

# ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

H01L 35/00

## Про можливість охолодження із застосуванням анізотропного діелектричного середовища

А. А. Ащеулов<sup>1</sup>, М. Я. Дерев'янчук<sup>2</sup>✉, Д. О. Лавренюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>2-3</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58002, Україна

✉ e-mail: <sup>2</sup>m.derevianchuk@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-5859-4479>

У роботі вперше розглядаються 2 оригінальні методи охолодження на основі анізотропних діелектричних матеріалів. Перший метод охолодження застосовує уніполярний анізотропний діелектричний матеріал в якому процес охолодження проходить за допомогою вихорів електричного поля з ламінарним характером течії. Для таких конструкцій, у випадку коефіцієнта анізотропії матеріалу пластини  $0 < K < 1$ , визначено: оптимальний кут орієнтації кристалографічних осей  $\gamma = 45^\circ$ , коефіцієнт перетворення ( $m$ ), холодопродуктивність ( $Q$ ), глибину охолодження ( $\Delta T$ ), коефіцієнт корисної дії ( $\theta$ ). Слід зазначити, що у цьому випадку коефіцієнт перетворення  $m_{\text{uni}} \in (0; 1)$ , а коефіцієнт корисної дії не перевищує 1. У якості можливих матеріалів, що можуть бути використані для такого охолоджувача, є монокристал дигідрофосфату калію (KDP). Розрахунковий перепад температур  $\Delta T_{\text{uni}}$ , що при цьому досягається, знаходиться в межах 80-100 К. Другий метод охолодження застосовує біполярний анізотропний діелектричний матеріал з відповідним виникненням в ньому вихорів електричного поля з турбулентним характером течії. Конструкція охолоджувача у цьому випадку аналогічна попередній. Застосування біполярного анізотропного діелектричного матеріалу обумовлює виникнення в об'ємі пластини вихорів електричного струму з турбулентним характером течії, що взаємодіє з її внутрішньою енергією і значно підвищує ефективність охолодження. У цьому випадку, при коефіцієнті анізотропії  $0 < K < 1$ , спостерігається значне зростання коефіцієнта перетворення  $m_{\text{bi}}$  в окремих випадках  $m_{\text{bi}} \gg 1$ . У випадку використання біполярного шарового штучно-анізотропного матеріалу на основі класичного діелектрика з додатнім коефіцієнтом діелектричної проникності і твердотільного метадіелектрика, що характеризується від'ємним значенням коефіцієнта діелектричної проникності, глибина охолодження  $\Delta T_{\text{bi}}$  у такого пристрою може досягати величин 200-250 К від кімнатної температури. Результати проведених досліджень показують перспективність використання таких пристроїв, як високоефективних холодильних елементів. Дані пристрої дозволяють здійснювати ефективну утилізацію та акумуляцію холоду, що виділяється, як від конкретних об'єктів, різних приладів і пристроїв, перекачуючи її в зовнішнє середовище. Проведені чисельні оцінки показують, що застосування запропонованого пристрою дасть значний екологічний та економічний ефекти.

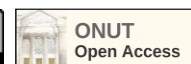
**Ключові слова:** Охолодження; Анізотропія; Уніполярність; Біполярність; Ламінарність; Турбулентність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i1.2608>

© The Author(s) 2023. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. Вступ

Піроелектричний ефект відноситься до широкого класу термоелектричних явищ, який проявляється у вигляді електризації діелектрика при зміні його температури. У порівнянні з іншими термоелектричними ефектами, піроелектричний ефект виділяється тим, що причина електризації безпосередньо пов'язана з температурними змінами полярних викривлень кристалічної структури діелектрика. Цей ефект відомий досить давно, майже як і електризація за допомогою тертя. Проте довгий час вважалося, що піроелектричні ефекти досить слабкі і не мають практичної цінності. Тому дослідження піроелектричних явищ до середини ХХ століття розвивались досить повільно. Основні теоретичні дослідження таких матеріалів того часу належать дослідникам В. Томсону [1] та В. Фойгту [2], в яких розвинуто термодинамічні підходи до опису піроелектрики. Основні результати експериментальних і теоретичних досліджень піроелектриків отримані в 2-й половині ХХ століття [3]. Значному підвищенню наукового і практичного інтересу до досліджень піроелектриків сприяв розвиток лазерної техніки та необхідність розвитку фізики сегнетоелектриків [4]. Проте дослідження питань зміни термодинамічного стану діелектриків від величини електричного поля досі не проводились. Особливий інтерес викликають нові ефекти охолодження, які виникають, наприклад, у анізотропних діелектричних середовищах.

У даний час для охолодження використовуються різноманітні термоелектричні охолоджувачі. До них в першу чергу слід віднести холодильники, які використовують ефект Пельтьє [5]. Також відомі гальванотермомагнітні холодильні елементи – Нернста-Еттінгсгаузена [6]. Ці елементи різноманітних конструкцій працюють як при кімнатних, так і нижче кімнатних температурах при протіканні постійного по характеру електричного струму. Недоліком таких пристроїв є незначна ефективність охолодження внаслідок малого значення коефіцієнта термоелектричної добротності матеріалу пластини. Наприклад, у випадку застосування анізотропного термоелектричного матеріалу пластини з монокристалу вісмуту, максимальне значення перепаду охолодження від кімнатної температури  $\Delta T$  досягає 10-15 К. Окремо слід відмітити, що при змінному елек-

тричному струмі такий ефект охолодження не спостерігається.

У роботі, що представлена, проведені результати досліджень можливості застосування анізотропних діелектричних (уніполярних і біполярних) середовищ та залежність їх термодинамічного стану від величини електричного поля.

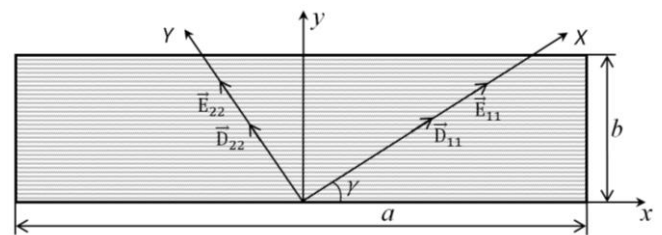
## 2. Модель уніполярного анізотропного діелектричного охолоджувача

Розглянемо прямокутну пластину довжиною  $a$ , шириною  $b$  та висотою  $c$  ( $a \gg b > c$ ), яку виконано з уніполярного анізотропного діелектричного (УАД) матеріалу, тензор діелектричної проникності  $\hat{\epsilon}$  якої, в головних кристалографічних осях  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$  має наступний вигляд [7]

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де діагональні компоненти тензора  $\epsilon_{11} \neq \epsilon_{22}$  ( $\epsilon_{11}$  та  $\epsilon_{22}$  – одного знаку).

Вибрані кристалографічні осі  $OX$  та  $OY$  із значеннями  $\epsilon_{11}$  і  $\epsilon_{22}$  відповідно, розташовано у площині її бічної грані  $a \times b$ , при цьому одна з цих осей, наприклад  $OX$ , орієнтована під деяким кутом  $\gamma$  до довжини пластини  $a$  (рис. 1).



**Рисунок 1** – Розміщення векторів електричних полів  $\vec{E}_{11}$ ,  $\vec{E}_{22}$  та індукцій  $\vec{D}_{11}$ ,  $\vec{D}_{22}$  в об'ємі УАД пластини

Розглянемо випадок коли коефіцієнт анізотропії  $K = (\epsilon_{11} / \epsilon_{22})$  знаходиться в інтервалі  $0 < K < 1$ .

Поворот цих осей на кут  $\gamma$  дозволяє представити тензор  $\hat{\epsilon}$  наступним чином:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} \cos^2 \gamma + \epsilon_{22} \sin^2 \gamma & (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & \epsilon_{11} \sin^2 \gamma + \epsilon_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

що характеризується наявністю як позовжньої ( $\epsilon_{\parallel}$ ) так і поперечної ( $\epsilon_{\perp}$ ) складових

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} \cos^2 \gamma + \epsilon_{22} \sin^2 \gamma), \quad (3)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma. \quad (4)$$

Коефіцієнт перетворення  $m_{uni}$ , який дорівнює відношенню складових поперечної та позовжньої складових тензора у загальному випадку матиме наступний вигляд

$$m_{uni} = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\epsilon_{11} \cos^2 \gamma + \epsilon_{22} \sin^2 \gamma} \quad (5)$$

або

$$m_{uni}(K, \gamma) = \frac{(K - 1) \tan \gamma}{K + \tan^2 \gamma}. \quad (6)$$

Оскільки  $a \gg b > c$  крайовими умовами на торцевих  $b \times c$  і на бічних  $a \times b$  гранях можна знехтувати [6].

Оптимізація значення  $m_{uni}(K, \gamma)$  по куту  $\gamma$  ( $\partial m_{uni} / \partial \gamma = 0, \partial^2 m_{uni} / \partial \gamma^2 < 0$ ), показує, що її максимум спостерігається при куті  $\gamma = 45^\circ$  і обчислюється за формулою

$$m_{uni} = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}}{\epsilon_{11} + \epsilon_{22}} = \frac{K - 1}{K + 1}. \quad (7)$$

На рис. 2 наведено залежність  $m_{uni}(K, \gamma)$  при  $\gamma = 45^\circ$  ( $0 < K < 1$ ). Коефіцієнт перетворення  $m_{uni}$  є від'ємним, а його значення  $m_{uni} \in (-1; 0)$ . Така особливість дає можливість використання даного ефекту для охолодження.

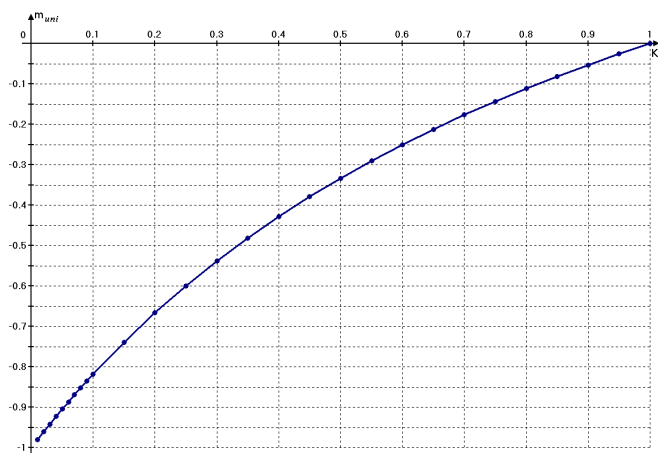


Рисунок 2 – Залежність  $m_{uni}(K, \gamma)$  при куті  $\gamma = 45^\circ$  ( $0 < K < 1$ )

Одна із можливих конструкцій такого пристрою наведено на рис 3. Охолоджуючий пристрій складається з прямокутної пластини 1, яка виготовлена з уніполярного матеріалу довжиною  $a$ , висотою  $b$  та шириною  $c$  ( $a \times b \times c$ ), які характеризуються анізотропією коефіцієнтів діелектричної проникності  $\hat{\epsilon}$ . Верхня та нижня грані пластини 1  $a \times c$  містять послідовно розташовані діелектричні 2 (з діелектричною провідністю  $\epsilon^*$ ) товщиною  $\Delta_1$  та електропровідні шари 3 (з електропровідністю  $\sigma^*$ ) товщиною  $\Delta_2$ . До зовнішніх граней шарів під'єднано електропроводи 4 та 5, які в свою чергу підключено до джерела змінного електричного поля  $E = E_0 \sin(\omega t)$ . Вісь  $OX$  нахилена до довжини пластини  $a$  під деяким кутом  $\gamma$ .

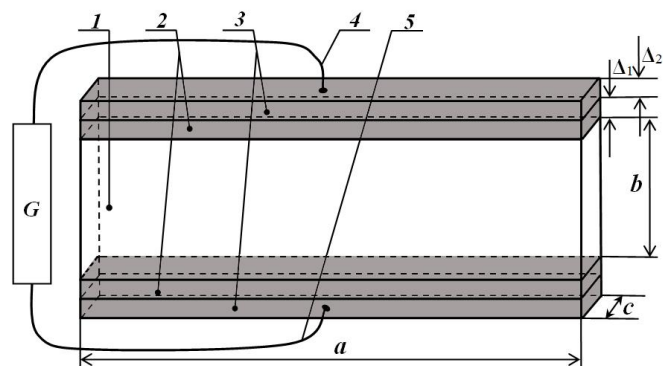


Рисунок 3 – Конструкція охолоджувача

Запропонований пристрій працює наступним чином: прикладання різниці потенціалів  $\Delta U = U_0 / \sin \omega t$  до електропідводів 4 та 5 веде до виникнення в об'ємі пластини електричного поля  $E = \Delta U / B$  та відповідного електричного струму. Наявність діелектричних 2 і електропровідних 3 шарів, забезпечують рівномірне розповсюдження густини електричного струму в пластині 1.

У пластині з уніполярного матеріалу прикладання електричної потужності веде до виникнення вздовж відповідних кристалографічних напрямків електричних полів  $\vec{E}_{11}, \vec{E}_{22}$  та електричних індукцій  $\vec{D}_{11}, \vec{D}_{22}$  одного знаку. У такому випадку при виконанні умови

$$\frac{\partial D_{11}}{\partial y_1} \neq \frac{\partial D_{22}}{\partial x_1}, \quad (8)$$

в об'ємі уніполярної пластини виникають ліво-сторонні вихорі електричного поля з ламінарним характером течії [8]. Як вже було згадано, максимальне значення коефіцієнта перетворення

$m_{uni}(K, \gamma)$  спостерігається при куті  $\gamma_1 = 45^\circ$  і формула має вигляд

$$m_{uni}(K, \gamma) = \frac{K-1}{K+1}. \quad (9)$$

Зазначимо, що у даному випадку завжди  $m_{uni}(K, \gamma) < 1$  і ККД такого анізотропного уніполярного діелектричного охолоджувача також не перевищуватиме 1.

Холодопродуктивність  $Q_{uni}$  такого охолоджувача представляється таким виразом

$$Q_{uni} = \frac{E \cdot m_{uni}}{1 + \text{tg}\delta} = E \frac{(K-1)\text{tg}\gamma}{(K + \text{tg}^2\gamma)(1 + \text{tg}\delta)}, \quad (10)$$

де  $\text{tg}\delta$  – діелектричні втрати анізотропного матеріалу, які обумовлені гістерезисом та провідністю. При цьому глибина охолодження  $\Delta T_{uni}$ , яка досягається таким пристроєм при адіабатичній ізоляції зовнішніх граней пластини

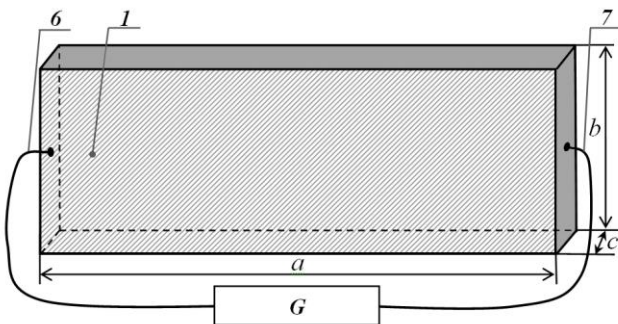
$$\Delta T_{uni} = \frac{Q_{uni} - q}{s \cdot M}, \quad (11)$$

де  $q$  – втрати, зумовлені охолодженням,  $s$  – теплоємність,  $M$  – його маса.

Коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\theta$  представлений формулою

$$\theta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (12)$$

де  $T_1$  – температура оточуючого середовища,  $T_2$  – температура анізотропної пластини яка досягається при охолодженні [9].



**Рисунок 4** – Конструкція охолоджувача з бічним розташуванням електричних контактів

Можливий варіант підключення змінного електричного поля до торцевих граней пластини (рис.4).

Електроконтакти у такому випадку кріпляться точково до центра торцевих граней. Така конструкція на відміну від попередньої не матиме діелектричних та електропровідних шарів.

Слід зауважити, що наведені вирази (10)-(12) справедливі при адіабатичній ізоляції пластини 1.

При застосуванні такого уніполярного матеріалу, як кристал дигідрофосфат калію (KDP) розрахунковий перепад температур  $\Delta T_{uni}$ , що досягається знаходиться в межах 80-100 К.

### 3. Модель біполярного анізотропного діелектричного охолоджувача

У 2000 р. англійський фізик Д. Пендрі опублікував свою теоретичну роботу в галузі метаматеріалів [10], а у 2001 р. група американських дослідників під керівництвом Д. Сміта експериментально підтвердили їх існування [11]. Публікація згаданих робіт викликала значне зацікавлення дослідників з усього світу. Завдяки дослідженням проведеним за останні 20 років у цій області та сьогодишньому технологічному прогресу з'явилися раніше невідомі метаматеріали, зокрема й метадиелектричні матеріали [12-13]. З появою таких метаматеріалів з'явилася можливість створення більш ефективних пристроїв та приладів [14-15], у тому числі й охолоджувачів.

На відміну від попереднього випадку, використовуємо замість уніполярного анізотропного діелектричного матеріалу – біполярний анізотропний діелектричний (БАД) матеріал. Загальний вигляд тензора [7] тоді матиме наступний вигляд

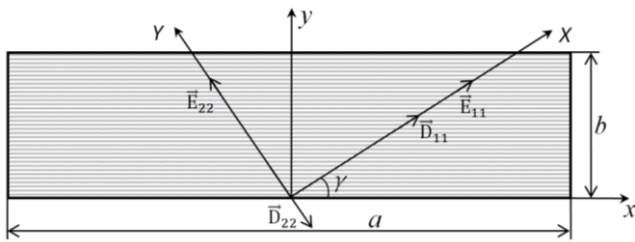
$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

де діагональні компоненти тензора  $|\epsilon_{11}| \neq |\epsilon_{22}|$ .

Вибрані кристалографічні осі  $OX$  та  $OY$  із значеннями  $\epsilon_{11}$  і  $(-\epsilon_{22})$  відповідно, також розташовано у площині її бічної грані  $a \times b$ , при цьому одна з цих осей орієнтована під деяким кутом  $\gamma$  до довжини  $a$  (рис. 5).

У свою чергу, у випадку біполярного матеріалу, поворот цих осей на кут  $\gamma$  дозволяє представити тензор  $\hat{\epsilon}$  наступним чином:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} \epsilon_{11} \cos^2 \gamma - \epsilon_{22} \sin^2 \gamma & (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & \epsilon_{11} \sin^2 \gamma - \epsilon_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix}. \quad (14)$$



**Рисунок 5** – Розміщення векторів електричних полів  $\vec{E}_{11}, \vec{E}_{22}$  та індукцій  $\vec{D}_{11}, \vec{D}_{22}$  в об'ємі БАД пластини

Це у свою чергу веде до можливості появи як поздовжньої ( $\epsilon_{\parallel}$ ) так і поперечної ( $\epsilon_{\perp}$ ) складових

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} \cos^2 \gamma - \epsilon_{22} \sin^2 \gamma), \quad (15)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_0 (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma. \quad (16)$$

Коефіцієнт перетворення  $m_{bi}$ , який дорівнює відношенню складових поперечної та поздовжньої складових тензора у загальному випадку матиме наступний вигляд

$$m_{bi} = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{(\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\epsilon_{11} \cos^2 \gamma - \epsilon_{22} \sin^2 \gamma} \quad (17)$$

Крайовими умовами на торцевих  $b \times c$  і на бічних  $a \times b$  гранях, як і у вищевказаному випадку можна знехтувати [6].

Дослідження функції

$$m_{bi}(K, \gamma) = \frac{(K+1) \tan \gamma}{K - \tan^2 \gamma} \quad (18)$$

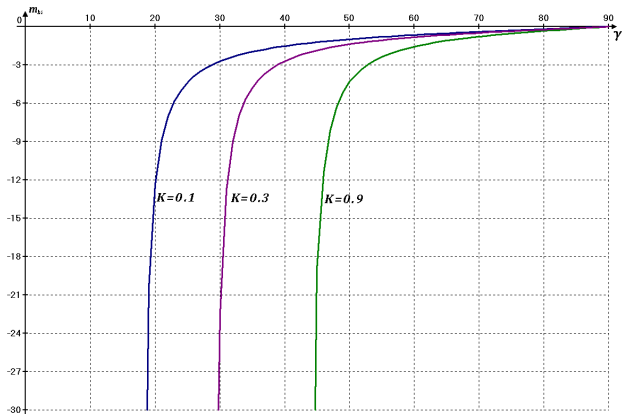
на екстремум ( $\partial m_{bi} / \partial \gamma = 0, \partial^2 m_{bi} / \partial \gamma^2 < 0$ ) показує, що екстремум функції відсутній.

Аналіз цієї функції  $m_{bi}(K, \gamma)$  показує, що її від'ємні значення спостерігаються у випадку коли кут  $45^\circ < \gamma < 90^\circ$ .

Зобразимо залежність коефіцієнта перетворення  $m_{bi}$  біполярного анізотропного діелектричного охолоджувача від кута  $\alpha$  для 3-х анізотропних біполярних діелектричних матеріалів при фіксованих коефіцієнтах анізотропії діелектричного матеріалу  $K = \{0,1; 0,3; 0,9\}$  у вигляді графіків на рис. 6.

Слід зазначити, що величиною коефіцієнта  $m_{bi}$  біполярного анізотропного діелектричного матеріалу, на відміну від уніполярного матеріалу, дозволяє варіювати в широких межах шляхом під-

бору оптимального кута  $\gamma_{opt}$ . З цього графіка випливає, що завжди існує можливість підбору кута  $\gamma_{opt}$  для заданого  $m_{bi}$  з необхідною величиною. Кут нахилу  $\gamma_{opt}$  слід підбирати рухаючись від  $90^\circ$  до  $0^\circ$ . Як бачимо для кожного окремого  $K$  існує свій оптимальний кут  $\gamma_{opt}$ . У нашому випадку, для матеріалів з коефіцієнтом анізотропії  $K = \{0,1; 0,3; 0,9\}$ , ефективне охолодження спостерігатиметься при оптимальних кутах  $\gamma_{opt} \cong \{18^\circ; 29^\circ; 44^\circ\}$  відповідно.



**Рисунок 6** – Залежність  $m_{bi}(\gamma)$  при  $K = \{0,1; 0,3; 0,9\}$

У разі  $\gamma = 45^\circ$  формула (17) набуде наступного вигляду

$$m_{bi} = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{\epsilon_{11} + \epsilon_{22}}{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}} = \frac{K+1}{K-1}. \quad (19)$$

Окремо слід зазначити, що при  $\gamma = 90^\circ$  коефіцієнт перетворення  $m_{bi} = 0$ , тобто охолоджувач не працює.

Таким чином, з використанням біполярного анізотропного діелектричного матеріалу веде до значного зростання значення коефіцієнта перетворення  $m_{bi}$ .

Коефіцієнт анізотропії матеріалу пластини  $0 < (K = |\epsilon_{11} / \epsilon_{22}|) < 1$  зумовлює виникненням в її об'ємі вихору з турбулентним характером течії і має наступний вигляд

$$\text{rot} \hat{D} = -\omega. \quad (20)$$

У випадку твердотілого охолоджувача на основі біполярної пластини за виконання наступної умови [16]

$$\frac{\partial D_{11}}{\partial y_1} \neq \left| \frac{\partial D_{22}}{\partial x_1} \right|; \quad (21)$$

Напрямок складових вектора електричного поля  $\vec{E}_{11}, \vec{E}_{22}$  залишається без змін, вектор електричної індукції  $\vec{D}_{11}$  також без змін, а напрям вектора  $\vec{D}_{22}$  змінюється на кут  $180^\circ$ . Це веде до появи моменту закручення та виникнення лівостороннього вихору електричного поля з турбулентним характером течії, що у свою чергу обумовлює значне зростання величини коефіцієнта перетворення  $m_{bi}$ . При куті  $\gamma_2 = 45^\circ$

$$m_{bi} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} = \frac{K+1}{K-1} \gg 1. \quad (22)$$

Лівостороннє обертання вихору електричного поля з турбулентним характером течії в об'ємі пластини веде до зменшення внутрішньої її енергії і як наслідок ефективного охолодження запропонованого пристрою.

При цьому внутрішня енергія пластини випромінюється у зовнішнє середовище через бічні грані  $a \times b$ , при додатному напівперіоді, а при від'ємному – через іншу, протилежну грань.

Для біполярного охолоджувача холодопродуктивність  $Q_{bi}$  представляється таким виразом

$$Q_{bi} = \frac{E \cdot m_{bi}}{1 + \text{tg} \delta} = E \frac{(K+1) \text{tg} \gamma}{(K - \text{tg}^2 \gamma)(1 + \text{tg} \delta)}. \quad (23)$$

Формула обчислення глибини охолодження  $\Delta T_{bi}$ ,

$$\Delta T_{bi} = \frac{Q_{bi} - q}{s \cdot M}. \quad (24)$$

А формула ККД матиме вигляд (12), як і в уніполярному випадку.

Використання біполярного шарового штучно-анізотропного матеріалу [17] на основі класичного діелектрика (поліетилен, полістирол...) з додатним коефіцієнтом діелектричної проникності [4] та твердотілого метадіелектрика [9], що характеризується від'ємним значенням коефіцієнта діелектричної проникності глибина охолодження, що досягається у цьому випадку може досягати величин  $\Delta T_{bi} = 200-250$  К від кімнатної температури.

Слід відмітити таку позитивну особливість запропонованих охолоджувачів, у порівнянні із існуючими, як відсутність традиційного тепловідводу для обох розглядуваних випадків.

Таким чином, проведені дослідження показують перспективність використання таких прис-

троїв, як високоефективних холодильних елементів. Дані пристрої дозволять здійснювати ефективну утилізацію та акумуляцію холоду, що виділяється, як конкретних об'єктів, різних приладів і пристроїв, перекачуючи її в зовнішнє середовище. Проведені чисельні оцінки показують, що застосування запропонованого пристрою дасть значний екологічний та економічний ефекти.

#### 4. Висновки

Вперше розглянуто можливість охолодження уніполярними та біполярними анізотропними діелектричними середовищами. Визначено конструктивні критерії оптимізації охолоджувачів. Для уніполярного анізотропного діелектричного охолоджувача максимальний коефіцієнт перетворення  $m_{uni}$  спостерігається при орієнтації вибраних кристалографічних осей під оптимальним кутом  $45^\circ$ . Механізмом охолодження є вихорі електричного поля з ламінарним характером течії.

Для біполярного анізотропного діелектричного охолоджувача величина коефіцієнта  $m_{bi}$  значно зростає, за рахунок виникнення в об'ємі пластини вихору електричного поля з турбулентним характером течії. Це веде до зростання показників його охолодження. Окремо слід відмітити, що обидві запропоновані конструкції не потребують традиційних тепловідводів, радіаторів та термостатів. У цьому випадку кондуктивна тепловіддача від нижньої грані ( $a \times c$ ) пластини 1 замінюється на індуктивну з бічної ( $a \times b$ ).

#### Особистий внесок авторів CRediT

**Ащеулов А.А.:** концептуалізація ідеї, формальний аналіз, адміністрування. **Дерев'янчук М.Я.:** концептуалізація, методологія, дослідження, проведення розрахунків, аналіз результатів, написання – оригінальний проєкт. **Лавренюк Д.О.:** інформаційний пошук, візуалізація, програмне забезпечення, написання – огляд та редагування.

#### Література

1. **Thomson W.** On the thermoelastic, thermomagnetic and pyroelectric properties of matter // Philosophical Magazine. – 1878. – Series 5. – Vol. 5. – P. 4-26.
2. **Voigt W.** Versuch zur Bestimmung des wahren spezifischen electrischen Momentes eines Turmalins (Experiment to determine the true specific electric

- moment of a tourmaline) // *Annalen der Physik.* – 1897. – Vol. 60. – P. 368-375.
3. **Randall B. Olsen, Diane Evans.** Pyroelectric energy conversion: Hysteresis loss and temperature sensitivity of a ferroelectric material // *Journal of Applied Physics.* – 1983. – Vol. 54 (10). – P. 5941–5944. <https://doi.org/10.1063/1.331769>
4. **Поплавко Ю.М.** Фізика діелектриків. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.
5. **Anatychuk L.I.** Thermoelectricity. Vol.1. Physics of Thermoelectricity. – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 1998. – 376 p.
6. **Anatychuk L.I.** Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters. – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2005. – 348 p.
7. **Nye J.F.** Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices. – Oxford University Press, Oxford, 1985. – 352 p.
8. **Вихор Л.М., Охрем О.А., Снарський А.О.** Термоелектричні та термомагнітні методи перетворення енергії: Конспект лекцій професора А.Г. Самойловича. – Чернівці: Рута, 2006. – 228 с.
9. **Сліпченко В.М.** До питання про ККД анізотропного термоелемента // *УФЖ.* – 1976. – Т.21. – №1. – С. 124-129.
10. **Pendry J.B.** Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Physical review letters* – 2000. – Lett. 85 (18). – P. 3966-3969. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.3966
11. **Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.** Experimental verification of a negative index of refraction // *Science.* – 2001. – Vol. 292. – P. 77-79. DOI: 10.1126/science.1058847
12. **Brener I., Liu S., Staude I., Valentine J. and Holloway C.** Dielectric metamaterials: fundamentals, designs, and applications. – Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials; 1st Edition, 2019. – 310 p.
13. **Pankaj K. Choudhury.** Metamaterials: technology and applications. – New York: Boca Raton; 1st Ed., 2021. – 408 p.
14. **Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.** On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment // *American Journal of Engineering Research (AJER).* – 2021. – Vol. 10 (7). – P. 112-118.
15. **Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.** The Phenomenon of Electric Field Energy Conversion in Anisotropic Metadielectric Media // *American Journal of Physical Chemistry.* – 2022. – Vol. 11. – No. 2. – P. 25-31. DOI: 10.11648/j.ajpc.20221102.11.
16. **Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.** The method of turbulent transformation of energy // *Engineering Reports.* – 2023. – e12620. DOI: 10.1002/eng2.12620.
17. **Ащеулов А. А., Дерев'янчук М. Я., Лавренюк Д. О., Романюк І.С.** Штучний анізотропний метаматеріал: пат. 151159 Україна: Н01F7/00, Н01F7/02, Н02N11/00. № и 2022 00369; заявл. 31.01.2022; опубл. 08.06.2022, Бюл. № 23. – 4 с.

Отримана в редакції 19.01.2022, прийнята до друку 16.03.2023

## On the possibility of cooling using an anisotropic dielectric medium

*Anatoly Ashcheulov*<sup>1</sup>, *Mykola Derevianchuk*<sup>2✉</sup>, *Dmytro Lavreniuk*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity, National Academy of Sciences and Ministry of Education and Science of Ukraine, 1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

<sup>2,3</sup>Uriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubinsky str., Chernivtsi, 58002, Ukraine

✉ e-mail: <sup>2</sup>m.derevianchuk@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-5859-4479>

*In the work presented for the first time, 2 original methods of cooling based on anisotropic dielectric materials are considered. The first method of cooling uses a unipolar anisotropic dielectric material in which the cooling process takes place with the help of electric field vortices with a laminar flow character. For such structures, in the case of the anisotropy coefficient of the plate material  $0 < K < 1$ , the following are determined: the optimal orientation angle of the crystallographic axes  $\gamma = 45^\circ$ , the conversion factor ( $m$ ), the cooling capacity ( $Q$ ), the cooling depth ( $\Delta T$ ), the efficiency factor ( $\theta$ ). In this case, the conversion factor is  $m_{\min} \in (0; 1)$  and the efficiency factor does not exceed 1. A possible material that can be used for such a cooler is a single crystal of potassium dihydrogen phosphate (KDP). The calculated tem-*

perature difference  $\Delta T_{uni}$ , which is achieved in this case, is in the range of 80-100 K. The second method of cooling uses a bipolar anisotropic dielectric material with the corresponding occurrence of electric field vortices in it with a turbulent flow character. The design of the cooler in this case is similar to the previous one. The use of bipolar anisotropic dielectric material causes the appearance of electric current vortices in the volume of the plate with a turbulent nature of the current, which interacts with its internal energy and significantly increases the cooling efficiency. In this case, with the anisotropy coefficient  $0 < K < 1$ , a significant increase in the conversion coefficient  $m_{bi}$  is observed in some cases of  $m_{bi} \gg 1$ . In the case of using a bipolar layered artificially anisotropic material based on a classical dielectric with a positive dielectric constant and a solid-state meta-dielectric characterized by a negative value of the dielectric constant, the cooling depth  $\Delta T_{bi}$  in such a device can reach values of 200-250 K from room temperature. The results of the conducted research show the prospects of using such devices as highly efficient refrigerating elements. These devices allow effective disposal and accumulation of cold released as specific objects, various appliances and devices, pumping it into the external environment. The conducted numerical evaluations show that the use of the proposed device will give significant environmental and economic effects.

**Keywords:** Cooling; Anisotropy; Unipolarity; Bipolarity; Laminarity; Turbulence

## References

1. Thomson, W. (1878) On the thermoelastic, thermomagnetic and pyroelectric properties of matter. *Philosophical Magazine*, 5, 5, 4-26.
2. Voigt, W. (1897) Experiment to determine the true specific electric moment of a tourmaline. *Annals of Physics*, 60, 368-375.
3. Olsen, Randall B., Evans, D. (1983) Pyroelectric energy conversion: Hysteresis loss and temperature sensitivity of a ferroelectric material. *Journal of Applied Physics*. 54 (10), 5941-5944.
4. Poplavko Yu.M. (2015) Physics of dielectrics. K.: NTUU «KPI», 572.
5. Anatyshuk, L.I. (1998). Thermoelectricity. Vol.1. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 376.
6. Anatyshuk, L.I. (2005). Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 348.
7. Nye, J.F. (1985) Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices. Oxford University Press, Oxford, 352.
8. Vykhov, L.M., Okhrem, O.A., Snarskyi, A.O. (2006) Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion: Synopsis of lectures by Professor A.G. Samoilovich. Chernivtsi: Ruta, 228.
9. Slipchenko, V.M. (1976) To the question of the efficiency of an anisotropic thermoelement. *UFZh*, 21, 1, 124-129.
10. Pendry, J.B. (2000) Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical review letters*, 85 (18), 3966-3969.
11. Shelby, R.A. & Smith, D & Schultz, S. (2001) Experimental verification of a negative index of refraction. *Science* 292, 77-79.
12. Brener, I., Liu, S., Staude, I., Valentine, J., Holloway, C. (2019) Dielectric metamaterials: fundamentals, designs, and applications. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials; 1st Edition, 310.
13. Pankaj, K. Choudhury (2021) Metamaterials: technology and applications. New York: Boca Raton; 1st Ed., 408.
14. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O. (2021) On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 10(7), 112-118.
15. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O. (2022) The Phenomenon of Electric Field Energy Conversion in Anisotropic Metadielectric Media. *American Journal of Physical Chemistry*. 11, 2, 25-31.
16. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O. (2023) The method of turbulent transformation of energy. *Engineering Reports*, e12620.
17. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya., Lavreniuk, D.O., Romaniuk, I.S. (2022) Artificial anisotropic metamaterial: Patent of Ukraine №151159: H01F7/00, H01F7/02, H02N11/00. № u 2022 00369.

Received 19 January 2023

Approved 16 March 2023

Available in Internet 31 March 2023