

ВІТРОВИЙ РЕЖИМ ТА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЛУЦЬКА

Федонюк В.В., Панькевич С.Г., Федонюк М.А.

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, 43018, м. Луцьк

ecolutsk@gmail.com, psg@gmail.com, m.fedoniuk@lntu.edu.ua

Розглянуто параметри формування вітроенергетичного потенціалу м. Луцька та чинники його змін у контексті проявів регіональних змін клімату на території дослідження. Предметом вивчення була оцінка можливостей розширеного використання альтернативної енергії вітру в м. Луцьку та у Північно-Західному регіоні України в цілому. В контексті дослідження вітроенергетичного потенціалу було проаналізовано особливості формування вітрового режиму Луцька, його динаміка та її зміни на протязі останніх 50 років (1971–2020 рр.). Досліджено чинники формування і основні показники вітрового режиму в Луцьку. Оцінено сприятливість вітрового режиму міста для потреб вітроенергетики. Проаналізовано вплив міста на формування місцевих мікрокліматичних особливостей вітрового режиму, зміну горизонтальних і вертикальних вітрових профілів у окремих мікрорайонах. Оцінено перспективи використання малих та великих вітроенергетичних установок у зонах збільшених швидкостей вітрового потоку. Дослідження виконувалося із застосуванням таких методів, як збір інформації, моделювання і прогнозування, графічні, картографічні методи, методи аналізу і синтезу, порівняння і аналогії.

Основні результати виконання наукового дослідження: визначено особливості та динаміку вітрового режиму та вітроенергетичного потенціалу м. Луцька; оцінено особливості впливу міської урбоєкосистеми на вітровий режим та зворотній вплив вітрового режиму на мікроклімат міста; збудовано ряд графіків, діаграм, таблиць, картосхем з числовими показниками динаміки вітрового режиму та вітроенергетичного потенціалу; оцінено доцільність встановлення в місті вітроенергетичних установок промислової та малої потужності; встановлено, що для Луцька перспективними є вітроенергетичні установки малої потужності (у поєднанні з сонячними панелями), місця встановлення яких варто вибирати після комплексного мікрокліматичного дослідження перетворень вітрового профілю та пошуку точок підсилення швидкостей вітру в місті. *Ключові слова:* вітровий режим, швидкість вітру, вітроенергетична установка, вітроенергетичний потенціал.

Wind regime and wind energy potential of Lutsk. Fedoniuk V., Pankevich S., Fedoniuk M.

The parameters of the formation of the wind energy potential of the city of Lutsk and the factors of its changes in the context of manifestations of regional climate changes on the territory of the study were considered. The subject of the study was an assessment of the possibilities of expanded use of alternative wind energy in the city of Lutsk and in the Northwestern region of Ukraine as a whole. In the context of the study of wind energy potential, the peculiarities of the formation of the wind regime of Lutsk, its dynamics and its changes over the past 50 years (1971–2020) were analyzed. The formation factors and main indicators of the wind regime in Lutsk were studied. The favorableness of the city's wind regime for the needs of wind energy was assessed. The impact of the city on the formation of local microclimatic features of the wind regime, changes in horizontal and vertical wind profiles in individual microdistricts is analyzed. The prospects for the use of small and large wind power plants in areas of increased wind speed have been assessed. The research was carried out using such methods as information gathering, modeling and forecasting, graphic, cartographic methods, methods of analysis and synthesis, comparison and analogy.

The main results of the scientific research: the characteristics and dynamics of the wind regime and wind energy potential of the city of Lutsk were determined; the peculiarities of the influence of the urban urban ecosystem on the wind regime and the reverse influence of the wind regime on the microclimate of the city were assessed; a number of graphs, diagrams, tables, maps with numerical indicators of the dynamics of the wind regime and wind energy potential were built; the feasibility of installing industrial and low-power wind power plants in the city was assessed; it was established that low-power wind energy installations (combined with solar panels) are promising for Lutsk, the installation sites of which should be chosen after a comprehensive microclimatic study of wind profile transformations and finding points of wind speed amplification in the city. *Key words:* wind regime, wind speed, wind energy installation, wind energy potential.

Постановка проблеми. У дослідженні було проаналізовано зміни у формуванні та динаміці вітрового режиму Луцька на протязі останніх 50 років (1971–2020 рр.) в контексті вивчення можливостей використання вітроенергетичного потенціалу регіону для розвитку малої вітроенергетики.

Актуальність дослідження. В останні десятиліття вчені, політики, практики – екологи активно працюють над «зеленим переходом» – комплексом заходів, що має на меті скоротити використання вуглецевих енергетичних ресурсів та збільшити

використання альтернативних відновлювальних джерел енергії, до яких відносять і енергію вітру. Вітроенергетичний потенціал – це важливий природний ресурс, який в наш час використовується для альтернативного отримання електроенергії як в приватних господарствах, так і на рівні держави. В Україні вітрова енергетика розпочала активно розвиватися перед війною, але агресія росії призвела до руйнування чи захоплення більшості великих вітроелектростанцій (далі – ВЕС), розміщених на півдні та південному сході. Водночас атаки ворога

на енергетичну структуру зробили процеси формування енергоне залежності міст, громад, окремих господарств дуже важливими. Все це визначає актуальність теми даного дослідження, в якому розглянуто доцільність розвитку вітроенергетики в тих областях України, які донедавна вважалися малоперспективними для неї.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Дослідження передумов та перспектив розвитку альтернативної енергетики в Україні, до якої відносимо і вітрову енергетику – це стратегічно важливий напрямок наукових та прикладних досліджень, який дозволить вирішити ряд завдань «зеленого переходу», просунути на шляху призупинення глобальних змін клімату, забезпечити енергоне залежність як окремих міст та громад, так і України в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості вітрового режиму над Україною, механізми розвитку циркуляційних систем в атмосфері вивчали такі українські вчені, як Г.Ф. Прихотько, М.В. Буйков, В.М. Мучник, О. Шевченко, С.І. Сніжко, М.М. Талерко, О.Н. Сухінський, Г.М. Пірнач, М.В. Сирота та багато інших, праці яких було узагальнено в [9, 14, 18]. Дослідження динаміки вітрового режиму для Луцька та території Волинської області здійснювали Бабіченко В.М., Сусідко М.Н., Смітюх В.Р., Щербань І.М., Половко І.К., Зузук Ф.П., Попов В.П., Пищолка В.М., Тарасюк Ф.П., Тарасюк Н.А., Федонюк В.В., Василюк М.В. та інші [2, 9, 11, 13, 16, 18]. Багато наукових праць було присвячено і вивченню вітроенергетичного потенціалу України, серед них відмітимо праці С. Величко, М. Сиротюк, Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценкова, А. Смердова, О. Ачкасової, О. Третякова, Кудрі С.О., Петрук В.Г., Коцюбинської С.С., Мацюк Д.В. [3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15]. Оскільки Волинська область довгий час вважалась малоперспективною для розвитку вітроенергетики, то науковому вивченню цього питання присвячено небагато праць, серед проаналізованих виділимо дотичні до теми роботи О. Наквацької, В.О. Фесюка, С.О. Пугача, А.М. Слащука, В.Г. Петрука, С.С. Коцюбинської, Д.В. Мацюк, В.В. Федонюк, М.А. Федонюка [11, 13, 16, 17, 18, 20]. Зокрема, у працях Христецької М.Б., Федонюк В.В., Федонюка М.А., Павлуся А.М., Мерленка І.М., Бондарчука С.П. при аналізі змін у динаміці таких метеоявищ, як атмосферні опади, грози, вітровий режим аналізувався як один з складників погодно-кліматичних умов у регіоні [17, 20].

Розрахунки показників вітроенергетичного потенціалу та ефективності роботи вітроенергетичних установок проводилися авторами за методиками П.Ф. Васька, А.С. Мазінова, Е.А. Бекірова [3, 4, 10]. Враховано було також результати досліджень Кузьо І.В., Корендій В.М., Петренко К.В., Кузнєцова М.П., Іванченко І.В., Кармазіна О.О., Борсук А.С. [5, 8, 12].

Для розуміння стану розвитку вітроенергетики в Україні та міжнародного досвіду у галузі було проаналізовано матеріали [6, 19]. Метеорологічні характеристики вітрового режиму і показники кліматичної норми для Луцька аналізувалися за даними [1].

Виділення не виділених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Об'єктом даного дослідження є вітроенергетичний потенціал м. Луцька та чинники його формування. Оскільки Волинська область довгий час вважалась малоперспективною для розвитку вітроенергетики, то вітроенергетичний потенціал самого Луцька практично не досліджувався. На основі цього було сформульовано мету дослідження: аналіз особливостей формування вітрового режиму та вітроенергетичного потенціалу Луцька, оцінка можливостей розширеного використання енергії вітру в регіоні.

Новизна. Новизна роботи визначається тим, що аналіз особливостей вітрового режиму Луцька у XXI ст., їх змін в контексті регіональних проявів глобальних змін клімату, а також оцінка показників вітроенергетичного потенціалу та можливості його розширеного використання дозволили вперше науково обґрунтувати доцільність та перспективність розвитку малої вітроенергетики у місті, встановивши оптимальні потужності малих ВЕУ.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проведено на основі статистико-математичного та графічного аналізу метеорологічної інформації, розрахунків характеристик вітроенергетичного потенціалу Луцька та інтерпретації їх результатів. Це визначає його методологічне та наукове значення, як прикладу досліджень такого типу. Запропонований авторами алгоритм може бути застосований для аналізу вітрового режиму та вітроенергетичного потенціалу інших міст та регіонів України.

Виклад основного матеріалу. Вітровий режим міста тісно взаємопов'язаний із динамікою та характером інших чинників погоди та клімату. Для Луцька характерним є клімат, типовий для помірного кліматичного поясу та його західної, в межах України, атлантично-континентальної провінції, зі зниженими значеннями температури влітку, вологим та досить дощовим теплим періодом року та м'якою, з частими відлигами, зимою. У Луцьку протягом року чітко виражені чотири сезони року: зима, весна, літо та осінь. Тривалість їх не завжди співпадає з календарною, а визначається за датами переходу середньої температури повітря через ustalені значення. В останні роки ця тривалість може відрізнитися від типової, це пов'язують із глобальними змінами клімату. Вітровий режим м. Луцька обумовлюється, з одного боку, характером діяльної поверхні, а з другого – типом та характером атмосферної циркуляції. Напрямок та швидкість вітру залежить від динаміки баричних центрів над Євразією й Атлантикою.

Волинська область зазнає впливу різних повітряних мас. Континентальне повітря помірних широт надходить протягом року та є панівною повітряною масою, яка формується з арктичного або морського повітря. Надходження морського повітря помірних широт також спостерігається в усі пори року. Взимку цей прихід пов'язаний із інтенсивною циклонічною діяльністю над Європою, а влітку – з антициклонами [17, 20]. Умови атмосферної циркуляції визначають напрямки вітрів: взимку в Луцьку переважають західні та південно-західні вітри, влітку панівними є західні й північно-західні, суттєвою є також частка південно-західних вітрів, є вітри південних та східних румбів.

Швидкість вітру залежить від характеру поверхні, величини градієнту та умов циркуляції. Середня річна швидкість вітру у Луцьку 3,5–4,0 м/с. Найбільшу повторюваність у річному ході мають вітри зі швидкостями від 2 до 3 м/с, ймовірність значної швидкості вітру – 8–10 м/с невелика й складає всього 9 % від загального числа випадків. Такі вітри в місті спостерігаються рідко. Вітер зі швидкістю 10 м/с теж буває нечасто. Середня річна швидкість вітру коливається біля 4,0 м/с. До 5 м/с вона може збільшуватися в окремі місяці року (рання весна, зима). Водночас найнижчою швидкість вітру є влітку. В теплу пору часто виникають короткочасні, сильні шквали, передгрозові вітри.

За даними [1] було проведено статистико-математичний аналіз річної динаміки вітру (середня річна швидкість вітру, максимальна швидкість та число днів з найсильнішим вітром за 50 років, 1971–2020 рр.) в Луцьку, щоб оцінити вплив глобальних змін клімату на його режим. В результаті виявлено наявність трьох періодів [18] з характерним типом вітрового режиму на протязі досліджуваних 50 років: у 1971 – 1981 рр. відмічено нормальний, типовий вітровий режим у Луцьку; протягом 1982–2000 рр. вітровий режим характеризується вельми нерівномірним характером; 2001–2020 рр. – це період із зниженою динамікою вітру, який триває. В цілому виявлено зниження середніх швидкостей вітру на 10–20 % нижче кліматичної норми у теплий період року (квітень – жовтень), в той час як у холодний період (листопад – березень) швидкості вітру знаходяться в межах кліматичної норми.

Отже, середні річні показники швидкості вітру в м. Луцьку є такими (3,5–4 м/с), що знаходяться на межі доцільності встановлення вітроенергетичних установок. Теоретично Луцьк потрапляє в зону, де доцільним є спорудження вітроенергетичних установок малої потужності. Проте в межах міста спостерігаються суттєві відмінності вітру, спричинені міською висотною забудовою, рельєфом, розподілом зелених зон, водних об'єктів та ін.

Аналіз можливостей впровадження вітроенергетики включає декілька етапів: 1) аналіз швидкості вітру: це не тільки аналіз середньодобових, серед-

ньорічних і середньомісячних значень швидкості вітру, але також і аналіз повторюваності найбільш перспективних швидкостей вітру на досліджуваній території; 2) аналіз можливості будівництва вітроенергетичних станцій: даний етап передбачає вибір ділянок, перспективних для такого будівництва; 3) розрахунок потенційної енергії, яку можна отримати, використовуючи вітроенергетичні установки різної потужності на вибраних ділянках.

В цілому для території Луцька швидкість вітрового потоку у середньорічному виразі є дещо меншою або близькою до 4 м/с. Відмітимо, що оптимальними показниками для територій, що вважаються сприятливими для вітроенергетики, є швидкості вітру понад 7 м/с, а найбільш сприятливими – понад 10 м/с: такі показники не є характерними для Луцька. Однак, враховуючи той факт, що швидкість вітру вимірюється на метеорологічних станціях на висоті встановлення флюгера чи анеморумбометра близько 12 м (ніколи не вище 20 м), а сучасні вітроустановки досягають у висоту 100 м, виникає потреба у розрахунку швидкості вітру саме на такій значній висоті. Вітроенергетичний потенціал швидкості вітру на будь-якій висоті до 100 м над поверхнею землі обчислюється за формулою П.Ф. Васько [3, 4]:

$$W_1 = V_0 * (H_1/H_0)^k$$

де: W_1 – це швидкість вітру (вітроенергетичний потенціал) на висоті 100 м, м/с;

V_0 – це швидкість вітру на висоті метеостанції, м/с;

H_1 – запланована висота осі ротора ВЕУ, м;

H_0 – встановлена висота флюгера на метеостанції, м (найчастіше = 12 м);

k – поправочний емпіричний коефіцієнт, що дорівнює 0.167.

При виборі перспективної ділянки для встановлення ВЕУ враховуються також такі критерії: крутизна схилів, статус ділянки в структурі землекористування, потрібна площа ділянки. При встановленні ВЕУ у місті враховують чинник шумового впливу, естетичного вигляду, впливу на біорізноманіття. Очевидна на перший погляд можливість встановлення ВЕУ на дахах висотних будинків, як правило, неможлива через активну незгоду їх мешканців, і в м. Луцьку вже були факти таких випадків.

Розрахунок технічно досяжного вироблення електроенергії ВЕУ було проведено за формулою А.С. Мазінова [10]:

$$E_{mic} = P_0 * t * n$$

де: E_{mic} – технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії;

P_0 – номінальна потужність вітроустановки;

t – кількість годин її роботи за кожен місяць;

n – % кількості днів зі швидкістю вітру > 4 м/с.

За цими методиками розраховано основні показники, які характеризують вітроенергетичний потенціал у Луцьку та перспективні можливості генерації

електроенергії для двох прикладів: у випадку встановлення промислової ВЕУ середньої потужності (3,6 МВт) та у випадку встановлення малої вітроенергетичної установки середньої потужності (10 КВт).

У табл. 1 наводяться отримані розраховані показники для кожного з 12 місяців року, а також осереднене (або сумарне) значення показника за рік. Розглядалися такі показники, як: середні швидкості вітру (м/с), значення яких є основоположним для розрахунку усіх наступних параметрів вітроенергетичного потенціалу; вітроенергетичний потенціал швидкості вітру, м/с; технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для проєктованої промислової ВЕУ потужністю 3,6 МВт; технічно досяжний обсяг вироблення електроенергії для малої ВЕУ потужністю 10 КВт.

За даними таблиці 1 збудовано діаграми (рис. 1 – рис. 4), що наочно представляють динаміку розрахованих показників протягом року в Луцьку та їх сумарні значення. Проаналізуємо отримані результати та порівняємо їх з рекомендованими мінімальними та оптимальними значеннями цих показників для ефективного впровадження вітрогенеруючих установок.

Протягом року в Луцьку середні місячні швидкості вітру змінюються досить динамічно, від максимальних значень, які досягають 4,9 м/с (лютий та березень) до мінімальних значень 3,0 м/с (серпень та вересень). Річна динаміка швидкостей вітру показує, що оптимальним періодом для використання вітроенергетичного потенціалу є холодний період, з листопада по березень.

Перейдемо до характеристики такого показника, як швидкість вітру вітроенергетичного потенціалу, який розраховується з врахуванням таких чинників, як фактичні швидкості вітру на рівні вимірювального приладу на місцевій метеостанції, висоти встановлення даного приладу, середнього показника висоти

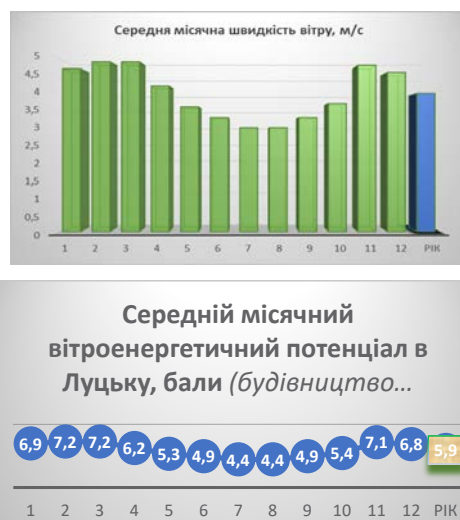


Рис. 1. Динаміка середніх місячних швидкостей та швидкості вітру вітроенергетичного потенціалу W у Луцьку протягом року

ротора ВЕС чи ВЕУ та емпіричних коефіцієнтів. Для розрахунку бралися середні місячні та середня річна швидкість вітру, висота анеморумбометра та флюгера на станції Луцьк, яка дорівнює 12 м, та середня типова висота ротора ВЕУ – 100 м. Доцільним спорудження та експлуатація ВЕУ вважається, якщо W більше 6 м/с, а оптимальним є W понад 10 м/с.

Аналіз отриманих даних показує, що в середньому протягом року вітроенергетичний потенціал в Луцьку дещо менший від значення, при якому використання вітрової енергії є доцільним (середнє річне значення $W = 5,9$ м/с). Проте аналіз даного показника у його річній динаміці показує, що, оскільки він корелюється з швидкостями вітру, то в період з листопада по березень значення W є достатніми для встановлення та продуктивної роботи ВЕУ.

Таблиця 1

Основні показники, що характеризують вітроенергетичний потенціал м. Луцька

Показник	Місяці року												Рік
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Середня місячна шв. вітру, м/с	4,7	4,9	4,9	4,2	3,6	3,3	3,0	3,0	3,3	3,7	4,8	4,6	4,0
W, вітроенергет. потенціал, м/с	6,9	7,2	7,2	6,2	5,3	4,9	4,4	4,4	4,9	5,4	7,1	6,8	5,9
$E_{\text{міс. max}}$ (технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для промислової ВЕУ 3,6 МВт)	0,24МВт	0,26МВт	0,26МВт	0,24МВт	0,19МВт	0,18МВт	0,14МВт	0,14МВт	0,18МВт	0,2МВт	0,24МВт	0,24 МВт	2,51МВт
$E_{\text{міс. max}}$ (технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для малої ВЕУ потужністю 10 КВт)	0,72 КВт	0,84 КВт	0,84 КВт	0,68 КВт	0,56 КВт	0,50 КВт	0,45 КВт	0,45 КВт	0,50 КВт	0,59 КВт	0,75 КВт	0,70КВт	7,58КВт

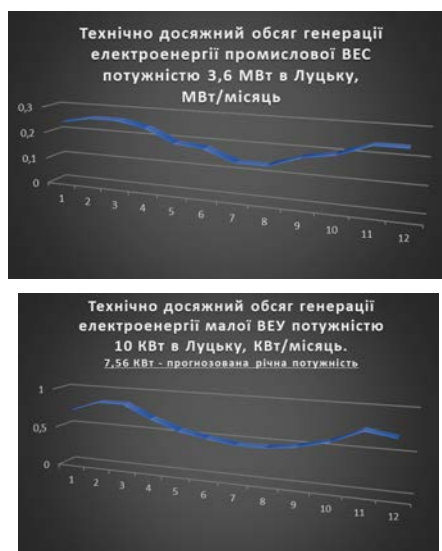


Рис. 2. Динаміка технічно досяжного обсягу генерації електроенергії у Луцьку при встановленні промислової ВЕС потужністю 3,6 МВт та при встановленні малої ВЕС потужністю 10 КВт

При показниках вітроенергетичного потенціалу, що коливаються в межах 6–7 м/с, рекомендовано встановлення у такій місцевості малих ВЕС [4, 8, 14].

До малих ВЕС (чи вітрогенераторів) відносяться генеруючі установки потужністю від 5 до 50 КВт, у той час як сучасні вітроенергетичні установки промислової потужності – це агрегати потужністю понад 500 КВт. В діапазоні 50–500 КВт працюють вітрогенеруючі установки середньої потужності.

ВЕС малої потужності (5–50 КВт) – це генератори, які найчастіше встановлюють дома, в межах окремого домогосподарства, і які дозволяють частково забезпечити додатковим джерелом енергії домогосподарство або комунальну чи адміністративну установу (школа, дитячий садочок, сільська амбулаторія, тощо). Цінність цих установок полягає в тому, що вони не надмірно дорогі, прості у експлуатації, особливо ефективні в сільській місцевості, де за рахунок більш відкритих просторів швидкості вітру також більші. В межах міста можливим є їх встановлення на дахах будинків, нежитлових чи промислових комплексів, у цьому випадку висота будівлі забезпечує додаткове збільшення висоти встановленого ротора вітрогенератора.

Тому, з урахуванням попередніх показників, які показали невисоку забезпеченість м. Луцька вітроенергетичними ресурсами, ми розрахували E_{max1} – технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для промислової ВЕС потужністю 3,6 МВт) та E_{max2} – технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для малої ВЕС потужністю 10 КВт.

Вибір потужності «еталонних» установок для розрахунку був зумовлений тим, що хоча існують значно потужніші промислові ВЕС (5 та 7 МВт), на українських ВЕС перевага надавалася установкам потужністю саме 3.6 МВт за рахунок їх практичності, надійності, відносної простоти у обслуговуванні. Генератори малих ВЕС потужністю 10 КВт є найпо-

пулярнішими за співвідношенням; ціна – потужність генерації – довговічність та якість.

Результати проведених розрахунків представлені у табл. 1 та на графіках на рис. 2. Як показали результати розрахунків, промислова ВЕС не зможе досягти проектної потужності ні в окремі місяці, ні на протязі року в цілому, у той же час для малої ВЕС проектні показники є задовільними, 7,56 КВт проектної потужності при максимальному можливій потужності 10 КВт – це значення, при якому доцільне встановлення та використання такої установки.

Малі вітроенергетичні установки можна також порекомендувати для встановлення у прилеглий до міста сільській місцевості, де вони стануть додатковим джерелом електроенергії для приватних садиб, шкіл та дитячих садків, селищних рад чи амбулаторій. Найоптимальнішим варіантом є паралельне встановлення сонячних панелей та вітрогенератора. Якщо сонячні панелі дають основну генерацію енергії влітку, то вітрогенератор буде переважно працювати у холодну пору, таким чином два незалежних джерела альтернативної енергії забезпечуватимуть енергетичну автономію садиби, господарства чи адміністративно-господарського або соціокультурного об'єкту.

Існує ряд проблем, пов'язаних із встановленням вітрогенераторів малої потужності у містах. До основних з них відносять шум та неестетичність, проте, якщо в конструкції новітніх ВЕС буде подолана проблема шуму та акустичного забруднення території – то незабаром, цілком можливо, висотні будівлі наших міст будуть заповнені вітрогенераторами, які даватимуть додаткову «зелену» енергію, що використовуватиметься для енерго – та теплозабезпечення, та зробить міста екологічними і енергонезалежними.

Головні висновки. Отже, аналіз характеристик вітрового режиму і вітроенергетичного потенціалу в Луцьку дозволяє зробити такі висновки:

1. Вітровий режим має значний вплив на екологічний стан міста та його мікроклімат. Вітер, його швидкості, панівні напрямки, режим впливають на формування погодних процесів, на поширення та розсіювання забруднюючих речовин, на самоочищення атмосфери та інші явища. Великим є значення вірної оцінки особливостей та параметрів аерації урботериторії при плануванні забудови та реконструкції кварталів, розробці генеральних планів.

2. Аналіз вітрового режиму є важливим для оцінки температурно-вологісного режиму, загазованості, запиленості повітря, обґрунтування щільності забудови, багатофакторного аналізу вітроенергетичного потенціалу.

3. Вітровий режим м. Луцька формується під впливом як загально-циркуляційних чинників, так і характеру підстильної поверхні, типу міської забудови, рельєфу міста, наявних зелених зон та водних об'єктів. В цілому вітровий режим Луцька є сприятливим, середні швидкості вітру коливаються в межах 3,5–4,0 м/с, максимальні пориви досягають 16–20 м/с, протягом року переважають вітри західних, північно-західних, південно-західних напрямків, що узгоджується з загальним типом західного перенесення повітряних мас.

4. Проведені розрахунки показали, що вітроенергетичний потенціал у Луцьку в середньому протягом року становить 5,9 м/с (при мінімальному показникові 6,0 м/с для оцінки району як сприятливого для промислового розвитку вітрової енергетики), проте у холодний період року (листопад – квітень) його значення є більшими та коливаються у межах 6,2–7,2 м/с.

5. Розраховано, що промислова ВЕУ з проектною потужністю 3,6 МВт в умовах м. Луцька не зможе досягти проектної потужності ні в окремі місяці, ні на протязі року в цілому, у той же час для малої ВЕУ досяжні показники є задовільними: 7,56 кВт річної проектної потужності при максимально можливій потужності 10 кВт – це значення, яке дозволяє говорити про доцільність встановлення та використання таких установок в місті.

6. Таким чином, дослідження показало, що розвиток вітроенергетики в нашому регіоні є можливим та доцільним, проте увагу слід звернути на малі ВЕУ, потужністю від 5 до 50 кВт, які ефективно працюватимуть у холодний період року (листопад – квітень). Поєднання таких вітрогенераторів з використанням сонячних панелей (які ефективні для теплої пори року) дозволить забезпечити авто-

номний енергетичний режим для окремих домогосподарств, промислових, соціальних, освітніх чи культурних закладів, що особливо актуально в наш час, в умовах широкомасштабної війни росії проти незалежної України та атак на нашу енергетичну інфраструктуру.

7. Водночас встановлення малих ВЕУ у місті має ряд екологічних проблем, серед яких: шумове та вібраційне забруднення, можливий негативний вплив на біоту (на птахів та кажанів), естетичні чинники та необхідність утилізації лопастей вітрогенераторів в майбутньому. При умові подолання чи мінімізації цих негативних супутних чинників ВЕУ малої потужності могли б з'явитися на дахах висотної нежитлової забудови Луцька та інших міст України, вносячи свій вагомий внесок у розвиток альтернативної енергетики, «зелений перехід» та подолання глобальної кліматичної кризи.

Перспективи використання результатів дослідження. Як перспективне питання для подальших досліджень розглядаємо дослідження мікрокліматичних особливостей режиму вітру в мікрорайонах для виявлення найбільш оптимальних для спорудження малих ВЕУ зон та ділянок в Луцьку.

Література

1. Архів погоди Волинського обласного центру з гідрометеорології. URL: <http://www.meteolutsk.net.ua>
2. Василюк М.В., Михайлюк В.А., Федонюк В.В. Вітровий режим на Волині в контексті глобальних кліматичних змін. Актуальні проблеми сучасної науки і освіти: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 20–21 січня 2022 року. Львів : ЛНУ, 2022. С. 6–8.
3. Васьо П. Ф., Вербовий А. П., Пазич С. Т. Реалізація стохастичної двопараметричної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика, 2017, (3). С. 50–64.
4. Васьо П.Ф. Розрахунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строків вимірювань швидкості вітру. Технічна електродинаміка, 2001. № 6. С. 45–49.
5. Величко С.А., Третьяков О. С. Аналіз просторово-часового розподілу швидкостей вітру на території Харківської області як основа оцінки вітроенергетичного потенціалу. *Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління*. Матеріали 4-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Х.: ХНУ. 2003. С. 314–315.
6. Енергетична стратегія України до 2030 року. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
7. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
8. Кузьо І.В., Корендій В.М. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка*, 2010, 679. С. 61–68.
9. Липінський В.М., Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Активізація стихійних метеорологічних явищ на території України – прояв глобальних змін клімату. *Український географічний журнал*. К.: 2007. № 2. С. 11–20.
10. Мазінов А.С., Бекиров Е.А. Вітроенергетичні установки: типи, ефективність, вибір. *Сонячна і вітрова енергетика*. Науковий бюлетень. Сімферопіль. 2012. С. 18–23.
11. Наквацька О. Можливості використання вітрової енергії у Волинській області. *Актуальні задачі сучасних технологій*. Матеріали Міжнар. науково-технічної конференції. Тернопіль 19–20 грудня 2012 р. С. 257–258.
12. Петренко К.В., Кузнецов М.П., Іванченко І.В., Кармазін О.О., Борсук А.С. Оцінка можливості використання даних швидкості вітру, отриманих методом реаналізу, для вирішення задач вітроенергетики. *Відновлювана енергетика*. № 3 (74). 2023. С. 75–85. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).75-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85)
13. Петрук В. Г., Коцюбинська С. С., Мацюк Д. В. Енергетичний потенціал альтернативної енергетики в Україні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 4, С. 90–93. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/481>
14. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д.. Основи вітроенергетики. Дніпро: НГУ, 2015. 335 с.
15. Смердов А. А., Бульба С. М. Статистичні характеристики швидкості вітру в регіоні м. Полтави. *Вісник ПДАА*. 2011. № 1. С. 153–157.
16. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області: кол. моногр. / В.О. Фесюк, С.О.Пугач, А.М. Слащук; за ред.В.О. Фесюка. К.: ТОВ «І-во «Ві Ен Ей»: 2016. 316 с.
17. Федонюк В.В., Федонюк М.А., Павлусь А.М. Дослідження грозової активності на Волині та в Україні за даними онлайн-ресурсу Blitzortung. *Український гідрометеорологічний журнал*. Одеса: 2021, 28(28). С. 16–28. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9703/1/uhmj_28_2021_16.pdf
18. Федонюк М.А., Федонюк В.В. Екологічний вплив вітру у зоні міської забудови Луцька. *Авіація, промисловість, суспільство* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Кременчук, 12 травня 2022 р. МВС України, Харків. нац. ун-т вн. справ, КІЛК. Х.: ХНУВС, 2022. С. 379–383.
19. Zdenko Simic. Small wind turbines. A unique segment of the wind power market. *Renewable Energy*. № 50, 2013. P. 156–234.
20. Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. Shallowing of the Svityaz Lake in the context of regional climate change. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2020. 29(4), 673-683. URL: <https://geology-dnu.dp.ua/index.php/GG/article/view/751>