

Л.І. Никируй¹, О.В. Замуруєва², Р.С. Яворський¹, Б.П. Найдич¹, Я.С. Яворський¹,
О.В. Новосад², С.А. Федосов²

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

²Волинський національний університет імені Лесі Українки

ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ

Проаналізовано публікації авторитетних світових науковців і з двох сусідніх держав – України та Польщі у галузі термоелектрики, щоб знайти закономірності розвитку цього напрямку у світі і в кожній державі зокрема, визначити перспективи для спільних досліджень. Аналіз ґрунтується на результатах, опублікованих у міжнародних наукових базах даних Web of Science та Scopus. Встановлено стан розвитку галузі термоелектрики у світі й Україні та Польщі, проаналізовано як теоретичні, так і прикладні дослідження, спрямовані на практичне застосування.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, термоелектрична енергія, термоелектрика, Україна, Польща, h-індекс.

Л.И. Никируй, О.В. Замуруева, Р.С. Яворский, Б.П. Найдич, Я.С. Яворский,
А.В. Новосад, С.А. Федосов

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Проанализированы публикации авторитетных мировых ученых и из двух соседних стран – Украины и Польши в области термоэлектричества, чтобы найти закономерности развития этого направления в мире и в каждом из государств в частности, определить перспективы для совместных исследований. Анализ основывается на результатах, опубликованных в международных научных базах данных Web of Science и Scopus. Установлено состояние развития отрасли термоэлектричества в мире и Украине и Польше, проанализированы как теоретические, так и прикладные исследования, направленные на практическое применение.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, термоэлектрическая энергия, термоэлектричество, Украина, Польша, h-индекс.

L. Nykyruy, O. Zamurujeva, R. Yavorskyi, B. Naidych, Y. Yavorskyi, O. Novosad,
S. Fedosov

PERSPECTIVE THERMOELECTRIC MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Analyzes the publications of authoritative world scientists and from two neighboring countries – Ukraine and Poland in the field of thermoelectricity in order to find patterns in the development of this direction in the world and in each of the states in particular, to determine the prospects for joint research. The analysis is based on the results published in the international scientific databases Web of Science and Scopus. The state of development of the thermoelectric industry in the world and in Ukraine and Poland is revealed, both theoretical and applied research aimed at practical application are analyzed.

Keywords: renewable energy, thermoelectric energy, thermoelectricity, h-index, Poland, Ukraine.

Постановка проблеми. Важливим кроком в удосконаленні енергетичної системи, до стабілізації клімату земної кулі є зменшення залежності від викопного палива та розвитку альтернативних джерел енергії. Тому більшість держав розпочали підтримувати розвиток відновлювальних джерел енергії на законодавчому рівні та заохочувати перехід до їх широкого використання. Однак такій політиці ЄС можливі виклики через недотримання таких ініціатив державами, що межують з ЄС. Тому є доцільним аналіз розвитку відновлювальної енергетики у двох сусідніх країнах, зокрема Польщі та України.

Одним із перспективних та сучасних напрямків відновлювальної енергетики є Термоелектрична енергетика / Термоелектрика (Thermoelectric Energy / Thermoelectricity). Даний напрямок для порівняльного аналізу між Україною та Польщею вибраний з наступних причин. Ці країни знаходяться в однакових широтах і мають схожу інфраструктуру, включаючи наукову. Термоелектрика у цих країнах не має сильного практичного застосування, але має потужні наукові результати світового класу, отримані вченими з університетів України та Польщі [1, 2]. Тому в

© Л.І. Никируй, О.В. Замуруєва, Р.С. Яворський, Б.П. Найдич, Я.С. Яворський, О.В. Новосад,
С.А. Федосов

майбутньому виробництво та використання термоелектричних пристроїв у цих країнах може стати головним у світі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще до 1990-х років кількість публікацій в окремих сферах відновлювальної енергетики становила одну або десятки публікацій на рік. Однак з початку 2000-х років спостерігається стрімке збільшення кількості публікацій. Однією з причин є Амстердамський договір, підписаний у 1997 р. Він закріпив принцип сталого розвитку для ЄС, суть якого полягала в удосконаленні виробництва відновлюваної енергії. Іншою причиною може бути усвідомлення науковою спільнотою нестабільності існуючого енергетичного стану, виснаження природних ресурсів та необхідність пошуку альтернативних джерел палива для зменшення викидів у навколишнє середовище. Ще однією умовою, яка призвела до нового кроку у розвитку відновлюваної енергії, була «вимушена політика» теплових колекторів у деяких державах, яка зобов'язувала людей ставити колектори тепла у своїх будинках. Відповідно, пошук дешевших фото-, термоелектричних та гібридних систем став новою причиною для збільшення кількості публікацій у цій галузі.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – провести аналіз публікацій світових науковців і науковців України та Польщі у галузі термоелектрики, щоб знайти закономірності як розвитку цього напрямку у світі так і у кожній країні зокрема, і визначити перспективи для спільних досліджень.

Методологія досліджень. Пошук для аналізу наукової літератури проводився у академічних бібліотеках Web of Science, Scopus, яку рецензували англійською мовою та видавали книги, що стосуються тематики. Пошук проводився з 1991 року (Україна стала незалежною державою). Завдяки досконалим можливостям наукометричних систем відібрані наукові праці, що свідчать про приналежність їх до Польщі чи України. Дана методологія детально описана в роботі [3]. Зокрема, огляд джерел проводився на основі аналізу як найбільш важливих або найбільш цитованих (сортування за кількістю цитат), так і найновіших (сортування за датою).

На другому етапі проаналізовано тип публікацій, їх фінансове забезпечення, а також специфічних для «Термоелектрики» внеску наукових напрямів (галузей), таких як «Матеріалознавство», «Фізика», «Технології» тощо.

Викладення основного матеріалу. Перетворення термоелектричної енергії, як і фотоелектрики, засноване на відомих ефектах, виявлених більше ста років тому. Принцип роботи термоелектричних приладів генерації електроенергії дуже простий: термоелектричний пристрій (зазвичай це термоелектричний генератор або модуль) розміщується так, щоб одна сторона була при вищій, а інша - при нижчій температурах. Відповідно, через різницю температур виникає електрорушійна сила термоелектрика, або, інакше кажучи, можна отримати різницю потенціалів або наявність постійного струму. Незважаючи на таку простоту використання, термоелектрик давно вважається непрактичним через низьку ефективність. Важливим кроком для початку швидкого розвитку цієї галузі було запропоноване у середині ХХ століття використання напівпровідників як термоелектричних матеріалів. Промислові термоелектричні пристрої мають порівняно низьку ефективність. Це приблизно 4-8 %, що суттєво поступається ефективності фотоелектричним (до 28 %). Однак такі невеликі значення дають можливість створити цілу низку різних автономних джерел енергії, які використовуються як у медицині, космічному застосуванні, так і в автомобільній техніці тощо. Безперечною перевагою термоелектрики є надійність пристроїв, їх безшумність, і надзвичайно довгий термін служби.

Термоелектричний модуль сконструйований на послідовності матеріалів n - та p -типу провідності. Саме якість цих матеріалів визначає ефективність роботи пристрою. Ось чому дослідники намагаються створити нові, недорогі, високоєфективні матеріали. Це наноматеріали, багатокомпонентні сполуки та матеріали з включенням різних фаз тощо.

В останні роки дуже потужною стала термоелектрична індустрія – «Thermoelectric Energy» (Термоелектрична Енергія). Лише для цього напрямку спостерігається значення R_1 (за цитуванням) вище R_2 (за останні роки) і становить відповідно 0,92 і 0,88 [4] ($R = N_{rel}/N$ – частка публікацій тематики відновлювальної енергетики (релевантних) від їх загальної кількості). Тобто, найбільш цитовані публікації становлять переважну частину відносно інших можливих матеріалів. Наприклад, коли досліджуються матеріали чи ефекти, які могли б використовуватися для виробництва термоелектричної енергії, але самі вони призначені для інших цілей. А практична можливість прямого перетворення тепла в електрику без застосування складних рухомих

механізмів та без спеціального спалювання сировини сьогодні є важливим економічним та екологічним фактором. Причому, щорічно зростає і кількість, і якість публікацій цього напрямку. Так за тегом «Thermoelectric Energy» h-індекс публікацій дорівнює 238 [3, 4]. Такі значення за цим тегом зрозумілі та передбачувані.

Відсоток внеску саме статей із галузі матеріалознавства у термоелектричну енергетику, як розділу, який відповідає фундаментальній природничій науці, становить (включаючи Chemical Engineering (хімічну інженерію)) 50,4% [3]. Більше значення цього показника для термоелектричної ніж для сонячної енергії (40,4% [4]) можна пояснити перспективами термоелектрики. Тобто, термоелектрична енергетика відноситься до високотехнологічних сфер з вагою науковою складовою. Але термоелектричні перетворювачі не завжди можуть бути незалежними джерелами електроенергії; часто вони є додатковими або допоміжними для поліпшення екологічної ситуації [5]. Тільки термоелектричне перетворення енергії використовується на практиці набагато рідше, ніж фотоелектричне. Відповідно, кількість опублікованих праць за тегом «Thermoelectric Energy» (Термоелектрична енергія) становить 12%.

Статистичні дані аналізу публікацій світової наукової спільноти за тегом «Thermoelectric Energy» наведено у таблиці 1. Незаперечними країнами-лідерами щодо публікацій у сфері термоелектричної енергії/енергетики є США та Китай. Такі країни як Японія, Індія, Німеччина, Великобританія, Південна Корея, Франція – країни, які мають національні пріоритети у сфері альтернативної енергетики.

Таблиця 1.

Статистика публікацій за країнами та провідними науково-дослідними центрами за тегом «Thermoelectric Energy» («Термоелектрична енергія / енергетика»)

Країни-лідери		Провідні науково-дослідні центри			
		за кількістю публікацій		за кількістю цитувань	
1. US	США	1. MIT	Массачусетський технол. ін-т	1. Northwestern University, Evanston, US	Північно-Західний ун-т, Еванстон, США
2. China				2. Northwestern University, Evanston, US	
3. Japan	Китай	2. Cal. Tech.	Каліфорнійський технол. ін-т	3. Purdue University, Lafayette, US	Північно-Західний ун-т, Еванстон, США
4. India		3. Tsinghua Univ.	Ун-т Цінхуа		
5. Germany	Японія	4. CNRS			
6. UK	Індія Німеччина	5. Wuhan Univ.	Нац. центр наук. досліджень Уханський ун-т		Ун-т Пердью, Вест-Лафайетт, США
7. South Korea	Велико-британія Південна Корея				
8. France	Корея Франція				

Рейтинг науково-дослідних центрів, які займають провідні позиції за кількістю публікацій, аналогічний рейтингу за державою. Існують центри, які, як і держава загалом, є однозначними лідерами в термоелектричних дослідженнях. Причому, це одночасно і розробка політики загалом щодо екологічних норм джерел енергії, так і розробка нових матеріалів та пристроїв. Массачусетський та Каліфорнійський технологічні інститути, Університети Цінхуа та Ухань, Національний центр наукових досліджень та ін. (табл. 1, стовпчик 2) – це організації, які здобули незаперечну позитивну репутацію.

Значно цікавішим є третій стовпчик табл. 1, у якому наведено центри, які є найбільш цитованими. Відбір здійснювався за найцитованішими дослідниками із цих центрів (афіліація найбільш визнаних вчених). У термоелектриці перші дві позиції займає один і той же університет – Північно-Західний університет (США), третю – Університет Пердью (США). Причому, лише Північно-Західний університет входять у перелік організацій із стовпця 2. Тобто, загальна кількість публікацій авторів із Університету Пердью у стовпці 3 є меншою, але саме вони є одними із флагманами («засновником тенденцій»). Тобто, якщо певний заклад не входить до переліку провідних науково-дослідних центрів, які мають найбільш кількість публікацій, тим не менш,

дослідники з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених. Це підтверджує, що статистика відкритих даних міжнародних науко-метричних баз дає вірогідний результат і сприяє наданню достовірних висновків.

Кількість українських та польських наукових публікацій набагато менша кількості публікацій світового наукового співтовариства. Суттєво впливає на кількість публікацій економічна ситуація в країнах. Однак, ці дві країни реалізують бажання розвиватися разом і є прикладом того, як можна створити конкурентне наукове середовище на кордоні ЄС. Нижче наведено основну інформацію, наявну в міжнародних наукових базах даних, про стан досліджень у двох прикордонних країнах з напрямку термоелектрики. Для зручності проведення аналізу важливості наукових досліджень вченими з Польщі та України, зібрані дані узагальнені в таблиці 2.

Дослідження термоелектрики тісно пов'язані з наукою про напівпровідникові матеріали. Найбільш цитовані праці за участю польських авторів стосуються фундаментальних досліджень електронних властивостей широкого кола напівпровідників. Це, зокрема [6], вивчення перших принципів резонансних станів або транспортних явищ носіїв, вивчення фундаментальних процесів у сучасних матеріалах, зокрема, наноструктур та матеріалів з нановключеннями, нової інженерії, включаючи багатокомпонентні структури, які перспективні для практичного використання в термоелектриці через свої унікальні властивості, екологічність та порівняно низьку вартість. Однак увага приділяється вивченню класичних термоелектричних матеріалів, і отримані результати відповідають високому світовому рівню. Це, зокрема, дослідження з урахуванням сучасних підходів, як експериментальних, так і теоретичних, сполук типу IV-VI [7], II-VI [8].

Таблиця 2.

Порівняльна статистична характеристика досліджень України та Польщі, проведених у напрямку «Thermoelectricity» («Термоелектрика»)

Україна	Порівняння	Польща
901	Кількість публікацій	1 145
28	h-індекс	40
<ul style="list-style-type: none"> – Institut of Thermoelectricity NASU – Ivan Franko Lviv Nat. Univ. – Nat. Univ. «Lviv Polytechnics» – Yuriy Fedkovych Chernivtsi Nat. Univ. – Nat. Techn. Univ. «Kharkiv Polytechnic Institute» 	Провідні установи (5 позицій)	<ul style="list-style-type: none"> – AGH Univ. of Science and Technology – Włodzimirz Trzebiatowski Institute of Low Temperature and Structure Research PAS – Wrocław Branch of PAS – Politechnika Warszawska – Institute of Molecular Physics PAS
<ul style="list-style-type: none"> – Engineering (26,6 %) – Physics (26,6 %) – Material Sciences (24,5 %) – Energy (4,9 %) – Computer Sciences (4,5 %) 	Найбільше представлення наукові напрямки	<ul style="list-style-type: none"> – Physics (29,1 %) – Material Sciences (27,7 %) – Engineering (21,7 %) – Chemistry (6,1 %) – Energy (3,9 %)
<ul style="list-style-type: none"> – National Academy of Sciences of Ukraine – Ministry of Education and Science of Ukraine – State Fund for Fundamental Research of Ukraine 	Найбільша фінансова підтримка	<ul style="list-style-type: none"> – Narodowe Centrum Nauki – SC of Antarctic research – KBN
<ul style="list-style-type: none"> – Poland – United States – RF – Germany – Austria 	Країна-партнер	<ul style="list-style-type: none"> – Germany – Ukraine – United States – France – Moldova

Однак найновіші публікації стосуються тих же напрямків [9, 10]. Тут важливо зазначити, що найбільш цитовані праці польських учених стосуються тих, що публікуються переважно за останні 5-10 років. Тобто в цей час відбувається пік якісних досліджень, визнаних науковою спільнотою світу. З цієї ж причини останні публікації мають авторство тих самих наукових колективів. Це

представники відомих наукових центрів, таких як Університет Гірничо-Металургійна Академія (Краків), два заклади у Вроцлаві та Інститут молекулярної фізики Польської АН у Познані (див. Таблицю 2). Географія науково-дослідних установ досить широка і не зосереджена у певному регіоні, що свідчить про систематичну підтримку державою таких високотехнологічних досліджень у Польщі. З точки зору якості варто відзначити перелік найпопулярніших видань, в яких публікуються вчені з Польщі. Серед найбільш цитованих однозначним лідером є *Physical Review*, який свідчить про розвиток фундаментальних досліджень. *Journal of Alloys and Compounds*, *Journal of Electronic Materials*, *Solid State Ionics* також дуже популярні. Щодо публікацій, які є найновішими на момент аналізу, вони опубліковані в *Journal of Alloys and Compounds*, *the Journal of Electronic Materials*, and *the Journal of Applied Physics* (табл. 2). Імпакт-фактор (ІФ) кожного з цих журналів складають від 3-7. Тобто середні журнали, в яких публікуються польські вчені, також належать до флагманських видань.

Найбільш цитовані праці дослідників з України стосувалися нових класів матеріалів, які відповідають світовим тенденціям – пошуку нових, екологічно чистих та недорогих матеріалів. Вони включають теоретичну роботу щодо моделювання нових класів багатокомпонентних сполук, моделювання продуктивності щодо нових класів термоелектричних матеріалів – скутерудит, напівгеслерські сплави або графен, як елементи кінцевого пристрою.

Однак вивчення класичних матеріалів також проводиться на високому рівні. Більше того, в деяких випадках демонструються ефекти, досліджені в певних матеріалах вперше. Це публікації про матеріали II-VI типу (кристали Bi-Sb, Bi₂Te₃), сполуки IV-VI: дослідження коливань термоелектричних параметрів для PbSe, нових сполук типу LATG-PbAgSbTe [11], або багаточарових на їх основі гетероструктури [12]. Більше того, ряд праць, опублікованих українськими вченими, значною мірою сприяють розвитку теорії термоелектричних явищ [13].

Особливістю досліджень термоелектрики є недорога можливість випробувати готові пристрої. У Чернівцях, в Україні, знаходиться найбільший у Східній Європі центр термоелектрики – Інститут термоелектрики НАН та МНС України та виробнича компанія ALTEK, на базі якої розробляються та випробовуються термоелектричні генератори, або Thermion Co. (Одеса). Існує також велика кількість цитат щодо систем охолодження або використання термоелектричних вимірювальних приладів.

Українські дослідники зазвичай публікують результати таких провідних видань, як *Applied Physics Letters*, *Acta Materialia*, *Journal of Alloys and Compounds*. Це журнали з імпакт-фактором 3-7. Однак, на відміну від журналів, в яких польські вчені зазвичай публікують свої найцитованіші праці, існує певний баланс між прикладними результатами та суто матеріальними дослідженнями.

Аналіз наукових праць, опублікованих нещодавно, показує, що залишається тенденцією дослідження багатокомпонентних об'ємних і низькорозмірних сполук та наноматеріалів [11]. Але, в той же час, існує велика кількість і дуже чітко спрямованих прикладних досліджень, що стосуються розробки конкретних термоелектричних пристроїв, зокрема для медицини [14], або гібридних енергосистем, що поєднують різні види генерації відновлюваної енергії в одному пристрої [15].

Також на базі Інституту термоелектрики в Чернівцях створена Міжнародна термоелектрична академія, яка об'єднує зусилля не лише українських вчених, а й представників практично всіх відомих наукових центрів світу, що займаються термоелектрикою. Виданий ними Журнал термоелектрики - один з найпопулярніших журналів для українських вчених у галузі термоелектрики.

Загалом напрям «Термоелектрична енергія / енергетика» є одним з пріоритетних на дослідницькому ринку України, що й у світі. Хоча h-індекси публікацій українських дослідників є значно нижчими за h-індекси науковців світу, для України за тегом «Thermoelectric Energy» зберігається однаковий відсоток, як і загальносвітий, від усієї кількості публікацій за тематикою відновлювальної енергетики (по 12 %) [4, 6]. Для кращого сприйняття співвідношення між українськими, польськими досягненнями та існуючим станом публікацій у світі, побудовано діаграми відносних значень h-індексів та кількості публікацій (рис. 1). На цих діаграмах нижчі значення демонструють вищий потенціал досягнень дослідників (зворотний характер).

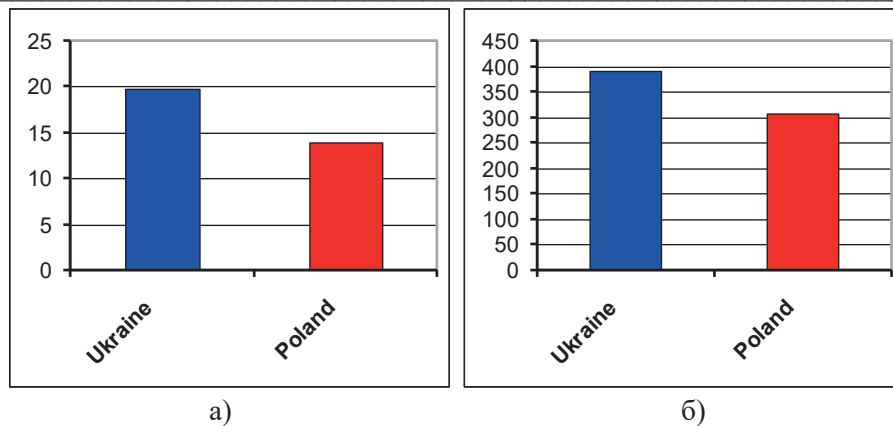


Рис. 1. Співвідношення (а) h -індексів (h_{glob}/h_{ukr} , h_{glob}/h_{pol}) та (б) кількості публікацій (N_{glob}/N_{ukr} , N_{glob}/N_{pol}) за напрямком «Термоелектрична енергія / енергетика» (Thermoelectric Energy) науковців України та Польщі до світових

Спільні ознаки можна виділити, розглядаючи термоелектричну енергетику (термоелектрику) в Україні та Польщі. Перш за все, співпраця польських та українських вчених, відображена великою кількістю спільних публікацій, що є пріоритетом обох країн. Також вчені обох країн успішно співпрацюють зі своїми колегами з Німеччини та США (табл. 2). Логічно пояснюються спільні дослідження як сусідніх держав, так і високотехнологічних, що володіють найсучаснішим обладнанням.

Кількість публікацій про термоелектрику порівнянн в обох країнах: 1 145 представлени польськими вченими та 901 українськими. Але h -індекси тут різні – 40 та 28, що майже на 50 % вище для польських видань. Це означає, що публікації українських вчених, які часто мають дуже високий науковий рівень, публікуються у менш відомих журналах світової наукової спільноти, і, отже, менш цитуються.

Очевидно, що у цій сфері кількість публікацій дуже різна, як і h -індекси. Для більш ефективного аналізу визначаються їх нормалізовані залежності:

$$h_{norm} = \frac{h_i}{N_i},$$

де h_i – h -індекс публікацій у відповідному напрямку, N_i – загальна кількість публікацій у цьому напрямку.

Для напрямку «Термоелектрика» нормалізовані значення h -індексу публікацій українських та польських науковців практично однакові за величиною. Тобто, якість наукових публікацій у високотехнологічних фундаментальних напрямках майже однакова для вчених обох країн.

Порівняння високо цитованих публікацій польських та українських вчених у галузі термоелектрики свідчить про те, що акцент польських вчених робиться на вивченні властивостей матеріалів, однак розробка приладів активно почала розвиватися лише в останні роки. Для України особливістю є паралельне існування цілого ряду робіт, присвячених термоелектричному матеріалознавству та термоелектричним прикладним системам. Одним із висновків, що впливає з цього аналізу, є те, що в Україні завжди була хороша база для промислового виробництва термоелектричних систем або елементів. У Польщі це лише на початкових етапах творення. Однак, беручи до уваги якість досліджень, проведених польськими вченими, нова промислова база буде зосереджена на нових екологічно чистих термоелектричних матеріалах. Сьогодні вони дешевші, але мають значно нижчі значення термоелектричної ефективності. Прогрес, досягнутий за останні роки, дає надію на прорив у цьому перспективному напрямку.

Основні наукові напрямки за ключовим словом «Thermoelectricity» зображені на рис. 2. Важливо зазначити, що так як і за напрямком «Фотоелектрика» [7, 16] дослідження польських вчених в основному зосереджені на фундаментальних дослідженнях (Фізика та Матеріалознавство), тоді як для України є певні зміщення пріоритету на прикладні дослідження (Інженерія та Фізика). Для «Термоелектрики» такий зсув менш помітний, але все ж він є. Тобто, значні та визнані технічні рішення є більш специфічними для України.

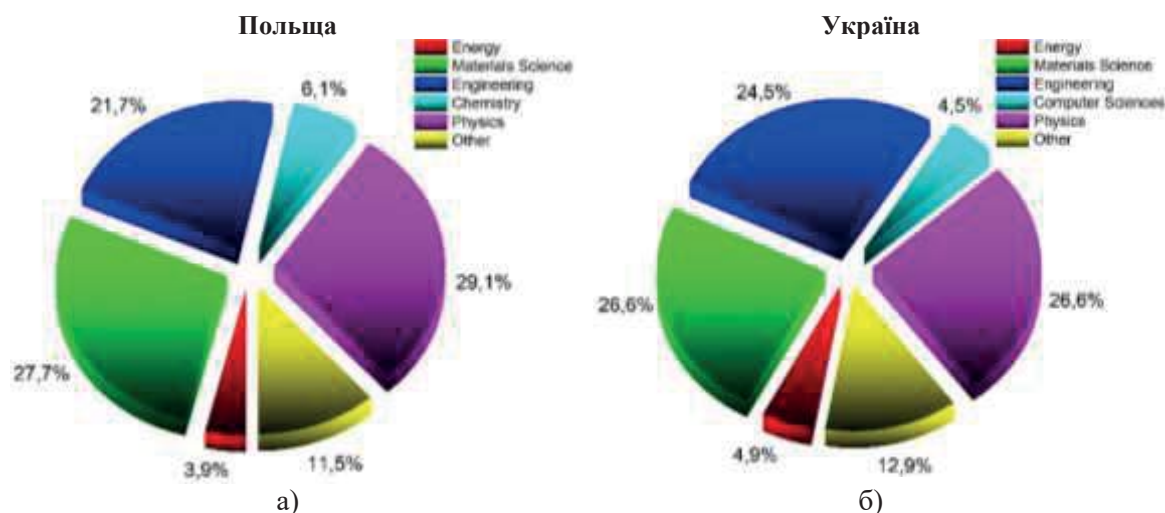


Рис. 2. h-індекси публікацій за науковими напрямками в термоелектриці (Thermoelectricity) (а) для наукових робіт Польщі, а (б) – український науковців

Висновки. Для ефективного розвитку та впровадження термоелектричної енергетики необхідно враховувати різні фактори одночасно. Довгострокова перспектива вимагає розробки нових, екологічно чистих та ефективних досліджень і створення можливостей для їх впровадження.

Жодна держава самостійно не може вирішити питання відновлення зеленої енергії. Аналіз світової науки та двох сусідніх країн Польщі та України свідчить про існування значних відмінностей в економічній та законодавчій системах, що є типовим прикладом розвитку співпраці між державами на кордоні ЄС.

Якість досліджень можна оцінити на основі передових наукових публікацій у рецензованих журналах. Кількість та внесок таких публікацій свідчать про науковий потенціал колективів, актуальність і можливість впровадження цих результатів. Нормалізований h-індекс вказує на те, що у сферах фундаментальних матеріалознавчих досліджень в галузі термоелектричної енергетики практично на одному рівні, незалежно від того, є держава членом ЄС чи ні.

Список використаних джерел:

1. Filin S.O. State of thermoelectricity development in Poland. *J. Thermoelectricity*. 2009. № 2. P. 7–11.
2. Anatyshuk L.I. On the development of thermoelectricity in Ukraine. *Visn. Nac. Ac. Nauk Ukraini*. 2016. № 11. P. 23–30. DOI: 10.15407/visn2016.11.023
3. Wisz G., Nykyruy L., Yakubiv V., Hryhoruk I., Yavorskyi R. Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine. *Int. J. Renewable Energy Res.* 2018. Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.
4. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Urban O.A., Fedosov S.A. The Impact of Scientific Research on the Development of Renewable Energy. *Perspective Technologies and Devices*. 2020. № 16. P. 82–91. DOI: [10.36910/6775-2313-5352-2020-16](https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16)
5. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex Thermoelectric Materials. *Nat. Mat.* 2008. Vol. 7. P. 105–114. DOI: 10.1038/nmat2090
6. Nykyruy L., Yakubiv V., Wisz G., Hryhoruk I., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R. Renewable Energy in Ukraine - Poland Region: Comparison, Critical Analysis and Opportunities. In *Renewable Energy-Resources, Challenges and Applications*. *IntechOpen*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.91686
7. Jaworski C.M., Wiendlocha B., Jovovic V., Heremans J.P. Combining alloy scattering of phonons and resonant electronic levels to reach a high thermoelectric figure of merit in PbTeSe and PbTeS alloys. *Energy Environ. Sci.* 2011. Vol. 4, № 10. P. 4155–4162. DOI: 10.1039/c1ee01895g
8. Wojciechowski K., Godlewska E., Mars K., et al. Characterization of thermoelectric properties of layers obtained by pulsed magnetron sputtering. *Vacuum*. 2008. Vol. 82, № 10. P. 1003–1006. DOI: 10.1016/j.vacuum.2008.01.039

9. Parashchuk T., Dashevsky Z., Wojciechowski K. Feasibility of a high stable PbTe: In semiconductor for thermoelectric energy applications. *J. Appl. Phys.* 2019, Vol. 125, № 24. P. 245103. DOI: 10.1063/1.5106422
10. Radchenko M., Lashkarev G., Baibara O., et al. Electronic Transport and Magnetic Properties of Co/SiO₂ Magnetic Nanocomposites. *Phys. Status Solidi B.* P. 1900145. DOI: 10.1002/pssb.201900145
11. Nykyruy L., Ruvinskiy M., Ivakin E., et al. A. Low-dimensional systems on the base of PbSnAgTe (LATT) compounds for thermoelectric application. *Physica E.* 2019. Vol. 106. P. 10–18. DOI: 10.1016/j.physe.2018.10.020
12. Rogacheva E.I., Nashchekina O.N., Meriuts A.V., et al. Quantum size effects in n-PbTe/p-SnTe/n-PbTe heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, № 6. P. 063103. DOI: 10.1063/1.1862338
13. Snarskii A.A., Bezsudnov I.V., Sevryukov V.A., Morozovskiy A., Malinsky J. Transport Processes in Macroscopically Disordered Media: From Mean Field Theory to Percolation. New York, NY : Springer, 2016. DOI: [10.1007/978-1-4419-8291-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8291-9)
14. Anatyshuk L., Vikhor L., Kotsur M., Kobylanskyi R., Kadaniuk T. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes. *Int. J. Thermophys.* 2018. Vol. 39, № 9. P. 108. DOI: 10.1007/s10765-018-2430-z
15. Prokopiv V.V., Nykyruy L.I., Voznyak O.M., et al. The Thermoelectric Solar Generator. *Phys. Chem. Solid State.* 2017. Vol. 18, № 3. P. 372–375. DOI: 10.15330/pcss.18.3.372-375
16. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Novosad O.V., Fedosov S.A. Perspective Solar Cells Materials and Technologies. *Perspective Technologies and Devices.* 2020. № 17. P. 175–182. DOI: [10.36910/6775-2313-5352-2020-17-26](https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-26)