

УДК 911.9:504.062.2

doi: 10.15407/ugz2015.04.010

О.О. Волковая, О.С. Третьяков, І.Г. Черваньов*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна***МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЛОКАЛЬНОЇ ДІЛЯНКИ ЛІСОСТЕПУ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ**

Мета публікації - удосконалення, шляхом використання ГІС-технологій, моделі розрахунку середніх швидкостей вітру на ділянках з різним поєднанням фізико-географічних умов для встановлення їх вітроенергетичного потенціалу. Вітроенергетика спирається на використання властивостей території – вітрового режиму та характеру земної поверхні. Через строкатість лісостепового ландшафту, притаманну значній частині території України, велике значення у виборі конкретних ділянок розміщення вітроагрегатів на локальному рівні має пошук найсприятливіших фізико-географічних умов як чинників вітроенергетичного потенціалу. Надалі для таких ділянок слід створювати моделі швидкостей вітру та його часового режиму. Викладено методику і результат застосування моделі прогностичного розрахунку середніх швидкостей вітру для потреб вітроенергетики на основі ГІС-технологій. Серед моделей, які використовуються з цією метою, шляхом порівняльного аналізу обрано чисельну модель MS-Micro/3, яка виявилась найпридатнішою для застосування на ділянках із фізико-географічними характеристиками, подібними до лісостепових ландшафтів північної частини території Харківської області. Розглянуто результати апробації моделі на локальній ділянці. Побудовано поверхню розподілу швидкостей вітру, виявлено ділянки, які найкраще відповідають потребам вибору місць розміщення вітроагрегатів. Виявлено недоліки методики та проблеми, які можуть постати під час моделювання середніх швидкостей вітру на локальних територіях. Проаналізовано отриману похибку середніх швидкостей вітру, запропоновано варіанти уникнення похибок у розрахунках за допомогою цієї моделі. Новизна, географічність та актуальність дослідження визначається тим, що пріоритетними для вибору безпосереднього місця встановлення вітроенергетичних станцій з урахуванням місцевих географічних умов обрано локалізовані (точкові) дослідження

Ключові слова: вітроенергетика; вітроенергетичний потенціал; вітроагрегат; вітропотік; локальна ділянка; ГІС-моделювання; середні швидкості вітру; похибки розрахунків.

O.O. Volkovaia, O.S. Tretiyakov, I.G. Chervaniov*V.N. Karazin Kharkiv National University***LOCAL FOREST-STEPPE AREA WIND POTENTIAL MODELING FOR THE WIND ENERGY NEEDS WITH THE USE OF GIS TECHNOLOGY**

The purpose of this publication - improving the calculation model of average wind speeds using GIS technology in the areas with combinations of different physical and geographical conditions to define the wind power potential. Wind energy sector relies on the use of the territory properties - wind conditions and terrain. Due to inconsistency of the forest-steppe landscape in large parts of Ukraine, the site-specific search and selection of the areas with the most favorable physical geographic wind potential conditions as factors for wind power turbines placement on the local level is of great importance. Then, models of wind speeds and timing should be created for those areas. The method and the result of predictive calculation model of average wind speeds for the wind energy needs based on GIS technologies has been presented. Among the models used for this purpose the numerical model MS-Micro / 3 was selected by using comparative analysis, which proved most useful in the areas with physical and geographical characteristics, similar to the northern forest-steppe landscapes of the Kharkiv region. The results of the model testing on local area have been reviewed. The surface of wind speed distribution has been built, the areas which best meet the needs for the wind turbines location choice defined. Some method and problem flaws which may arise during modeling at medium wind speeds in local areas have been revealed. The resulting error of average wind speeds has been estimated and the ways to avoid errors in calculations using this model have been proposed. Novelty, geographic appeal and relevance of the study was selection of localized (point) research as immediate priority for the wind power stations installation sites choice, considering local geographical conditions.

Keywords: wind energy; wind energy potential; wind turbines; windflow; local area; GIS modeling; the average wind speed; calculations error.

Вступ

Вітроенергетика, як високотехнологічна, економічно та екологічно ефективна галузь енергетики, базується на використанні відновлюваного джерела енергії для розв'язання однієї з найбільш критичних проблем людини – споконвічної боротьби

за енергію та, водночас, зменшення негативного впливу на довкілля. За останні 10-15 років активізувався її розвиток у багатьох країнах світу.

Перспективності вітроенергетики як бізнесу сприяють, крім високої окупності капітальних витрат, величезні потенційні енергетичні ресурси

вітрового потоку на певних територіях. Натомість, просторово-часова строкатість, певна непередбачуваність вітропотоків і головне – недостатня його вивченість погіршують ефективність і гальмують розвиток цієї перспективної галузі сучасного енергетичного господарства.

Як відомо, доцільність встановлення вітроенергетичних установок (ВЕУ) у певному конкретному місці визначається його вітропотенціалом, тобто здатністю потоку повітря (вітропотоків) забезпечувати технологічні вимоги його ефективної роботи. Вітропотенціал залежить як від фізичних властивостей вітропотоків, так і від технологічних можливостей вітроагрегату.

Ми розглядаємо саме перший із факторів, який визначається поєднанням двох природних властивостей вітру: спектру його швидкостей (хоча враховуються, як правило, їх усереднені значення) та вітрового режиму. Практика автоматичних анемометричних вимірів дає можливість безпосередньо отримувати ці показники як миттєві, тобто без їх узагальнення, як це показали автори робіт [1-3].

Але врахувати такий потенціал безпосередньо навіть для локальної ділянки можливого розміщення вітроагрегатів практично неможливо. Тому вдаються до моделювання. Оскільки натурні спостереження за швидкостями вітру є точковими, слід шукати спосіб поширення їх результатів на певну територію, виходячи з її фізико-географічних властивостей. Важливу роль у реалізації таких досліджень відіграють геоінформаційні системи і ГІС-технології. Надалі у обраних місцях слід встановлювати щогли з автоматичними анемографами, щоб пересвідчитись у правильності вибору.

З фізико-енергетичного боку найважливішим параметром ефективної роботи ВЕУ є наявність значної кінетичної енергії повітряного потоку. Врахування фізико-географічних факторів, які його модифікують, є необхідним для прогнозування швидкостей вітру та апіорного оцінювання ефективності роботи ВЕУ.

Це завдання має неабияке економічне значення: адже кожний необґрунтовано встановлений агрегат – це значні економічні втрати і певна зневіра у можливостях цієї перспективної галузі бізнесу.

Аналіз попереднього досвіду

Попри величезний світовий досвід моделювання швидкостей вітру, в Україні поки що є лише окремі роботи цього напрямку. М.Сиротюк [7] за вихідні дані для отримання комплексної оцінки вітроенергетичного потенціалу (на прикладі фізико-географічних умов Закарпаття) використала виміри швидкості вітру на опорній мережі Гідрометслужби України, врахувала залежності напрямку та швидкості вітру від різних природних чинників (напрям гірських долин, особливості атмосферної цир-

куляції та рельєфу). На основі обчислень питомої потужності вітрового потоку за методом Монте-Карло, вона виділила три вітроенергетичні зони. Було визначено, що найбільший потенціал вітрової енергії має найвища зона (Полонинський хребет).

А.Смердов [8] на основі статистичного оцінювання характеристик швидкості вітру у м. Полтава здійснив оцінку вітрового потенціалу шляхом розрахунку коефіцієнтів для ймовірного розподілу Вейбулла-Гнеденко, відомого з теорії випадкових величин.

Низку досліджень вітроенергетичного потенціалу, його просторово-часової структури та залежностей від фізико-географічних умов лівобережного Лісостепу виконали науковці Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Зокрема, О. Ачкасова і О. Третьяков [1] дослідили вітроенергетичний потенціал рівнинної території рангу фізико-географічного району, якому притаманні мінімальне (близько 10%) заліснення та відсутність значних водних просторів, Результатом роботи була побудова великомасштабних карт вітроенергетичного потенціалу та середніх швидкостей вітру для території дослідження.

Різні аспекти натурних спостережень та аналітичних розрахунків вертикального профілю вітропотоків здійснено у роботах [2-3]. Наприклад, С.Величко у кандидатській дисертації [3], досліджуючи можливості ресурсного забезпечення гібридних (геліо-вітроенергетичних) агрегатів на території всієї України (по адміністративних областях), встановив чотири типи співвідношень геліо- та вітропотенціалу, довівши досить значні можливості спільного їх використання. Він також дослідив експериментально вітровий режим у м. Харків на відносній висоті близько 40 м над земною поверхнею, зафіксувавши його з коротким інтервалом (через 1 хв.) у вигляді унікальної бази даних, потрібної для подальших розрахунків (як приклад, вона частково візуалізована в авторефераті).

Шорсткість місцевості враховано у роботах О. Ачкасової та О.Третьякова опосередковано через особливості типу ландшафту. Метод врахування шорсткості місцевості, який було використано, базується на результатах досліджень американських вчених [10]. Для оцінки доцільності використання обраної моделі розрахунку середніх швидкостей вітру було здійснено порівняльний аналіз отриманих даних похибок моделі із існуючими даними. Дослідження похибок різних моделей представлені у роботах [9, 11].

Метою цієї роботи є удосконалення, шляхом використання ГІС, моделі розрахунку середніх швидкостей вітру на ділянках з різним поєднанням фізико-географічних умов.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- збір даних щодо використання різних моделей розрахунку вітроенергетичних характеристик;
- прогностичний розрахунок середніх швидкостей вітру для обраної ділянки із застосуванням моделі та аналіз точності отриманих результатів;
- порівняння отриманих даних із даними інших досліджень;
- аналіз результатів розрахунку швидкостей вітру та визначення оптимальних місць для встановлення вітроагрегатів.

Загальна постановка завдання

Із загальних теоретичних положень зрозуміло, що вітровий потік є чотиривимірним геофізичним полем. Три виміри просторові, четвертий – часовий. Така модель вітрового потоку є надто складною для побудови і нереальною для застосування. Тому у подальшому ми обмежимося вибором та верифікацією тривимірної моделі, припускаючи, що четвертий вимір може задаватися через осереднення стохастичних показників зміни швидкостей та пульсацій вітрового потоку, які насправді потім «враховуються» самим вітрогенератором, відповідно оснащеним для цього.

Зосередимося також на розрахункових даних для локальної території. Виходячи із стохастичної природи вітру, аналіз значних територій є нераціональним і непрактичним. Натомість, локалізовані дослідження можуть бути цікавими, навіть визначальними для вибору безпосередньо точки спорудження вітроенергетичної станції (ВЕС) із урахуванням місцевих географічних факторів: рельєфу, шорсткості поверхні, а в певних випадках (які далі не розглядаються) – характером природокористування.

Власне, саме цим визначаються і географічність дослідження, і його актуальність для вітроенергетики, що набуває популярності як продуктивна підгалузь енергоринку і, до того ж, має значну соціально-економічну значущість: вітроагрегат певної обраної потужності (з величезного діапазону таких можливостей, які є на нинішньому ринку) можна встановлювати і на подвір'ї, і на фермі, і біля водної свердловини.

Методи дослідження

Методи прогнозування вітрової енергії для ВЕС поділяють на дві категорії: фізичні, які враховують певні динамічні властивості приземного шару тропосферного повітря та його взаємодії з поверхнею землі, та статистичні, що базуються на усереднених результатах безпосередніх вимірювань. Вважається, що використання одночасно обох категорій забезпечує оптимальну точність результатів [6].

У нашому дослідженні було використано методику моделювання швидкостей вітру, яка наведена у [1]. Принципово новим є розгляд неоднорідних територій для дослідження виробництва енергії вітрогенераторами, аналіз придатності простої моделі розрахунку швидкостей вітру саме для території з фізико-географічними умовами, подібними до Харківської області, яка в своїй північно-західній частині є типовим лівобережним Лісостепом. Отже, надалі можливості використання отриманих результатів слід поки що обмежити саме лісостеповими умовами території України. Априорі зазначимо, що вони є складнішими, ніж більшість моделей для більш монотонних рівнинних територій у зв'язку з виразною структурою рельєфу і мозаїчністю шорсткості поверхні, які є важливими фізичними факторами модифікації вітрового потоку.

Виклад основного матеріалу

Вибір моделі. Здійснення розрахунків потенційного виробництва енергії базується на значенні швидкості вітру, причому чим детальнішою є інформація щодо значень швидкості вітру, тим точнішим буде прогнозоване виробництво енергії.

Найпоширенішими моделями розрахунку середніх швидкостей вітру є:

1. Аналітичні моделі (метод найближчого сусіда, зворотних зважених відстаней). Зазвичай найпростіші.

2. Емпіричні (модель впливу Дж. Клайна).

3. Лінійні моделі вітрового потоку (WAsP, MS-Micro/3), які широко використовуються для прогнозування просторової зміни середньої швидкості вітру, розподілу частот за напрямом (роза вітрів), зсуву профілю вітру та інших граничних характеристик приземного повітряного шару. Їх почали широко використовувати в 1980-х роках, коли обчислювальний ресурс був досить обмежений. Ці моделі набули статусу галузевого стандарту [11]. За їх допомогою можна було виконати швидкі та достатньо точні розрахунки для територій, де на середньорічні швидкості вітру не надто впливає наявність крутих схилів для поділу потоку, баричних систем, низько розташованих вихорів (джет-стрімів), а також інших динамічних та нелінійних явищ.

4. Моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) (WindSim), які вважають наступним поколінням моделей вітрового потоку для ВЕС. Більшість з них виходять з вимоги збереження маси та імпульсу нелінійного рівняння Нав'є-Стокса і забезпечують розрахунок лише для умови постійного профілю вітру, що є надто жорсткою і нереалістичною умовою. Натомість, кілька наукових досліджень показують, що моделі CFD усе ж таки працюють краще, ніж WAsP моделі, але не в усіх випадках.

5. Наступні за ступенем складності є мезо-

Таблиця 1. Похибки розрахунку середніх швидкостей вітру (відповідно до показання анемометра) [9, 11]

	Метод	Плоске підвищення	Відкритий пагорб	Пагорби	Гірський схил	Гори	Загальна
Аналітична модель	Зворотних зважених відстаней	3%	5%	2%	9%	12%	6%
Емпірична модель	Модель впливу Дж. Клайна	-	0%	10%	6%	-	Н
Чисельні моделі	WinSim	6%	2%	8%	8%	13%	7%
	WAsP	5%	2%	7%	8%	16%	7%
	MS-Micro/3	4%	1%	6%	8%	16%	7%
	NWP	4%	-	8%	-	-	Н

масштабні моделі чисельного прогнозу погоди (NWP), наприклад, MASS, WRF, ARPS, MC2, KAMM і т.п. [11]. Моделі NWP дають можливість обраховувати і прогнозувати широкий спектр метеорологічних явищ, але потребують значної обчислювальної потужності. Щоб розв'язати цю проблему, моделі NWP, як правило, використовують у поєднанні з лінійними «мікромасштабними» моделями вітрового потоку для досягнення можливо вищої просторової роздільної здатності.

У таблиці 1 представлено дані щодо похибок розрахунку для кожної моделі.

Дані таблиці свідчать, що незалежно від методу моделювання, невизначеність збільшується зі зростанням складності рельєфу, а також неоднорідності рослинного покриву: чим складніша місцевість, тим більшою є похибка. Жодна модель не надає точної оцінки швидкості вітру. Отже, особлива увага повинна бути приділена змістовному тлумаченню та осмисленому використанню результатів моделювання.

Емпірична база. Вперше у регіоні досліджень квазінеперевне (з інтервалом у 5 с.) фіксування швидкості вітру і автоматичний запис результатів у комп'ютері було здійснено у лабораторії альтернативної енергетики кафедри географічного моніторингу і охорони природи Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна у 2004-2005 рр. С. Величком. Анемометр було встановлено на висоті майже 40 м на даху університетського корпусу. Оброблені дані для різних типів погоди наведені у роботах [2, 3]. Завдяки цьому було отримано достовірні відомості про тонкі зміни часової структури вітрового потоку. Їх певним обмеженням є те, що вони стосуються висотно забудованої території великого міста, де за санітарними нормативами неможливо розміщувати вітроагрегати.

У нашому дослідженні використано дані безпосередніх короткоперіодичних вимірів анемомет-

ра, який було встановлено на висоті 22 м відносно земної поверхні (180 м над рівнем моря), на термін 5 місяців за холодний період року – з початку жовтня по початок березня¹.

Важливий аспект оцінювання вітрових ресурсів пов'язаний з тим, що відносна висота вітроколеса сучасного потужного вітроагрегату знаходиться в інтервалі висот 50-70 м, тобто вищій за висоту встановлення анемометра. Відомо, що в приземному шарі спостерігається, як правило, зростання швидкості вітру зі збільшенням висоти. Для екстраполяції величини швидкості вітру у вертикальній площині було використано логарифмічний закон побудови вертикального профілю вітру, а також враховано шорсткість підстильної поверхні.

Обробка емпіричних даних. Для оцінювання ймовірного розподілу отриманих значень швидкості вітру було використано функцію розподілу Вейбулла:

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right],$$

де k – параметр форми;

c – параметр масштабу, який вимірюється у м/с;

V – швидкість вітру [13].

Параметр форми k можна визначити за допомогою графіка інтегральної повторюваності швидкості вітру, побудованого в логарифмічних координатах. На осі абсцис відкладається інтегральна повторюваність швидкості вітру у відсотках від загального числа спостережень, а по осі ординат – значення швидкості вітру в метрах за секунду. Нанесення експериментальних даних на такий графік дає лінійну залежність. Котангенс кута

¹ Прим. авт.: виміри здійснювалися співробітниками згаданого у тексті кафедри за участю працівників французької вітроенергетичної компанії «Nerzh an Avel» у 2008 - 2009 рр. на характерних ділянках у Харківській області.

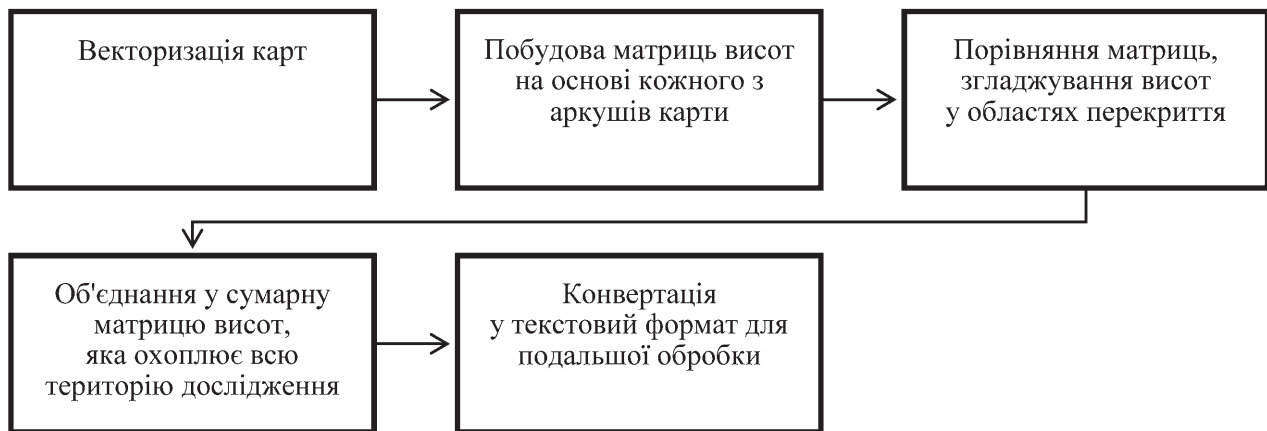


Рисунок 1. Алгоритм обробки даних про рельєф місцевості

нахилу прямої лінії до осі абсцис дає значення параметра k . Параметр масштабу розподілу Вейбулла визначається за формулою [13]:

$$c = \frac{1}{V_{\text{сер}} \Gamma(1 + 1/k)},$$

де $V_{\text{сер}}$ – середня швидкість вітру;

k – параметр форми.

Використовуючи відповідні для ділянки аргументи цієї функції, отримано параметри $k = 2,4$ та $c = 6,33$, які надалі слугують підставою для подальших розрахунків.

Врахування рельєфу. На першому етапі дослідження було побудовано сумарну матрицю висот у середовищі програми ГІС Карта 2011. За основу для побудови матриці взято топографічні карти місцевості у масштабі 1:10 000. Площа території становить 275 км². Таке охоплення є надто великим для оброблення у згаданій вище програмі WindFarm. Тому результуючу карту було поділено на частини, кожну з яких проаналізовано окремо.

Негативною властивістю аналізу у програмі WindFarm є досить значне спотворення результатів у крайових ділянках карти. Щоб його уникнути, було забезпечене перекриття суміжних модельних ділянок з величиною 50 %. Сторона квадрата складала 5 км, перекриття – 2,5 км. У такий спосіб з однієї великої, загальної для усієї території матриці, ми отримали 31 окремі матриці висот. Апаратним способом вони були об'єднані в одну, вихідну для врахування фактора рельєфу у розподілі вітропоту. Алгоритм розрахунків показано на рис. 1.

Останнє, що було зроблено на цьому етапі, – переведення (конвертування) сумарних матриць висот у текстовий формат для подальшого використання у середовищі інших ГІС.

Надалі були обчислені статистичні поверхні середніх швидкостей вітру для різних висотних рівнів, які, взяті разом, дають картину тривимірного географічного поля вітрового потоку залежно від умов місцевості.

Врахування шорсткості поверхні. На основі космічного знімку території з бази космічних знімків Google Earth у програмі WindFarm було побудовано поверхню шорсткості місцевості. Для цього проведено векторизацію об'єктів місцевості (лісів, лісосмуг, чагарників, ріллі, водосховищ, ставків, населених пунктів) на основі растрового зображення.

Кожному об'єкту присвоєно відповідне значення шорсткості на основі класифікації місцевості стосовно аеродинамічного коефіцієнта шорсткості z_0 , яку наведено у [12].

Створення тривимірної моделі вітрового потоку. Наступний етап – створення набору даних для програми WindFarm по кожній з матриць висот. Кожен набір даних має прив'язку до географічних координат. У набори даних було вміщено сітки зі значеннями висот та шорсткості місцевості. До кожного з наборів даних було прив'язано інформацію щодо рози вітрів та швидкостей вітру згідно показань анемометра. На кожній з ділянок місце розташування анемометра обрано на тій самій абсолютній (180 м) та відносній (22 м) висоті, що й у тій частині ділянки, де він розміщувався під час вимірювань. Далі здійснено моделювання швидкостей вітру, для якого було використано програмний модуль WindFlow. Під час моделювання спочатку було проведено математичний розрахунок швидкостей вітру за заданими параметрами, потім – побудова поверхонь середніх швидкостей вітру для даної території.

Виявлені проблеми. Слід зазначити, що за результатами побудови поверхонь швидкостей вітру ми отримали деяку похибку розрахункових швидкостей вітру. Ця похибка пов'язана з різноманітністю показників шорсткості в межах ділянки та великими перепадами висот для території. Розмір похибки встановлено шляхом об'єднання поверхонь розподілу швидкостей вітру для різних ділянок. Найбільшою виявилась похибка для акваторії водосховища.

Встановлення похибки моделі розрахунку.

Величина розбіжностей між значенням у зонах переходу складала близько 0,5 м/с (10 %), хоча, за іншими дослідженнями, наведеними у [11], похибка цієї моделі для локальних ділянок може скласти близько 6%. Аналіз причини появи у нашому дослідженні більшої похибки дав підстави для припущення, що нею могла бути надмірно велика комірка подання просторової інформації (5x5 км), що надалі слід врахувати.

Внаслідок дослідження встановлено непридатність (принаймні, для умов шорсткості поверхні лісостепу) логарифмічного закону зміни швидкості вітру з висотою. Наприклад, вимірювання показали, що для рівного невисокого пагорбу спостерігається посилення швидкості вітру близько до земної поверхні, що спричинює зміну у вертикальному профілі [4]. При аналізі отриманої поверхні можна дійти висновку, що найбільші перепади у швидкості вітру спостерігаються у місцях схилу, а на рівнинній території на сході (поверхня водосховища) та північному заході похибки менші. Тому для обраної ділянки використано ступеневий закон зміни швидкості вітру з висотою [10], відповідно до якого перераховано отримані розрахункові дані поля швидкостей вітру.

Зазначимо, що розрахунок проводився спочатку для місця встановлення анемометра. Надалі на їх основі обчислено ймовірнісні показники на всю територію дослідження згідно з моделлю розрахунку MS-Micro, за якою враховуються атрибутивні показники місцевості.

Дослідження результатів моделювання дало підстави для висновку, що застосування простої лінійної моделі розрахунку вітроенергетичних характеристик має обмежуватися незначною територією дослідження та супроводжуватися порівняльним застосуванням різних методик. У нашому випадку обов'язковим є додатковий розрахунок швидкостей вітру за ступеневим законом, який буде висвітлено авторами у наступних роботах.

Аналіз результатів

За результатами моделювання автори довели, що найбільші швидкості вітру в межах тестової ділянки спостерігаються на плакорі, у північній його частині, яка характеризується найбільшими висотами на досліджуваній місцевості. Попри тривіальність цього результату, він має методичне значення, пересвідчуючи у реальності моделі.

Деяке зростання швидкостей вітру спостерігається повсюдно на прибережному схилі, що спричинене насамперед близькістю водосховища (хоча априорі вважається, що малі водойми не впливають на вітровий потік безпосередньо). Напено, тут має вирішальне значення істотне зменшення шорсткості водної поверхні порівняно з суходолом, тому вітри певних напрямів набувають більшої швидкості над поверхнею водосховища. Отже, слід керуватися і розою вітрів.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Встановлено, що в складних фізико-географічних умовах лівобережного Лісостепу України слід прискіпливо визначати ділянки розміщення вітроагрегатів, тому що вітроенергетичний потенціал залежить від сукупності декількох природних чинників: рельєфу, рослинного покриву та наявності водних об'єктів. Причому, такі тонкощі як структура рельєфу і навіть співвідношення напрямків його форм із розою вітрів істотно визначають відмінності у просторово-часовому розподілі вітропотоків, отже, – його енергетичної ефективності. З огляду на це, виробництво енергії вітрогенераторами має значно відрізнитися для різних потенційних положень відповідно до конкретних фізико-географічних умов. Визначено, що серед виділених ділянок (плакор, схил, водосховище) найперспективнішою для використання енергії вітру є найвища ділянка, розташована на плакорі. Найменші середні швидкості вітру спостерігаються у широкій частині водосховища, оточеній з усіх сторін лісовими насадженнями, та узбережним схилом з боку переважаючого напрямку вітрів.

Хоча підтверджено, що домінуючим параметром при проектуванні виробництва енергії є абсолютна висота місцевості, встановлено, що за умови сприятливого впливу комплексу інших чинників, середні швидкості вітру можуть сягати великих значень навіть у точках місцевості, які не характеризуються домінуючими висотами. Більшим виробництвом енергії буде у тій місцевості, яка має найменші показники шорсткості та достатньо відкрита для розгону повітряних потоків.

Отже, моделювання за допомогою ГІС дає змогу повніше оцінити перспективи розміщення вітроенергетичних станцій та виділити на локальних ділянках точки місцевості, що мають найбільший вітроенергетичний потенціал.

References [Література]

1. Achkasov O.O., Tretyakov O.S. (2009). GIS-modeling of wind velocities in central Vovchansk district of Kharkiv region. *Problems of Continuing Education and cartography: collection of scientific papers*. 9 Issue. Kyiv Institute of Advanced Technology, 13-17. [in Ukrainian].
[Ачкасова О. О., Третьяков О. С. ГІС-моделювання швидкостей вітру центральної частини Вовчанського району Харківської області // Проблеми безперервної освіти і картографії: зб. наук. праць. Випуск 9. – К.: Інститут передових технологій, 2009. – С. 13-17.]

2. Velichko S.A., Tretyakov O.S. (2003). Analysis of the spatial and temporal distribution of wind speeds in Kharkiv region as a basis for wind energy potential assessment. *Materials of 4th Intern. Interdisciplinary scientific-pract. Conference Modern problems of humanization and harmonization of management*. Kharkov: Kharkov National University Publishing, 314-315. [in Ukrainian].
[Величко С.А., Третяков О. С. Аналіз просторово-часового розподілу швидкостей вітру на території Харківської області як основа оцінки вітроенергетичного потенціалу // Матеріали 4-ї Міжнар. міждисциплінарної наук.-практ. конференції «Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління». – Харків: Вид-во ХНУ. – 2003. – С. 314-315.]
3. Velichko S.A. (2006). *Natural resources provision for hybrid solar-wind power systems (within Ukraine flats territory)*: Abstract thesis... candidate geography sciences: 11.00.11. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University. [in Ukrainian].
[Величко С.А. Природно-ресурсне забезпечення гібридних геліо-вітроенергетичних систем (в межах рівнинної території України): автореф. дис. ...канд. геогр. наук: 11.00.11. – Харків: ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2006. – 20 с.]
4. *Wind power*. Ed. D. de Renzo: Trans. from English; ed. Shefter J.I. (1982). Moscow: Energoatomizdat. [in Russian].
[Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ.; под ред. Я. И. Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.]
5. *Energy Strategy of Ukraine to the year 2030*. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13> [in Ukrainian].
[Енергетична стратегія України до 2030 року. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>]
6. Kuznetsov M.P. (2010). Forecasting methods of wind power stations electricity production. *Renewable energy*, 3, 42-48. [in Ukrainian].
[Кузнєцов М.П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 3. – С. 42-48.]
7. Syrotiuk M. I. (2008). *Renewable energy sources: manual*. Lviv: Publishing center of Ivan Franko Lviv. National University. [in Ukrainian].
[Сиротюк М. І. Поновлювані джерела енергії: навч. посібник. – Львів: Видавничий центр Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка, 2008. – 247 с.]
8. Smerdov A.A., Bulba Ye.M. (2011). Statistical characteristics of wind speed in Poltava region. *Journal of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 153-157. [in Ukrainian].
[Смердов А. А., Бульба Є. М. Статистичні характеристики швидкості вітру в регіоні м. Полтави // Вісник Полтав. держ. аграр. академії. – 2011. – № 1. – С. 153-157.]
9. Beaucage P., Brower M. C., Tensen J. (2014). Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping. *Wind Energy*. V. 17, 2, 197-208.
10. Cataldo J., Zeballos M. (2009). *Roughness terrain consideration in a wind interpolation numerical model*. 11th Americas Conference on Wind Engineering. San Juan, Puerto Rico.
11. Comparison of WASP, MS-Micro/3, CFD, NWP, and Analytical Methods for Estimating Site-Wide Wind Speeds / VanLuvanee D. et al. (2009) // Proceedings from AWEA Windpower.
12. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (2012). *WMO*, 8. Geneva. http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=12407#.VYmr9WTwmGM
13. Johnson G. L. (2006). *Wind Energy Systems*. Kansas: Kansas State University.
14. Volkovaia O. O., Tretyakov O. S. (2014). Geoinformational support of wind power development at the local level. *Problems of continuous education of geographical education and cartography*. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University 19. 117-120 [in Ukrainian: name of the edition].
[Волковаїа О. О., Третяков О. С. Geoinformational support of wind power development at the local level // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. – Вип. 19. – С. 117-120.]

УДК 551.580

doi: 10.15407/ugz2015.04.016

Л.С. Рибченко, С.В. Савчук

Український гідрометеорологічний інститут, Київ

ПОТЕНЦІАЛ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КЛІМАТИЧНИХ РЕСУРСІВ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ В УКРАЇНІ

Мета публікації – оцінка геліоенергетичного потенціалу території України з визначенням перспектив розвитку геліоенергетики. У сучасних умовах, коли важливого значення набуває питання енергетичної незалежності України, розвиток геліоенергетики є перспективним напрямком використання природного потенціалу відновлювальних джерел енергії. У відповідних таблицях представлені спеціалізовані показники геліоенергетичних кліматичних ресурсів за 1961–1990 рр. та їх значення на окремих станціях спостереження. Визначено внесок прямої сонячної радіації в складі сумарної за радіаційно-теплий період (квітень – вересень). У зв'язку зі зміною радіаційних характеристик наведено значення спеціалізованих показників за 1991–2014 рр. Встановлено на основі моніторингу сонячної радіації на початку XXI ст. збільшення складових радіаційного режиму, що зумовлюють доцільність використання геліоенергетичних ресурсів, є підставою для розвитку геліоенергетики на більшій частині території країни.

Ключові слова: геліоенергетичні ресурси; спеціалізовані показники геліоенергетичних ресурсів; пряма і сумарна сонячна радіація; тривалість сонячного сьйва.