

А.А. Ащеулов, д.т.н., проф.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України

М.Я. Дерев'янчук, аспірант

Д.О. Лавренюк, студент

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Вихорі з ламінарним та турбулентним характерами течій  
в анізотропних середовищах**

У дослідженні розроблено й описано у загальному вигляді нові моделі та пристрої енергетичних перетворювачів. Запропоновані пристрої працюють на основі прямокутного паралелепіпеда довжиною  $a$ , висотою  $b$  і шириною  $c$  ( $a \gg b \cong c$ ), виготовленого з анізотропного матеріалу. Вибрані кристалографічні осі згаданого матеріалу розміщено у бічній грані ( $a \times b$ ) прямокутної пластини, при цьому одна з кристалографічних осей нахилена під деяким кутом  $\gamma$  до довжини  $a$ . В основу методу енергетичної трансформації покладено ефект поляризації об'єму такої анізотропної пластини та виникнення як поздовжньої  $\vec{F}_{\parallel}$ , так і поперечної  $\vec{F}_{\perp}$  складових вихорового енергетичного поля. У першому випадку для виготовлення анізотропної пластини використовується уніполярний анізотропний матеріал, який характеризується тензором другого рангу  $\hat{\tau}_1$ . Усі коефіцієнти тензора  $\hat{\tau}_1$  є додатними ( $\tau_{ii} > 0, i = 1..3$ ). За виконання належних граничних умов в об'ємі уніполярного анізотропного середовища формуються вихорі, що мають ламінарний характер течії. У випадку дії зустрічного електричного  $E$ , магнітного  $H$ , гравітаційного  $G$  полів і потоків, електричного струму  $I$  та теплового потоку  $Q$  спостерігається перетворення енергії, коефіцієнт якого не перевищує 1 ( $t \leq 1$ ).

Для випадку біполярних анізотропних матеріалів, за виконання граничних умов, формуються енергетичні вихорі, що характеризуються турбулентним характером течії. Такий біполярний анізотропний матеріал описується тензором другого рангу  $\hat{\tau}_2$ . Розглядається випадок, коли один із коефіцієнтів тензора  $\hat{\tau}_2$  є від'ємним  $\tau_{22} < 0$  ( $\tau_{ii} > 0, i = 1, 3$ ). Турбулентні енергетичні вихорі, взаємодіючи із зовнішнім середовищем, дають можливість отримати коефіцієнт перетворення значно більший за 1 ( $|t| > 1$ ). У цілому це значно розширює існуючі можливості та обумовлює появу нових методів і створених на основі них пристроїв перетворення енергії.

**Ключові слова:** тензор; анізотропія; метаматеріал; уніполярність; біполярність; вихор; турбулентність.

**Актуальність теми.** Сьогодні характеризується наявністю великої кількості як методів, так і приладів перетворення енергії. Загальновідомо, що ККД таких пристроїв не перевищує 1. Поява метаматеріалів викриває можливості для створення нових методів та пристроїв з підвищеним значенням ККД.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Дослідження термоелектричних явищ в анізотропних середовищах висвітлено у роботах А.Г. Самойловича [1–4], Л.І. Анатичука [5–6], А.А. Ащеулова [7–8] та ін. Протягом останніх 20-ти років почалися активні дослідження метаматеріалів [9–12]. Якщо в анізотропних матеріалах використовувати композиції матеріалів з метаматеріалами, то проявляються нові малодосліджені особливості. Інформаційну основу опублікованих матеріалів представлено в попередніх публікаціях авторів цієї статті [13–20].

**Метою статті** є дослідження і оцінка можливості створення нових методів та пристроїв перетворення енергії, які базуються на використанні поперечних ефектів у штучних анізотропних, як уніполярних, так і біполярних, матеріалах з покращеними характеристиками.

**Викладення основного матеріалу.** На сьогодні певний інтерес викликають різноманітні вихорі: вихорі хвиль, оптичні вихорі, електромагнітні вихорі, квантові вихорі, вихорі Абрикосова, гравітаційні вихорі та ін. Поруч із згаданими вихорами відомі також і вихорі електричного («струми Фуко») [21] та термоелектричного струму [5, 6, 22], які описані для уніполярних анізотропних або неоднорідних матеріалів. Поряд з цим відомі також і біполярні анізотропні матеріали [23], які створюють як з класичних електропровідних, діелектричних, магнітних матеріалів, так і метаматеріалів, способи виготовлення яких вже розроблені, а окремі і запатентовані [10, 12].

**Загальна фізична модель уніполярного анізотропного перетворювача.** Як відомо, тензор другого рангу  $\hat{\tau}_1$  у головних кристалографічних напрямках для уніполярного анізотропного матеріалу представлено у такому вигляді [24]:

$$\hat{\tau}_1 = \tau_0 \begin{vmatrix} \tau_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

де як  $\hat{\tau}_1$  мається на увазі потрібні фізичні характеристики матеріалу, такі як: електропровідність ( $\sigma$ ), теплопровідність ( $\kappa$ ), термоЕРС ( $\alpha$ ), магнітна проникність ( $\mu$ ), діелектрична проникність ( $\epsilon$ ) та ін.

За наявності прямокутної пластини з анізотропного уніполярного матеріалу довжиною  $a$  шириною  $b$  та висотою  $c$  ( $a \gg b \cong c$ ), характеристика якого вказується у згаданому вище тензорі, одним із зазначених коефіцієнтів таким чином, що вибрані кристалографічні осі  $\tau_{11}$ ,  $\tau_{22}$  розміщено у бічній стороні  $a \times b$  пластини, при цьому одна з кристалографічних осей нахилена під деяким кутом  $\gamma$  до довжини  $a$  (рис. 1). У цьому випадку загальний тензор  $\hat{\tau}_1$  представляється таким чином:

$$\hat{\tau}_1 = \begin{vmatrix} \tau_{11} \cos^2 \gamma + \tau_{22} \sin^2 \gamma & (\tau_{11} - \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma & 0 \\ (\tau_{11} - \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma & \tau_{11} \sin^2 \gamma + \tau_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

та характеризується наявністю як поздовжньої  $\tau_{1\parallel}$ , так і поперечної  $\tau_{1\perp}$  складових:

$$\tau_{1\parallel} = \tau_0 (\tau_{11} \cos^2 \gamma + \tau_{22} \sin^2 \gamma), \quad (3)$$

$$\tau_{1\perp} = \tau_0 (\tau_{11} - \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma. \quad (4)$$

При цьому коефіцієнт перетворення  $m_1$  такої структури, в основі якої знаходиться згадана вище прямокутна пластинка, має такий вигляд:

$$m_1 = \frac{\tau_{1\perp}}{\tau_{1\parallel}} = \frac{(\tau_{11} - \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{\tau_{11} \cos^2 \gamma + \tau_{22} \sin^2 \gamma}. \quad (5)$$

Проведені чисельні оцінки пристроїв (трансформатор, концентратор, перетворювач) показують, що за  $a \gg b \cong c$  крайовими умовами на торцевих  $b \times c$  і на бічних  $a \times b$  гранях можна знехтувати [13, 14, 16].

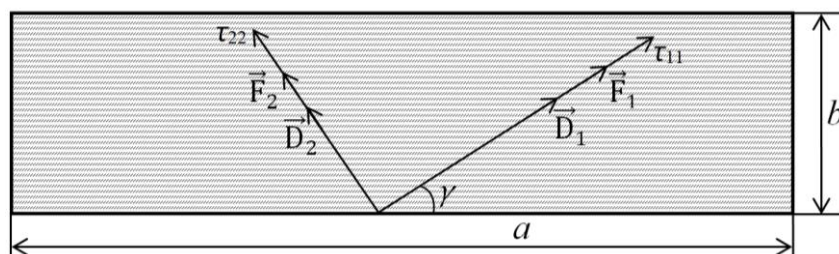


Рис. 1. Орієнтація кристалографічних осей в анізотропній прямокутній пластині з уніполярного матеріалу та розташування векторів енергетичної дії  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  та векторів енергетичної індукції  $\vec{D}_1$ ,  $\vec{D}_2$

Внаслідок виконання умови

$$\frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} \neq \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} \quad (6)$$

за наявності деякого енергетичного потоку  $F(t)$  вздовж висоти  $b$  пластини (рис. 1) зовнішньої енергетичної дії  $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$  в її об'ємі виникає замкнутий вихор  $F_L \neq 0$ . Цей вихор, як впливає з робіт А.Г. Самойловича, характеризується ламінарним характером течії [4].

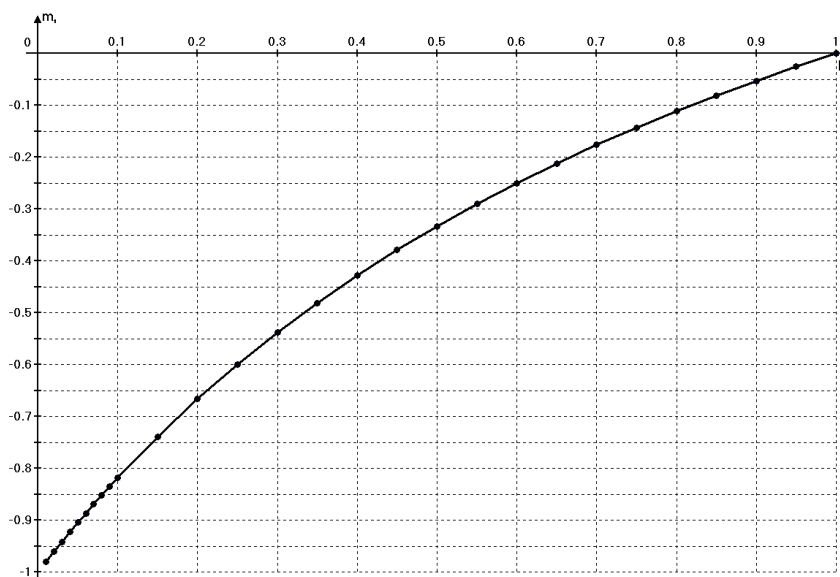


Рис. 2. Залежність коефіцієнта перетворення  $m_1$  від величини анізотропії за  $0 < K < 1$  та кута  $\gamma = 45^\circ$

Проведені дослідження за різних коефіцієнтів анізотропії  $K = \tau_{11} / \tau_{22}$  ( $0 < K < \infty$ ) показали, що в розглядуваному випадку величина коефіцієнта перетворення не перевищує 1 ( $m \leq 1$ ) [20]. Для випадків, як  $0 < K < 1$  (рис. 2), так і для  $1 < K < \infty$  (рис. 3).

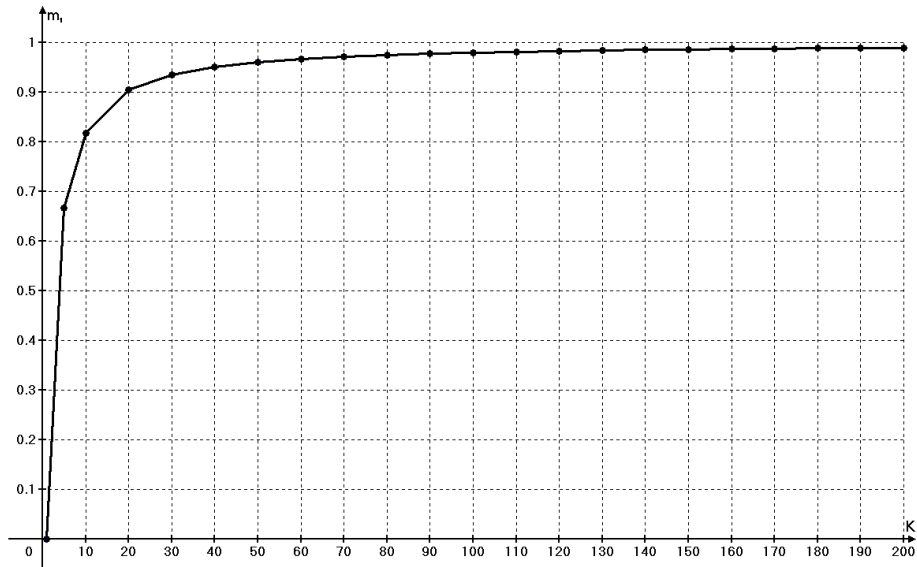


Рис. 3. Залежність коефіцієнта перетворення  $m_1$  від величини анізотропії за  $1 < K < \infty$  та кута  $\gamma = 45^\circ$ .

Розглянутий тип ламінарних вихорів спостерігається у таких анізотропних пристроях, як трансформатори електричного поля та струму [17, 25], концентратори магнітного поля [16, 26] та інших перетворювачах.

**Загальна фізична модель біполярного анізотропного перетворювача.** Розширення можливостей перетворення енергії спостерігається у випадку застосування анізотропних біполярних матеріалів, які характеризуються різними знаками компонент тензора  $\hat{\epsilon}_2$  у головних кристалографічних напрямках [24]:

$$\hat{\epsilon}_2 = \tau_0 \begin{vmatrix} \tau_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\tau_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

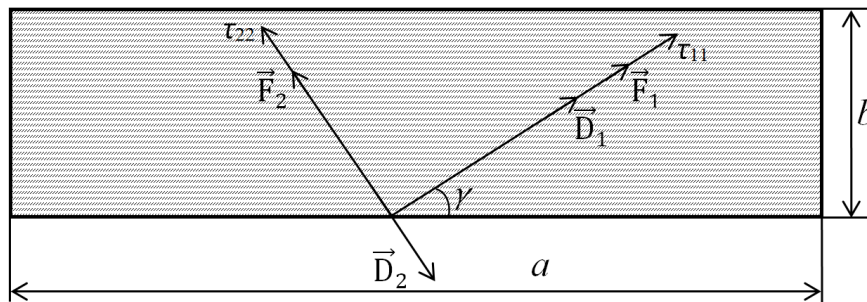


Рис. 4. Орієнтація кристалографічних осей в анізотропній прямокутній пластині з біполярного матеріалу та розташування векторів енергетичної дії  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$  та векторів енергетичної індукції  $\vec{D}_1, \vec{D}_2$

Створення з такого матеріалу аналогічної прямокутної пластини  $a \gg b \cong c$  (рис. 4) за аналогічних граничних умов, як і в попередньому випадку дозволяє представити тензор  $\hat{\epsilon}_2$  таким чином [4]:

$$\hat{\epsilon}_2 = \begin{vmatrix} \tau_{11} \cos^2 \gamma - \tau_{22} \sin^2 \gamma & (\tau_{11} + \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma & 0 \\ (\tau_{11} + \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma & \tau_{11} \sin^2 \gamma - \tau_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

що характеризується наявністю як поздовжньої  $\tau_{2\parallel}$ , так і поперечної  $\tau_{2\perp}$  складових:

$$\tau_{2\parallel} = \tau_0 (\tau_{11} \cos^2 \gamma - \tau_{22} \sin^2 \gamma), \quad (9)$$

$$\tau_{2\perp} = \tau_0 (\tau_{11} + \tau_{22}) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma. \quad (10)$$

При цьому коефіцієнт перетворення  $m_2$  пристрою, в основі якого знаходиться згадана вище прямокутна пластинка, має вигляд:

$$m_2 = \frac{\tau_{2\perp}}{\tau_{2\parallel}} = \frac{(\tau_{11} + \tau_{22}) \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma}{\tau_{11}\cos^2\gamma - \tau_{22}\sin^2\gamma}. \quad (11)$$

Дослідження функції

$$m_2(K, \gamma) = \frac{(K + 1) \cdot \operatorname{tg} \gamma}{K - \operatorname{tg}^2 \gamma} \quad (12)$$

на екстремум ( $\partial m_2 / \partial \gamma = 0, \partial^2 m_2 / \partial \gamma^2 < 0$ ) демонструє, що точки екстремуму функції відсутні.

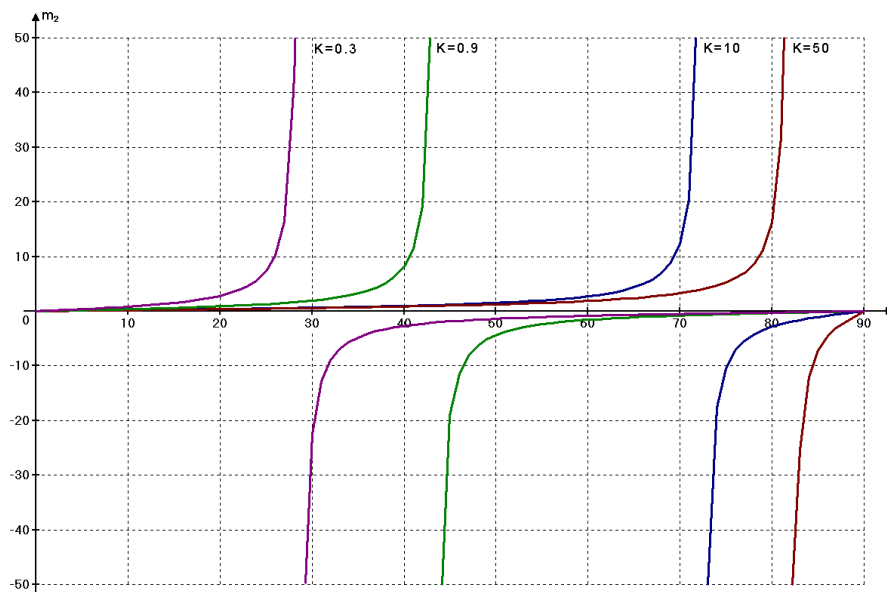


Рис. 5. Залежність коефіцієнта перетворення  $m_2$  від кута  $\gamma$  за фіксованих коефіцієнтів анізотропії біполярного матеріалу  $K = 0,3; 0,9; 10; 50$

Функція  $m_2(K, \gamma)$  має сингулярний характер. Така особливість дає змогу варіювати величиною коефіцієнта  $m_2$  цього пристрою в широких межах шляхом підбору відповідного кута  $\gamma$ . Таку можливість продемонстровано на рисунку 5. для чотирьох анізотропних біполярних матеріалів з коефіцієнтами анізотропії  $K = 0,3, 0,9, 10$  і  $50$ . Аналіз цих графіків демонструє, що завжди існує можливість підбору кута  $\gamma$  для заданого  $m_2$  з необхідною величиною і знаком.

Умови виникнення такого енергетичного вихору в об'ємі пластини мають такий вигляд [4]:

$$\frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} \neq \left| \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} \right| \quad (13)$$

Якщо кут  $\gamma = 45^\circ$  вираз (12) набуває такого вигляду:

$$m_2 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} = \frac{K+1}{K-1}. \quad (14)$$

Аналіз цих функцій показує, що значення коефіцієнта  $|m_2| > 1$ , це дає можливість зробити висновок про енергетичну взаємодію між такими вихорами в об'ємі цієї анізотропної пластини (рис. 4) із зовнішнім енергетичним середовищем [27, 28]. Тобто, таку анізотропну біполярну структуру з вихорами, що виникають в її об'ємі можна розглядати як відкриту енергетичну систему. Таким чином, використання анізотропного біполярного матеріалу веде до підвищення коефіцієнта перетворення  $m_2$  порівняно з уніполярними анізотропними матеріалами.

Пояснення цього явища можна дати з використанням уявлень вихрової електродинаміки. У випадку протікання енергетичного потоку  $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$  вздовж її висоти  $b$  в її об'ємі виникають енергетичні вихори, які характеризуються турбулентною течією [29, 30]. У нашому випадку аналогічно [27, 29], зміна характеру вихору з ламінарною течією на турбулентну обумовлена переорієнтацією напрямків відповідних складових векторів (рис. 4). У цьому разі поздовжня складова вектора розташовується антипаралельно кристалографічному напрямку другої вибраної кристалографічної осі. Напрямок згенерованої енергії у цьому випадку розташовується антипаралельно напрямку вектора енергії, що її генерує.

Проходження вектора генеруючої енергії  $f(t)$  вздовж висоти  $b$  викликає появу вектора згенерованої енергії  $F(t)$  вздовж довжини  $a$ .

У цьому випадку енергетичний вихор згідно з [4, 5, 29] представляється таким чином:

$$\operatorname{rot} \vec{f} = \begin{cases} -\omega, & \text{при } 0 < K < 1, \\ \omega, & \text{при } 1 < K < \infty \end{cases} \quad (15)$$

де  $\omega = F(\sigma_{11}, \sigma_{22}, a, b, c, \gamma)$  – кругова частота обертання енергетичного вихору, знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання.

Такі енергетичні вихори є ефективним механізмом, що перекачують енергію  $\vec{E}$  між зовнішнім енергетичним середовищем і в нашому випадку об'ємом анізотропної біполярної пластини.

Презентований механізм енергетичної взаємодії є перспективним для сучасної науки та техніки.

Енергія зовнішнього середовища, що застосовується у розглянутих випадках, складається з набору, як відомих енергій (електрична, теплова, магнітна, гравітаційна ...), так і малодосліджених енергій космічного походження, які можуть взаємодіяти між собою. Залежно від типу вихору (електричний, магнітний, гравітаційний ...) ці складові взаємодіють відповідно з певною складовою енергією. Така взаємодія є маловивченою та потребує подальшого, більш глибокого дослідження.

**Висновки.** Отримання у 2000 р. першого зразка метаматеріалу, науковою групою з Каліфорнійського університету, викликало велике зацікавлення дослідників з усього світу. Протягом останніх десятиріч було опубліковано чимало цікавих робіт у області теоретичних та експериментальних досліджень метаматеріалів. Враховуючи фізичні властивості експериментальних зразків метаматеріалів та їх композицій, запропоновано новий метод та пристрої перетворення енергії.

У роботі проведено чисельні розрахунки та показано, що використання у пристроях перетворення енергії композитних матеріалів з використанням метаматеріалів веде до підвищення коефіцієнта перетворення порівняно з уніполярними анізотропними матеріалами. Запропонований метод та пристрої дозволять значно розширити номенклатури незалежних, екологічних методів перетворення та отримання енергії.

#### Список використаної літератури:

1. *Samoilovich A.G.* On the Theory of Anisotropic Thermoelectric power in Semiconductors / *A.G. Samoilovich, M.V. Nitsovich, V.M. Nitsovich* // *Physica. Status. Solidi.* – 1966. – P. 459–465. DOI: 10.1002/pssb.19660160210.
2. *Samoilovich A.G.* Phonon-drag effect anisotropy parameter of the thermoelectric power in n-Ge / *A.G. Samoilovich, I.S. Buda* // *Physics Letters A.* – 1968. – Vol. 28 (6). – P. 408–409. DOI: 10.1016/0375-9601(68)90463-5.
3. Galvanothermoelectric effects in anisotropic media / *P.I. Abanskii, I.S. Buda, I.V. Dakhovskii, A.G. Samoilovich* // *Physica. Status. Solidi.* – 1975. – P. 291–299. DOI: 10.1002/pssb.2220670128.
4. *Вихор Л.М.* Термоелектричні та термомагнітні методи перетворення енергії: конспект лекцій професора А.Г. Самойловича / *Л.М. Вихор, О.А. Охрем, А.О. Снарський.* – Чернівці: Рута, 2006. – 228 с.
5. *Anatychuk L.I.* Thermoelectricity. Vol. 1. Physics of Thermoelectricity / *L.I. Anatychuk.* – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 1998.
6. *Anatychuk L.I.* Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric power converters / *L.I. Anatychuk.* – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003.
7. *Ащеулов А.А.* Нові термоелектричні ефекти та елементи / *А.А. Ащеулов, В.Г. Охрем, І.С. Романюк.* – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – 228 с.
8. *Ащеулов А.А.* Анізотропні оптичні термоелементи на основі антимоніду кадмію та їх застосування / *А.А. Ащеулов, І.С. Романюк.* – Чернівці: Золоті литаври, 2012. – 228 с.
9. *Metamaterials: physics and engineering explorations* / in *Nader Engheta and Richard W. Ziolkowski* ed. – New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2006. – 440 p.
10. *Dielectric metamaterials: fundamentals, designs, and applications* / in *Brener Igal, Liu Sheng, Staude Isabelle and other* (ed.). – Cambridge: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2019. – 1st Ed. – 310 p.
11. *Electromagnetic metamaterials: modern insights into macroscopic electromagnetic fields* / in *Kazuaki Sakoda* ed. – Singapore: Springer, 2019. – 1st ed. – 292 p.
12. *Metamaterials: technology and applications* / *Pankaj K. Choudhury* ed. – New York: Boca Raton, 2021. – 1st Ed. – 408 p.
13. *Ashcheulov A.* The Phenomenon of Electroohmic Transformation / *A.Ashcheulov, M.Derevianchuk, D.Lavreniuk* // *Physics and Chemistry of Solid State.* – 2020. – № 21 (4). – P. 743–748. DOI: 10.15330/pcss.21.4.743-748.
14. On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment / *A.A. Ashcheulov and other* // *American Journal of Engineering Research (AJER).* – 2021. – Vol. 10 (7). – P. 112–118.
15. *Ащеулов А.* Анізотропний метадіелектричний перетворювач / *А.Ащеулов, М.Дерев'янчук, Д.Лавренюк* // *Електротехніка та енергетика.* – 2021. – № 4. – С. 18–27. DOI: 10.15588/1607-6761-2021-4-2.
16. *Ashcheulov A.* Effect of magnetic field concentration / *A.Ashcheulov, M.Derevianchuk, D.Lavreniuk* // *Physics and Chemistry of Solid State.* – 2022. – № 23 (1). – P. 72–76. DOI: 10.15330/pcss.23.1.72-76.
17. *Ashcheulov A.* The phenomenon of electroohmic energy conversion in anisotropic electroconductive environments / *A.Ashcheulov, M.Derevianchuk, D.Lavreniuk* // *Physics and Chemistry of Solid State.* – 2022. – № 23 (4). – P. 693–698. DOI: 10.15330/pcss.23.4.693-698.
18. *Ashcheulov A.A.* The Phenomenon of Electric Field Energy Conversion in Anisotropic Metadielectric Media / *A.A. Ashcheulov, M.Ya. Derevianchuk, D.O. Lavreniuk* // *American Journal of Physical Chemistry.* – 2022. – Vol. 11, № 2. – P. 25–31. DOI: 10.11648/j.ajpc.20221102.11.
19. *Ащеулов А.А.* Ефект концентрації магнітного поля в анізотропних метамагнітних середовищах / *А.А. Ащеулов, М.Я. Дерев'янчук, Д.О. Лавренюк* // *Технічна інженерія.* – 2022. – № 1 (89). – P. 116–124. DOI: 10.26642/ten-2022-1(89)-116-124.

20. Ashcheulov A. The method of turbulent transformation of energy / A.Ashcheulov, M.Derevianchuk, D.Lavreniuk // *Engineering Reports*. – 2023. DOI: 10.1002/eng2.12620.
21. Білокур І.П. Основи дефектоскопії / І.П. Білокур. – К. : Азимут-Україна, 2004. – 496 с.
22. Hirose A. Mathematical Theory of Multi-dimensionnal Thermo-electricity with Some Experimental Proofs / A.Hirose // *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*. – 1954. – № 74. – P. 1056 [Electronic resource]. – Access mode : [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/74/792/74\\_792\\_1056/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/74/792/74_792_1056/_pdf/-char/en).
23. Штучний анізотропний метаматеріал : Патент України № 151159 / А.А. Ащеулов, М.Я. Дерев'яничук, Д.О. Лавренюк, І.С. Романюк. – 2022.
24. Nye J.F. Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices / J.F. Nye. – Oxford : Oxford University Press, 1985.
25. Анізотропний діелектричний трансформатор : Патент України № 146001 / А.А. Ащеулов, М.Я. Дерев'яничук, Д.О. Лавренюк, І.С. Романюк. – 2021.
26. Ащеулов А.А. Концентратор магнітного поля : Патент України № 141900 / А.А. Ащеулов, О.С. Веренко, Д.О. Лавренюк. – 2020.
27. Федорченко А.М. Теоретична фізика. Квантова механіка, термодинаміка і статистична фізика. Т.2 / А.М. Федорченко. – Київ : Вища школа, 1993. – 415 с.
28. Vennegut B. Electrical Theory of Tornadoes / B.Vennegut // *J. Geophys. Res.* – 1960. – Vol. 65. – P. 203–212.
29. Халатов А.А. Основи теорії прилежового шару / А.А. Халатов, Є.В. Мочалін, Н.Ф. Димитрієва. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 191 с.
30. Davidson L. An introduction to turbulence models / L.Davidson. – Göteborg : Chalmers Un-ty of Technology, 2003. – 48 p.

#### References:

1. Samoilovich, A.G., Nitsovich, M.V. and Nitsovich, V.M. (1966), «On the Theory of Anisotropic Thermoelectric power in Semiconductors», *Physica. Status. Solidi*, pp. 459–465, doi: 10.1002/pssb.19660160210.
2. Samoilovich, A.G. and Buda, I.S. (1968), «Phonon-drag effect anisotropy parameter of the thermoelectric power in n-Ge», *Physica Letters A*, Vol. 28 (6), pp. 408–409, doi: 10.1016/0375-9601(68)90463-5.
3. Abanskii, P.I., Buda, I.S., Dakhovskii, I.V. and Samoilovich, A.G. (1975), «Galvanothermomagnetic effects in anisotropic media», *Physica. Status. Solidi*, pp. 291–299, doi: 10.1002/pssb.2220670128.
4. Vykhor, L.M., Okhrem, O.A. and Snarskyi, A.O. (2006), *Termoelektrychni ta termomagnitni metody peretvorennia enerhii*, konspekt leksii profesora A.H. Samoilovycha, Ruta, Chernivtsi, 228 p.
5. Anatychuk, L.I. (1998), *Thermoelectricity. Vol.1. Physics of Thermoelectricity*, Institute of Thermoelectricity, Kyiv, Chernivtsi.
6. Anatychuk, L.I. (2003), *Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric power converters*, Institute of Thermoelectricity, Kyiv, Chernivtsi.
7. Ashcheulov, A.A., Okhrem, V.H. and Romaniuk, I.S. (2015), *Novi termoelektrychni efekty ta elementy*, Vydavnychiy dim «Rodovid», Chernivtsi, 228 p.
8. Ashcheulov, A.A. and Romaniuk, I.S. (2012), *Anizotropni optychni termoelementy na osnovi antymonidu kadmiu ta yikh zastosuvannia*, Zoloti lytavry, Chernivtsi, 228 p.
9. Engheta, Nader and Ziolkowski, Richard W. (ed.) (2006), *Metamaterials: physics and engineering explorations*, Wiley-IEEE Press, New Jersey, 440 p.
10. Brener Igal, Liu Sheng, Staude Isabelle et al. (ed.) (2019), *Dielectric metamaterials: fundamentals, designs, and applications*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Cambridge, UK, 1st Ed., 310 p.
11. Kuzuaki Sakoda (ed.) (2019), *Electromagnetic metamaterials: modern insights into macroscopic electromagnetic fields*, Springer, Singapore, 1st ed., 292 p.
12. Pankaj K. Choudhury (ed.) (2021), *Metamaterials: technology and applications*, Boca Raton, New York, 1st Ed., 408 p.
13. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2020), «The Phenomenon of Electroohmic Transformation», *Physics and Chemistry of Solid State*, No. 21 (4), pp. 743–748, doi: 10.15330/pcss.21.4.743-748.
14. Ashcheulov, A.A. et al. (2021), «On the Possibility of Electrostatic Transformation by Anisotropic Dielectric Environment», *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol. 10 (7), pp. 112–118.
15. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2021), «Anizotropnyi metadiielektrychnyi peretvoriuvach», *Elektrotehnika ta enerhetyka*, No. 4, pp. 18–27, doi: 10.15588/1607-6761-2021-4-2.
16. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2022), «Effect of magnetic field concentration», *Physics and Chemistry of Solid State*, No. 23 (1), pp. 72–76, doi: 10.15330/pcss.23.1.72-76.
17. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2022), «The phenomenon of electroohmic energy conversion in anisotropic electroconductive environments», *Physics and Chemistry of Solid State*, No. 23 (4), pp. 693–698, doi: 10.15330/pcss.23.4.693-698.
18. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ya. and Lavreniuk, D.O. (2022), «The Phenomenon of Electric Field Energy Conversion in Anisotropic Metadielectric Media», *American Journal of Physical Chemistry*, Vol. 11, No. 2, pp. 25–31, doi: 10.11648/j.ajpc.20221102.11.
19. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ia. and Lavreniuk, D.O. (2022), «Efekt kontsentratsii mahnitnoho polia v anizotropnykh metamahnitnykh seredovyshchakh», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (89), pp. 116–124, doi: 10.26642/ten-2022-1(89)-116-124.
20. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2023), «The method of turbulent transformation of energy», *Engineering Reports*, doi: 10.1002/eng2.12620.
21. Bilokur, I.P.(2004), *Osnovy defektoskopii*, Azymut-Ukraina, K., 496 p.

22. Hirose, A. (1954), «Mathematical Theory of Multi-dimensionnal Thermo-electricity with Some Experimental Proofs», *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, No. 74, pp. 1056, [Online], available at: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/74/792/74\\_792\\_1056/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejjournal1888/74/792/74_792_1056/_pdf/-char/en)
23. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ia., Lavreniuk, D.O. and Romaniuk, I.S. (2022), *Shtuchnyi anizotropnyi metamaterial*, Patent Ukrainy No. 151159.
24. Nye, J.F. (1985), *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*, Oxford University Press, Oxford.
25. Ashcheulov, A.A., Derevianchuk, M.Ia., Lavreniuk, D.O. and Romaniuk, I.S. (2021), *Anizotropnyi dielektrychnyi transformator*, Patent Ukrainy No. 146001.
26. Ashcheulov, A.A., Verenko, O.S. and Lavreniuk, D.O. (2020), *Kontsentrator mahnitnoho polia*, Patent Ukrainy No. 141900.
27. Fedorchenko, A.M. (1993), *Teoretychna fizyka. Kvantova mekhanika, termodynamika i statystychna fizyka. T.2, Vyshcha shkola*, Kyiv, 415 p.
28. Vennegut, B. (1960), «Electrical Theory of Tornadoes», *J. Geophys. Res.*, Vol. 65, pp. 203–212.
29. Khalatov, A.A., Mochalin, Ye.V. and Dymytriieva, N.F. (2019), *Osnovy teorii pryvezhovoho sharu*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 191 p.
30. Davidson, L. (2003), *An introduction to turbulence models*, Charmles Un-ty of Technology, Göteborg, 48 p.

**Ащеулов** Анатолій Анатолійович – доктор технічних наук, професор Інституту термоелектрики НАН і МОН України.

<https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- розробка та впровадження в промисловість пристроїв та приладів, що працюють на основі термоелектричних явищ в анізотропних середовищах;
- метаматеріали.

**Дерев'янчук** Микола Ярославович – аспірант, заступник директора Відокремленого структурного підрозділу «Фаховий коледж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича».

<https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- дослідження нелінійних коливних систем;
- метаматеріали.

**Лавренюк** Дмитро Олександрович – студент Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

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

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- мікропроцесорні системи керування технологічними об'єктами (процесами);
- метаматеріали.

**Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.**

#### **Vortices with laminar and turbulent flow patterns in anisotropic media**

The study develops and describes, in general, new models and devices of energy converters. The proposed devices operate on the basis of a rectangular parallelepiped with length  $a$ , height  $b$ , and width  $c$  ( $a \gg b \cong c$ ) made of anisotropic material. The selected crystallographic axes of the mentioned material are located in the side face ( $a \times b$ ) of a rectangular plate, and one of the crystallographic axes is inclined at a certain angle  $\gamma$  to length  $a$ . The method of energy transformation is based on the effect of polarization of the volume of such an anisotropic plate and the appearance as a longitudinal one  $\vec{F}_{\parallel}$ , and transverse  $\vec{F}_{\perp}$  components of the vortex energy field.

In the first case, a unipolar anisotropic material characterized by a second-rank tensor is used to make anisotropic platinum  $\hat{\tau}_1$ . All tensor coefficients  $\hat{\tau}_1$  are positive ( $\tau_{ii} > 0, i = 1..3$ ). When the proper boundary conditions are met, vortices with a laminar flow character are formed in the volume of a unipolar anisotropic medium. In the case of counter-electric  $E$ , magnetic  $H$ , gravitational  $G$  fields and flows, electric current  $I$  and heat flow  $Q$ , an energy conversion coefficient of which does not exceed 1 ( $m \leq 1$ ) is observed.

For the case of bipolar anisotropic materials, when the boundary conditions are met, energy vortices are formed, characterized by a turbulent flow pattern. Such a bipolar anisotropic material is described by a second-rank tensor  $\hat{\tau}_2$ . We consider the case when one of the coefficients of the tensor  $\hat{\tau}_2$  is negative  $\tau_{22} < 0$  ( $\tau_{ii} > 0, i = 1, 3$ ). Turbulent energy vortices, interacting with the external environment, make it possible to obtain a conversion factor significantly greater than 1 ( $|m| > 1$ ). In general, this significantly expands the existing capabilities and leads to the emergence of new methods and energy conversion devices created on them.

**Keywords:** tensor; anisotropy; metamaterial; unipolarity; bipolarity; vortex; turbulence.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2023.