тому ми надалі будемо позначати цю величину як $\Delta T_m^{(i)}$. За даних умов при збереженні таких високих локальних температур на мембрані це неминуче призводило б до денатурації компонентів мембрани і її руйнування. Але чи відбувається реально таке локальне підвищення температури на мембранах? При наявності таких процесів теплообміну підвищення температури на мембранах може бути значно нижчим.

Час вирівнювання температури на відстанях, що дорівнюють за порядком величини розміру клітини d_c , можна оцінити за допомогою співвідношення:

$$\tau_c \sim d_c^2 / \chi, \quad (11)$$

де χ — коефіцієнт теплопровідності.

Для типових величин $d_c = 10^{-4} \text{ м}$ і $\chi = 1,3 \div 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{С} \sim 10^{-7} \text{ м}^2/\text{С}$ (цукровий буряк в інтервалі вологостей $70 \div 80 \%$ [8]) отримаємо $\tau_c = 0,1 \text{ С}$. Таким чином, при виникненні локального перегріву на всій клітині за час порядку τ_c процеси вирівнювання температури знімають цей перегрів. Зазначимо, що час вирівнювання температури на відстанях, рівних за порядком величині товщини мембрани d_m , дорівнює:

$$\tau_m \sim d_m^2 / \chi \sim 10^{-9} \text{ С} \quad (12)$$

при $d_m \sim 10^{-8} \text{ м}$.

Для оцінки кінетики зміни температури на мембрані проведемо більш детальний розгляд відповідної теплофізичної задачі. Розглянемо окрему мембрану, що знаходиться в точці $x = 0$

в оточенні внутрішньоклітинного розчину. Вивчимо наслідки дії початкового теплового імпульсу, що має довжину t_i , при якому температура мембрани підвищується на початкову величину ΔT_m . Розподіл температурного поля для даної задачі визначається шляхом розв'язку рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T. \quad (13)$$

Розв'язок даної задачі з миттєвим точковим джерелом потужності $Q = C\rho$, що розміщене в момент $t = 0$ в точці $x = y = z = 0$, добре відомий і температурне поле в цьому одновимірному випадку визначається виразом [9, 10]:

$$T(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\chi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\chi t}\right), \quad (14)$$

а для нашого випадку його можна представити у вигляді

$$T(x, y, z) = \frac{\Delta T_m}{\sqrt{4\pi t^*}} \exp\left(-\frac{x^2}{4t^*}\right) \text{ при } t \geq t_i, \quad (15)$$

де введені нові безрозмірні величини $t^* = t / \tau_m$, $x^* = x / d_m$. Тут за одиницю часу ми беремо час вирівнювання температури на товщині мембрани, а за одиницю довжини — товщину мембрани.

Застосовність виразів (14)—(15) обмежується часом $t \geq t_i$, а також вимогою $t_i \leq \tau_m \sim 10^{-9} \text{ С}$. Остання вимога випливає з того факту, що за час дії миттєвого імпульсу температура не повинна істотно вирівнюватись.

Для розгляду загальної теплофізичної задачі при довільних значеннях $t_i > \tau_m \sim 10^{-9} \text{ С}$ розглянемо кінцеворізницький розв'язок задачі (13). Мембрана товщиною d_m розташована в точці $x = 0$, з обох боків її оточують N комірок товщиною d_m , що моделюють внутрішньоклітинний розчин. Загальна довжина системи становить $(N+1)d_m = d_c$. На зовнішніх границях системи (при $x = \pm N/2$) застосовуються періодичні граничні умови. Час змінювався з інтервалом $\Delta t = \tau_m = 10^{-9} \text{ С}$. Таким чином, час визначається співвідношенням $t = i\tau_m$, де i — номер ітерації часу. В початковий момент часу система має однорідну температуру. При кожній ітерації в точці розташування мембрани ($x = 0$) температура збільшувалась на величину $\tau_m V_m$ і проводився розрахунок розподілу температур у всій системі. Збільшення температури відбувалося під час дії поля протягом часу $t = t_i$, при $t > t_i$ поле виключалося і температура на мембрані далі не збільшувалась. Розмір систем становив $N = 50 \div 5000$, $\chi = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{С}$.

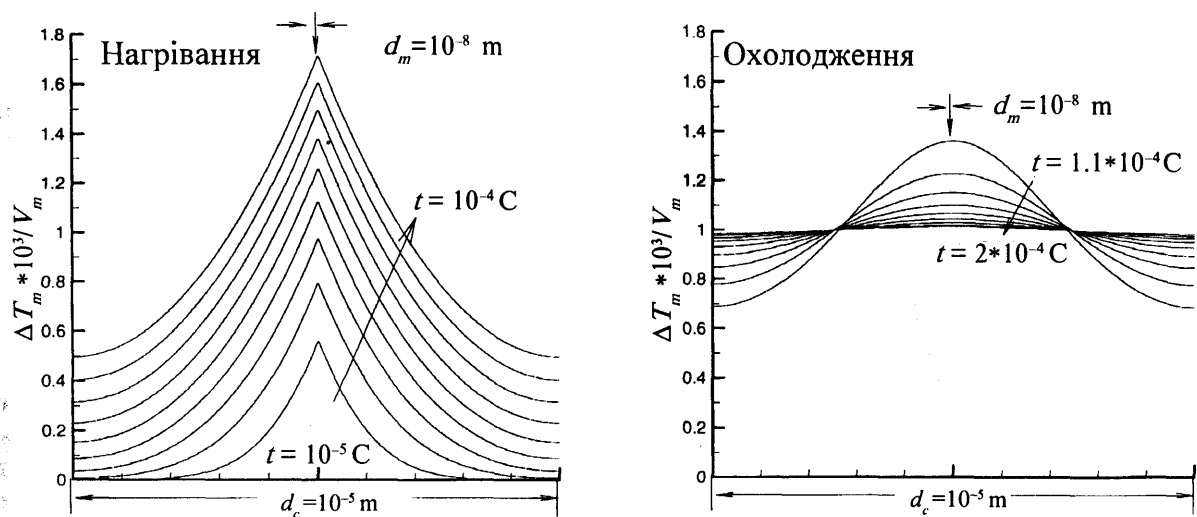


Рис. 2. Профілі зміни нормованої температури в клітині ($\Delta T_m \cdot 10^3 / V_m$) під час дії електричного поля протягом часу $t = 10^{-4}$ C та після його виключення, $d_c = 10^{-5}$ м, $d_m = 10^{-8}$ м, $N = d_c/d_m = 1000$

На рис. 2 представлені профілі зміни нормованої температури в клітині ($\Delta T_m \cdot 10^3 / V_m$) під час дії електричного поля протягом часу $t = 10^{-4}$ C та після його виключення. $d_c = 10^{-5}$ м, $d_m = 10^{-8}$ м, $N = d_c/d_m = 1000$. Тут величина V_m (див. співвідношення (8.1)) відповідає швидкості зростання температури на мембрані за умов відсутності теплообміну. Ми бачимо, що процеси теплообміну значно зменшують перегрів, локалізований в місці розташування мембрани, хоча температура на мембрані в умовах неповного зняття перегріву в декілька разів перевищує температуру оточуючого середовища. При виключенні електронавантаження спостерігається досить швидке вирівнювання температури в межах клітини

за час, що дорівнює за порядком величини τ_c . На рис. 3 представлені кінетика зміни температури на мембрані ΔT_m , температури в об'ємі клітини ΔT_c (температура на зовнішніх границях системи, при $x = \pm N/2$), різниці $\Delta T_m - \Delta T_c$ та ідеалізованої температури на мембрані $\Delta T_m^{(i)}$, при відсутності теплообміну (всі величини тут також нормовані на значення $\cdot 10^3 / V_m$). Отримані нами дані дозволяють зробити висновок, що при наявності теплообміну температура на мембрані приблизно зростає за законом

$$\Delta T_m = a V_m \sqrt{t}, \quad (16.1)$$

де величина $a = (1,77 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ отримана шляхом обробки даних моделювання за допомогою методу найменших квадратів.

Таку поведінку, що описується співвідношенням (16.1), можна обґрунтувати за допомогою наступних простих міркувань. Дійсно, при відсутності теплообміну підвищення температури на мембрані товщиною d_m описується співвідношенням $\Delta T_m^{(i)} = V_m t$. При наявності теплообміну з оточенням за час t ця температура усереднюється на відстані $\sim \sqrt{\chi t}$, тобто в цьому випадку маємо:

$$\Delta T_m \approx \frac{d_m}{\sqrt{\chi t}} \Delta T_m^{(i)} = (d_m / \sqrt{\chi}) V_m \sqrt{t}, \quad (16.2)$$

і, таким чином, враховуючи, що $\chi = 10^{-7}$ м/С і $d_m = 10^{-8}$ м в загальному випадку для оцінки a отримаємо

$$a \approx 0,56 (d_m / \sqrt{\chi}). \quad (17)$$

Однак закон підвищення температури (16) спостерігається тільки при обмеженому часі дії

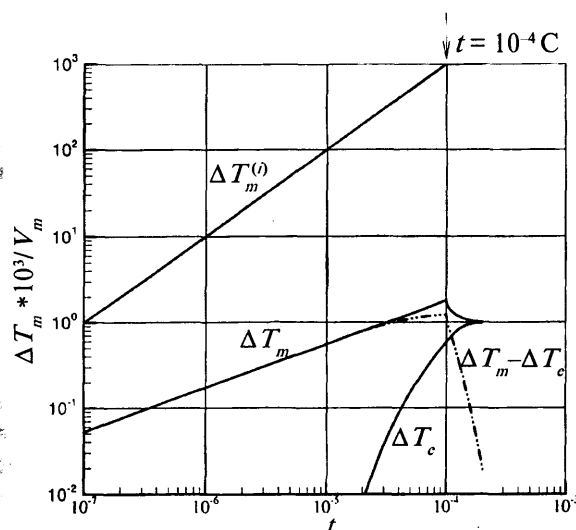


Рис. 3. Кінетика зміни температури на мембрані ΔT_m , температури в об'ємі клітини ΔT_c (це температура на зовнішніх границях системи, при $x = \pm N/2$), різниці $\Delta T_m - \Delta T_c$, ідеалізованої температури на мембрані $\Delta T_m^{(i)}$, при відсутності теплообміну. Всі величини нормовані на $10^3 / V_m$. Час дії поля дорівнює $t = 10^{-4}$ C

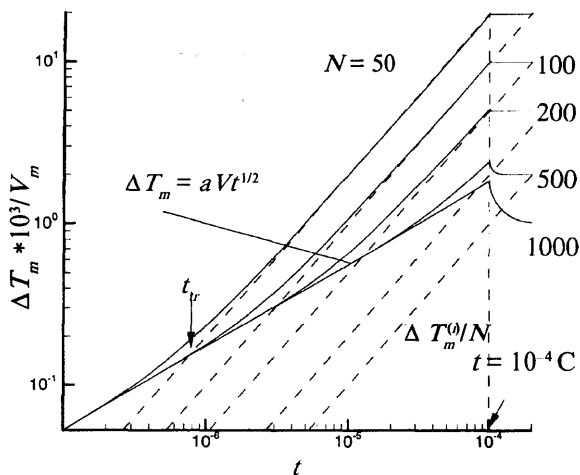


Рис. 4. Кінетика зростання температури на мембрані ΔT_m для систем розміром $N = d_c/d_m = 50, 100, 200, 500$ і 1000 під час дії поля протягом часу 10^{-4} с та після його виключення. $t_{tr} = (aN)^2$ — час переходу між законами зростання температури $\sim t^{1/2}$ і $\sim t^1$. Пунктирною лінією позначено залежності $\Delta T_m^{(i)}/N$ — температури мембрани при миттєвому теплообміні в системі, де $\Delta T_m^{(i)} = Vt$ — максимально досяжна температура мембрани при відсутності теплообміну.

Всі величини нормовані на $10^3/V_m$ електричного поля $t < t_{tr}$. При значних проміжках часу, а саме, коли $t \gg t_c \sim d_c^2/\chi$ слід розглядати інший граничний випадок, що фактично є еквівалентним миттєвому теплообміну по всій клітині ($\chi \rightarrow \infty$). При цьому ми будемо спостерігати лінійне зростання температури на мембрані з часом за законом:

$$\Delta T_m = \Delta T_m^\infty \approx \frac{d_m}{d_c} \Delta T_m^{(i)} = V_m t / N = \Delta T_{ef}, \quad (18)$$

і ця температура буде фактично дорівнювати температурі оточуючого середовища.

Перехідний час між режимами нагрівання мембрани, що описуються за допомогою рівнянь (16) і (18), можна приблизно визначити з умови $aV_m \sqrt{t_{tr}} = V_m t_{tr} / N$, звідки

$$t_{tr} = (Na)^2 = (ad_c/d_m)^2 \chi \sim \tau_c = d_c^2/\chi. \quad (19)$$

Дана поведінка повністю підтверджується результатами моделювання для систем з різними значеннями $N = d_c/d_m = 50, 100, 200, 500$ і 1000 (рис. 4) і тут час переходу між режимами (16) і (18) добре описується за допомогою співвідношення (19). Таким чином, в загальному випадку спостерігаються два режими підвищення температури: повільний, $\Delta T_m \sim t^{1/2}$, при $t < t_{tr}$, рівняння (16), і швидкий, $\Delta T_m \sim t$, при $t > t_{tr}$, рівняння (18).

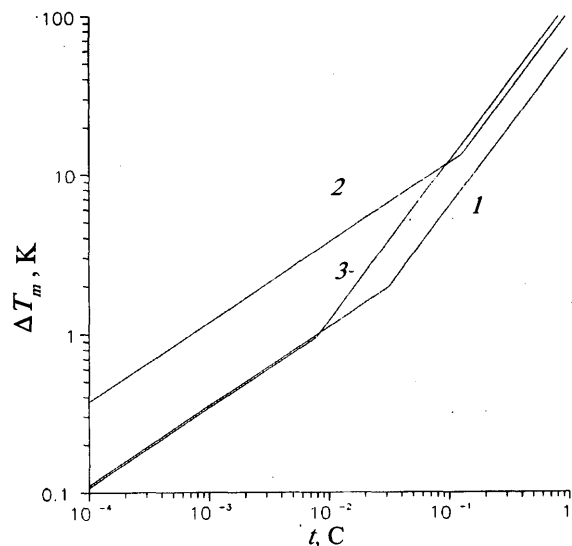


Рис. 5. Оцінка кінетики зростання температури на мембрані ΔT_m в реальних біологічних системах. Результати отримані за допомогою рівнянь (16) і (18) та співвідношення (10.2) при $E = 0,5$ кВ/см, $d_m = 10^{-8}$ м, $\sigma_c = 1$ См/м і таких значеннях параметрів:

- 1 — $\sigma_m = 10^{-5}$ См/м, $d_c = 10^{-4}$ м ($\lambda = 0,1$, $\sigma_{ef} = 0,1$ См/м);
- 2 — $\sigma_m = 10^{-5}$ См/м, $d_c = 2 \cdot 10^{-4}$ м ($\lambda = 0,2$, $\sigma_{ef} = 0,2$ См/м);
- 3 — $\sigma_m = 5 \cdot 10^{-5}$ См/м, $d_c = 10^{-4}$ м ($\lambda = 0,25$, $\sigma_{ef} = 0,25$ См/м)

Результати наближених оцінок значень перегрівів мембран в реальних біологічних системах за допомогою рівнянь (16) і (18) та співвідношення (10.2) представлені на рис. 5. При даних оцінках ми використовували значення параметрів $\sigma_m = 1 \div 5 \cdot 10^{-5}$ См/м, $\sigma_c = 1$ См/м, $d_m = 10^{-8}$ м, $d_c = 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ м, характерні для реальних біологічних тканин (яблуко, цукровий буряк тощо) з ефективною електропровідністю в інтервалі $\sigma_{ef} = 0,1 \div 0,25$ См/м, близькою до експериментально вимірюваних значень. Ми бачимо, що в реальних умовах перегрів на мембранах при використанні досить великих полів $E = 0,5$ кВ/см може сягати не дуже високих значень: на $10 \div 20$ °К за час порядку $0,1$ с. Звичайно електрообробку припиняють за умов $t > t_{tr}$ через те, що при цьому починається небажане омичне нагрівання загальної маси зразка. Тому на практиці доцільно використовувати комбіновану термічно-електричну обробку з попереднім термічним нагріванням загальної температури середовища до $40 \div 50$ °С [12]. Лише за таких умов локальне омичне нагрівання може призвести до підвищення температури на мембранах порядку $60 \div 70$ °С і викликати інтенсифікацію процесів плазмолізу.

1. Chernomordik L. V., Sukharev S. I., Popov S. V., Pastushenko V. F., Sokirko A. V., Abidor I. G., Chizmadhev U. A. Biochim. et biophys. acta, 1987, V. 902, P. 360—373.
2. Neumann E., Sprafke A., Boldt E., Wolf H. Biophysical considerations of membrane electroporation // Guide to Electroporation and electrofusion, San Diego, Academic

Press, Ed. by D. C. Chang, B. M. Chassy, J. A. Saunders, A. E. Sowers, 1992.,— P. 77—117.

3. Болога М. К., Чебану В. Г., Берзой С. Е. и др. Оптимизация процесса электроплазмоллиза яблочной мезги // Электронная обработка материалов.— 1988.— № 2.— С. 70—72.

4. Ботошан Н. И., Папченко А. Я., Берзой С. Е. Интенсификация процесса экстракции сахара электрообработкой свекловичной стружки // Электронная обработка материалов.— 1990.— № 6.— С. 66.
5. Knorr D., Geulen M., Grahl Th., Sitzmann W. Food application of high electric pulses // Trends in Food Science and Technology.— 1994.— V. 5, N 3.— P. 71—75.
6. Barbosa-Canovas G. V., Swanson B. G., Pothakamury U. R. u. Palou R. E. Non Thermal Processing of Foods.— Marcel Dekker, 1995.
7. Halden K., de Alwis A. A. P., Fryer P. J. Changes in electrical conductivity during ohmic heating of foods. Int. J. Food Sci. Technol.— 1990.— N 25.— P. 9—25.
8. Загоруйко А. Я. Получение диффузионного сока с помощью электроплазмоллиза.— Автореф. канд. дис.— Киев, 1958.— 20 с.
9. Михайлик В. А. Термохимические исследования рекристаллизации сахарозы. Автореф. канд. дис.— Киев, 1980.— 45 с.
10. Тихонов А. Н., Самарский А. А., Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1972.— С. 736.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности.— М.: Изд-во техн. теор. лит., 1952.— С. 392.
12. Лебовка Н. И., Купчик М. П., Бажал М. И., Фалес В. М., Серебряков Р. А. Моделирование процессов электрообработки гетерогенных смесей // Обработка дисперсных материалов и сред.— 1999, № 9.— С. 35—41.

*Lebovka N. I., Melnyk R. M., Kupchyk M. P.,
Bazhal M. I., Serebrjakov P. A.*

LOCAL GENERATION OF OHMIC HEATING ON CELL MEMBRANES DURING ELECTRIC TREATMENT OF BIOLOGIC TISSUE

The estimation of the processes of local ohmic heating generation at the cell membranes during electric treatment of biological tissues is carried out. The treatment of a general thermal physical problem for the model of linear chains is presented. Two modes of temperature increase at a membrane affected by electric field are identified: slow, $\Delta T_m \sim t^{1/2}$, and fast, $\Delta T_m \sim t$. The period of transfer between slow and fast modes is equal to the time of thermal relaxation at distances of cell dimension order $t_{tr} \sim d_c^2/\chi$. It is shown that in real systems the local ohmic heating may have efficient impact on the processes of plasmolysis only subject to preliminary thermal heating of environment to the temperature of order 40—50 °C and rather high field strengths of order $E = 0,5 \text{ kV/cm}$.