

the annual harmonic in the seasonal fluctuations of these values at individual stations usually exceeds 90 %.

Noticeable semi-annual harmonics are detected in the seasonal variation of atmospheric pressure (13.6 %) and amount of precipitation (26.0 %). In a spatial sense, their contribution is very varied for precipitation (from 16.8% in Zhytomyr to 32.8 % in Olevsk) and remained almost unchanged (13-14 %) for atmospheric pressure. Perhaps, this is due to the influence of factors of different scales.

The third harmonic (with a period of 4 months) causes significant perturbation only in the annual variations of atmospheric pressure (16.0 %).

Usually the intensity of the higher orders harmonics is small. The exception is only the fifth harmonic (with a period of 2.4 months) of fluctuations of atmospheric pressure at sea level (the contribution of this harmonic is greater than 6 % at all weather stations).

Also the synchronicity of the timing of the maxima of the annual harmonic for individual pairs of meteorological values is analyzed.

**Keywords:** mean monthly values; seasonal oscillations of meteorological value; amplitude and phase of periodic oscillations; climatological standard period; Zhytomyr Polissya.

**Надійшла до редколегії 28.12.2016**

УДК 551.582.2

**Ошурок Д.О.**

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м.Київ

## **КЛІМАТОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ОБМЕЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ**

**Ключові слова:** вітроенергетичний потенціал, швидкість вітру, кліматологічна оцінка, моделювання, вітрова установка

**Вступ.** Розвиток альтернативної енергетики є однією з найбільш пріоритетних задач, що поставлена світовою спільнотою з метою вирішення в першу чергу екологічних проблем, пов'язаних зі спалюванням викопного палива. Одним з найбільш потужних та перспективних альтернативних джерел енергії є вітер, який являє собою направлений рух повітряних мас. У глобальному масштабі вітер виникає через нерівномірне нагрівання земної поверхні, і як наслідок – нерівномірний розподіл атмосферного тиску, та дії сил інерції, спричинених обертанням Землі [2, 23, 31]. За приблизними оцінками, потужність вітрової енергії в масштабах планети оцінюється в 370 ТВт [13]. Це дає підстави стверджувати, що виробництво електроенергії вітровими агрегатами в багато разів може перевищувати кількість енергії, яка на сьогоднішній день споживається у світі [13, 23].

З давніх-давен енергію вітру використовували у господарських цілях (перемелювання зерна, перекачування води тощо). В останні кілька десятиліть активного розвитку набула вітрова енергетика, як окрема галузь сучасної енергетики [2, 7, 20, 23, 28]. Відомо, що характеристики вітру у нижній частині атмосфери визначаються не лише структурою баричного поля атмосфери (основний чинник), але й значною мірою залежать від рельєфу, типу підстильної поверхні (рослинного покриву, забудов, наявності великих водойм тощо) та характеристик граничного шару [17, 22]. З огляду на це, важливим етапом в утилізації теоретично можливого потенціалу вітрової енергії є детальна (з високою роздільною здатністю) оцінка просторово-часового розподілу кліматичних характеристик вітру [20]. Однак проведення такої оцінки потребує вирішення ряду труднощів, пов'язаних з дискретністю емпіричної інформації про вітер та інші важливі характеристики граничного шару атмосфери, які визначаються на

**Гідрологія, гідрохімія і гідроekологія. – 2017. – Т.1(44)**

метеорологічних станціях, а також зі значними затратами в ресурсах і у часі при обчисленнях.

**Метою** роботи є аналіз основних методів оцінки вітроенергетичного потенціалу обмежених територій. В роботі розглянуто деякі теоретичні аспекти кліматологічного оцінювання вітрових ресурсів та проаналізовано сучасні підходи для проведення даного роду досліджень.

**Виклад основного матеріалу. Кліматична інформація та оцінка впливу підстильної поверхні у вітроенергетиці.** Вітер є надзвичайно мінливою величиною, що змінюється в широкому спектрі просторових та часових масштабів, включаючи і мікомасштаби (турбулентні пульсації) [21]. Проте вимірювання швидкості вітру на метеорологічних станціях проводять з деяким інтервалом осереднення залежно від вимірювального пристрою (2 хв за флюгером, 10 хв по анеморумбометру або анемометру) [12, 18]. Крім того, спостереження за вітром на метеостанціях в Україні проводять з інтервалом у 3 години, тобто – 8 разів на добу. Більш затратними, але значно інформативнішими є запуск радіозондів (дані про вертикальний профіль), використання радарів та лідарів, датчиків на метеорологічних баштах. Інколи вимірювання проводять на вершині башти самих вітрових установок, щоправда результати таких вимірів дещо спотворюються внаслідок роботи самої установки (в середньому швидкість вітру за ротором вітроустановки/турбіни зменшується на 20%) [34, 41]. Хоча в цілому такі вимірювання співставні з даними спостережень на метеорологічних баштах [41].

Загалом, першим кроком на шляху визначення оптимальних місць розміщення вітроенергетичних установок (ВЕУ) є кліматологічне оцінювання та районування території за вітроенергетичним потенціалом. Виходячи із конкретних цілей, кліматичну інформацію у вітроенергетиці можна розділити на такі види [8, 12, 17, 18]: 1) кліматичні характеристики, які використовуються при оцінці вітроенергетичного потенціалу – середня багаторічна швидкість вітру (в цілому за рік та по місяцям), добовий хід швидкості вітру в різні сезони, повторюваність швидкості вітру по градаціям в різні сезони та місяці року (імовірнісний/частотний розподіл), вертикальні профілі швидкості вітру, коефіцієнти, що враховують зміну швидкості вітру у просторі під впливом макро- і мезонеоднорідностей підстильної поверхні; 2) інформація для більш точної оцінки ефективності роботи ВЕУ – неперервна тривалість швидкості вітру вище заданого значення, період «енергетичного затишшя» (недостатня для початку роботи установки швидкість); 3) кліматичні характеристики, необхідні для конструювання ВЕУ – розрахункова максимальна швидкість вітру різної повторюваності, дані про пориви вітру, інтегральна повторюваність швидкості вітру вище заданого значення і т. д. Важливою прикладною інформацією у вітроенергетиці є дані про повторюваність швидкостей різних напрямів вітру (кутові градієнти швидкості суттєво впливають на роботу установки в процесі її орієнтації «на вітер») [23] та характеристики ожеледно-паморозових відкладень [1, 12, 18, 38]. Дотримання екологічних та санітарних норм вимагає врахування інформації щодо відстані до найближчих житлових будинків, шляхів міграції птахів тощо [2]. З метою оптимізації затрат, виробництво електроенергії зазвичай здійснюється групою вітроустановок, об'єднаних у ВЕС (вітроелектричні станції), тому важливим є розрахунок оптимального розміщення окремих агрегатів всередині ВЕС [17, 34].

Існує два способи для проведення розрахунку імовірнісного/частотного розподілу швидкості вітру. Перший спосіб дає найбільш точні результати, так як спирається на використання фактичних даних. Його суть полягає у визначенні частки швидкостей вітру, які потрапили у заданий інтервал. Дана процедура проводиться для усього діапазону можливих значень [2]. Очевидно, достовірність

оцінки залежить від тривалості періоду, що охоплюють дані спостережень. Через відсутність необхідного масиву даних часто користуються другим способом, що базується на апроксимації фактичного розподілу аналітичними/теоретичними формулами. Дослідження показали, що в умовах рівнинної місцевості використання двопараметричного розподілу Вейбула дає найбільш точні результати в діапазоні швидкостей 4-20 м/с. Диференціальна функція розподілу Вейбула має вигляд [2, 6, 18, 27, 38, 39]:

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

де  $V$  – модуль швидкості вітру,  $c$  і  $k$  – параметри розподілу. Параметри  $c$  і  $k$  характеризують масштаб зміни функції розподілу по осі швидкостей та форму кривої розподілу відповідно. Детальні роз'яснення щодо розрахунку цих параметрів представлено в [12, 18]. Порівняльний аналіз результатів апроксимації розподілом Вейбула та емпіричного розподілу швидкостей вітру виконано в [27].

Для проведення оцінок вітроенергетичного потенціалу на висотах дуже важливими є дані про вертикальний профіль атмосфери, адже колесо вітрової установки розміщують на деякій висоті над землею поверхнею. Оскільки дана інформація доступна лише в окремих точках вимірювання, вертикальний профіль вітру часто апроксимують (екстраполюють) використовуючи степеневу (2) та логарифмічну (3) формули [2, 4, 7, 14, 23, 27, 29, 35]:

$$V = V_1 \cdot \left(\frac{h}{h_1}\right)^m, \quad (2)$$

$$V = V_1 \cdot \frac{\lg\left(\frac{h}{h_0}\right)}{\lg\left(\frac{h_1}{h_0}\right)}, \quad (3)$$

де  $V_1$  – швидкість вітру, виміряна поблизу земної поверхні на висоті  $h_1$ ,  $V$  – швидкість, яку потрібно знайти на висоті  $h$ ,  $h_0$  – висота, на якій швидкість вітру дорівнює нулю (залежить від шорсткості підстильної поверхні),  $m$  – безрозмірний параметр.

У більшості досліджень показник  $m$  в степеневій формулі приймається рівним 0,143 (1/7) або 0,2 залежно від типу підстильної поверхні (для морських акваторій чи відкритих місць та для ділянок суші з елементами захищеності відповідно) [27, 29, 35]. Останні дослідження показали залежність цього показника як від сезону року так і від величини середньої швидкості вітру. Середньорічні значення  $m$  змінюються від 0,42 за середньої швидкості  $\bar{v} = 1,5$  м/с до 0,12 при  $\bar{v} > 28$  м/с [2, 18]. В [27] представлено емпіричну формулу з розрахунку цього параметру, а в [29] метод розрахунку  $m$ , де зазначено що такий підхід дає більш об'єктивні оцінки порівняно із використанням сталого  $m = 1/7$ . У роботах [29, 40] відмічається, що параметр  $m$  залежить не лише від особливостей орографії та підстильної поверхні, але й від стану стратифікації граничного шару атмосфери також. В [29] проаналізовано його сезонний та географічний розподіл. Визначено, що великі амплітуди швидкості приземного вітру характерні для умов чітко вираженого добового ходу стратифікації [41]. У європейських країнах та США досить поширеним підходом для екстраполяції швидкості вітру на висоти є використання логарифмічного профілю з урахуванням температурної стратифікації атмосфери, що будується на основі теорії подібності Моніна-Обухова [21, 40, 41].

**Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2017. – Т.1(44)**

вертикального профілю швидкості вітру, виконані в [41] свідчать про те, що найбільш точною є екстраполяція за логарифмічною формулою, починаючи від рівня поруч із висотою розташування вітроколеса ВЕУ. Очевидно, що проведення такої процедури вимагає наявності даних висотних вимірювань. В той же час використання логарифмічного профілю для екстраполяції з висоти флюгера (10 м) є обґрунтованим лише при нейтральній стратифікації граничного шару атмосфери [4, 21, 29, 41].

Отримання необхідної інформації для проведення розрахунку просторово-часового розподілу характеристик вітру у нижній частині граничного шару атмосфери спирається на результати тривалих у часі (декілька десятків років і більше) стандартних вимірювань на метеорологічних станціях. У разі відсутності цих даних проводять короткотермінові експедиційні вимірювання. Проте результати цих вимірювань не можуть використовуватись для кліматичних оцінок (кліматичними вважаються дані за 30-річний період осереднення), оскільки не враховують міжрічну мінливість [21]. По-друге, дані спостережень про середні швидкості вітру відповідають конкретним рельєфним та ландшафтним умовам в районі метеостанції та на певній визначеній висоті над землею поверхнею (висота флюгера, 10 м). Для різних станцій ці умови можуть значно відрізнятись, тому з метою проведення об'єктивного порівняння прийнято використовувати середні багаторічні швидкості вітру [2]. В [18] відмічається, що для отримання достовірних даних по повторюваності заданих швидкостей вітру потрібно мати ряд спостережень за флюгером або анеморумбометром за період не менше 10 років. Виходячи з цього, у кожному конкретному випадку потрібно робити прив'язку до стаціонарної метеорологічної мережі [9, 20]. Зокрема в [12] приведений метод прив'язки кліматичних характеристик короткого ряду експедиційних вимірювань (не менше 1 року) до характеристик ряду тривалих метеорологічних спостережень. Поблизу земної поверхні величина питомої потужності вітру різко змінюється із висотою, і в типових випадках зростає на 30-60% при переміщенні вимірювального пристрою з 10 до 20 м [7]. Отже не менш важливою при розрахунках процедурою є приведення даних вимірювань до висоти флюгера [19]. Проте основними факторами, які стають на заваді проведення об'єктивного просторового-часового аналізу є недостатня щільність пунктів спостережень за вітром, а також неоднорідність та наявність пропусків у самих даних [29]. В окремих випадках переміщення пункту спостережень може призвести до зміни середньої річної швидкості вітру більш ніж на 1 м/с [40].

Об'єктивна оцінка вітрових ресурсів території вимагає не лише даних спостережень за вітром, але й врахування особливостей топографії місцевості. Недоліком наземних спостережень за вітром є їх суттєва залежність від міри захищеності метеостанції. Дані вимірювань, як правило, відображають вітровий режим лише в районі пункту спостережень, який часто знаходиться під впливом вітрової тіні від оточуючих перешкод (дерева, будівлі тощо) або форм рельєфу [20, 22]. Вертикальний масштаб зони впливу таких перешкод становить приблизно 3-кратну її висоту, а горизонтальний – відстань, що перевищує висоту даного об'єкту в 30-40 разів [17, 39]. Іноді, з метою врахування умов відкритості метеомайданчика на місцевості користуються класифікацією В.Ю. Мілевського, з допомогою якої визначають степінь (коефіцієнт) відкритості метеостанції. В [2, 19] представлений спосіб приведення вимірюваної на висоті флюгера швидкості вітру до умов однорідного рельєфу та відкритої місцевості, що базується на використанні цієї класифікації (застосовується переважно для рівнинних територій [12]). Класифікація територій за параметром шорсткості поверхні приведена в [17, 39]. У ній виділено 4

класи топографічних умов, що відповідають певним значенням параметру шорсткості (від 0,0002 м до 0,4 м).

**Розрахунок вітроенергетичного потенціалу та особливості утилізації вітрової енергії.** Потужність вітрового потоку (вітроенергетичний потенціал), що припадає на одиницю площі його поперечного перерізу рівна [4, 7, 13, 23, 39]:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3, P = Bm/m^2, \quad (4)$$

де  $V$  – швидкість вітру ( $[V] = m/c$ ),  $\rho$  – густина повітря ( $[\rho] = kg/m^3$ ).

Відповідно до формули (4) вітроенергетичний потенціал пропорційний кубу його швидкості та густині повітря, яка залежить від висоти та температури. У практичних розрахунках найчастіше використовують значення густини рівне  $1,225 \text{ кг/м}^3$ , що відповідає умовам стандартної атмосфери на рівні моря (температура повітря дорівнює  $15^\circ\text{C}$ , атмосферний тиск –  $1013 \text{ гПа}$ ) [1, 7, 35, 38]. Використання змінної величини  $\rho$  є доцільним у районах зі значними перепадами висот (тиску) та/або за наявності чітко вираженого річного ходу швидкості вітру з максимумом у холодні місяці [1, 7, 28, 38].

Насправді, вітрова установка перетворює в корисну роботу лише частину енергії. Сучасні вітрогенератори при роботі в найбільш ефективному (розрахунковому) режимі перетворюють в механічну роботу не більше 45-48%, за більш новими даними [38, 41] до 50% кінетичної енергії вітрового потоку через різноманітні втрати, причому коефіцієнт використання енергії вітру не може перевищувати порогове значення, рівне 0,593. Ця частина існуючого в природі енергетичного потенціалу вітру являє собою технічний потенціал. Існує також поняття економічного потенціалу, що є частиною від технічного, і який може бути реалізований з економічно доцільними витратами порівняно з традиційними енергоресурсами [2, 13, 17, 23]. Економічна вигода від використання вітрової енергії проаналізована в [10].

Крім того, швидкість вітру яка може бути утилізована, співпадає з фактичною лише у певному діапазоні значень, що визначається трьома важливими технічними характеристиками вітрової установки [1, 9, 35, 38]. Це мінімальна робоча (*cut-in speed*)  $V_0$ , номінальна (розрахункова, *rated speed*)  $V_p$  та максимальна робоча (*cut-out speed*)  $V_m$  швидкості вітру. У більшості сучасних вітрових агрегатах мінімальна робоча швидкість становить  $3 \text{ м/с}$ , максимальна робоча –  $25 \text{ м/с}$  [29, 35]. Номінальна швидкість залежить від технічної складової установки (здебільшого від її потужності), і складає в середньому  $12-16 \text{ м/с}$  [38]. При малих швидкостях вітру  $V < V_0$  вітроустановка простоює, якщо  $V_0 < V < V_p$  кількість виробленої енергії зростає пропорційно до фактичної швидкості вітру аж до досягнення номінальної потужності установки при швидкості  $V_p$ . Задля запобігання пошкоджень установки, робота двигуна в діапазоні швидкостей  $V_p \leq V < V_m$  регулюється таким чином, що лопаті обертаються з однією і тією ж швидкістю. При цьому виробляється однакова кількість енергії, що відповідає номінальній потужності. З тієї ж причини, при перевищенні максимальної робочої швидкості  $V > V_m$  робота установки на деякий час припиняється. Інформація про індивідуальні технічні характеристики установки, як і дані про вітровий режим, є необхідною складовою для проведення розрахунку кількості виробленої цієї установкою електроенергії за одиницю часу [17, 27, 35].

Враховуючи вище сказане, слід відмітити, що доступна енергія вітру значно менша вітроенергетичного потенціалу за наступних причин [1, 38]: 1) швидкості, рівні або вищі максимальної робочої суттєво підвищують величину середнього вітроенергетичного потенціалу; 2) питома потужність вітру значною мірою втрачається на швидкостях вище номінальної через зменшення ефективності установки у діапазоні  $V_p \leq V < V_m$ . «Втрати» енергії на швидкостях менше мінімальної робочої є порівняно незначними. Також встановлено, що кількість виробленої електроенергії не є пропорційною до площі яку захоплює колесо вітроустановки, оскільки зі збільшенням довжини лопатей скорочується її коефіцієнт корисної дії [38].

Величина вітроенергетичного потенціалу являє собою деяке стає значення, що характеризує вітроенергетичні ресурси за великий проміжок часу (кілька десятків років). Порівняно точну оцінку потенційно можливих вітроенергетичних ресурсів можна отримати якщо розглядати кожне вимірне значення швидкості вітру з усього масиву багаторічних даних. Менш наближена, але більш швидка в розрахунках оцінка може бути отримана використовуючи перші три моменти функції розподілу швидкості вітру – математичне очікування (середнє), дисперсію та коефіцієнт асиметрії [1, 18]. Використання лише середнього арифметичного значення є некоректним, адже величина потенційних вітрових енергоресурсів при цьому суттєво занижується [1, 4, 9, 39]. Навіть при використанні середніх добових значень замість строкових, вітроенергетичний потенціал буде в цілому занижений на 20-30% [4].

Загалом, вітрові установки поділяються на три класи залежно від їх функціонального використання [13]: 1) механічні (перетворюють енергію вітру в механічну роботу (найчастіше використовуються для перекачування води в насосних станціях)) – потужністю до 10 кВт; 2) автономні (використовуються в приватних господарствах для обігрівання та/або електрозабезпечення із застосуванням акумуляторів) – малої потужності (до 100 кВт); 3) великогабаритні установки, які працюють на електричну мережу – середньої (100-1000 кВт) та великої (1 МВт і більше) потужності (термін служби таких установок понад 20 років, а вироблена електроенергія є дешевшою, ніж на теплових електростанціях). Найбільш широкого застосування набули автономні вітрові агрегати. З огляду на сучасний рівень розвитку вітроенергетики, дати приблизну оцінку економічній доцільності роботи вітрових установок можна на основі середньої швидкості вітру  $\bar{V}$ : швидкості вітру  $\bar{V} < 3 \text{ м/с}$  – безперспективні для будь-яких ВЕУ, швидкості  $3 \leq \bar{V} < 3,5 \text{ м/с}$  – малоперспективні,  $3,5 \leq \bar{V} < 4 \text{ м/с}$  – перспективні для ВЕУ малої потужності,  $4 \leq \bar{V} < 5,5 \text{ м/с}$  – перспективні для ВЕУ малої та середньої потужності і  $\bar{V} \geq 5,5 \text{ м/с}$  – перспективні для будь-яких ВЕУ [4, 14, 23]. Проте для точнішої оцінки доцільності встановлення тієї чи іншої ВЕУ потрібно мати інформацію про розподіл швидкості вітру та його вертикальний профіль.

**Дослідження вітроенергетичних ресурсів в Україні та за кордоном.** Енергетичну цінність вітру визначає його швидкість [13, 22, 23]. Найбільш сприятливими для вітроенергетики є території з місцевою циркуляцією (бриз, гірсько-долинні вітри), яка характеризується порівняно стабільним режимом швидкості вітру [12]. Надзвичайно перспективними також є мілководні ділянки морської шельфової зони, які можуть мати у 2,5-3 рази вищий вітроенергетичний потенціал порівняно з відкритими ділянками узбережжя [18].

Виявлено, що значне зростання вітроенергетичного потенціалу відмічається в нижньому 200-метровому шарі атмосфери (*wind energy layer*), отже саме ці висоти є актуальними для використання у вітроенергетиці [41]. Згідно [29, 35, 36, 40]

Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2017. – Т.1(44)

стандартна висота розміщення колеса вітроенергетичної установки (*hub height*) становить 80 м, тому більшість розрахунків енергетичних характеристик вітру проводиться саме для цієї висоти. Майже у всіх кліматичних зонах України вітроенергетичний потенціал зростає на висоті 30 м в 1,5 рази порівняно з 10 м, на висоті 60 м – в 2 рази, на 100 м – в 2,5 рази [13]. Аналіз кількості виробленої за рік електроенергії проведений в [27] підтверджує її стійке зростання із висотою. Швидкість вітру на висотах над різними типами підстильної поверхні також є різною [41], хоча дослідження проведені в [19] вказують на вирівнювання з висотою режиму швидкості вітру (енергетичного потенціалу), тобто їх більш плавний просторовий розподіл.

У багатьох роботах [наприклад 30, 38, 39] проведено оцінювання/ районування територій за потенціалом вітрової енергії, в тому числі й України [3, 4, 5, 8, 9, 11, 21, 22]. Зокрема у [21] кліматологічна оцінка вітроенергетичного потенціалу для Криму проведена на основі розрахунків чисельної (гідродинамічної) регіональної моделі циркуляції атмосфери, а у [3, 15, 16] з цією метою використано мезомасштабну діагностичну негідродинамічну модель. В [5, 8, 9] досліджено також сезонний розподіл вітроенергетичних характеристик по території України.

В країнах заходу доволі поширеною методикою розробки карт просторового розподілу характеристик вітру є використання регіональних кліматичних моделей. У даному випадку вхідною інформацією для моделювання з метою подальших кліматологічних оцінок часто слугує вибірка репрезентативних днів. Найбільш поширеним методом відбору такої вибірки є так званий «виробничий» підхід (*“industry” approach*), відповідно до якого з усього багаторічного (10-30 років) масиву даних (найчастіше глобальний реаналіз) відбирається 1-річна вибірка з рівним представленням усіх календарних днів року [36]. Важливою перевагою такого підходу є суттєве скорочення об'єму розрахунків при подальшому моделюванні з дрібнішим просторовим кроком. Головне припущення – статистичні характеристики відібраної вибірки повинні відображати статистичну поведінку повного ряду. В [36] представлений більш удосконалений метод відбору репрезентативної вибірки, що базується на статистичному аналізі (метод Монте-Карло). Порівняно зі стандартним підходом, нова методика дає точніші результати для територій з відносно однорідним рельєфом та невеликих ділянок в цілому.

Моделювання вітроенергетичних ресурсів в районах зі складним рельєфом та місцевою циркуляцією є доцільним при застосуванні чисельних мезомасштабних гідродинамічних або негідродинамічних моделей [25], в яких вхідною інформацією зазвичай слугують дані реаналізу (ERA-40, ERA-Interim, MERRA і т. д.) [21, 30, 34, 35, 36]. В даному випадку точність моделювання суттєво залежить від деталізації даних про рельєф та тип підстильної поверхні, адже від точності задання цих характеристик зазвичай залежить величина отриманих похибок [41]. Зокрема точність моделювання характеристик швидкості вітру значно залежить від просторового кроку моделі [25]. Раніше проведені дослідження показують, що лише моделі з високою просторовою роздільною здатністю (~ 1,3 км) можуть враховувати основні чинники, що формують добовий хід швидкості вітру на мезомасштабах [41]. Наприклад, результати розрахунків відомої чисельної мезомасштабної моделі WRF (*Weather Research and Forecasting*), виконаних у [25, 38] показують, що просторовий крок моделі 3 км є занадто грубим для об'єктивної оцінки вітроенергетичного потенціалу гірських районів. З метою покращення точності результатів, в [38] використане додаткове метеорологічне забезпечення – мікромасштабна модель WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) [39] з високою просторовою роздільною здатністю (100 м), реалізація якої здійснюється двома кроками: 1) розрахунок загального вітрового режиму для всієї території моделювання шляхом

залучення різних параметризацій в граничному шарі атмосфери та усунення (на основі певних припущень) ефектів локальної/місцевої топографії; 2) модифікація «фонового» вітрового режиму відповідно до специфічних для кожної ділянки місцевості характеристик орографії та підстильної поверхні. У зазначених умовах такого роду мікромасштабні моделі є важливим інструментом для проведення деталізованих оцінок [25]. Іноді, використовують спрощений варіант мезомасштабних моделей, в яких здійснюється динамічна підгонка/адаптація приземного вітру під дрібномасштабні особливості орографії [30]. Такий підхід є виправданим для аналізу в районах, де вітровий режим значною мірою формують місцеві вітри (наприклад бора, яка періодично виникає на прибережних ділянках відокремлених від суші невисокими гірськими хребтами [12]). Результати розрахунків є точнішими (зокрема вдається краще відтворити розподіл сильних вітрів) при порівняно незначних обчислювальних затратах, незважаючи на те, що просторовий крок моделі значно зменшений. Досить часто використовують негідродинамічні моделі типу CALMET. Їх перевага полягає у суттєвому спрощенні розрахунків порівняно з чисельними моделями. Щоправда, результати досліджень проведених у [24] показують, що точність розрахунків у CALMET значно залежить від кількості та якості вхідної метеорологічної інформації, а також рівномірності розташування пунктів спостережень. Виявлено, що модель є більш чутливою до вхідних даних, ніж до вибору контролюючих параметрів моделі. Іноді, з метою створення масиву багаторічних даних з малою часовою дискретністю (до 1 години) застосовують методи стохастичного моделювання. Використовуючи цей підхід, в [26] змодельовані флуктуації швидкості вітру із подальшим створенням «штучних» часових рядів швидкості вітру з 10-хвилинною часовою дискретністю на основі розрахунків двох мезомасштабних моделей (MM5 та NZLAM). Звісно, даний метод оцінки вітроенергетичного потенціалу менш точний порівняно з вище перерахованими, хоча створені часові ряди досить добре корелюють з даними реальних вимірювань.

**Оцінка довгострокової динаміки вітрових ресурсів.** З точки зору оцінки вітроенергетичного потенціалу у довгостроковій перспективі потрібно провести аналіз динаміки просторово-часового поля швидкості вітру. Результати аналізу трендів швидкості вітру на основі даних метеорологічних вимірювань, виконаного в [33] для усїєї території Китаю, підтверджують висловлені раніше припущення, в яких зменшення середньої швидкості приземного вітру пов'язують із тропосферним потеплінням (зменшуються широтні градієнти приземної температури). Виявлено, що переходи між фазами посилення та послаблення вітрового режиму є більш різкими в гірських районах. Від початку 2000-х років відмічається відновлення тренду швидкості вітру на рівнині, а у горах навіть його зростання. Імовірно, збільшення широтного градієнту висоти ізобаричної поверхні 500 гПа та швидкостей вітру на цій висоті можуть свідчити про перебудову атмосферної циркуляції та подальше посилення вітру біля земної поверхні. Проте аналогічні дослідження у Європі та Північній Америці показують різну спрямованість трендів швидкості вітру біля землі (спадання) та у вільній атмосфері (зростання). У ході аналізу трендів швидкості вітру над територією США у [29], побудованих на основі даних реаналізу NARR із попереднім вилученням часової автокореляції в даних, виявлено слабе зростання швидкостей вітру на висоті 10 м. Тенденція до посилення вітру на висоті 80 м виявилась більш вираженою, що можливо пов'язано зі зростаючим трендом у верхній частині граничного шару атмосфери. Зменшення середніх швидкостей вітру на висоті флюгера за даними метеорологічних спостережень автори пояснюють переважно посиленням впливу оточуючих об'єктів (збільшення кількості забудов та висоти дерев) на вітровий режим метеостанцій [29]. З тієї ж причини, різниця трендів



швидкості вітру, виміряного на 2 м та 10 м, є ще більш відчутною [32]. Просторово-часовий аналіз поля швидкості вітру з високою просторовою роздільною здатністю ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) з використанням процедур гомогенізації та статистичної інтерполяції вхідних даних на базі прикладного метеорологічного забезпечення MASH та MISH відповідно, проведений в [37]. Результати аналізу трендів в [37] вказують на зменшення середніх швидкостей вітру. Слід зауважити, що тренди швидкості вітру в [29, 33, 37] співставні у часових рамках, так як вони можуть характеризувати спільний 30-річний період часу (1981-2010 рр.). Стосовно території України, то порівняльний аналіз середньорічної швидкості вітру за періоди 1961-1990 та 1981-2010 рр. показує її зменшення [4, 14].

В [35] проводиться оцінка майбутніх змін просторово-часового розподілу вітроенергетичного потенціалу на території Європи на основі ансамблю проєкцій двох регіональних кліматичних моделей. Відповідно до результатів автори висловлюють припущення про незначне підвищення (переважно взимку і восени) питомої потужності вітру над центральною та північною Європою, а також зростання міжрічної та сезонної мінливості цього показника у західній та центральній Європі у наступні десятиліття. Південну Європу, за виключенням окремих регіонів, очікує зменшення енергетичного потенціалу вітру. Важливо акцентувати увагу також на тому, що діапазон робочих швидкостей сучасних вітроустановок не охоплює усіх змін вітрового режиму в цілому.

**Висновки.** Кліматологічне оцінювання/районування території за вітроенергетичним потенціалом є початковим етапом на шляху визначення оптимальних місць розміщення вітрових установок. Об'єктивна оцінка вітроенергетичних ресурсів певної території вимагає не лише достатньої кількості та якості даних про вітер, але й врахування топографічних умов місцевості. Очевидно, з метою раціонального використання енергії вітру технічні характеристики ВЕУ мають бути ретельно підібрані під вітровий режим конкретної ділянки місцевості.

В останні роки у країнах заходу широкого застосування набули чисельні та інтерполяційні методи моделювання просторово-часового поля характеристик вітру. Аналіз динаміки середньої швидкості вітру над різними регіонами земної кулі вказує на різну спрямованість трендів в останні роки та можливі зміни у величині та мінливості в сторону збільшення у наступні десятиліття.

#### Список літератури

1. Анапольская Л.Е. Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки / Л.Е. Анапольская, Л.С. Гандин. // Метеорология и гидрология. – 1978. – №7. – С. 11–17.
2. Безруких П.П. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / П.П. Безруких, П.П. Безруких (мл.), С.В. Грибков. – Под общей редакцией П.П. Безруких. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. – 304 с.
3. Вітрові ресурси Тернопільської області / В.І. Осадчий, О.Я. Скриник, Д.О. Ошурок, О.А. Скриник // Наукові праці УкрГМІ. – 2016. – Вип. 269.
4. Вітроенергетичні ресурси Українських Карпат / В.І. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник, Р.Ю. Радченко. // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2014. – Вип. 266. – С. 3–11.
5. Волеваха М.М. Енергетичні ресурси клімату України / М.М. Волеваха, М.І. Гойса. – Київ: Наукова думка, 1967. – 132 с.
6. Волковая О.О. Моделювання вітрового потенціалу локальної ділянки лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій / О.О. Волковая, О.С. Третьяков, І.Г. Черваньов. // Український географічний журнал. – 2015. – №4. – С. 10–16.
7. Де Рензо Л. Ветроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
8. Дмитренко Л.В. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч. // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 166–173.
9. Клімат України – за ред. В.М. Ліпінського. – К.: Видавництво Раєвського, 2003. – 343 с.
10. Кушнир В.Г. Эффективность использования энергии ветра в Костанайской области северного региона Казахстана в целях генерирования электрической энергии / В.Г. Кушнир, И.В. Кошкин. //

**Hydrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekolohiia. – 2017. – Т.1(44)**

Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, №4. – С. 49–54. **11.** *Мартазінова В.Ф.* Сучасний клімат Київської області / В.Ф. Мартазінова, О.К. Іванова. – Київ, 2010. – 70 с. **12.** *Методические Указания:* Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок / [М.М. Борисенко, А.Д. Дробышев, В.П. Харитонов и др.]. – 1990. **13.** *Мхитарян Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. – К.: Наукова думка, 1999. **14.** *Осадчий В.* Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду / В.І. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник / – Доповіді НАНУ – 2015. – 8. – С. 95–99. **15.** *Оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій невеликих просторових масштабів із складним рельєфом* / В.І. Осадчий, О.А. Скриник, Д.О. Ошурок, О.Я. Скриник // Доповіді НАНУ – 2017. – 5. **16.** *Ошурок Д.О.* Застосування метеорологічного препроцесора CALMET для розрахунку вітроенергетичних ресурсів Тернопільської області / Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля в контексті екологічних викликів сьогодення: Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених. / Д.О. Ошурок – К: Ніка-Центр, 2016. – С. 144–146. **17.** *Порядок оценки ветроэнергетического потенциала* при размещении ветроэнергетических установок на территории республики Беларусь. – Минск, Минприроды, 2012. – 19 с. **18.** *Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 80 с. **19.** *Рыхлов А.Б.* Ветроэнергетический потенциал на различных высотах приземного слоя атмосферы на юго-востоке европейской территории России / Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. – 2014. – Т. 14, вып. 1. **20.** *Сиротюк М.* Методичні аспекти оцінювання вітроенергетичного потенціалу / М. Сиротюк, О. Гринда. // Вісник Львівського університету. Серія Географія. – 2011. – Вип. 39. – С. 313–319. **21.** *Ефимов В.В.* Численное моделирование ветрового энергетического потенциала Украины / [В.В. Ефимов, В.С. Барабанов, М.В. Шокуров та ін.]. // Відновлювана енергетика. – 2010. – №1. – С. 44–50. **22.** *Швень Н.І.* Оцінка вітрових ресурсів на території України, просторово-часовий аспект / Н.І. Швень, К.В. Петренко. // Відновлювана енергетика. – 2007. – №3. – С. 40–43. **23.** *Шефтер Я.И.* Использование энергии ветра. / Я.И. Шефтер – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с. **24.** *An Evaluation of a Diagnostic Wind Model (CALMET)* / [W. Wang, W.J. Shaw, T.E. Seiple etc.]. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2008. – p. 1739–1756. **25.** *Analysis of WRF Model Wind Estimate Sensitivity to Physics Parameterization Choice and Terrain Representation in Andalusia (Southern Spain)* / [F.J. Santos-Alamillos, D. Pozo-Vazquez, J.A. Ruiz-Arias etc.]. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2013. – p. 1592–1609. **26.** *Creating Synthetic Wind Speed Time Series for 15 New Zealand Wind Farms* / [R. Turner, X. Zheng, N. Gordon etc.]. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2011. – p. 2394–2409. **27.** *Dhunni A.Z.* Long-Term Wind Characteristics at Selected Locations in Mauritius for Power Generation / A.Z. Dhunni, M.R. Lollchund, S.D.D.V. Rughooputh. // Journal of Wind Energy. – 2015. **28.** *Dinoiu A.* Modeling and Simulation of Wind Turbines in Southern Carpathians / A. Dinoiu, C. Barbu, M. Pop. // WSEAS Press. – 2013. – p. 100–105. **29.** *Holt E.* Trends in Wind Speed at Wind Turbine Height of 80 m over the Contiguous United States Using the North American Regional Reanalysis (NARR) / E. Holt, J. Wang. // Journal of applied meteorology and climatology. – 2012 – p. 2188–2202. **30.** *Horvath K.* Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows / K. Horvath, A. Bajic, S. Ivatek-Sahdan. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2011. – p. 1676–1691. **31.** *Landberg L.* Meteorology for wind energy: an introduction, 2016. – 227 p. **32.** Long-Term Wind Speed Trends over Australia / P. Coppin, R. Davy, C. Russell, A. Hirsch. // Journal of Climate. – 2012. – vol. 25. – p. 170–183. **33.** *Observed Coherent Trends of Surface and Upper-Air Wind Speed over China since 1960* / C. Lin, K. Yang, J. Qin, R. Fu. // Journal of Climate. – 2013. – p. 2891–2903. **34.** *Olauson J.* Modelling the Swedish wind power production using MERRA reanalysis data / J. Olauson, M. Bergkvist. // Renewable Energy. – 2015. – №76. – p. 717–725. **35.** *Regional Changes in Wind Energy Potential over Europe Using Regional Climate Model Ensemble Projections* / [H. Hueging, R. Haas, K. Born etc.]. // Journal of applied meteorology and climatology. – 2013 – p. 903–917. **36.** *Selecting Representative Days for More Efficient Dynamical Climate Downscaling: Application to Wind Energy* / [D. Rife, E. Vanvyve, J. Pinto etc.]. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2013. – p. 47–63. **37.** *Solar and wind energy resources of the Eger Region* / [J. Mika, E. Csabai, Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2017. – Т.1(44)

I. Dobi etc.]. // Hungarian Geographical Bulletin. – 2014. – №63. – p. 17–27. **38.** *The wind energy potential of Iceland* / [N. Nawri, G. N. Petersen, H. Bjornsson etc.]. // Renewable Energy. – 2014. – №69. – p. 290–299. **39.** *Troen I. European Wind Atlas* / I. Troen, E. Lundtang Petersen. – Roskilde: Risø National Laboratory, 1989. – 656 p. **40.** *Uncertainty of Wind Energy Estimation* / [T. Weidinger, A. Kiss, A.Z. Gyöngyösi etc.]. **41.** *Wind Speeds at Heights Crucial for Wind Energy: Measurements and Verification of Forecasts* / S. Drechsel, G. Mayr, J. Messner, R. Stauffer. // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2012. – p. 1602–1617.

#### **Кліматологічна оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій**

**Ошурок Д.О.**

*Проведений аналіз літературних джерел, у яких представлені основні методи оцінки вітроенергетичного потенціалу обмежених територій. Значне удосконалення методів просторово-часового аналізу поля вітру в останні роки є дуже важливим чинником сталого розвитку вітроенергетики як перспективної галузі альтернативної енергетики.*

**Ключові слова:** вітроенергетичний потенціал, швидкість вітру, кліматологічна оцінка, моделювання, вітрова установка.

#### **Климатологическая оценка ветроэнергетических ресурсов ограниченных территорий**

**Ошурок Д.О.**

*Проведен анализ литературных источников, в которых представлены основные методы оценки ветроэнергетического потенциала ограниченных территорий. Значительное усовершенствование методов пространственно-временного анализа поля ветра является очень важным фактором стабильного развития ветроэнергетики как перспективной отрасли альтернативной энергетики.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетический потенциал, скорость ветра, климатологическая оценка, моделирование, ветровая установка.

#### **Climatological assessment of wind resources of small-scale areas**

**Oshurok D.O.**

*In this paper we have reviewed Ukrainian and international scientific literature sources (papers, books and other documents), which contain the main modern methods used in order to assess the wind energy capacity of areas with relatively small spatial scales. In particular, the following points have been addressed. 1) Climatological information, which is necessary to be utilized in wind energy industry: the mean value (multiyear average) of wind speed, its seasonal and diurnal variations, a frequency distribution of wind velocity (for different seasons or months), a vertical profile of wind speed. 2) Evaluation of an impact of surface (orography and type of land cover) on a spatial distribution of wind energy. 3) Calculation of the wind energy potential and efficiency of wind power application by modern wind turbines. 4) Evaluation of long-term trends of the wind energy potential.*

*Climatological assessment of wind energy potential of some areas is the primary step for defining the optimal locations where wind farm may be sited. Therefore, development of wind resources atlas is very important task. However, such development requires accurate and detailed (with high spatial and temporal resolution) information about wind field. Because of stochastic nature of wind, special numerical meteorological models are necessary to achieve the acceptable accuracy (spatial and time resolution). Such models have to take into account many factors, which influence wind over a particular region. The main factor is a structure of large-scale pressure field. However, orography, type of land cover (vegetation, water bodies, buildings etc.) and characteristics of atmospheric boundary layer have also a strong influence on wind field configuration. It's evident that technical characteristics of wind turbine (cut-in speed, rated speed and cut-out velocity) have to be selected carefully according to the wind regime of a particular location. Recently, one of the most common methods to model wind field over the small-scale areas is downscaling. This method is often based on application of numerical models or different types of interpolation.*

*Long-term trends of average wind speed have been analyzed over the different countries and reported in publications. The results have shown that the mean value of wind speed and its seasonal variability might increase in the future decades.*

*Significant improvement of methods for spatial-temporal analysis is very promising for a stable development of wind power sector as a perspective part of renewable energy industry.*

**Keywords:** wind energy potential, wind speed, climatological assessment, modelling, wind turbine.

**Надійшла до редколегії 16.02.2017**