

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ  
БУКОВИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# МАТЕРІАЛИ

III науково-практичної інтернет-конференції



**РОЗВИТОК  
ПРИРОДНИЧИХ НАУК  
ЯК ОСНОВА НОВІТНІХ  
ДОСЯГНЕНЬ У  
МЕДИЦИНІ**

*м. Чернівці  
21 червня 2023 року*

УДК: 536.7:536.42:612.014.6

Чалий О.В., Гриценко Н.Л., Хмель В.В., Корицький Є.А.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТІЛА ЛЮДИНИ

*Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ,*

*avchal@univ.kiev.ua , nataly812305@gmail.com , khmel.viktoriya.2006@gmail.com ,  
zenjakorickij@gmail.com*

**Анотація.** У цій статті експериментально досліджені особливості теплового випромінювання, яке широко використовується в сучасній медицині в якості діагностичного метода. Отримана часова залежність процесу температурної релаксації, а також числові значення параметрів, які описують цей процес для шкіри людини. Проведений експеримент показав, що температура теплового випромінювання локально нагрітої ділянки тіла людини спадає з часом не експоненціально, як для нагрітих неорганічних тіл, а згасаючими коливаннями навколо початкового рівноважного значення температури. Така часова залежність процесу температурної релаксації теплового випромінювання пояснюється впливом терморецепторів, що знаходяться у шкірному покриві тіла людини. Теоретична обробка отриманих результатів дозволила визначити наступні параметри процесу температурної релаксації: період згасаючих коливань температури, коефіцієнт згасання та час релаксації температурних коливань теплового випромінювання шкіри людини, а також частоти згасаючих і власних температурних коливань. Окрім знаходження зазначених параметрів, одним з важливих теоретичних результатів виявилось знаходження явного вигляду диференціального рівняння другого порядку, яке описує зміну температури теплового випромінювання шкіри людини.

*Ключові слова:* температурна релаксація, закони теплового випромінювання, терморецептори, диференціальне рівняння згасаючих коливань температури.

**Вступ.** Серед багатьох теоретичних та експериментальних методів, які використовуються в природничих науках (зокрема, в медичній та біологічній фізиці), значна роль належить важливому розділу, який вивчає особливості теплового випромінювання об'єктів живої та неживої природи [1-18]. Як відомо, теплове (температурне) випромінювання, причиною якого є тепловий рух атомів і молекул всіх нагрітих тіл, має не тільки велике значення для медицини як прецизійний та неінвазивний діагностичний метод, так і для всієї природничої

науки та освіти [1-5]. Саме пояснення спектру теплового випромінювання абсолютно чорного тіла М. Планком у грудні 1900 р. поклало початок видатному науковому досягненню, яким є створення квантової механіки, та її теоретичному і практичному застосуванню в багатьох галузях науки і техніки. Дана стаття присвячена експериментальному дослідженню теплового випромінювання шкіри людини, а також теоретичним розрахункам параметрів теплового випромінювання, які описують отримані експериментальні дані. Основним науковим результатом проведеного дослідження є встановлення того факту, що наближення температури теплового випромінювання до свого рівноважного значення для біологічного об'єкту, яким є шкіри людини, відбувається не за експоненціальним законом, характерним для нагрітих неорганічних тіл, а у формі згасаючих температурних коливань за рахунок впливу терморцепторів у шкірі людини.

**Особливості температурної релаксації нагрітих неорганічних тіл.** Розглянемо задачу про температурну релаксацію неорганічного тіла, нагрітого в початковий момент часу  $t = 0$  до температури  $T_0$ , яка перевищує рівноважну температуру зовнішнього середовища. Відповідна задача Коші математичної фізики зводиться до розв'язання наступного диференціального рівняння другого порядку в частинних похідних (див. деталі виведення такого рівняння з повної системи 4-х рівнянь для термодифузійних явищ та його розв'язок, наприклад, у монографії [4]):

$$\partial T / \partial t = \chi \Delta T \quad (1)$$

Це рівняння містить похідну від температури  $T$  по часу  $t$  в лівій частині (1) та просторові похідні від температури в останньому множнику правої частини, де оператор Лапласа  $\Delta$ , що діє на температуру  $T$ , означає такий вираз:  $\Delta T = \partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2$ .

У подальшому для спрощення розв'язку диференціального рівняння (1) будемо вважати: а) постійною величиною кінетичний коефіцієнт  $\chi$ , який носить назву коефіцієнта температуропровідності, а також б) просторову неоднорідність температури достатньо плавною настільки, що в одномірному випадку можна скористатися наближеним виразом  $\partial^2 T / \partial x^2 \approx T / L^2$ , де  $L$  - це характерний розмір системи в напрямку  $x$ -осі. Оскільки з плином часу фізичний зміст при даній постановці задачі має лише від'ємне значення похідної  $\partial T / \partial t$ , то рівняння (1) спрощується до вигляду простого лінійного диференціального рівняння першого порядку:

$$dT / dt = -\chi T / L^2 \quad (2)$$

Легко збагнути, що частинний розв'язок диференціального рівняння (2), який задовольняє початковій умові  $T(t=0) = T_0$ , відповідає наступній експоненціальній залежності зміни температури  $T$  з плином часу  $t$ :

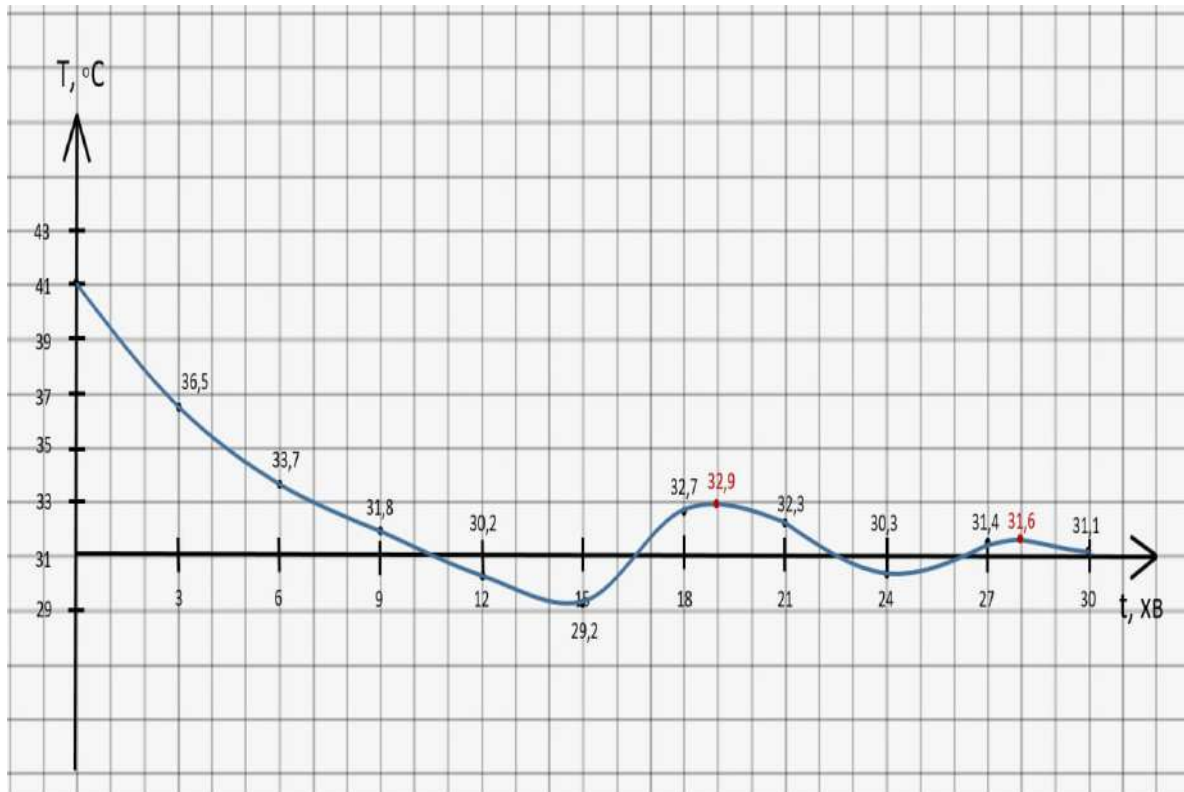
$$T(t) = T_0 \exp(-\chi t / L^2) . \quad (3)$$

Таким чином, час температурної релаксації  $\tau_{\text{релакс}}$  описується наступним виразом:

$$\tau_{\text{релакс}} = L^2 / \chi = \rho C_p L^2 / \lambda , \quad (4)$$

де використана формула  $\chi = \lambda / \rho C_p$ . Звідси випливає, що час температурної релаксації  $\tau_{\text{релакс}}$  в неорганічній речовині збільшується при зростанні густини (концентрації) числа частинок  $\rho$  та ізобарної теплоємності  $C_p$ , а також при зменшенні коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$  та температуропровідності  $\chi$ .

**Експериментальні дослідження та розрахунок параметрів теплового випромінювання шкіри людини.** Перейдемо тепер до вивчення процесу температурної релаксації теплового випромінювання в органічному об'єкті живої природи, яким є шкіра людини. Нами були проведені експериментальні дослідження процесу температурної релаксації теплового випромінювання, представлені на Рис. 1. Отримані результати для температури теплового випромінювання дозволили визначити числові значення параметрів цього процесу для шкіри людини. Доведено (див. також посилання в [1]), що часова залежність температури теплового випромінювання характеризується такими особливостями: 1) вона не підкорюється експоненціальному закону (3), як це спостерігається для об'єктів неорганічної природи, 2) вона відбувається у вигляді згасаючих коливань температури  $T$  з плином часу  $t$ , як це чітко видно на Рис. 1. Причина полягає в дії терморецепторів, які створюють сенсорну систему, котра розташована в різних ділянках та органах тіла людини (зокрема, у шкірі, слизовій оболонці, головному мозку, тощо). Зазначимо, що найбільша кількість терморецепторів міститься у шкірі людини. Встановлено, що в поверхневих шарах шкіри набагато більше терморецепторів, які реагують на холод, тоді як в більш глибоких шарах шкіри містяться рецептори, які реагують на тепло. Обробка інформації щодо терморецепції відбувається в центрі терморегуляції за участю гіпоталамусу в головному мозку людини [6].



**Рис. 1.** Графік залежності температури  $T$  теплового випромінювання шкіри людини від часу  $t$ .

На Рис. 1 наданий графік часової залежності температури  $T(t)$  для процесу температурної релаксації теплового випромінювання шкіри людини в таких координатах: температура  $T$  у градусах Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ); час  $t$  у хвилинах (хв.). Початкова температура нагріву локальної ділянки шкіри між великим та вказівним пальцями кисті руки становила  $41^{\circ}\text{C}$ , тоді як рівноважна температура цієї ділянки шкіри до нагріву дорівнювала  $31^{\circ}\text{C}$ . Виміри температури теплового випромінювання шкіри проводилися за допомогою інфрачервоного пірметра «Німбус», виготовленого вітчизняною фірмою «Харків-прилад». Цей прилад мав такі технічні характеристики: роздільна здатність вимірювання температури  $0.2^{\circ}\text{C}$ , температурний інтервал вимірювання від  $-32^{\circ}\text{C}$  до  $420^{\circ}\text{C}$ .

Як відомо [1], лінійне диференціальне рівняння другого порядку, яке описує згасаючі температурні коливання теплового випромінювання шкіри людини, має такий загальний вигляд:

$$\frac{d^2T}{dt^2} + 2\beta \frac{dT}{dt} + \omega_0^2 T = 0 \quad (5)$$

Розрахуємо основні параметри диференціального рівняння (5), до яких відносяться

коефіцієнт згасання  $\beta$  та частота  $\omega_0$  власних температурних коливань теплового випромінювання. Коефіцієнт згасання  $\beta$  температурних коливань можна оцінити за наступною формулою, яка зв'язує коефіцієнт згасання  $\beta$  з оберненою величиною часу релаксації  $\tau_{\text{релакс}}$ :

$$\beta = 1 / \tau_{\text{релакс}} \quad (6)$$

Слід зауважити, що час релаксації  $\tau_{\text{релакс}}$  - це той час, за який температурна амплітуда нагріву шкіри, котра в початковий момент часу  $t = 0$  дорівнювала  $10^{\circ}\text{C}$ , зменшиться в  $e = 2.718$  разів.

З лівої частини графіку для функції  $T(t)$  видно, що час релаксації  $\tau_{\text{релакс}} = 5$  хвилин, через який температура теплового випромінювання стане приблизно рівною  $34.7^{\circ}\text{C}$ . Саме за цей

час амплітуда температурного нагріву шкіри досягне значення  $10^{\circ}\text{C} / 2.718 = 3.678^{\circ}\text{C}$ , що

відповідає саме вказаній температурі шкіри  $T_{\text{шк}} \approx 31^{\circ}\text{C} + 3.7^{\circ}\text{C} = 34.7^{\circ}\text{C}$ . Звідси за

формулою (6) маємо, що коефіцієнт згасання температурних коливань теплового випромінювання шкіри дорівнює  $\beta = 0.2\text{хв}^{-1}$ .

Що стосується частоти  $\omega_0$  власних температурних коливань теплового випромінювання, то числове значення частоти  $\omega_0$  можна знайти з формули для частоти згасаючих коливань

$\omega = (\omega_0^2 - \beta^2)^{1/2}$ . З цієї формули маємо такий вираз для частоти  $\omega_0$  власних температурних коливань:

$$\omega_0 = (\omega^2 + \beta^2)^{1/2} = [(2\pi / T^*)^2 + \beta^2]^{1/2} \quad (7)$$

З формули (7) випливає, що для знаходження числового значення  $\omega_0$  слід знайти лише

частоту  $\omega$  згасаючих коливань або їхній період  $T^* = 2\pi / \omega$ . З правої частини графіку для

функції  $T(t)$  видно, що значення сусідніх амплітуд згасаючих коливань величиною  $32.9^{\circ}\text{C}$  і

$31.6^{\circ}\text{C}$ , які позначені червоним кольором, знаходяться одна від одної на відстані в часі, що

дорівнює періоду згасаючих коливань  $T^* = 9\text{хв}$ . Тоді на підставі формули  $\omega = 2\pi / T^*$

знаходимо числове значення частоти згасаючих температурних коливань  $\omega = 0.70\text{рад/хв}$ .

Підставляючи в правую частину формули (7) числові значення  $T^*$  і  $\beta$ , отримуємо таке числове значення частоти власних температурних коливань теплового випромінювання шкіри

людини:  $\omega_0 = 0.73 \text{ рад/хв.}$

Таким чином, з урахуванням отриманих числових значень коефіцієнта затухання  $\beta$  та частоти  $\omega_0$  власних температурних коливань отримуємо наступне результуюче диференціальне рівняння для часової залежності температури  $T(t)$ :

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + 0.40 \frac{dT}{dt} + 0.53 T = 0, \quad (8)$$

яке описує згасаючі температурні коливання теплового випромінювання шкіри людини у відповідності до експериментальних даних, представлених на Рис. 1.

**Висновки.** У результаті проведення експериментальних вимірювань температури теплового випромінювання тіла людини вдалося встановити, що часова залежність температури теплового випромінювання шкіри характеризується не експоненціальною залежністю, як у тіл неорганічної природи, а у формі згасаючих температурних коливань, представлених на Рис.1. Знайдені такі параметри часової залежності згасаючих температурних коливань теплового випромінювання шкіри людини: час релаксації згасаючих температурних коливань  $\tau_{\text{релакс}} = 5 \text{ хв.}$ , коефіцієнт згасання температурних коливань теплового випромінювання  $\beta = 0.2 \text{ хв}^{-1}$ , період згасаючих температурних коливань  $T^* = 9 \text{ хв.}$ , частота згасаючих температурних коливань  $\omega = 0.70 \text{ рад/хв.}$ , частота власних температурних коливань  $\omega_0 = 0.73 \text{ рад/хв.}$  Запропонований явний вигляд диференціального рівняння другого порядку для часової залежності температури  $T(t)$ , яке описує згасаючі температурні коливання теплового випромінювання шкіри людини у відповідності до отриманих експериментальних даних.

### Список використаної літератури

1. Medical and Biological Physics / Textbook for students of higher medical universities. Edited by A. Chalyi, 4<sup>th</sup> edition, Nova Knyga, Vinnitsia (2020).
2. S.R. de Groot and P. Mazur. Non-Equilibrium Thermodynamics. Dover Publications, New York (2013).
3. Л.А. Булавін, Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман та О.В. Чалий. «Медична фізика. Динамічні та статистичні моделі», Видавничий центр «Київський Університет», Київ (2011).
4. A.V. Chalyi. “Non-equilibrium Processes in Physics and Biology”, Naukova Dumka, Kyiv, (1997).
5. А.І. Єгоренков, В.В. Пашченко, Л.Г. Лесько. «Фізичні Основи Медико-Діагностичних Вимірювань». Книга-плюс, Київ (2023).
6. Медична біологія / Навчальний посібник для практичних занять. За редакцією О.В. Романенка.- Здоров'я, Київ (2005).
7. A. Chalyi and N. Gritsenko “Brief History of the Creation of a Diagnostic Method of Electrocriography”. *EC Clinical and Medical Case Reports* 6.1 (2023): 30-34.
8. A. Chalyi, V. Pashchenko, K. Chalyu, N. Stuchinska, A. Egorenkov, L. Lesko, Yu. Litvin, V. Rudneva “Elective Course «Medical Equipment: Physical and Biophysical Principles»”. *EC Clinical and Medical Case Reports* 5.9 (2022):

67-72.

9. A. Chalyi and A. Kryshchtopa, «Synergetic Approach to Teaching Natural Sciences in Medical Universities», *EC Clinical and Medical Case Reports* 5.6 (2022): 58-61.
10. A. Chalyi, D. Lukomsky, O. Chaika, O. Zaitseva and K. Chalyy, «Physical Aspects of Pulse Oximetry in the Context of COVID-19 Pandemic», *EC Clinical and Medical Case Reports* 5.5 (2022): 22-27.
11. A. Chalyi, O. Lyubchik, K. Chalyy et al. «Teaching of Medical and Biological Physics and Medical Informatics in European Universities», *Continuing Professional Education* 3 (2021): 71-88.
12. O.V. Chalyi, K.O. Chalyy, L.G. Lesko, V.V. Pashchenko and A.I. Egorenkov. «Mechanisms and Effects of Action of Physical Fields on Biological Tissues: Physical and Biophysical Foundations of Physiotherapy (Scientific and Methodological Review)», Knyga Plus, Kyiv (2019).
13. B Nolting, «Methods of Modern Biophysics». Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin (2006).
14. P Nelson, «Biological Physics. Energy, Information, Life». W.H. Freeman and Company, New York (2004).
15. R Cotterill, «Biophysics. An Introduction». John Wiley & Sons, New York (2003).
16. A.V. Chalyi and P.M. Deluca, «The Fulbright Program Builds Bridges Between Leading American and Ukrainian Universities in the Study of Medical Physics and Biomedical Engineering», *Fulbright Newsletter*, 4 (1999): 8-11.
17. Russel K Hobbie, «Intermediate Physics for Medicine and Biology». Springer-Verlag, New York 1997).
18. M. Nelkon, P. Parker. «Advanced Level Physics». 5<sup>th</sup> edition, Heinemann Educational Books, London (1982)

Гринчук Ф.Ф

## ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЖИТТЄЗДАТНОСТІ КИШОК В ЕКСПЕРИМЕНТІ

Буковинський державний медичний університет, Чернівці

[fedir.grynychuk@gmail.com](mailto:fedir.grynychuk@gmail.com)

**Вступ.** Оцінювання життєздатності (ЖТЗ) кишок часто проводять при гострій кишкової непрохідності, защемленні гриж, гострій мезентеріальній ішемії [1-4]. Головним методом оцінювання є візуальний, але цей метод є суб'єктивним і недостатньо надійним [5,6]. Для об'єктивного оцінювання є багато способів [6-16]. Більшість з них визначають інтенсивність кровообігу в тканинах. Але зміни кровообігу недостатньо інформативні, оскільки некроз починається зі слизової оболонки [5], що такі методи не виявляють. Отож пошук ефективного методу оцінювання ЖТЗ є актуальним.

**Мета.** В експерименті дослідити ефективність застосування лазерного випромінювання для визначення ЖТЗ кишок.

**Методи.** 30 білих нелінійних щурів: у 10 – перев'язували петлю тонкої кишки (ТкК) з брижею, у 10 – петлю товстої кишки (ТсК) з брижею. Через 6 год вимірювали ширину зони розсіювання лазерних променів (ШЗРЛП) (у міліметрах) на стінках кишок в привідній (ПД), відвідній (ВД) і перев'язаній (ПрД) ділянках і забирали їх на гістологічне дослідження. Контролем були дані 10 здорових тварин.

Для опромінення використовували лазерні світлодіоди з довжинами хвиль випромінювання  $\lambda=0,63$  мкм і  $\lambda=0,4$  мкм. Препарати були зафарбовані гематоксилін-еозином.