

УДК 339.926

JEL Classification: F10, F52, F63, F64, F68

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.172153

ПОРІВНЯННЯ ВАРТОСТІ ВИРОБНИЦТВА, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ, ЯДЕРНОЇ ТА НЕВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кричковський Т. О.

1. Вступ

На сьогоднішній день можна спостерігати, що існує багато технологій для виробництва електроенергії, такі як традиційна енергетика, відновлювальна енергетика, атомна енергетика та інші. Можна спостерігати, що кожен вид виробництва електроенергії має переваги та недоліки. Наприклад, ядерна енергетика є однією з найдешевших у виробництві, однак є мабуть найдорожчою при утилізації. Також і відновлювальна енергетика та енергетика з викопного палива має схожі питання. Сьогодні існують різні методи оцінювання вартості енергетики, однак існує брак комплексних досліджень, які б зробили цю оцінку загальною, а не лише з певних аспектів вартості енергетики. Тому актуальним є дослідження, присвячене комплексній оцінці вартості виробництва енергії, що дозволить визначити, який вид енергетичних технологій на сьогодні є найкращим та найдешевшим.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є методи порівняння вартості виробництва, експлуатації та утилізації відновлювальної, ядерної та невідновлювальної енергетики. Одним з найбільш проблемних місць у визначенні того, яка енергетична технологія є найдешевшою є те, що різні автори зосереджуються на різних аспектах оцінки джерел енергії. Деякі вчені зосереджувалися виключно на вартості будівництва електростанції певного типу, інші на вартості утилізації або вартості експлуатації. Однак, не існує єдиного підходу, який дозволив би усунути недоліки попередніх досліджень, та оцінити вартість різних енергетичних ресурсів комплексно.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення того, яка енергетична технологія є найдешевшою.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні буде виконано такі задачі:

1. Проаналізувати вартості виробництва, використання та утилізації відновлювальної, ядерної та невідновлювальної енергетики.
2. Визначити, яка технологія є найдешевшою та має найбільше переваг.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Проводячи огляд літератури та досліджуючи підходи, які використовують різні вчені для аналізу та порівняння різних енергетичних технологій, можна

сказати, що існує багато підходів для порівняння різних видів виробництва електроенергії. Наприклад, автори робіт [1, 2] розглядають це питання з точки зору порівняння вартостей виробництва енергетичних технологій, однак не приділяють уваги таким важливим аспектам утворення ціни, як утилізація та вартість створення технології. Автори досліджень [3] зробили спробу визначити, яка технологія є найефективнішою за допомогою показника EROI (ефективності технології), однак не включив питання ціни до свого дослідження. Автори дослідження [4] на основі 8 індикаторів намагалися дати відповідь на питання про те, який вид енергії є найкращим. Серед цих індикаторів був також і критерій ціни, однак питання ціни у даній роботі не було розкрито достатньо широко. Наступні автори дослідження [5] вважають, що коливання цін на нафту веде до зростання популярності енергії з відновлювальних джерел та може по різному впливати на країни-експортери та країни-імпортери нафти. Ще інші автори у своїх працях [6, 7] зосереджувалися на окремих аспектах виробництва енергетики, наприклад, на утилізації, та не розглядали весь процес утворення ціни комплексно. Варто також відзначити, що багато інформації було взято з досліджень та статистичних даних таких відомих міжнародних організацій та компаній, як:

- IRENA [8, 9];
- British Petroleum [10];
- IEA;
- Агентство по енергетичній інформації США (U.S. EIA) та інші.

5. Методи досліджень

При дослідженні були використані наступні наукові методи:

- метод аналізу – при вивченні літератури;
- метод спостереження – при аналізі різних енергетичних технологій;
- метод порівняння – при порівнянні різних підходів до оцінки вартості енергетики;
- метод узагальнення – при аналізі отриманих даних.

6. Результати дослідження

Як слушно зазначає автор роботи [11], ефективна енергетична, технологічна стратегія повинна балансувати між встановленням стабільних, довготривалих основ для інновацій, а також, в той самий час, повинна відповідати на більш нагальні зміни у вартості технології та ефективності.

Тому вважаємо, що для порівняння різних технологій виробництва електрики порівняння енергетичних технологій лише за одним критерієм є недостатнім. У цьому розділі, пропонується порівнювати енергетичні технології за трьома критеріями на основі ціни:

1. Вартість виробництва технології.
2. Вартість палива для певного виду електростанції.
3. Вартість утилізації або переробки відходів від діяльності електростанції.

Це допоможе знайти найдешевшу та найбільш екологічно чисту технологію виробництва електроенергії, яка доступна сьогодні.

Отже, першим критерієм, за яким будемо оцінювати різні технології є вартість створення самої технології. Для порівняння було обрано вартість створення вітрової турбіни (як приклад відновлювальної енергетики), будівництво теплоелектростанції, яка працює на вугіллі або на рідкому паливі (традиційна енергетика), будівництво атомних електростанцій (ядерна енергетика).

На даний час вітрова енергетика є однією з найдешевших технологій виробництва енергії з відновлювальних джерел, тому був обраний саме цей тип енергії для порівняння.

За останні 30 років вартість вітрової енергії значно зменшилася, завдяки скороченню капітальних витрат і покращенню продуктивності. Різні фактори дозволяють припустити, що найнижча ціна на вітрову енергію буде продовжувати падати в довгостроковій перспективі. За більшістю недавніх оцінок вважається, що ціни на вітрову енергію можуть впасти ще на 20–30 % протягом наступних двох десятиліть [11]. Зокрема у звіті Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики за 2017 р. [8] йдеться про те, що ціни на турбіни та на наземну вітрову енергетику знижуються з кожним роком. За останні 30 років вартість наземної вітрової енергетики значно знизилась, згідно з базою даних IRENA про витрати на проекти на наземну вітрову енергетику з 1983 по 2016 рр.

На основі цих даних було створено графік (рис. 1) для того, щоб побачити і зрозуміти динаміку цін на вітрову енергетику та турбіни.

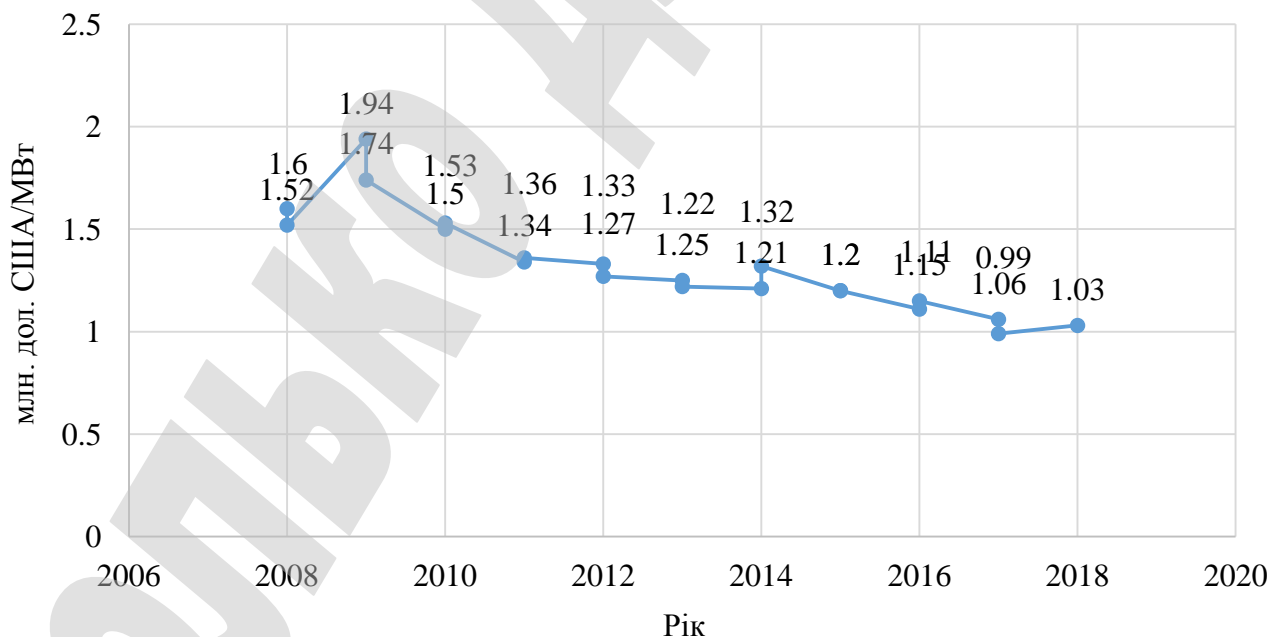


Рис. 1. Ціна турбіни за датою доставки (складено автором на основі [12])

Дослідження [12] показує, що загальна середньозважена вартість електроенергії або повна приведена вартість електроенергії (LCOE) для наземного вітру знизилася з 85 доларів за МВт в першій половині року до 83 доларів у другій половині року. А для кристалічного кремнію фотовольтаїчна сонячна енергія знизилася з 129 доларів до 122 доларів.

Для прикладу пропонуємо розглянути динаміку цін на викопне вугілля. Для порівняння було обрано вугілля, тому що вугілля є одним з ресурсів, яке найчастіше використовується для виробництва електрики. Наприклад, у структурі виробництва електроенергії у таких країнах, як Німеччина та США на енергію вироблену з вугілля припадає більше 50 % [13].

Майбутнє спалювання викопного палива передбачає використання технології захоплення та зберігання вуглецю (carbon capture and sequestration – CCS) для того, щоб відповідати міжнародним цілям обмеження глобального потепління в атмосфері. Це значно збільшить капітальні витрати на такі установки. Найдешевший такий варіант з сучасною технологією з CCS, який, як очікується, буде коштувати 1720 дол. США/кВт. Вугільна електростанція з внутрішнім циклом газифікації згорання вугілля, на основі спалювання вугілля, з CCS технологією коштує 3427 дол. США/кВт, практично в два рази більше, ніж електростанція, яка працює на газі [10].

Важливим фактором у виробництві електроенергії на ТЕС є також ціни на вугілля. Тому, також було наведено динаміку цін на вугілля, на якому працюють теплоелектростанції (ТЕС), рис. 2.

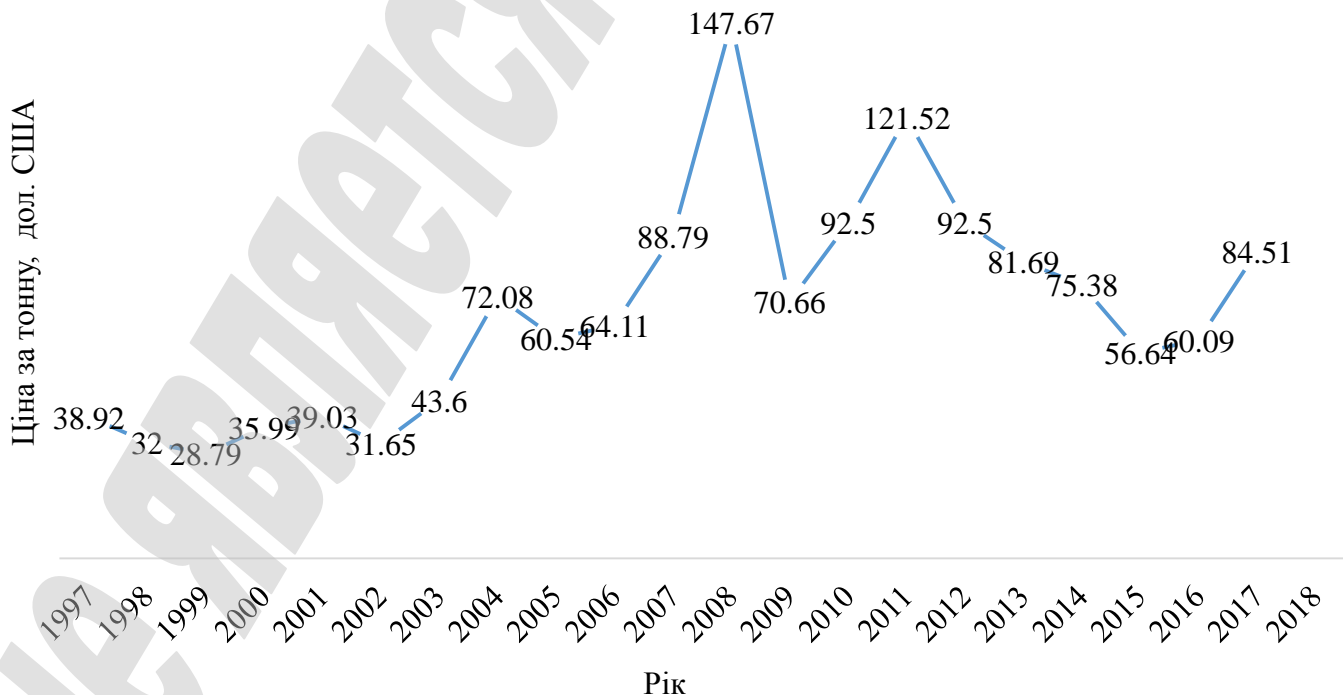


Рис. 2. Динаміка цін на кам'яне вугілля (складено автором за даними [13])

Інколи зазначають, що ціни на вугілля можуть мати значний вплив на ціну урану, оскільки обидва ресурси використовуються для виробництва електрики, а також попит та ціна на один вид ресурсу може відобразитися і на ціні та попиті на інший ресурс. Тому наступним енергетичним ресурсом, для порівняння, було обрано саме атомну енергетику.

Як приклад можна навести будівництво нового реактора у Фінляндії – реактор Olkiluoto 3. Вперше проект був поданий у 2000 р. у Кабінет міністрів Фінляндії, а будівництво розпочалося у 2005 р. Спочатку передбачалося завершити проект до 2010 р. з бюджетом приблизно 2,8 млрд. євро. Однак, реактор досі не введено в експлуатацію, а недавні підрахунки кошторисів витрат перевищують 8,5 млрд. євро [1].

Згідно з дослідженнями, проведеними Управлінням по енергетичній інформації США, собівартість будівництва для сучасної атомної електростанції з номінальною потужністю 2,234 мВт є 5945 дол./кВт [14].

Також, для порівняння з відновлювальною енергетикою та викопними видами палива доцільно навести динаміку цін на уран, який є основою для роботи атомних електростанцій (АЕС), рис. 3.

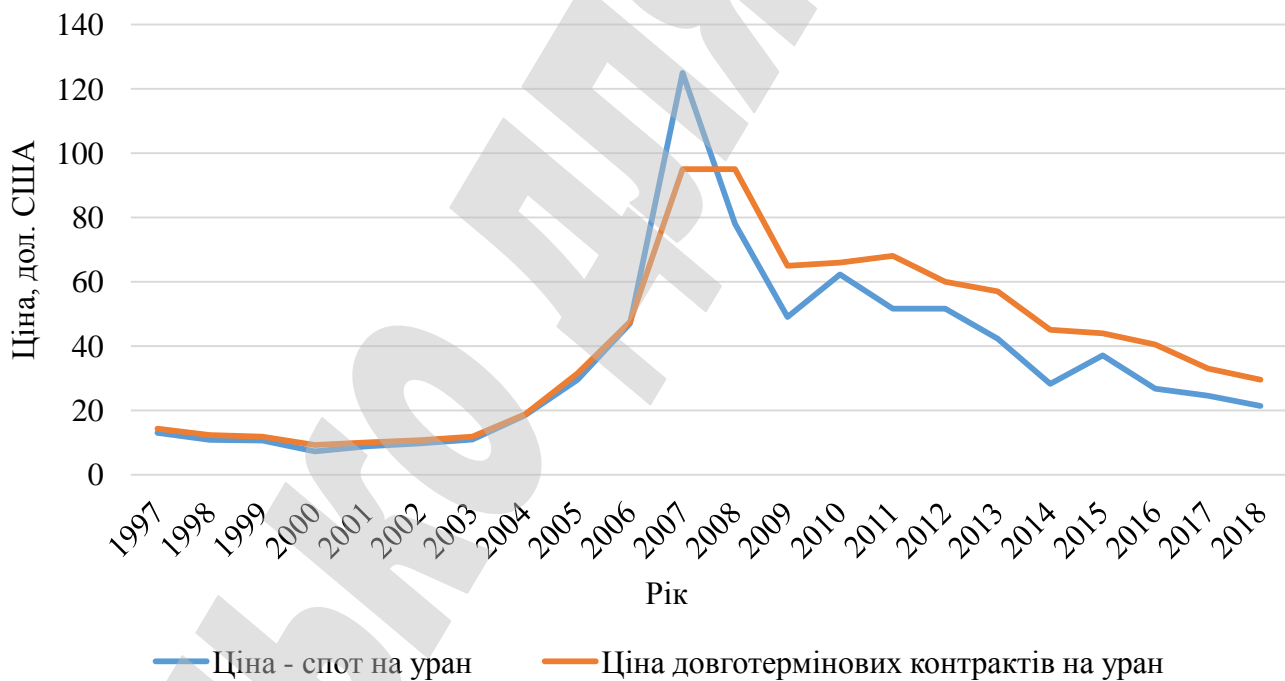


Рис. 3. Динаміка цін уран (складено автором за даними [14])

На основі проведених досліджень можна порівняти різні види енергетичних ресурсів за ціновим критерієм. Для прикладу, середня ціна виробництва вітрової турбіни становила 1730 дол./кВт у 2017 р. Для будівництва ТЕС, яка працює на вугіллі та яка оснащена звичайними системами контролю викидів, вартість буде 2078 дол./кВт. Більш технологічна електростанція з технологією захоплення та

зберігання вуглецю буде коштувати 3427 дол./кВт. Середня вартість для будівництва потужностей для виготовлення 1 кВт на АЕС становитиме в середньому 5945 дол./кВт. Слід додати, що спостерігається тренд із зниження цін на вітрові турбіни та із збільшення цін на будівництво та введення в експлуатацію ТЕС та АЕС.

З точки зору ціни на енергоресурси, відновлювальні джерела енергії мають значну перевагу над традиційними, оскільки, здебільшого, не потребують палива в процесі роботи.

Коли мова йде про витрати, пов'язані з використанням певного енергетичного ресурсу, доцільно також згадати не лише про вартість виробництва певної технології та витрати на паливо, яке потрібне для виробництва енергії. Також варто пам'ятати і про вартість утилізації відходів, які утворюються при виробництві електроенергії та самого заводу або установки. Утилізація також стосується і технологій відновлювальної енергетики. Адже і сонячні батареї, і вітрові установки мають свій термін експлуатації.

Як приклад, можна навести утилізацію сонячних панелей, адже на відміну від вітрових установок, сонячні панелі містять також такий хімічний елемент, як кремній, який потребує додаткової уваги при утилізації.

Коли мова йде про утилізацію сонячних панелей, то різні вчені виділяють дещо відмінні способи поведінки із сонячними панелями після терміну їх придатності. Наприклад, автори роботи [15] називають таких 4 способи обходження із сонячними панелями:

1. Відправлення на сміттєзвалище.
2. Спалювання.
3. Повторне використання.
4. Переробка.

Говорячи про переробку сонячних панелей, то вартість переробки суттєво знизилася за останні 20 років. Наприклад, у 2004 р. вартість переробки становила 0,12 дол./кВт [16]. А у 2018 р. вартість переробки оцінювалася у 0,045 дол./кВт згідно з даними ІЕА [17].

Інші вчені оцінюють вартість переробки за тону сонячних панелей. Наприклад, автор роботи оцінює цю вартість у 200 євро/т [17].

Багато вчених вважають, що переробка сонячних панелей може перетворитися у доволі значний ринок. За попередніми оцінками вважається, що сировина, яка буде видобуватися в процесі переробки може сукупно досягнути значення у 450 млн. дол. США до 2030 р. [18].

Вважається, що для порівняння доцільно порівняти вартості утилізації відходів ТЕС та ядерної енергетики також.

На відходи ТЕС потрібно звернути особливу увагу, адже на ТЕС виробляється приблизно 63 % електроенергії у всьому світі, гідроелектростанціями 19 % і АЕС 17 % [19].

Автори роботи [19] стверджують, що при переробці 100 тис. т відходів можна отримати 10–12 тис. т. вторинного вугілля, 1,5–2 тис. т. залізорудного

концентрату, 20–60 кг золота, 60–80 тис. т будівельного матеріалу (інертна маса). Це все створює доволі значний ринок для переробки відходів із ТЕС.

Наступною групою відходів, яку було проаналізовано є відходи АЕС. Особливістю радіоактивних відходів є те, що на відміну від відходів ТЕС, ці відходи не піддаються переробці і не відомо чи зможуть бути перероблені чи якось використані у майбутньому. Хоча деякі вчені припускають, що плутоній, потенційно, може бути хімічно іммобілізовано (два найбільш імовірних матеріали є скло та кераміка) [20]. Проте, поки що прикладів такого використання немає.

Найбільшим сховищем радіоактивних відходів у Британії є Селлафілд. Автори дослідження [20] дійшли до висновку, що платники податків витрачають, щороку більше 2,5 мільярдів фунтів стерлінгів на обслуговування та підтримання цього сховища. Варто згадати також і про величезні кошти, які було витрачено на будівництво цього сховища, а також затрати, які будуть необхідні для виведення його з експлуатації (приблизно через 100 років). Національне ревізійно-фінансове управління Британії та Ірландії оцінює ці суми у 49 та 67 мільярдів фунтів стерлінгів, відповідно.

Пропонується проаналізувати отримані результати дослідження за допомогою SWOT-аналізу (табл. 1–3).

Таблиця 1

SWOT-аналіз відновлювальної енергетики (ВДЕ)

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> 1. Динаміка із зменшення цін на вироблену енергію. 2. Відсутність палива для виробництва енергії. 3. Нижчі затрати на встановлення установок відновлювальної енергії у порівнянні з традиційною та ядерною енергетикою. 4. Доступність та легкість у переробці або повторному використанні. 5. Підтримка урядів. 6. Екологічність 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Висока поточна вартість енергії виробленої за допомогою ВДЕ. 2. Практично відсутня інфраструктура для переробки відпрацьованих установок ВДЕ (сонячних панелей, вітряків і т. д.). 3. Невелика частка у загальній структурі енергоспоживання
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> 1. Встановлення нових потужностей ВДЕ. 2. Великий ринок для переробки відпрацьованих установок ВДЕ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Великий вплив на сектор урядових субсидій. 2. Для переходу на ВДЕ потрібний певний час

Таблиця 2

SWOT-аналіз традиційної енергетики

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Невисока ціна виробленої енергії. 2. Велика частка у загальній структурі виробництва енергії. 3. Переробка відходів діяльності ТЕС	1. Висока вартість будівництва, підтримки та виведення з експлуатації електростанцій на традиційному паливі. 2. Зростання цін на паливо для ТЕС. 3. Негативний вплив на навколишнє середовище. 4. Залежність від постачальників енергетичних ресурсів
Можливості	Загрози
1. Диверсифікація імпорту енергетичних ресурсів для пального на ТЕС	1. Забруднення навколишнього середовища. 2. Викиди парникових газів. 3. Загроза опинитися без палива для електростанцій

Таблиця 3

SWOT-аналіз ядерної енергетики

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Значна частка у загальній структурі виробництва енергії. 2. Невисока вартість виробленої енергії. 3. Екологічність в процесі виробництва	1. Дорога технологія для зведення, експлуатації та припинення виробництва енергії. 2. Залежність від постачання ядерного палива. 3. Неможливість переробки відходів АЕС
Можливості	Загрози
1. Перехід на низько збагачений уран. 2. Розроблення нових, більш безпечних технологій виробництва енергії за допомогою урану	1. Загрози катастроф на АЕС

На основі опрацьованих даних можна зробити висновок, що для кожного виду енергетичних ресурсів існують певні переваги та недоліки. Однак, найбільше переваг на даний момент має відновлювальна енергетика.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Сильним сторонами дослідження є комплексний підхід до вивчення проблеми, а також конкретні отримані результати в кінці дослідження. В

порівнянні з аналогами це допомагає нам дивитися на проблему ширше та краще розуміти цінові характеристики енергетичних технологій.

Weaknesses. Отримані результати потребують подальших допрацювань. Потрібно буде розглянути питання оцінення енергетичних ресурсів, більш детально, включивши більше факторів, що дозволить отримати ще точніші результати.

Opportunities. Результати отримані в дослідженні допоможуть фахівцям точніше оцінювати ризики та перспективи при виборі певної енергетичної технології. Це дозволить приймати більш правильні рішення у проектах втілення енергетичних об'єктів.

Threats. Для використання результатів дослідження, можуть бути певні перешкоди. Перш за все для переходу на відновлювальні джерела енергії потрібний певний час та кошти. Часто уряди все ще вибирають старі та неефективні технології, які можуть здаватися на перший погляд дешевші.

8. Висновки

1. В результаті проведеного дослідження, було виявлено плюси та мінуси кожного з вище перелічених джерел енергії та з'ясовано, чому один вид енергії може бути водночас ефективніший в деяких показниках, та менш ефективним в інших. Так наприклад, традиційна енергетика має невисоку ціна виробленої енергії та велику частка у загальній структурі енергетики, але водночас чинить негативний вплив на навколишнє середовище та сприяє залежності від постачальників енергетичних ресурсів. Схожі переваги та недоліки має і ядерна енергетика.

2. На основі проведеного SWOT-аналізу можна побачити, що найбільше переваг та перспектив має відновлювальна енергетика, а зокрема, вітрова та сонячна. Це зокрема:

- динаміка із зниження цін на відновлювальні технології;
- підтримка урядів;
- відсутність палива для виробництва енергії;
- нижчі затрати на встановлення установок відновлювальної енергії у порівнянні з традиційною та ядерною енергетикою;
- доступність та легкість у переробці або повторному використанні.

Література

1. Ram M., Child M. Comparing electricity production costs of renewables to fossil and nuclear power plants in G20 countries. Lappeenranta University of Technology (LUT), 2017. P. 1–84.
2. Candelise C., Winkler M., Gross R. J. K. The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 26. P. 96–107. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.012>
3. Raugei M., Fullana-i-Palmer P., Fthenakis V. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles // Energy Policy. 2012. Vol. 45. P. 576–582. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.008>

4. Evans A., Strezov V., Evans T. Comparing the sustainability parameters of renewable, nuclear and fossil fuel electricity generation technologies // Proceedings of the 21st World Energy Congress. London: World Energy Council, 2010. P. 1–19.
5. Deniz P. Oil Prices and Renewable Energy: Oil Dependent Countries. URL: https://editorialexpress.com/cgi-bin/conference/download.cgi?db_name=MEEA18&paper_id=49
6. Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules / Lunardi M., Alvarez-Gaitan J., Bilbao J., Corkish R. // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, Issue 8. P. 1396. doi: <http://doi.org/10.3390/app8081396>
7. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels / Latunussa C. E. L., Ardente F., Blengini G. A., Mancini L. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. Vol. 156. P. 101–111. doi: <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>
8. Renewable Power Generation Costs in 2017 / Ilas A., Ralon P., Rodriguez A., Taylor M. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018. 160 p.
9. Weckend S., Wade A., Heath G. End of Life Management, Solar Photovoltaic Panels. IRENA, 2016. 100 p.
10. BP Statistical Review of World Energy. BP p.l.c., 2018. 56 p.
11. Lantz E., Hand M., Wiser R. The Past and Future Cost of Wind Energy: Preprint // 2012 World Renewable Energy Forum Denver. Colorado: NREL, 2012. P. 1–10.
12. Uranium Price. 2019. URL: <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>
13. Енергетика. 2018. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%>
14. Binek A., Petrus M. L., Huber N., Bristow H., Hu Y., Bein T., Docampo P. Recycling Perovskite Solar Cells To Avoid Lead Waste // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 8, Issue 20. P. 12881–12886. doi: <http://doi.org/10.1021/acsami.6b03767>
15. Fthenakis V. M. Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2004. Vol. 8, Issue 4. P. 303–334. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.001>
16. Komoto K., Lee J. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies: Report IEA-PVPS T12-10:2018. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program, 2018. 105 p.
17. Dziedzioch V., Felix J. Recycling of Silicon Based Photovoltaic Modules. Energimyndigheten, 2018. 32 p.
18. Хлопицький О., Макарченко Н. Перспективи розвитку переробки твердих шлакових відходів теплових електростанцій у готові продукти // Праці Одеського політехнічного університету. 2013. Вип. 3 (42). С. 91–94.
19. Cotton M. Nuclear waste politics: monograph. London: Routledge, 2017. 71 p.
20. Morse A. Managing Risk Reduction at Sellafield. London: National Audit Office, 2012. 50 p.