

ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ТА ПРОБЛЕМИ ПЕРЕРОБЛЕННЯ НЕПРИДАТНИХ ВІТРОВИХ УСТАНОВОК

Лопушанська М.Р., Іванов Є.А.

Львівський національний університет імені Івана Франка

вул. Університетська, 1, 79007, м. Львів

mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua, yevhen.ivanov@lnu.edu.ua

На шляху до декарбонізації виробництва виникає питання впровадження альтернативних джерел енергопостачання. Активний розвиток нетрадиційної (відновлюваної) енергетики розпочався на початку 2000-их років. У глобальному розвитку відновлюваної енергетики важливе місце займає вітрова енергетика. Розробники вітрових установок пропонують сучасніші моделі із турбінами, що виробляють понад 6 МВт електроенергії, зменшують залежність турбін від сили і швидкості вітру та гарантують від 20 до 30 років їх експлуатації. Водночас вітрові турбіни виходять з ладу раніше гарантійного терміну через поломки ротору і лопатей. Проблема повторного використання лопатей та їх повної або часткової утилізації гостро стоїть у багатьох країнах світу. Окремі частини турбіни вміщують різні матеріали, які потребують перероблення, зокрема залізо (сталі), алюміній, мідь, скловолокно, епоксидна смола, пластик, акумуляторні батареї, мастило, фарба та ін. Обраний спосіб перероблення залежить від матеріалу комплектуючих частин вітрових установок. Науковці розробляють методи перероблення композиційних матеріалів, які входять до складу лопатей та які важко відокремити між собою. Для перероблення сталі, алюмінію і міді, на які припадає понад 90 % компонентного складу вітрових турбін, існують методи повторного переплавлення. Ці методичні підходи дозволяють економити енергоресурси та забезпечити матеріал для вторинного використання.

У Львівській області вітрова енергетика почала розвиватись у 2014 р., коли введено в експлуатацію першу промислову ВЕС «Старий Самбір-1». Станом на березень 2022 р. у регіоні функціонує одна експериментальна і дві промислові вітрові електростанції. Промислові ВЕС обладнані 10 вітровими установками данського виробника «Vestas». Загальна потужність вітрових електростанцій становить 34,65 МВт. У Дрогобицькому і Стрийському районах здійснюється будівництво двох вітрових електростанцій. Запропоновані європейськими спеціалістами методи повторного використання вітрових турбін для потреб тактичного урбанізму та організації громадських просторів. Аналогічні проєкти варто реалізувати у Львівській області після виведення з експлуатації вітрових турбін. Створення нових громадських просторів збільшить туристичну привабливість міст у регіоні. *Ключові слова:* вітрова енергетика, вітрова електростанція, перероблення, утилізація, вітрова установка, турбіна, лопаті.

Wind energy in Lviv region and problems of recycling unusable wind turbines. Lopushanska M., Ivanov Ye.

On the way to decarbonization of production the reemerges the issue of introduction of renewable energy sources. The active development of non-traditional (renewable) energy began in the early 2000s. Wind energy plays an important part in the global development of renewable energy. Wind turbine developers offer more modern models with turbines producing more than 6 MW of electricity, reduce the dependence of turbines on wind force and speed, guarantee 20 to 30 years of their operation. At the same time, wind turbines start malfunctioning before the warranty period is up due to the failure of rotor and blades. The problem of reusing the blades as well as their full or partial disposal is acute in many countries of the world. Some parts of the turbine contain various materials that need to be recycled, including iron (steel), aluminum, copper, fiberglass, epoxy, plastic, batteries, oil, paint, etc. The method of processing depends on the material of the components of wind turbines. Scientists develop methods of processing composite materials, which are part of the blades and are difficult to separate. In order to process steel, aluminum and copper, which account for more than 90 % of the component composition of wind turbines, there are ways of remelting. These techniques save energy and provide material to be reused.

In the Lviv region, wind power began to develop in 2014, when the first industrial wind power plant Stary Sambir-1 was put into operation. As of March 2022, one experimental and two industrial wind power plants are in operation in the region. Industrial stations use 10 wind turbines from the Danish manufacturer «Vestas». The total capacity of wind power plants is 34.65 MW. Two wind power plants are under construction in Drohobych and Stryi districts. Presently, there exist methods of reusing of wind turbines for tactical urbanism and organization of public spaces proposed by the European specialists. Similar projects should be implemented in the Lviv region after the decommissioning of wind turbines. Creating new public spaces will increase the tourist attraction of cities in the region. *Key words:* wind energy, wind power plant, recycling, disposal, turbine, blades.

Постановка проблеми. У зв'язку з глобальними змінами клімату, все більше уваги приділяється виробництву електроенергії без викидів парникових газів, зокрема безвуглецевому її виробництву. Саме

тому, на початку 2000-их років розпочали активно обговорювати розвиток відновлюваної енергетики. Найбільшу увагу приділяли сонячній і вітровій енергетиці. Для багатьох країн така енергетика стала про-

ривом на шляху до декарбонізації, її активно стали впроваджувати. Інтенсивний розвиток вітрової енергетики в Україні припадає на 2015–2019 роки. Водночас, важливим та досі не врегульованим питанням в Україні, яке вже у найближчі роки стане актуальним, вважаємо перероблення та утилізацію комплектуючого обладнання непридатних вітрових установок, зокрема лопатей та елегазових вимикачів.

Актуальність дослідження. Для виробництва електроенергії на вітрових електростанціях (ВЕС), головне, необхідно визначити території з високим вітропотенціалом та змонтувати вітрову установку. Важливим елементом вітрової установки є лопаті (у більшості промислових вітряків їх три), від розміру яких залежить потужність вітрової установки. Вони приводять у рух вал вітрогенератора (вітрової турбіни) завдяки кінетичній енергії вітру [1]. Термін придатності турбіни становить 20–30 років. Для того, щоб вітрові турбіни генерували максимальні обсяги електроенергії, лопаті вкривають спеціальними речовинами, тому їх не можна утилізувати як звичайні відходи. На жаль, на законодавчому рівні питання утилізації специфічного обладнання від вітрової енергетики не врегульоване.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У 2014 р. Україна підписала з Європейським Союзом (ЄС) Угоду про асоціацію. У главі 6 «Навколишнє середовище» угоди зазначено, що співробітництво передбачає збереження, захист, поліпшення і відтворення якості навколишнього середовища в частині управління відходами і ресурсами (ст. 361), а законодавство України поступово зближуватись із законодавством ЄС у сфері охорони навколишнього середовища (ст. 363) [2].

В ЄС активно розвивається циркулярна економіка (економіка замкнутого циклу), яка передбачає зменшення негативного впливу на довкілля, зокрема в частині зменшення відходів виробництва та повторного використання, перехід з використання викопного палива на відновлювані джерела енергії [3].

Оскільки в Україні вітрова енергетика є молодого галуззю енергетики, то проблему утилізації комплектуючого обладнання вітрових установок нерідко вважають не актуальною. Попри те, що термін експлуатації вітрових установок залежно від виробника може змінюватися від 20 до 30 років, вже фіксуються випадки, коли лопаті стають не придатними для подальшої експлуатації через пошкодження раніше до цього терміну. Проте варто врахувати, що в Україні досі відсутні підприємства, які б могли утилізувати специфічне обладнання вітрової установки. У статті проаналізовано приклади можливого повторного використання та утилізації обладнання вітрових установок у різних країнах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні проблеми вітрової енергетики та перероблення комплектуючих частин вітрових установок

розглянуті у працях науковців Національної лабораторії з відновлюваної енергетики (США), зокрема О. Купермана, А. Ебарле, Е. Ланце [4]. Питання впливу відходів від вітрової енергетики на довкілля вивчають науковці з Канади і Великої Британії, зокрема Г. Хенг, Ф. Менг і Дж. МакКечні [5]. На сьогодні в українських дослідженнях мало вивчені розглянуті у статті питання, існують лише роботи Б. Мухи та І. Притули, присвячені вітровому потенціалу досліджуваного регіону [6]. Варто зазначити, що багато публікацій регулярно подають виробники вітрових турбін, описуючи можливості забезпечення повторного використання та мінімізації утворення відходів.

Метою роботи є вивчення досвіду інших країн щодо управління відходами від вітрових електростанцій та можливістю їхнього подальшого використання у вітровій енергетиці та інших галузях, запровадження локальних громадських просторів.

Новизна. У роботі визначено та узагальнено подальші способи управління відходами від вітрових електростанцій, наведено приклади реалізації методів перероблення та використання лопатей у міському середовищі, запропоновано шляхи управління відходами існуючих вітрових установок у Львівській області.

Методологічне значення. У роботі використано дані Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг [7], Департаменту паливно-енергетичного комплексу на енергозбереження Львівської ОДА [8], Єдиного реєстру з оцінки впливу на довкілля [9], а також інформацію з офіційних сайтів підприємств, які займаються будівництвом та експлуатацією об'єктів вітрової енергетики [10]. Здійснено аналіз та узагальнення зібраних даних. У роботі розглянуто вітрові електростанції Львівської області та можливі методи управління відходами після їхнього виведення з експлуатації. Дослідження є важливим для визначення подальших дій України на шляху до декарбонізації виробництва та забезпечення принципів циркулярної економіки.

Викладення основного матеріалу. Розвиток вітрової енергетики у Львівській області розпочато у 1997 р. із введенням в експлуатацію Східницької (Трускавецької) ВЕС, побудовану для вивчення ефективності функціонування вітрових електростанцій в Українських Карпатах. Це експериментальна вітрова електростанція із загальною встановленою потужністю 750 кВт, розташована поблизу селища Східниця. Станція налічує сім американських турбін типу USW 56-100, виготовлених в Україні за ліцензією [11].

У 2015 р. введено в експлуатацію першу чергу, а у 2016 р. – другу чергу ВЕС «Старий Самбір-1» загальною встановленою потужністю 13,2 МВт, яка генеруватиме електроенергію за “зеленим” тарифом до 2030 р. Це перша промислова вітрова електростанція у Західній Україні і гірському регіоні Українських

Карпат. У 2017 р. побудовано ВЕС «Старий Самбір-2» загальною потужністю 20,7 МВт (рис. 1). Отже, на сьогодні у Львівській області діють дві промислові та одна експериментальна ВЕС загальною потужністю 34,65 МВт (табл. 1) [11].



Рис. 1. ВЕС «Старий Самбір-2» (на задньому тлі – ВЕС «Старий Самбір-1») [10]

Для виробництва електроенергії від вітрової електростанції важливу роль відіграють вітрові установки (турбіни). Провідними виробниками вітрових турбін у світі вважаються чотири корпорації: «Vestas» (Данія), «Nordex» і «Siemens» (Німеччина), «General Electric» (США).

Діючі промислові вітрові електростанції у Львівській області обладнані десятима вітровими установками данського виробника «Vestas». Співвідношення матеріалів для турбін різної потужності відрізняються [12]. Компонентний склад матеріалів для виробництва вітрових турбін типів V112-3.3 і V126-3.45 становить відповідно: сталь і залізо – 87,0 і 89,0 % від загальної ваги, скло і вуглецеві композити – 7,1 і 5,7 %, полімерні матеріали – 2,8 і 2,7 %, алюміній і сплави – 1,0 і 1,3 %, електро-

ніка – 0,8 і 0,7 %, мідь і сплави – 0,7 і 0,6 %, мастило й флюїди – по 0,4 %.

Проаналізуємо головні характеристики встановлених вітрових турбін в межах Львівської області, які експлуатуються (див. табл. 1). Одинична встановлена потужність турбін змінюється від 3,3 до 3,45 МВт. Загальна кількість лопатей усіх промислових вітрових електростанцій становить 30 од., а очікувана маса відходів композитних матеріалів, що вже у недалекому майбутньому буде накопичено на Львівщині – 401,904 т.

Розглянемо потенційні способи перероблення та утилізації окремих частин вітрової установки та матеріалів, які їх складають (рис. 2) [13]. Окремі частини турбіни вміщують різні головні матеріали, зокрема залізо (сталь), алюміній, мідь, скловолокно, епоксидна смола, пластик, акумуляторні батареї, мастило, фарба та ін.

Власне сучасні технології оброблення матеріалів після завершення терміну служби турбін визначають обраний спосіб перероблення та утилізації вітрових установок. Наприклад, чорні і кольорові метали придатні для переплавлення і подальшого використання, тоді як скловолокно чи епоксидні смоли потребують складнішого перероблення, спалювання чи захоронення на сміттєзвалищах.

Загалом, на сьогодні у світі вже впроваджено або продовжують активно вивчати такі способи перероблення вітрових турбін (табл. 2). При цьому обраний спосіб перероблення залежить від матеріалу комплектуючих частин вітрових установок [14].

У Європейському Союзі суворо регульовані матеріали, що потрапляють на сміттєзвалища, тому окремі лопаті спалюють у котлах теплових електростанцій і печах цементних заводів. Зважаючи на слабкий і нерівномірний енергетичний вміст лопатей, при спалюванні скловолокно залишає забруднювачі речовини [17]. У свою чергу, заклики до

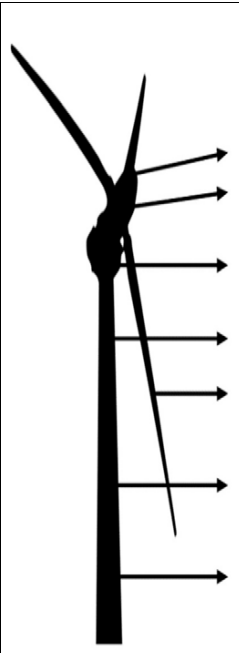
Таблиця 1

Головні характеристики вітрових турбін у Львівській області [10]

Вітрова електростанція	Місце розташування	Рік введення в експлуатацію	Кількість, тип і вага турбін	Одинична і загальна встановлені потужності, МВт	Загальна кількість лопатей	Очікувана маса відходів композитних матеріалів, т
Східницька (Трускавецька)	смт Східниця Дрогобицького р-ну	1997	сім, USW 56-100	0,75	–	–
Старий Самбір-1, перша черга	м. Старий Самбір Самбірського р-ну	2014	дві, V112-3.3, 438,0 т	$3,3 \times 2 = 6,6$	6	77,915
Старий Самбір-1, друга черга	м. Старий Самбір Самбірського р-ну	2016	дві, V112-3.3, 438,0 т	$3,3 \times 2 = 6,6$	6	77,915
Старий Самбір-2	с. Стрільбичі Самбірського р-ну	2017	шість, V126-3.45, 530,0 т	$3,45 \times 6 = 20,7$	18	246,074
Разом			17	34,65	30	401,904

заборони звалищ у ЄС прискорюють розвиток технологій рециркуляції та зростання попиту на перероблені матеріали. Наприклад, датський вітроенер-

гетичний гігант “Vestas” поставив кінцевою метою зробити лопать на 100 % придатною для вторинного перероблення [18].



Частина турбіни	Головні матеріали	Оброблення після завершення терміну служби
Маточина	Залізо	Перероблення (переплавлення)
Ковпак ротора	Скловолокно, епоксидна смола або сталь	Перероблення, спалювання чи сміттєзвалище
Гондола	Сталь, постійні магніти, блок управління процесами, батареї	Перероблення твердих частинок, спалювання чи сміттєзвалище
Платформи і сходи	Алюміній	Перероблення (переплавлення)
Лопаті	Скловолокно, епоксидна смола і коркове дерево	Перероблення твердих частинок, спалювання чи сміттєзвалище
Кабелі та шини	Пластик, мідь і алюміній	Перероблення (переплавлення)
Вежа (башта)	Сталь	Перероблення (переплавлення)
Інше	Мастило, фарба, каучук, пластик	Перероблення, спалювання чи сміттєзвалище

Рис. 2. Потенційні способи перероблення та утилізації окремих частин вітрової установки [13]

Таблиця 2

Способи перероблення матеріалів комплектуючих частин вітрових установок [14]

Матеріал комплектуючих частин	Спосіб перероблення
Сталь, залізо	Повторне перероблення, подальше використання. Збільшення частоти перероблення знижується якість сталі, а видалення домішок вимагає збільшення фінансових витрат. При демонтажі турбін приблизно 10 % сталі (заліза) залишається закопаним у землю або вивозиться на звалище разом із бетоном
Бетон	Після демонтажу 100 % відходів вивозять на звалище. Розглядається варіант, коли фундаменти залишаються у землі без демонтажу
Композиційні матеріали	Складені з вугле- і склопластику. Складно переробити, відокремити армуючі волокна і полімерні смоли, тому переважає захоронення. Розроблюють екологічні варіанти поводження з цими відходами
Мідь	Повторне перероблення, вимагає на 85 % менше енергії від виробництва первинної міді. Мідь підземних кабелів не переробляють, вона залишається закопаною. Отримують до 90–95 % продукту
Алюміній	Повторне перероблення, вимагає на 95 % менше енергії від виробництва первинного алюмінію
Пластик	Повторне перероблення можливе лише один–два рази, після підлягає утилізації. Спосіб перероблення залежить від типу пластику, має власну швидкість перероблення і специфічні властивості, які визначають термін служби. Пластик використовують в електроніці, кабелях і лопатях. Типи та обсяги пластику невідомі і відрізняються у різних конструкціях турбін

Спеціалісти Національної лабораторії з відновлюваної енергетики (США) визначили методи досягнення циркулярної економіки для вітрової енергетики [15]. Виробництво і зберігання відновлюваної енергії стає центральною віссю економіки чистої енергії. Нові матеріали і технології гарантують продовження терміну експлуатації та уникнення проблем перероблення вітрових установок.

Особливо важливим є процес перероблення лопатей вітрових установок. На сьогодні у багатьох країнах накопичено досвід їхнього перероблення. Наприклад, співробітники фірми “Carbon Rivers” і вчені Університету Теннессі (США) виведені з експлуатації лопаті вітрових турбіни механічно розбивають на невеликі шматочки, а потім за допомогою піролізу (термічного розкладання) отримують високоякісне скловолокно, яке використовують для виробництва композитів другого покоління для автомобільної, морської та аерокосмічної промисловості [16] (рис. 3а).

Стартап “Global Fiberglass Solutions” розробив метод розбиття лопатей та пресування їх у гранули і волокнисті плити, які використовують для заповнення підлоги і стін (див. рис. 3б). Запропоноване циркулярне рішення спрямоване на захоронення відходів зі скловолокна та зменшення вуглецевого

сліду у світі [19]. Вчені Орхуського університету (Данія) розробляють хімічний розчинник, який розділить композитні матеріали, виокремить окремо скло від пластикових волокон, що дозволить їх переробити [20].

У США лопаті розрізають та зберігають на спеціальних звалищах лопатей. Американська асоціація вітроенергетики стверджує, що зберігання лопатей на спеціальних звалищах є найбезпечнішим і найдешевшим виходом із ситуації (див. рис. 3в) [21].

Загалом, до проблем повторного перероблення (утилізації) лопатей відносять значну собівартість робіт, складність відокремлення скловолокна від інших компонентів у складі лопатей та відсутність технологій, які б забезпечили ефективне повторне використання. Оскільки нині відсутні технології повного перероблення, які мінімізують вплив на довкілля, деякі країни використовують обладнання вітрових електростанцій для інших цілей.

Питання перероблення та утилізації відходів непридатних вітрових установок в Україні наразі не розглядається. Проаналізуємо досвід управління відходами від вітрових електростанцій, який накопичено у Великій Британії. Частка перероблених матеріалів комплектуючих частин вітрових установок суттєво відрізняється. На сьогодні у цій країні



а) процес перероблення лопатей за допомогою піролізу



б) перероблені гранули з лопатей

в) утилізація лопатей на звалищі

Рис. 3. Способи перероблення та утилізації вітрових лопатей [16; 17; 19]

переробляють 87 % сталі і заліза, 95 % алюмінію і міді, а решта чорних і кольорових металів потрапляє на захоронення у спеціальні полігони. Бетон і композитні матеріали у повному обсязі утилізують на сміттєзвалищах. Дані щодо поводження із відходами пластику на жаль відсутні [14].

У перспективі, відповідно до Стратегії розвитку Львівської області на період 2021–2027 рр., у регіоні заплановано будівництво 16-ти вітрових електростанцій загальною встановленою потужністю понад 505 МВт (рис. 4) [11]. Загальна потужність ВЕС є співмірною із потужністю Добровірівської ТЕС. Будівництво нових вітрових електростанцій передбачено у шести із семи адміністративних районів Львівщини. Найбільші потужності планують ввести у Новояворівській і Городоцькій міських територіальних громадах Яворівського району, Трускавецькій міській територіальній громаді Дрогобицького району і Славській селищній територіальній громаді Стрийського району [22].

Згідно з нашим прогнозом, навіть за умови встановлення вітрових турбін одиничною потужністю 5,0 МВт, через 25 років утвориться понад 300 відпрацьованих лопатей, які потрібно буде переробити. Існує ймовірність, що до цього часу з'являться новітні екологічно безпечні технології, які позитивно вплинуть на довкілля та забезпечать повне перероблення лопатей.

В Львівській області на сьогодні експлуатують 10 вітрових турбін, а термін експлуатації першої черги ВЕС завершиться у найближчі 10–15 років. Оскільки кількість відпрацьованих лопатей є невеликою (30 од.), пропонуємо їхнє використання для розвитку різних громадських просторів у містах Львівщини. Приклади вдалого використання лопатей з метою будівництва мостових переходів (а), ігрових майданчиків (б) чи велосипедних станцій (в) у країнах ЄС (Данія, Нідерланди, Польща та ін.) вказують на перспективність цього напрямку (рис. 5). Це сприятиме розвитку сучасних міст і містечок Львівської області

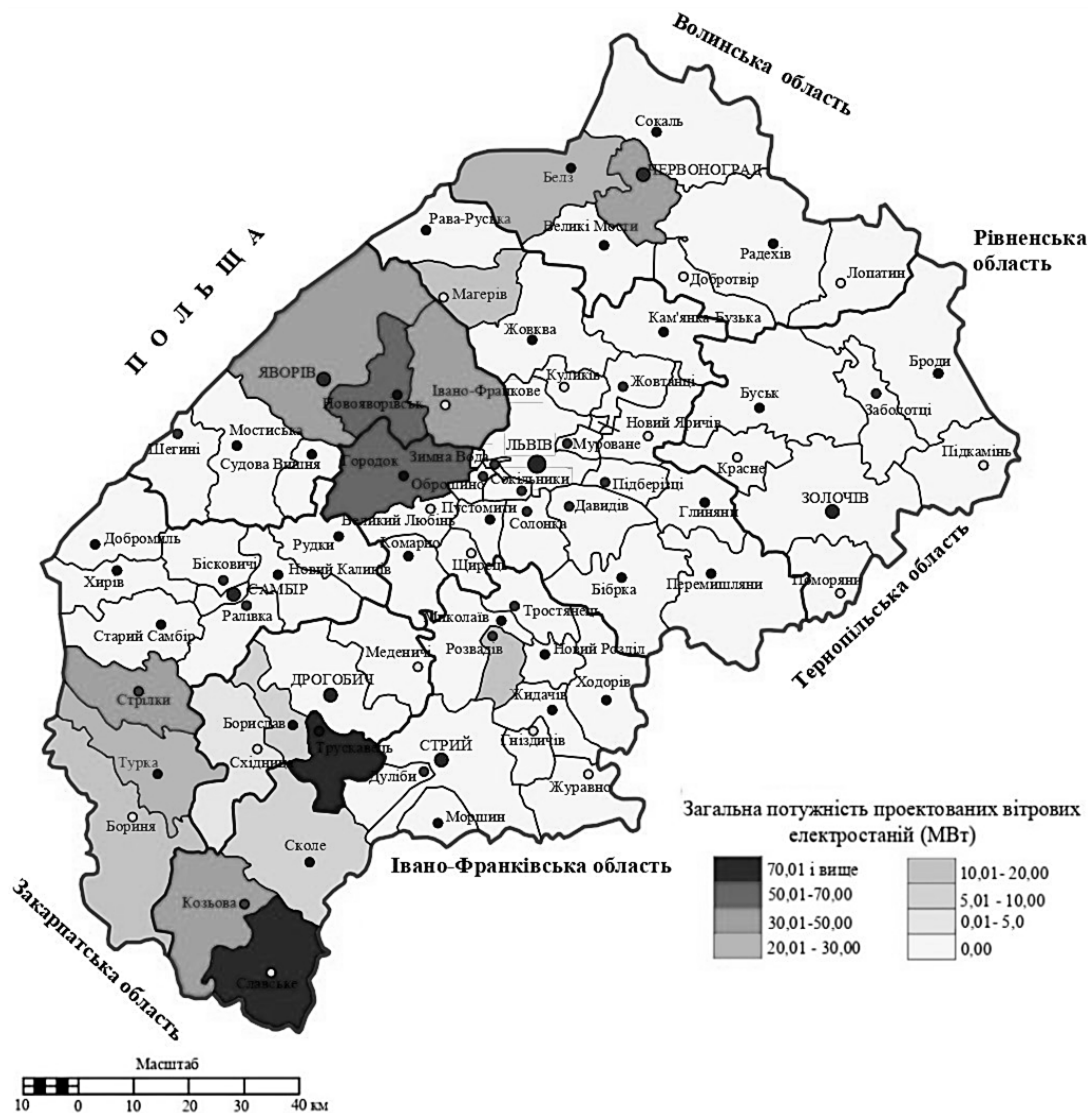


Рис. 4. Перспективні вітрові електростанції у Львівській області (за даними Єдиного реєстру з оцінки впливу на довкілля [9])

згідно з сучасними принципами тактичного урбанізму. Організація креативних громадських просторів суттєво збільшить туристичну привабливість локацій та дасть змогу якісно використати міське середовище.

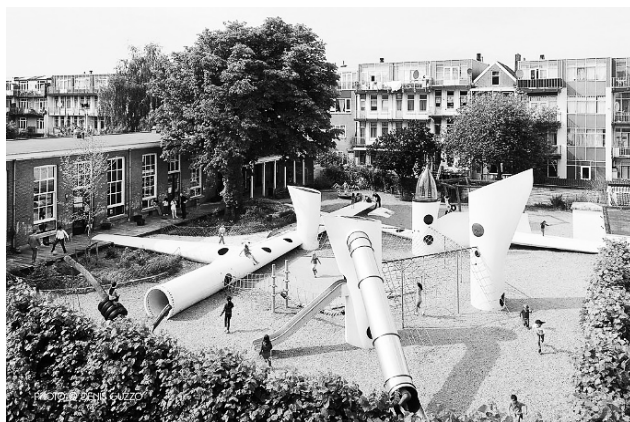
Варто зазначити, що для ефективної роботи вітрових турбін слід врахувати можливість заміни комплектуючих частин через зношення або пошкодження, які зумовлені різними внутрішніми і зовнішніми чинниками. Найчастіше із ладу виходять генератори, лопаті і ротор. Це зумовлює додаткове

утворення відходів у досліджуваному регіоні від вітрових електростанцій до завершення гарантійного терміну експлуатації [14].

Висновки. З початком процесу декарбонізації, у світі активно розвивають відновлювані джерела енергетики, зокрема й вітрову енергетику. Чимало уваги приділено вивченню питань збільшення однічної потужності вітрових турбін, забезпеченню ефективнішого використання вітрового потенціалу та збільшення виробництва електроенергії.



а) перший у світі лопатевий мостовий перехід на заході Польщі



б) ігровий майданчик і громадський простір у Роттердамі (Нідерланди)



в) велосипедна станція у Данії

Рис. 5. Приклади використання лопатей в цілях тактичного урбанізму [20; 23; 24]

Водночас, актуальним і не вирішеним залишається питання забезпечення екологічно ефективного перероблення або повторного використання комплектуючих елементів вітрових установок. Сучасні технології не спроможні повністю переробити лопаті, проте науковці працюють над їхнім удосконаленням. У передових країнах світу вже сьогодні накопичено досвід практичного використання лопатей у різних арт-проектах та в цілях тактичного урбанізму. Проаналізований досвід буде корисним для вирішення проблем утилізації вітрових установок в Україні загалом і Львівській області зокрема.

Перспективи використання результатів дослідження. Загалом розвиток вітрової енергетики є перспективним для Львівської області. Проте будівництво та експлуатація сучасних вітрових установок потребує значно більше коштів порівняно із сонячними панелями. При їхньому проектуванні важливо враховувати вплив на довкілля, на орнітофауну та хіроптерофауну прилеглих територій. Важливим аспектом є також наявність значної кількості спеціальних документів для того, щоб увести в експлуатацію вітрові електростанції.

Література

1. Будова та компоненти вітряних установок. ПКП «Техноноватор». URL: <http://tehnovator.com.ua/ua/energy-ua/wind-energy-ua/construction-wind-system-ua.html>
2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: закон України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII. *Відомості Верховної Ради України*. 2014. № 40. Ст. 2021. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text
3. Федорчук Я., Серветник Д. Циркулярна економіка. Організаційно-правові аспекти. Business Law Electronic Resource. URL: <https://www.businesslaw.org.ua/circle-economic-t/>
4. Cooperman A., Eberle A., Lantz E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105439>
5. Heng H., Meng F., McKechnie J. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. *Waste Management*. 2021. Vol. 133. P. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.032>
6. Муха Б. П., Притула І. М. Нові результати досліджень вітру в Карпатах. *Проблеми географії України* : матеріали наукової конференції (Львів, 25–27 жовтня 1994 р.). Львів, 1994. С. 198–199.
7. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=60637>
8. Департамент паливно-енергетичного комплексу та енергозбереження Львівської ОДА: офіційний сайт. URL: https://loda.gov.ua/departament_palyvno_energetychnogo_kompleksu_ta_energozberezhennya
9. Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля. URL: <http://eia.menr.gov.ua/>
10. Еко-Оптіма: офіційний сайт. URL: <http://www.ecooptima.com.ua/#projects>
11. Геоєкологія Львівської області : монографія / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.
12. Material Use. Turbines. Vestas Wind Systems. URL: https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/environment/201802_Material%20Use%20brochure.pdf
13. Jensen J. P. Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines *Wind Energy*. 2018. 22 (3). P. 316–326. DOI: 10.1002/we.2287
14. Tota-Maharaj K., McMahon A. Resource and waste quantification scenarios for wind turbine decommissioning in the United Kingdom. *Waste Disposal & Sustainable Energy*. 2021. Vol. 3. P. 117–144. DOI: 10.1007/s42768-020-00057-6
15. NREL Research Identifies Motivations, Methods for Achieving a Circular Economy for Wind Energy. *National Renewable Energy Laboratory (NREL) Transforming Energy*. 2021. 16 February. URL: <https://www.nrel.gov/news/program/2021/nrel-research-identifies-motivations-methods-for-achieving-a-circular-economy-for-wind-energy.html>
16. No Time To Waste: A Circular Economy Strategy for Wind Energy. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. 2021. 2 June. URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/no-time-waste-circular-economy-strategy-wind-energy>
17. Martin C. Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills. *Bloomberg Green*. 2020. 5 February. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
18. Боротьба з вітряками: чому утилізувати відпрацьовані вітряні турбіни виявилось складно. *Mind*. 2021. 26 червня. URL: <https://mind.ua/news/20227900-borotba-z-vitryakami-chomu-utilizuvati-vidpracovani-vitryani-turbini-viyavilosya-skladno>
19. Steffen A. What Happens To Old Wind Turbines? The Answer's Not So Eco-Friendly. *Intelligent Living*. 2020. 22 February. URL: <https://www.intelligentliving.co/what-happens-to-old-wind-turbines-the-answers-not-so-eco-friendly/>
20. Patowary K. The Second Life of Wind Turbine Blades. *Amusing planet*. 2017. 12 January. URL: <https://www.amusingplanet.com/2017/01/the-second-life-of-wind-turbine-blades.html>
21. Лопаті вітрових електростанцій викидають на звалища, бо їх складно переробити. Хмарочос. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2021/10/04/lopati-vitrovih-elektrostantsij-vykydayut-na-zvalyshha-bo-yih-skladno-pererobyty/>
22. Lopushanska M., Krychevska D., Ivanov E., Pylypovych O. Geography, current state and development prospects of renewable energy facilities in Western Ukraine (example of Lviv region). *Geo Decade 2020–2030* : International Geographic Conference (24–26 November 2020, Sofia, Bulgaria): Book of abstracts. Sofia, 2020. P. 41–43.
23. Denmark is repurposing discarded wind turbine blades as bike shelters. *JNews*. 2021. 27 September. URL: <https://africapearl.com/2021/09/27/denmark-is-repurposing-discarded-wind-turbine-blades-as-bike-shelters.html>
24. Stone M. Engineers are building bridges with recycled wind turbine blades. *The verge*. 2022. 11 February. URL: <https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first>