

# ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦІЙНІ АВТОКОЛИВАННЯ В КРИСТАЛИКАХ МЕТАНУ ОПРОМІНЮВАНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ТЕПЛОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

І.Ю. Голіней

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Досліджено виникнення термоконтраційних автоколивань в сферичному кристалітику метану при опроміненні електронами, в умовах, коли розсіяння тепла відбувається через випромінювання за законом Стефана – Больцманна. Автоколивання існують за низьких температур, у кристалітиках обмежених за розміром. Проаналізовано залежності області існування автоколивань та їхньої частоти від параметрів, зокрема від інтенсивності опромінення, розмірів, температури оточення, енергії активації дифузії тощо.

При опроміненні кристала метану електронами експериментально спостерігалися регулярні періодичні коливання тиску в резервуарі [1]. Ці викиди газу з опроміненого зразка пояснені в роботі [2] як прояв термоконтраційних автоколивань – при опроміненні створюються радикали  $\text{CH}_3$ , об'єднання яких супроводжується виділенням тепла. Внаслідок підвищення температури збільшується рухливість радикалів, а отже ймовірність їхньої рекомбінації, що супроводжується додатковим підвищенням температури. Так виникає необхідний для автоколивань позитивний зворотній зразок. Для повернення до низькотемпературного стану зразок треба охолоджувати. В роботі [2] вважалося, що охолодження забезпечувалося за рахунок контакту зразка з термостатом. Однак характер цього контакту залишався невідомим параметром. У дослідженні, про яке доповідається тут, розглянуто кристалик метану сферичної форми у вакуумі, коли єдиним шляхом відведення тепла є теплове випромінювання за законом Стефана – Больцманна.

Кінетика зміни концентрації радикалів та температури в опроміненому електронами кристалі описується системою рівнянь:

$$\frac{dn}{dt} = G - R(n, T)$$
$$C(T) \frac{dT}{dt} = P + ER(n, T) + \beta(T_{th}^4 - T^4)$$

Тут  $n$  – концентрація радикалів  $\text{CH}_3$ ,  $T$  – температура зразка,  $G$  – швидкість створення радикалів при опроміненні,  $P$  – енергія, яка виділяється в зразку при опроміненні, безпосередньо не пов'язана з утворенням радикалів,  $E$  – енергія, яка виділяється при об'єднанні двох радикалів  $\text{CH}_3$  з утворенням молекули етану,  $\beta = \frac{3\sigma}{R}$  – коефіцієнт теплообміну між зразком і простором,  $R$  – радіус кристалика,  $\sigma$  – стала Стефана – Больцманна. Обернено-пропорційна залежність ефективного теплообміну від радіуса виникає тому, що утворення радикалів може відбутися в будь-якій точці кристалика, тобто кількість радикалів пропорційна об'єму, а випромінювання тепла пропорційне площі поверхні.  $C(T)$  – теплоємність зразка,  $T_{th}$  – температура простору. Член  $R(n, T)$  описує процес об'єднання двох радикалів і задається у вигляді  $R(n, T) = Kn^2 e^{-\varepsilon/T}$ , де  $\varepsilon$  – енергія активації дифузії радикалів (у кельвінах), а  $K$  – незалежний від температури коефіцієнт.

На Рис. 1 проілюстровано часову залежність концентрації радикалів та температури, що демонструє можливість автоколивань, які виникають у кристалах достатньо малого розміру (21 нм). У більших кристалах коливання затухають, менших – зменшується частота, процес накопичення радикалів триває довше.

Задача може знайти застосування в астрофізиці, при вивченні утворення складних органічних молекул внаслідок опромінення кристаликів метану космічними променями[3].

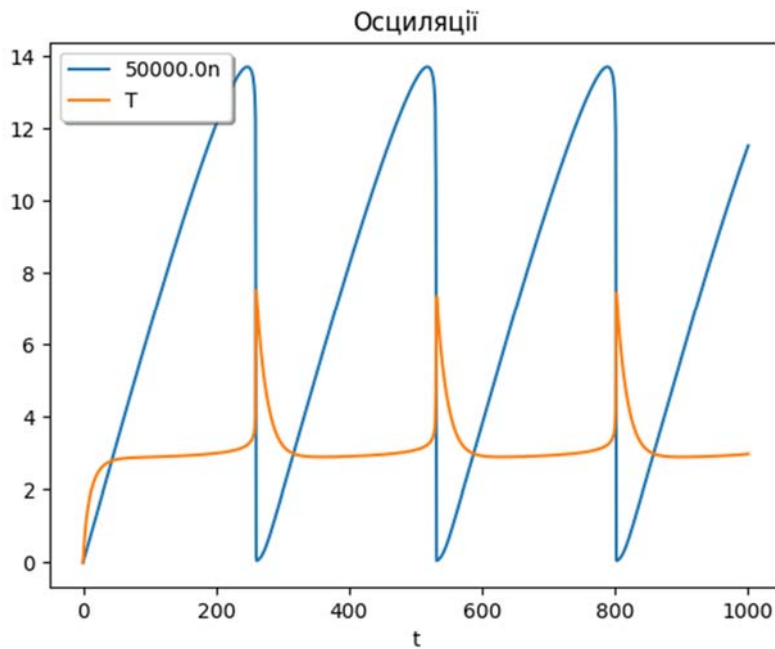


Рис. 1. Ілюстрація автоколивань. Часова залежність температури кристаліка (жовта крива) та концентрації радикалів у ньому (синя крива). Відбувається повільне накопичення радикалів при майже постійній температурі, різкий стрибок температури під час швидкої реакції об'єднання радикалів метанолу в молекулу етану та дещо повільніше охолодження за рахунок теплового випромінювання.

1. I. V. Khizhny, S. A. Uytunov, M. A. Bludov, and E. V. Savchenko. *Low Temperature Physics*. 44 (2018) 1223.
2. M. A. Bludov, I. V. Khyzhniy, E. V. Savchenko, V. I. Sugakov, S. A. Uytunov. *Ядерна фізика та енергетика*. 21 (2020) 312.
3. Cheng Zhu et al. *The Astrophysical Journal*, 920 (2021) 73.