

УДК 620.9+621.315.592

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2020-17-26

Никируй Л.І.¹, канд. фіз.-мат. наук, Замурусва О.В.², канд. фіз.-мат. наук, Новосад О.В.², канд. фіз.-мат. наук, Федосов С.А.², д-р фіз.-мат. наук¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника²Волинський національний університет імені Лесі Українки

ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У роботі проаналізовано публікації авторитетних світових науковців і з двох країн – України та Польщі у галузі «Фотоелектрика / Фотовольтаїка», щоб знайти закономірності як розвитку цього напрямку у кожній державі, так і визначити перспективи для спільних досліджень. Аналіз ґрунтується на результатах даних, опублікованих у міжнародних наукових базах даних Web of Science та Scopus. Виявлено найсучасніші галузі досліджень у кожній країні, проаналізовано як теоретичні, так і прикладні дослідження, спрямовані на практичне застосування.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, фотоелектрика, фотовольтаїка, сонячні елементи, *h*-індекс.

Вступ. Відсутність належної енергетичної політики серед держав, зокрема тих, економіка яких базується на викопних паливах, часто згубно впливає на навколишнє середовище [1]. Зменшення залежності від викопного палива є важливим кроком у трансформації стійкої енергетичної системи. З цієї причини більшість держав розпочали підтримувати розвиток відновлювальних джерел енергії на законодавчому рівні та заохочувати перехід до їх широкого використання. Однак виклик такій політиці ЄС можливий через недотримання цих ініціатив державами, що межують з ЄС. Тому доцільним є аналіз розвитку відновлювальної енергетики у двох сусідніх країнах – Польщі та Україні. Одним із перспективних напрямків відновлювальної енергетики є Сонячна енергетика / Фотоелектрика / Фотовольтаїка (Solar Energy / Photoelectric / Photovoltaics). Цей напрямок для порівняння між Україною та Польщею вибраний з наступних причин. Обидві країни знаходяться в схожих широтах і мають майже однакову кількість сонячних днів та схожу інфраструктуру, включаючи наукову. Сонячна енергетика, зокрема фотовольтаїка, – одна з областей, де можна швидко перевірити властивості нових матеріалів та впровадити їх у виробництво. І, враховуючи потужний глобальний розвиток у цьому напрямку, дуже легко порівняти отримані результати та гнучко вибирати нові об'єкти для дослідження.

Методологія досліджень. Наукові результати можна проаналізувати, якщо вони є у формі публікації. Наукову літературу шукали в академічних бібліотеках, Web of Science, Scopus, рецензували англійською мовою та видавали книги, що стосуються тематики.

Таким чином, пошук проводився з 1991 року (Україна стала незалежною державою). Завдяки вдосконаленим інструментам наукометричних систем були відібрані наукові праці, що свідчать про приналежність Польщі чи України. Процедура детально описана в роботі [2]. Зокрема, огляд джерел проводився на основі аналізу як найбільш важливих чи найбільш цитованих (сортування за кількістю цитат), так і останніх (сортування за датою).

На другому етапі зроблено аналіз типу публікацій, їх фінансового забезпечення, а також специфічних для напрямку сонячна енергетика галузей, таких як «Матеріалознавство», «Фізика», «Технології» тощо.

На останньому етапі було проведено аналіз найвизначніших публікацій та закономірностей для прогнозування варіантів розвитку даного напрямку та узагальнення ключових результатів в рамках напрямку для підтримки теоретичного розвитку чи певних практичних технологій.

Аналіз результатів. Фотоелектрика (фотовольтаїка) – один із найпопулярніших видів відновлювальної енергії сьогодні. Причиною цього є вільне джерело – сонячне випромінювання, яке, потрапляючи на правильно підготовлені напівпровідникові матеріали, перетворюється на електричний струм завдяки відомому явищу – фотоефекту. Дослідження та аналіз публікацій сонячної енергетики (тег «Solar Energy») поєднано в єдиний тег «Solar Photoelectric / Solar Photovoltaic» (Сонячна фотоелектрика / Сонячна фотовольтаїка) та «Solar Heat Energy» (Сонячна теплова енергія). Фізика цих процесів принципово різна, однак, для них існує спільне джерело безкоштовної енергії – Сонце. Перетворення сонячної енергії в електричну чи теплову значно раніше почали цікавити дослідників і тепер вони стабілізувалися

на певних пропорційних до кількості публікацій значеннях щодо інших публікацій за цими тегами [2]. До інших областей досліджень тут однозначно відносять астрофізичні (процеси на Сонці), аерокосмічні та «чисті» географічно-екологічні дослідження. Хоча результати свідчать про високий імпакт досліджень щодо сонячної енергетики, який підтримується як державними механізмами у різних країнах, так і бізнесом, для яких впровадження інновацій є одночасно і комерційним і суспільним успіхом.

Сонячна енергетика на сьогодні у світі з усіх напрямків відновлювальної енергетики як за цитуванням, так і за кількістю публікацій має найвищі значення. Так за тегом «Solar Energy» h-індекс публікацій дорівнює 508 і 38 % загальної кількості публікацій за тематикою відновлювальної енергетики [2, 3]. Такі значення за цим тегом зрозумілі та передбачувані. Адже саме сонячна енергетика, також як і вітрова, сьогодні є вирішальними з економічної точки зору і першими почали масово впроваджуватися [4]. Основні публікації стосуються високотехнологічної сфери щодо принципово нових ідей, які стимулюють новий етап розвитку галузі. Так, у [5] обґрунтовано можливість розробки дешевих та комерційно вигідних фотоелементів товщиною 10 мкм на основі оптично прозорих плівок із наночастинок діоксиду титану. Ці наночастинок збирають достатньо високий відсоток потоку сонячного випромінювання (46 %) і демонструють виняткові показники перетворення енергії фотона в електричну енергію із загальною ефективністю (7,1-7,9) %. Схожим матеріалам присвячені й інші роботи, де пропонується певна хімічна модифікація цих фотоелементів на основі TiO₂ внаслідок легування елементами нітрогену, розробка поверхнево активного наноструктурного діоксиду титану, тощо. Тобто, чітко видно, що найбільш цитованими є наукові дослідження у сфері фотоелектричного матеріалознавства. Відсотковий вміст внеску саме статей із галузі матеріалознавства у сонячну енергетику, як розділу, який для цього напрямку найбільше відповідає фундаментальній природничій науці, становить (включаючи Chemical Engineering (хімічну інженерію)) 40,4 % [2]. Тобто, сонячна енергетика відноситься до технологічних сфер, яка має вагому наукову складову.

Певну статистику щодо публікацій світової наукової спільноти за тегом «Solar Energy» наведено у таблиці 1. Однозначними країнами лідерами щодо публікацій у сфері сонячної енергетики є США та Китай. Є країни, які мають національні пріоритети у сфері відновлювальної енергетики. Це часто пов'язано із географічним розташуванням країни, або із власною державною політикою. Як США, так і Китай географічно розташовані у різних географічних поясах, а також кожна із цих держав має потужні дослідницькі центри. Тому їх 1-а і 2-а позиції є очевидними. Індія, Німеччина, Японія, Великобританія, Італія, Франція – це країни, які обрали енергетичну безпеку у якості свого національного інтересу.

Таблиця 1

Статистика кількості публікацій по країнах та провідних науково-дослідних центрах відповідно до тегу «Solar Energy»

Країни-лідери	Провідні науково-дослідні центри				
	за кількістю публікацій		за кількістю цитувань		
1. USA	США	1. NASA	Центр космічних польотів імені Годдарда	1. Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany	Інститут досліджень твердого тіла імені Макса Планка, Штутгарт, Німеччина
2. China	Китай	2. Nat. Renewable Energy Lab.	Національна лабораторія по вивченню відновлювальної енергії	2. ETH Zurich, Switzerland	Швейцарська вища технічна школа Цюріха, Цюріх, Швейцарія
3. India	Індія	3. CNRS	Національний центр наукових досліджень	3. University of Ontario, Oshawa, Canada	Технологічний інститут університету Онтаріо, Ошава, Канада
4. Germany	Німеччина	4. UC Berkeley	Каліфорнійський університет в Берклі		
5. Japan	Японія	5. Cal. Tech.	Каліфорнійський технологічний інститут		
6. UK	Великобританія				
7. Italy	Італія				
8. France	Франція				

Наприклад, Індія задекларувала перехід на 100 % відновлювальну енергетику до 2022 року. Основою відновлювальної енергетики в Індії буде сонячна енергетика. Тому саме у сонячній енергетиці Індія займає 3 місце у світі за кількістю публікацій. Ця сама тенденція є і у виробництві сонячної електроенергії. Лідуючі позиції в розвитку сонячної енергетики займають Китай (52 ГВт), США (12,5 ГВт) та Індія (9 ГВт) [4].

Ситуація щодо науково-дослідних центрів, які займають провідні позиції за кількістю публікацій, дещо відмінна від рейтингу за державою. Існують центри, які, як виявилось, є однозначними лідерами в енергетичних дослідженнях. Причому, це одночасно може бути і розробка політики щодо екологічних норм джерел енергії, і розробка принципово нових матеріалів та пристроїв. Тобто, існують організації, які здобули незаперечну позитивну репутацію (табл. 1, стовпчик 2): NASA Goddard Space Flight Center, National Renewable Energy Laboratory, CNRS, UC Berkeley, California Institute of Technology, University of Tokyo, MIT, Tsinghua University, Technical University of Denmark та ін.

Але ще цікавішим є третій стовпчик табл. 1, у якому наведено центри, які є найбільш цитованими у своїй галузі. Відбір проводився за найцитованішими дослідниками із цих центрів (наведено афіліацію найбільш визнаних вчених). У сонячній енергетиці перші три позиції займають заклади, що не входять у перелік організацій із стовпця 2. Тобто, загальна кількість публікацій авторів із закладів, що вказані у стовпці 3 є меншою, але саме вони є флагманами, тобто тими, хто є «засновником тенденцій». І виявляється, що ці «засновники тенденцій» представляють організації не лише із США, Канади, Японії, Німеччини, Індії, але й із Швейцарії, Норвегії, Данії, Нідерландів, які не входять у перелік держав, наведених у стовпці 1 табл. 1. Тобто, якщо певна держава не входить до переліку тих країн, які видають найбільшу кількість публікацій, тим не менш, дослідники з них можуть претендувати на найвищі позиції у рангу світових вчених. І друге, дуже цікавим виявилось певне «зміщення» у тих організаціях, де працюють найбільш цитовані дослідники у скандинавських державах. А з іншої сторони, саме держави, наведені у стовпці 3 табл. 1, мають найбільшу кількість нобелівських лауреатів. Це підтверджує, що статистика відкритих даних міжнародних науко-метричних баз дає вірогідний результат і сприяє наданню достовірних висновків.

Щодо українських та польських видань, то кількість робіт набагато менша ніж кількість публікацій світового наукового співтовариства. Економічна ситуація в країнах суттєво впливає на кількість публікацій. Нижче наведено короткий опис інформації, наявної в міжнародних наукових базах даних про стан досліджень у напрямку фотоелектрики проведений у двох прикордонних країнах. Ці дві країни зараз реалізують бажання розвиватися разом і є прикладом того, як можна створити конкурентне наукове середовище на кордоні ЄС. Для зручності проведення аналізу впливу наукових досліджень, проведеного вченими з Польщі та України, зібрані дані узагальнені в таблиці 2.

Аналіз публікацій за тегом «Solar Photovoltaic» вимагає ретельного вивчення. За весь період (1991-2019 рр.) у базі даних Scopus є 2 292 публікації польських дослідників. Хоча «відкритий доступ» для результатів досліджень має лише 403 публікації, можливих для публічного доступу. За кількістю цитування $h=66$ для загальної кількості публікацій «Solar Photovoltaics» за період 1991-2019 років. Однак слід пам'ятати, що не всі публікації стосуються виробництва, зберігання або перетворення сонячної енергії, і лише частина публікацій стосується пошукового запиту [6]. Дослідження зроблені на першій сотні найбільш цитованих та найновіших публікаціях. Найцікавіші з них були відібрані для аналізу.

Найбільш цитується документ [7] з $h=2122$. У ньому представлений короткий огляд добре встановлених багаторівневих перетворювачів, орієнтованих на їх сучасний стан у промислових сферах, та огляд нових перетворювачів, які потрапили в галузь. Крім того, були обговорені нові перспективні топології та нетрадиційні програми, що працюють на багаторівневих перетворювачах.

Однією з найбільш цитованих робіт є [8], про специфічні хімічні та фізико-хімічні вимоги до органічних сполук, що застосовуються в органічних або гібридних електронних пристроях, таких як фотодіоди, світлодіоди, фотоелектричні елементи тощо. Однією з найбільш цитованих (184 рази) та нових публікацій (2019) є [9], про нові нефулеронні органічні напівпровідники n -типу, які привернули значну увагу як акцептори в органічній фотовольтаїці (ОФВ) завдяки своєму великому потенціалу. Вироблені ОФВ показали високу ефективність 15,7 %.

Таблиця 2

Порівняльна статистична характеристика досліджень України та Польщі, проведених у напрямку «Сонячна фотovoltaїка»

Україна	Порівняння	Польща
1 370	Кількість публікацій	2 292
38	h-індекс	66
1. Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv 2. Nat. Univ. «Lviv Polytechnics» 3. Yuriy Fedkovych Chernivtsi Nat. Univ. 4. Institut of Physics, NASU 5. Nat. Techn. Univ. «Kharkiv Polytechnic Institute»	Провідні установи (5 позицій)	1. Politechnika Warszawska 2. Wroclaw Univ. of Science and Technology 3. AGH Univ. of Science and Technology 4. Silesian Univ. of Technology; 5. Lodz Univ.
Engineering (21,63 %) Physics and Astronomy (20,71 %) Material Sciences (19,11 %) Energy (7,98 %) Chemistry (7,64 %)	Найбільше представлени наукові напрямки	Physics and Astronomy (29,5 %) Material Sciences (25,57 %) Engineering (16,73 %) Chemistry (6,68 %) Energy (5,6 %)
Ministry of Education and Science of Ukraine National Academy of Sciences of Ukraine Science and Technology Center in Ukraine State Fund for Fundamental Research of Ukraine European Regional Development Fund	Найбільша фінансова підтримка	Narodowe Centrum Nauki Narodowe Centrum Badan I Rozwoju European Regional Development Fund European Commission Fundacja na rzecz Nauki Polskiej
1. RF 2. Germany 3. Poland 4. United States 5. France	Країна-партнер	1. Germany 2. France 3. United States 4. United Kingdom 5. Ukraine

Серед інших публікацій можна знайти статті, пов'язані з органічними сонячними елементами (organic solar cells), полімерними сонячними елементами (polymer solar cells), напівпровідниковими з гетеропереходами сонячними елементами (semiconductor heterojunctions solar cells), кремнієвими сонячними елементами (silicon-based solar cells), сонячними елементами з барвниками (dye-sensitized solar cells), перовскітною фотovoltaїкою (perovskite photovoltaics) та інші матеріали, завдяки високій ефективності перетворення енергії. У цих роботах описані можливі фізико-хімічні процеси та явища, що відбуваються під час підготовки матеріалів, використання властивостей та їх апробація метастабільності електричних властивостей, фотоелектричних параметрів, світлочутливості та поглинання, хімічної обробки та методів осадження, зон, дефектів, границь зерна, енергії зв'язку, фактори, що впливають на ефективність перетворення тощо. Зокрема, з 1991 р. сонячні елементи з барвниками (dye-sensitized solar cells (DSSC)), викликали значний інтерес з боку наукової та комерційної спільноти завдяки своїм перспективним характеристикам як перетворювачі сонячного світла. Близько 8 % перших 200 публікацій пов'язані з темою матеріалів для сонячних елементів.

За темою «Solar Photovoltaics» [6] найбільш цитуються також дослідження властивостей TiO_2 та ZnO і гетеропереходів на їх основі. Інші високо цитовані публікації – це дослідження полімерних матеріалів у фотоелектричних пристроях із застосуванням полімерних сонячних елементів або дослідження та моделювання метастабільності в сонячних елементах на основі халькопіриту, наприклад $Cu(In,Ga)Se_2$, або на основі $ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se_2$ тонкоплівковий сонячний елемент. Найновіші публікації стосуються питань екології, економіки тощо, зокрема впровадження та застосування гібридних систем перетворення енергії в Польщі. Були також публікації про несіліконові ФВ модулі, дослідження погодних та кліматичних умов щодо

ефективності перетворення сонячної енергії тощо. Результати, представлені в цих роботах, стали основою для розвитку виробництва відновлюваних джерел енергії та ефективної комерціалізації певних наукових результатів.

Сектор сонячної фотовольтаїки є одним з найбільш швидкозростаючих секторів відновлюваної енергії у Польщі та світі. Спостерігається динамічне зростання нових ФВ установок. У 2018 році Польща почала виділятися серед інших країн ЄС і щорічно збільшувалась на 235 МВт – вона вже була на 9-му місці. З огляду на поточні та реальні інвестиції, що тривають, Польща у 2020 році може опинитися на 4 місці в ЄС за щорічним збільшенням нових джерел сонячної енергії.

Сонячна енергетика в Україні активно розвивається з кінця 2008 року з прийняттям «зеленого» тарифу на законодавчому рівні, який зробив фінансово привабливі інвестиції в промислові електромережі сонячні електростанції. Використання сонячних панелей на дахах приватними домогосподарствами до 2050 року може досягати 40-50 %. Крім того, використання сонячних колекторів для обігріву води буде більш економічно вигідним. Ці технології забезпечать потреби на гарячу воду в приватних домогосподарствах на 70-100 % влітку та 15 % взимку.

За досліджений період у Scopus є 1370 публікацій (табл. 2), що на 922 менше, ніж за аналогічний період у Польщі. Лише 114 з 1370 публікацій перебувають у «відкритому доступі». За кількістю цитат $h=38$ для загальної кількості публікацій, пов'язаних із «Solar Photovoltaics» за цей період.

Найбільш цитується публікація за участю українських дослідників [10] з $h=207$ стосується ефективного фотокаталітичного розщеплення води. Стаття [11] була однією з основних у 2000-х роках, в якій були представлені дизайн та фотоелектричні показники сонячних елементів на основі різних напівпровідникових наноматеріалів, таких як TiO_2 , ZnO , CdS , $CdSe$, $CdTe$, CuO , Si та порівняно з відповідними сонячними елементами на основі напівпровідникових наночастинок, специфічні для синтезу та застосування вуглецевих нанотрубок у фотоелектричних пристроях також були розглянуті в цих роботах.

Найбільша кількість публікацій в Україні за тегом «Solar Photovoltaics» стосується фотоелектричних матеріалів, головним чином, це високотехнологічні результати, спрямовані на оптимізацію параметрів існуючих матеріалів для фотоелектрики, вдосконалення методів їх виготовлення та дослідження, а також створення нових ефективних та недорогих матеріалів для конкуренції з існуючими [6]. Часто цитуються дослідження властивостей гетероперехідних сонячних елементів на основі $CdTe$. Перші роботи, присвячені вивченню властивостей $CdTe$ в Україні з часів її незалежності, з'явилися в 1997 році. Перші згадки про концепцію квантової ефективності $CdS/CdTeSC$ – у 2012 році. Сонячні модулі на основі розроблених гнучких сонячних елементів $ITO/CdS/CdTe/Cu/Au$ на поліімідних плівках були згадані вперше в 2009 році.

Із перших 200 публікацій дослідників з України за тегом «Solar Photovoltaics» ~12,5 % становлять наукові статті на сполуках, що містять $CdTe$, тоді як відсоток публікацій, що стосуються кремнію та його можливих модифікацій для використання у сонячній енергетиці – ~10 %. Хоча в останні роки спостерігається збільшення кількості публікацій інших наукових груп у цій галузі, які демонструють сучасні конкурентні досягнення [12]. Публікації, що розглядають перспективи використання квантових точок у сонячних елементах, дуже популярні. Їх фотофізичні та електрофізичні властивості можуть змінюватись різними розмірами та формою частинок, а QD може забезпечити поглинання сонячної енергії у значно ширшому спектральному діапазоні порівняно зі сполученими органічними сполуками. На першому плані у науці стоять перспективні методики розвитку технологій ФВ-систем другого покоління, ефективність яких зараз порівнянна з ефективністю кремнію, а вартість і витрата матеріалу значно нижчі.

Аналізуючи останні публікації в цілому, можемо спостерігати тенденцію до інтересу моделювання впливів погодних умов на властивості фотоелектричних установок, методів його ідентифікації, моделювання енергопостачання будівель на основі ФВ модулів [12], мікросітка з гібридною системою відновлюваної енергії, концепція накопичення енергії від фотоелектричних та вітроелектростанцій.

Однак структура більшості публікацій має характер фундаментальних досліджень фізики напівпровідників. Напівемпіричні підходи, що поєднують дослідження матеріалознавства, розробку технології виготовлення маломірних структур, тестування отриманих параметрів для

роботи як фотоелемента та вказують на перспективу подальшого практичного застосування – основні особливості українських вчених.

Загалом для України є суттєво вищою у відсотковому співвідношенні [3, 6] кількість публікацій за тегом «Solar Energy» (45 % в Україні проти 38 % у світі). Щоб краще продемонструвати співвідношення між українськими, польськими досягненнями та існуючим станом публікацій у світі, побудовано діаграми, які демонструють відносні значення h-індексів та кількості публікацій (рис. 1). На цих діаграмах нижчі значення демонструють вищий потенціал досягнень дослідників (зворотний характер).

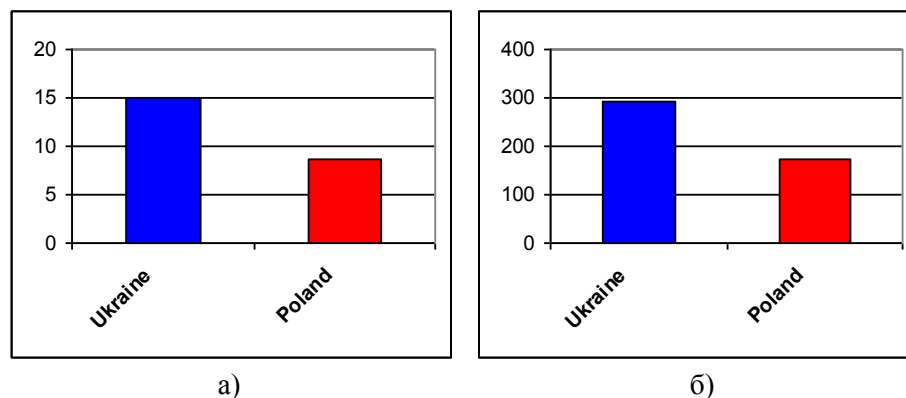


Рис. 1. Співвідношення (а) h-індексів (h_{glob}/h_{ukr} , h_{glob}/h_{pol}) та (б) кількості публікацій (N_{glob}/N_{ukr} , N_{glob}/N_{pol}) за напрямком «Сонячна енергетика» (Solar Energy) науковців України та Польщі до світових

Розглядаючи сонячну енергетику (фотоелектрика / фотовольтаїка) в Україні та Польщі, можна виділити певні спільні риси. Перш за все, співпраця польських та українських вчених, виражена через велику кількість спільних публікацій, що є пріоритетом обох країн. Також вчені обох країн успішно співпрацюють зі своїми колегами з Німеччини та США (табл. 2). Логічно пояснити, що є спільні дослідження як сусідніх держав, так і високотехнологічних, які володіють найсучаснішим обладнанням.

Кількість публікацій про фотоелектрику суттєво відрізняється в обох країнах: 2 292 представлені польськими вченими та 1 370 українськими. H-індекси для польських та українських вчених відповідно 66 та 38. Це майже на 50 % вище для польських видань. Це означає, що публікації українських вчених, які часто мають дуже високий науковий рівень, все ще 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.

Нормалізовані значення h-індексу публікацій українських та польських вчених практично однакові за величиною для напрямку «Фотоелектрика». Тобто можна зробити висновок, що якість наукових публікацій у високотехнологічних фундаментальних напрямках майже однакова для науковців обох країн.

Основні наукові напрямки за ключовим словом «Photoelectricity» зображені на рис. 2. Важливо зазначити, що за напрямком «Фотоелектрика» дослідження польських вчених в основному зосереджені на фундаментальних дослідженнях (Фізика та Матеріалознавство), тоді як для України є певний зсув пріоритету на прикладні дослідження (Інженерія та Фізика). Тобто, значні та визнані технічні рішення є більш специфічними для України. Це стосувалося фотоелектричних досліджень для військових чи космічних цілей. Вони часто мали прикладний аспект і не були спрямовані на публікацію наукових досягнень. Після переорієнтації держави на мирні завдання часто представники найвідоміших установ (Харків, Київ) демонстрували

чималу кількість публікацій про технічні аспекти роботи фотоелектричних систем або проектування ліній для їх виробництва. Але поки що склалася спільна робота, і в результаті з'являються спільні публікації високого рівня.

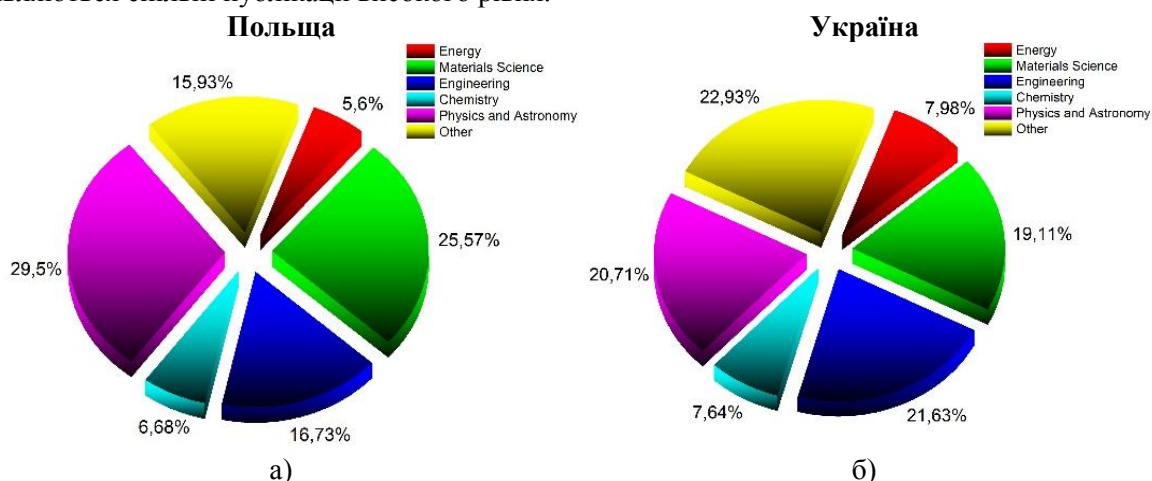


Рис. 2. h-індекси публікацій за науковими напрямками в сонячній фотоелектриці (Solar Photovoltaic) (а) для наукових робіт Польщі, а (б) – український науковців

Тому з 2016 року кількість спільних українсько-польських видань щороку збільшується. Якщо розглядати окремо кількість опублікованих праць у Польщі та Україні за тегом «Solar Photovoltaics» за 2019 рік, то можна зазначити, що в Польщі опубліковано 158 робіт, тоді як в Україні лише 64.

Висновки. Для ефективного розвитку та впровадження відновлювальної енергетики необхідно враховувати різні фактори одночасно. За короткий термін впровадження відновлювальних джерел енергії визначається економічним фактором та наявністю певних інвестицій у зелену енергію. Однак довгострокова перспектива вимагає розробки нових, екологічно чистих та ефективних досліджень та створення можливостей для їх впровадження.

В усьому світі жодна держава не може самостійно вирішити питання відновлення зеленої енергії. Для розвитку міжнародної співпраці було зроблено світовий аналіз та двох сусідніх країн Польщі та України. Крім їх близького географічного положення, існують значні відмінності в економічній та законодавчій системах. Такий аналіз є типовим прикладом розвитку співпраці між державами на кордоні ЄС.

Якість досліджень можна довести на основі якісних наукових публікацій у рецензованих журналах. Кількість та вплив таких наукових публікацій свідчать про потенціал наукових колективів, їх актуальність та можливість впровадження.

Нормалізований h-індекс вказує на те, що у сферах фундаментальних матеріалознавчих досліджень в галузі енергетики практично на одному рівні, незалежно від того, є держава членом ЄС чи ні. Фундаментальні дослідження мають високий пріоритет майже скрізь, тоді як прикладні дослідження, які потребують складних установок для їх тестування або дорогого імітаційного програмного забезпечення, ефективніше впроваджуються в країнах ЄС.

Інформаційні джерела

1. Burke M.J., Stephens J.C. Political Power and Renewable Energy Futures: A Critical Review. *Energy Res. Social Sci.* 2018. Vol. 35. P. 78–93. DOI: 10.1016/j.erss.2017.10.018.
2. 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.
3. 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
4. Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2018. 160 p.
5. O'Regan B., Grätzel M. A Low-cost, High-efficiency Solar Cell Based on Dye-sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature.* 1991. Vol. 353. P. 737–740. DOI: 10.1038/353737a0

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. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Perez M.A., Leon J.I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters. IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. Vol. 57, № 8. P. 2553–2580. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049719
8. Pron A., Gawrys P., Zagorska M., Djurado D., Demadrille R. Electroactive Materials for Organic Electronics: Preparation Strategies, Structural Aspects and Characterization Techniques. Chem. Soc. Rev. 2010. Vol. 39, № 7. P. 2577–2632. DOI: 10.1039/B907999H
9. Yuan J., Zhang Y., Zhou L. [et al]. Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core. Joule. 2019. Vol. 3, № 4. P. 1140–1151. DOI: 10.1016/j.joule.2019.01.004
10. Pihosh Y., Turkevych I., Mawatari K. [et al]. Photocatalytic Generation of Hydrogen by Core-shell WO₃/BiVO₄ Nanorods with Ultimate Water Splitting Efficiency. Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 11141. DOI: 10.1038/srep11141
11. Kislyuk V.V., Dimitriev O.P. Nanorods and Nanotubes for Solar Cells. J. Nanosci. Nanotechnol. 2008. Vol. 8, № 1. P. 131–148. DOI: 10.1166/jnn.2008.N16
12. Wisz G., Virt I., Sagan P., Potera P., Yavorskyi R. Structural, Optical and Electrical Properties of Zinc Oxide Layers Produced by Pulsed Laser Deposition Method. Nanoscale Res. Lett. 2017. Vol. 12. P. 253–259. DOI: 10.1186/s11671-017-2033-9

Никируй Л.И.¹, канд. физ.-мат. наук, Замуруева О.В.², канд. физ.-мат. наук, Новосад А.В.², канд. физ.-мат. наук, Федосов С.А.², д-р физ.-мат. наук

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

²Волинський національний університет імені Леси Українки

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе проанализированы публикации авторитетных мировых ученых и из двух стран – Украины и Польши в области «Фотоэлектричество / Фотовольтаика», чтобы найти закономерности как развития этого направления в каждом государстве, так и определить перспективы для совместных исследований. Анализ основывается на результатах данных, опубликованных в международных научных базах данных Web of Science и Scopus. Выявлено современные области исследований в каждой стране, проанализированы как теоретические, так и прикладные исследования, направленные на практическое применение.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрика, фотовольтаика, солнечные элементы, h-индекс.

Nykyruy L.I.¹, Cand. Sc. (Phys. & Math.), Zamurujeva O.V.², Cand. Sc. (Phys. & Math.), Novosad O.V.², Cand. Sc. (Phys. & Math.), Fedosov S.A.², Dr. Phys. & Math. Sc.

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University

²Lesya Ukrainka Volyn National University

PROSPECTIVE SOLAR CELLS MATERIALS AND TECHNOLOGIES

The paper analyzes the publications of authoritative world scientists and from two countries – Ukraine and Poland in the fields of «Photoelectricity / Photovoltaic» in order to find regularities in both the development of these areas in each state and to determine the prospects for joint research. The analysis is based on the results of data published in the international scientific databases Web of Science and Scopus. The most advanced areas of research in each country are identified, both theoretical and applied research are analyzed, aimed at practical application.

Keywords: renewable energy, photoelectricity, photovoltaic, solar cells, h-index.