

Л.Д. Пляцук, д.т.н., проф.  
Н.О. Афанасьєва, аспір.  
Сумський державний університет

## ПОЛЕ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ДОВКОЛА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ. ІМПУЛЬСНИЙ НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ШУМ

У послідовному вигляді, за шляхом утворення і розповсюдження в атмосфері, наведено структурний аналіз джерел звукової емісії від об'єктів вітроенергетики. Імпульсна низькочастотна складова звукової емісії визначена як специфічна для даного виду техногенного впливу і навантаження на довколишнє природне середовище. З метою теоретичного обґрунтування і моделювання звукового сигналу, що утворюється об'єктами вітроенергетики, наведені деякі з найбільш перспективних математичних моделей утворення частотних спектрів окремих джерел звуку, у тому числі низькочастотного імпульсного. Для обґрунтування коректної моделі поширення даного виду звукового сигналу, з урахуванням його специфіки розглянуто можливий взаємозв'язок виділених характерних критеріїв з особливостями атмосфери, динамікою її структури у часі і просторі. Представлено математичні залежності врахування деяких вагомих специфічних характеристик і достовірно відоме фактичне їх підтвердження. Робота робить вагомий внесок в розробку теоретично і фактично обґрунтованого методу оцінки техногенного навантаження на довколишнє середовище шуму від об'єктів вітроенергетики з урахуванням їх специфіки.

**Ключові слова:** вітроенергетика, джерела звукової емісії, низькочастотний звук, звукова емісія в атмосфері.

**Вступ.** Політика збереження кліматичного балансу та прийняття стратегії сталого розвитку передбачає зростання долі відновлювальних джерел енергії. Галузь вітрової енергетики є найбільш поширеною та розвивається найбільш стрімко. Зростає кількість і потужність інсталюваних вітрових електроустановок (ВЕУ), станцій (ВЕС), вітропарків, інших об'єктів вітрової енергетики.

Шум є найбільш вагомим типом техногенного навантаження на біосферу довкілля ВЕС. Разом з поширенням вітрової енергетики зростає і необхідність забезпечення науково обґрунтованої екологічної безпеки цих об'єктів. Гостра необхідність в детальних дослідженнях джерел виникнення і шляхів поширення звукової емісії довкола ВЕС ґрунтується на істотних висновках сьогодення. З одного боку, вітроенергетичні споруди, згідно з існуючими нормами безпеки, не дають підстав вважати їх потенційно небезпечними. З іншого, істотний обсяг скарг від населення прилеглих регіонів і спостережень негативного впливу на біосферу довкілля дає підстави вважати існуючі нормативи безпеки, у даному випадку, недостатніми. Відповідно, виникає потреба вдосконалення і розробки більш специфічних критеріїв і методів оцінки екологічної безпеки для об'єктів вітрової енергетики.

**Метою** роботи є аналіз загальної структури звукового поля довкола ВЕУ і ВЕС, джерел його утворення та шляхів поширення у просторі. Зокрема, поставлене завдання визначення місця в цій структурі імпульсної низькочастотної складової звукового поля та її особливостей.

Наведені результати роботи спрямовані на формування акцентів щодо контролю над впливом специфічного звукового поля ВЕС на довкілля.

**Проблема звукової емісії від ВЕУ і ВЕС. Структурний аналіз джерел.** Щодо шуму, спричиненого роботою ВЕУ і ВЕС, слід виділити дві основні проблеми. По-перше – населення прилеглих районів страждає на розлади центральної нервової системи: порушення сну, активного мислення, головний біль тощо. По-друге – в біосфері довкілля спостерігаються виражені процеси порушення стану флори і фауни.

Вагомі дослідні дані щодо виміру рівня звукового тиску (РЗТ) довкола ВЕС відомі за роботами Van den Berg (2004). Використовуючи традиційні методи виміру, з А-корекцією та щільністю виміру 50 мс, автор виявив наявність коливань РЗТ на частоті ~1 Гц. Амплітуда коливання у точці виміру, на відстані 750 м від ВЕС, варіювала під час дослідів між 1 та 5 дБ. Для низьких частот таке посилення РЗТ є суттєвим. Наприклад, для окремо взятої ВЕУ (за міжнародним стандартом) збільшення РЗТ у діапазоні низьких частот на 3 дБ потребує збільшення запобіжної відстані на 41 % [3]. Van den Berg встановив зв'язок. В моменти синфазної і протифазної звукової емісії від ВЕУ, в районах проживання населення, значно віддалених від ВЕС, виникають піки РЗТ. Такі висновки вказали на *ефект посилення імпульсного звуку на відстані* довкола різноскладної ВЕС.

В наслідок цього ефекту у віддаленні від вітроенергетичних підприємств виникають зони потужних імпульсів звукового тиску, що підтверджено багатьма дослідженнями на сучасних Європейських ВЕС. Безпосередньо у межах ВЕС рівень тиску звукових коливань високої частоти переважає і маскує імпульсний звук низької частоти у вимірах. Ефект посилення у даному випадку також є можливим.

Застосування на сучасних ВЕС методів управління за цим фактором дозволили знизити вірогідність виникнення цього ефекту. У той же час, негативний вплив на населення прилеглих регіонів залишається і має стабільний характер. Таким чином, можливим фактором впливу є саме специфіка звукового сигналу що утворює ВЕУ в процесі роботи.

**Звукове поле в межах ВЕС. Ширококутовий аеродинамічний звук.** Безпосередньо у межах ділянки ВЕС посилений потужний імпульсний звук не є домінуючим. Головним чином тут можна чути і спостерігати у вимірах ширококутовий (за діапазоном частот) свисто-подібний звук, що виникає як аеродинамічне явище, спричинене рухом лопаті у повітряному потоці та взаємодії з ним.

Ширококутовий аеродинамічний звук збуджується відповідно на передньому та задньому фронтах лопаті. На передньому фронті лопаті виникає аеродинамічний звук спричиненої ним турбулентності. РЗТ цього джерела на фоні власного звуку турбулентності повітряного потоку не є домінуючим і заглушається. Пікове значення енергії цього джерела звукової емісії відповідає частоті, що визначається з залежності:

$$f_{peak} = \frac{S_t \cdot V_{tip}}{h - 0.7 \cdot R}, \quad (1)$$

де  $S_t = 16,6$ ;  $V_{tip}$  – швидкість руху крайньої точки ротора;  $h$  – висота розташування центру вітроколеса;  $R$  – радіус лопаті.

Орієнтовно, для типової великої ВЕУ промислових розмірів GE 2,3 МВт звукова частота цього джерела становить приблизно 18 Гц. У наведеному прикладі ВЕУ характеризується діаметром ротора 94 м та висотою вежі 100 м (тестовий прототип турбіни Oerlemans and Schepers 2009) за швидкості вітру 9,75 м/с та швидкості обертання ротора 14,7 об./хв. (емпірична модель Sebesci and Bradshaw 1977).

Звук на задньому фронті лопаті, в першу чергу, пов'язаний зі спектром поверхневого тиску на цьому фронті (Howe 1978). На цей час вже існує значна кількість загальних емпіричних моделей для обчислення розподілу звукової енергії за спектром частот для цього джерела звуку. Наприклад, одна з добре перевірених моделей – модель Goody (2004). Вона дозволяє оцінити частоту, за якої найбільша частина аеродинамічної енергії турбулентності трансформується у флуктуацію поверхневого тиску і далі у звукову емісію.

За цією моделлю спектр поверхневого тиску у граничному шарі можна розрахувати, виходячи з його товщини, а пікове значення звукової потужності знаходиться приблизно в декаді від кожного краю частотної смуги, що визначається з залежності:

$$\frac{\omega \cdot \delta}{U_e} \sim 1, \quad (2)$$

де  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота;  $\delta$  – товщина граничного шару на задньому фронті лопаті;  $U_e$  – швидкість ззовні граничного шару заднього фронту лопаті.

Виходячи з цього рівняння, пікове значення потужності звуку, спричиненого на задньому фронті лопаті, відповідає частоті близько 465 Гц. Що, в свою чергу, знаходиться у межах значень А-корегованих вимірів (Oerlemans and Schepers, 2009), піків акустичної (чутної) потужності звуку на інтервалі частот 250–1000 Гц. Також слід зазначити, що дані є усередненими за часом.

Ефект взаємного посилення ширококутового звуку у межах різноскладної ВЕС також може існувати. Слід зауважити, що зв'язку РЗТ ширококутового типу звуку довкола ВЕУ зі станом атмосфери у денний та нічний час у більшості дослідів не зазначається.

**Імпульсний звук низької частоти.** Імпульсний звук низької частоти виникає в момент проходження лопаті повз вежу і спричинений взаємодією лопаті зі дестабілізованим простором наступаючого потоку перед вежею. У цей момент кут атаки на лопаті змінюється, спричиняючи флуктуацію сили підйому лопаті. У наслідок цього виникає імпульс звукової емісії порційний за часом розмірам простору наступаючого потоку перед вежею. Така модель є дійсною, коли вважати вплив аеродинаміки граничного шару не є суттєвим у виділеній області.

Таким чином, використовуючи оцінку площини потоку, оцінюється варіація за часом кута атаки лопаті у виділеній області простору наступаючого потоку перед вежею. Такий запис історії зміни кута атаки далі перераховується у відповідний ряд флуктуації сили підйому (з використанням тонкої теорії повітряного сліду (Curle, 1955)). Далі можна оцінити силу джерела звуку шляхом знаходження похідної сили підйому за часом. Виходячи з цього метода, загальна залежність може мати вигляд:

$$\frac{\dot{L} \cdot D_T}{V_{tip} \cdot q \cdot c \cdot l} = 2\pi \dot{a} \frac{D_T}{V_{tip}}, \quad (3)$$

де  $\dot{L}$  – похідна сили підйому за часом;  $D_T$  – діаметр вежі;  $q$  – динамічний тиск потоку в приближенні до лопаті;  $c$  – довжина хорди лопаті;  $l$  – обґрунтована область лопаті, що підлягає аналізу (не менше за 20 % лопаті);  $\dot{a}$  – похідна за часом від кута атаки лопаті.

Відносно до прикладу ВЕУ GE 2,3 МВт, що має діаметр вежі 4 м і відстань від вежі до лопаті 1 м, за цією теоретичною моделлю можна розглянути структуру імпульсного звуку. Так за один повний оберт ротор спричиняє три імпульси звуку. Кожен імпульс виникає в момент проминання лопаттю вежі та взаємодії її зі дестабілізованою областю потоку, і має містити варіацію частотних компонент. На рисунках 1 та 2 зображена розгорнута осцилограма, що побудована за наведеною моделлю.

У даній моделі використовуються безрозмірні одиниці з використанням діаметра вежі ( $D_T$ ) і швидкості кінцівки лопаті ( $V_{ip}$ ), що дозволяє наблизитися до оптимального рівня нормалізації за часом. Діаграма спектра показує структуру варіації частотних складових. Пікове значення енергії тут відповідає  $f \cdot D_T / V_{ip} = 0,23$  або частоті 4 Гц, а варіації частотних компонент знаходяться у межах від  $f \cdot D_T / V_{ip} = 0,075$  до  $f \cdot D_T / V_{ip} = 1,38$ , або 1,3–24 Гц відповідно.

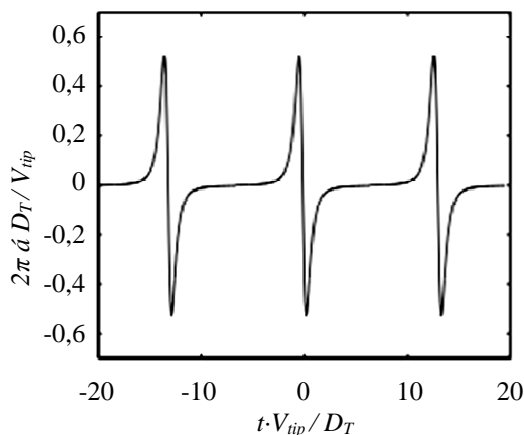


Рис. 1. Варіація сили джерела імпульсного звуку за період одного повного оберту ротору GE прототип вітрової турбіни [1]

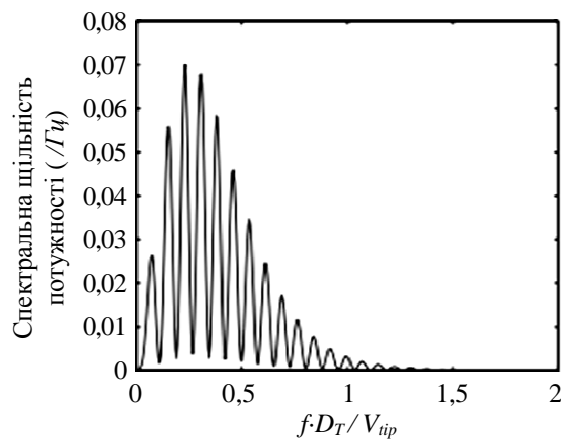


Рис. 2. Спектральна щільність сигналу джерела імпульсного звуку [1]

Слід зазначити, що це джерело звукових коливань залежить, головним чином, від структурних характеристик ВЕУ. Залежність нормалізована за допомогою введення безрозмірних одиниць і сформована на основі найбільш вагомих характеристик. Таким чином, в математичних залежностях є суттєвим показник швидкості руху кінцівки лопаті  $V_{ip}$ , і відповідно швидкість обертання. Із цим показником пов'язана, головним чином, частота звукової емісії імпульсного характеру, спричиненої роботою ВЕУ. У свою чергу, рівень сили звукової емісії знаходиться в прямій залежності зі статичними структурними характеристиками ВЕУ, довжиною лопаті і діаметром вежі, і визначається діючою на установку силою вітру – силою підйому. Тобто рівень сили звуку зростає пропорційно розмірам ВЕУ і силі діючого вітрового потоку.

Більш того, ґрунтовні емпіричні дослідження Н.Мøller та С.С. Pedersen (2010) показали, що залежність відносної сили звуку ( $P_S$ ), у фронтальному напрямку (за швидкості вітру 8 м/с), є більш ніж пропорційною до розмірів і відповідно до номінальної електричної потужності ВЕУ ( $P_E$ ) (рис. 3, 4).

$$P_A = \text{constant}_1 \cdot (P_A / 1 \text{Ä} \delta)^{\text{slope} / 10 \text{Ä} \text{Ä}}, \quad (4)$$

де *slope* – нахил лінії регресії (тут дорівнює 11,0 дБ, експонента – 1,10);  $\text{constant}_1$  може бути визначена із відповідної регресійної залежності.

Відповідно, і територія в межах якої спостерігається такий рівень шуму, не враховуючи коефіцієнт поглинання атмосфери (оскільки цей фактор переважно вагомий для звуку високої частоти і на великих відстанях) є більш ніж пропорційною до відносного рівня сили звуку і відповідно номінальної потужності ВЕУ.

$$A = \text{constant}_2 \cdot \text{constant}_1 \cdot (P_A / 1 \text{Ä} \delta)^{\text{slope} / 10 \text{Ä} \text{Ä}}, \quad (5)$$

де  $\text{constant}_2$  залежить від нормативу безпеки за шумом.

Таким чином, автори зазначають, що, з точки зору шумового забруднення, група ВЕУ номінальної потужності до 2 МВт (малі) впливає на територію меншої площі, ніж відповідна за загальною потужністю група ВЕУ більших за 2 МВт (великі) [3].

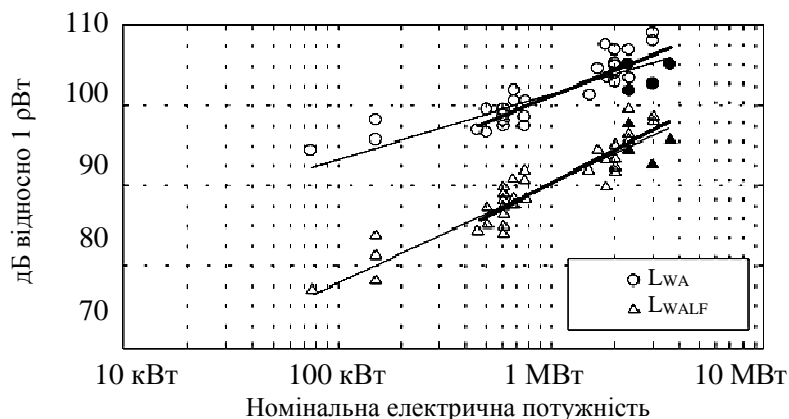


Рис. 3. Рівні сили звуку ( $L_{AW}$  – загальний A-скорегований рівень,  $L_{AWLF}$  – спектральна низькочастотна міра A-скорегованого рівня частотної смуги 10–160 Гц) у фронтальному напрямку як функція потужності ВЕУ:  
 — регресія для ВЕУ 450 кВт–3,6 МВт;  
 - - регресія для ВЕУ 1650 кВт–3,6 МВт [3]

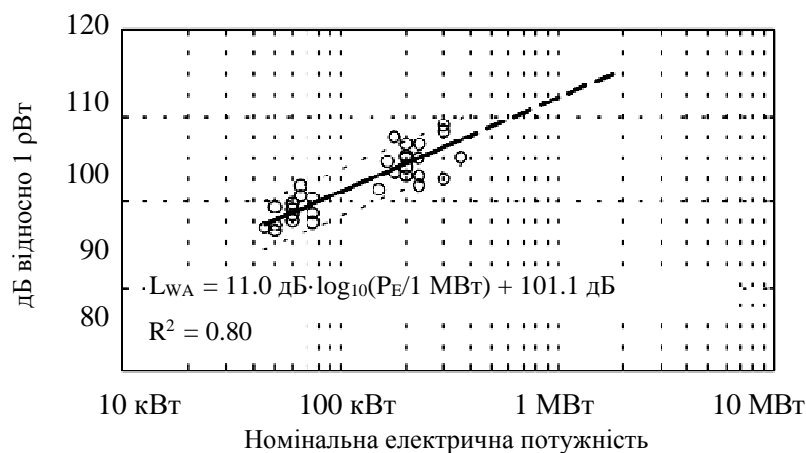


Рис. 4. Відносні рівні сили звуку ( $L_{AW}$  – загальний A-скорегований рівень) у фронтальному напрямку як функція потужності ВЕУ. Лінія регресії, за виключенням ВЕУ, потужністю нижче за 450 кВт (стандартна помилка оцінки – 1,64 дБ) [3]

Подальше розповсюдження емісії у довколишньому середовищі залежить від характеристик атмосфери, що транслює цей сигнал. Характеристики атмосфери, в свою чергу, не є постійними і змінюються (на певній місцевості) залежно від денного і нічного часу доби.

Свого часу Van den Berg також виокремив цю залежність. У приземному шарі (на висоті 10 м) в нічний час швидкість вітру може значно знижуватись. Проте на висоті розміщення ротора цей показник у 2,6 раза вище за значення, що можна отримати для цієї висоти за стандартною моделлю атмосфери денного часу. Ця різниця додатково створює 15 дБ рівня звукового тиску.

З боку населення досліджуваної території також зазначено, що в нічний час шум, спричинений роботою ВЕУ, стає найбільш подразнюючим, коли швидкість обертання ротора зростає разом зі зростанням швидкості вітру. У денний час літнього періоду року рівень звуку від ВЕС відносно низький і малоподрознюючий, навіть за сильного вітру (у приземному шарі). В нічний час місцевими мешканцями зони 500–1000 м від ВЕС відмічений імпульсний, подібний до ударів, шум, а мешканцями території на відстані 1900 м – шум, подібний до шуму потягу. В межах ВЕС, за даними Van den Berg, імпульсний, подібний до ударів, шум не спостерігається.

Із проходженням ротором ВЕУ великої потужності (і розмірів) одночасно декількох температурних і вітрових шарів атмосфери Van den Berg пов'язував, в свою чергу, наявність частотної варіації у спектральній щільності окремих імпульсів звукової емісії [1].

Разом із цим стає видна залежність вірогідності виникнення фізіологічної реакції живого організму від характеристик стабільності атмосфери як першочергового шляху трансляції звукової емісії у середовищі довкола ВЕУ і ВЕС.

**Атмосфера як провідник сигналу звукових коливань.** У цьому розрізі необхідно розглянути атмосферу як транслятор відповідного сигналу звукових коливань, зі стабільністю якого визначається відповідно здатність і стабільність трансляції звуку атмосферним середовищем. Здатність атмосфери до трансляції визначається як протилежна до її провідного опору.

Провідний опір атмосфери, або її коефіцієнт поглинання звукових хвиль, як загальна характеристика, складається з певного набору критеріїв різних рівнів організації.

Коефіцієнт поглинання атмосфери, як транслятора звукових коливань, головним чином, зростає пропорційно квадрату частоти. З іншого боку, змінні характеристики атмосфери, наприклад молекулярно-релаксаційні процеси, здатні змінювати стабільність трансляції, що, в свою чергу, дуже залежить від частоти сигналу [4]. Особливо впливає відносна вологість повітря, оскільки наявність триатомних молекул сприяє коливальній релаксації молекул  $N_2$  та  $O_2$ .

Відповідно виникає ефект частотно-залежного коефіцієнта поглинання звукових коливань для певного рівня відносної вологості. Типово, що для меж варіації рівня вологості повітря від 10 до 90 %, для певних частот звукових коливань, коефіцієнт поглинання варіює відповідно: для 125 Гц –  $9 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ ; 1 кГц –  $1,6 \cdot 10^{-3} \dots 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ ; 20 кГц –  $0,03 \dots 0,05 \text{ м}^{-1}$ .

Видно, що ультразвук з частотою 20 кГц є чутливим до поглинання в атмосфері і на відстані 100 м РЗТ цієї звукової частоти знизиться на декілька відсотків (для інтенсивності звуку, оскільки вона пропорційна квадрату РЗТ, коефіцієнт ослаблення відповідно подвоюється). Низькочастотні звукові коливання практично не залежать від рівня відносної вологості і коефіцієнта поглинання взагалі [5].

Розглядаючи процес розповсюдження звуку на відкритому просторі, слід звернути увагу на вагомий вплив деяких ефектів цього простору. У приземному шарі для джерел і рецепторів звуку, ефект відбиття призводить до частотно-залежних підйомів і знижень; часто, у зв'язку зі шпаруватою структурою ґрунту, варіює різниця фаз відбитих хвиль різної частоти, а також відсоток кута їх відхилення. Температурні шари атмосфери (і, відповідно, шари розподілу вітру) спричиняють ефект заломлення хвиль, висхідне – для нормального температурного градієнта (на вітер); і спадних – для інверсії (під вітер). Виділені ефекти набирають вагомості на значних відстанях більших за 100 м [2].

Багато опублікованих матеріалів дослідів шуму довкола ВЕУ різних типів і розмірів описують території як безпосередньо наближені, так і значно віддалені (орієнтовно 68–2100 м). Розглядаючи транслуючу спроможність атмосфери, обидва критерії – розмірів ВЕУ і відстані до них – мають першочергове значення.

Найбільш поширеною є сферична модель розповсюдження звуку довкола ВЕУ, коли зниження РЗТ складає 6 дБ на подвоєння відстані. Проте за певних обставин, як, наприклад, температурна інверсія або наявність низького повітряного потоку, можливе виникнення шару звукового відбиття із розповсюдженням циліндричного типу до певної відстані. За такою моделлю зниження РЗТ складає лише 3 дБ на подвоєння відстані. Для низьких частот така залежність була отримана Hubbard and Shepherd та пояснена Zornski and Willshire, а також Johansson. Далі Bolin et al. показали наявність цього ефекту на відстані до 100–200 м, яка і використовується для нормативної оцінки в Швеції.

За циліндричної моделі розповсюдження, у межах 200 м, Н. Møller та С. S. Pedersen показали, що рівень звукового тиску буде знижений до 35 дБ (А) на відстані, значно більшій (1414–3482 м), ніж за традиційної моделі. Другий висновок говорить, що низькочастотна складова звуку за таких обставин стає значно більш чіткою і вагомою (табл. 1) [3].

Із даних таблиці 1 добре видно, що стабільність атмосфери, відображена у формі моделі розповсюдження звуку у просторі довкола ВЕУ, впливає на відстань, необхідну для зниження РЗТ довкола ВЕУ і ВЕС. Циліндрична модель, порівняно зі сферичною, показує значно більші відстані і, таким чином, пояснює фактичні дані скарг населення, що проживає на відстані декількох кілометрів. Стає більш зрозуміло, чому традиційна сферична модель не могла забезпечити необхідний рівень зниження впливу шуму, що утворюється ВЕУ, для забезпечення безпеки середовища.

Цікаві дані досить ретельних фактичних спостережень і вимірів S. Ambrose та R. Rand підтверджують такий теоретичний підхід. Виміри проведені авторами на декількох зростаючих відстанях (81,686–518,6 м) від окремої робочої ВЕУ (Falmouth, Massachusetts). Населення, розташоване на відстані 518,6 м, вже довгий час скаржилося на такі симптоми, як розлад сну, головний біль, порушення концентрації й активного мислення. В продовж періоду дослідів автори підтвердили наявність цих фізіологічних ефектів, спостерігаючи за власним станом. В результаті вимірів було отримано, що у той час, як рівень звуку дБ(А) діапазону знижується за традиційною моделлю – 6 дБ на подвоєння відстані, – некоректований РЗТ (дБ(L)) знижується як 3 дБ на подвоєння відстані, відповідно до більш повільного ослаблення низькочастотної компоненти звуку.

Таблиця 1

*Теоретична відстань, на якій загальний рівень звукового тиску дорівнює 35 дБ, для циліндричної моделі розповсюдження до 200 м і традиційної сферичної моделі*

(відстань наведена як відстань за нахилом до центра ротора ВЕУ та є близькою до горизонтальної) відповідно [3]

Показник		ВЕУ (>2 МВт)									ВЕУ (<450 кВт)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Циліндрична модель (до 200 м)	Відстань	1476	1414	2373	2100	1562	1829	1776	3482	3152	827
	L <sub>рА</sub> (дБ)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	L <sub>рALF</sub> (дБ)	29,7	28,2	30,3	29,2	29,4	30,7	30,0	29,7	29,6	25,6
	L <sub>рG</sub> (дБ)	60,4	56,2	57,1	60,0						
Сферична модель	Відстань	629	647	879	822	679	758	713	1227	1144	453
	L <sub>рА</sub> (дБ)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	L <sub>рALF</sub> (дБ)	28,8	26,7	28,9	27,6	28,0	29,1	28,8	27,0	27,0	24,8
	L <sub>рG</sub> (дБ)	59,1	54,5	55,0	58,0						

Зацікавленість викликає й те, що у той час як на відстані 518,16 метрів рівень А-скорегованого звуку значно нижчий всередині приміщення, ніж зовні (43 дБ(А) – ззовні, 21 дБ(А) – всередині), рівень некорегованого звуку має протилежну залежність (75 дБ(L) – ззовні, 79 дБ(L) – всередині). Це підтверджує багато стверджень населення, що вплив є більш відчутним всередині будинку, ніж зовні.

Автори зазначають, що корпус будинку блокує, головним чином, звук частоти більшої за 10 Гц, і посилює пульсації низької частоти, що залишаються. Багато мешканців порівнюють своє сприйняття з тим, ніби вони живуть всередині барабана [6].

Також, звертаючи увагу на критерій розміру ВЕУ, потужна установка промислового масштабу (>2 МВт) має ротор із діаметром >90 м і висотою вежі >100 м. За таких габаритів установка розміщується у значному просторі атмосфери й взаємодіє одночасно з великою кількістю компонентів складної її структури. Додатково кожен з таких компонентів має великий рівень варіативності за часом, кліматом, місцевістю тощо. У результаті це збільшує ризик непередбачуваних процесів за тенденції зросту потужності сучасних ВЕУ.

**Висновки.** Розглядаючи звукове поле, що утворюють ВЕУ і ВЕС довкола себе, необхідно, в першу чергу, зазначити його неоднорідність і структурність. ВЕУ утворює звук у результаті взаємодії з повітряним середовищем, головним чином, з вітровим потоком, і в межах окремих компонентів установки утворюються джерела звуку, різні за своїми характеристиками. Виходячи з фізичних особливостей самих звукових коливань, на певних джерелах утворюється звук певної частоти і інтенсивності, залежно від структурних характеристик ВЕУ. На сьогоднішній день існує вже чимало теоретичних моделей оцінки як загального рівня звукового тиску довкола ВСУ, так і окремих джерел. Теоретичні моделі окремих джерел відображають їх специфічний тон та його взаємозв'язок із характеристиками структурних компоненти установки. Це може дозволити, з одного боку, виокремити складові тони звукового поля, а з іншого – отримати теоретичну динамічну модель кінцевого складного звукового сигналу, спричиненого роботою ВЕУ.

Важливе місце у цьому розрізі займає коректно підібрана нормалізація за часом, що спричинено пріоритетним за рівнем потужності положенням імпульсного звуку низької частоти. Цей пріоритет складає специфіку звукового поля створюваного роботою ВЕУ, яка виокремлює імпульс і імпульсний характер у окремий специфічний об'єкт дослідження. З цієї точки зору, піки енергії звукової емісії є більш значущим критерієм безпеки, ніж узагальнені за великі проміжки часу значення рівня звукового тиску, і, особливо, скореговані за непріоритетною частотою.

Виходячи з таких особливостей звукового сигналу ВЕУ, наступну позицію займає специфіка атмосферного середовища, що транслює цей сигнал. Відповідно, слід зазначити неоднорідність атмосфери за висотою, і, особливо, за часом доби і метеорологічними явищами. Це спричиняє специфічну варіацію у коефіцієнті поглинання атмосферою звукової енергії та, відповідно, у відстані ослаблення її впливу до безпечного рівня. З цієї точки зору, більш виправданим видається використання циліндричної моделі розповсюдження шуму до відстані 200 м, ніж традиційної сферичної.

Виходячи зі складного характеру атмосферного простору, вирішальним також є розмір ВЕУ і склад ВЕС. За зростом потужності і розмірів промислових ВЕУ зростає і специфічність звукового сигналу, його низькочастотний імпульсний характер, сила та площі поширення впливу у довколишньому середовищі.

Необхідно зазначити, що, на відміну від звичного акустичного шуму, імпульсна складова, зустрічаючи корпус приміщення, перетворюється і посилюється всередині. Такий ефект робить території, що знаходиться під впливом такого звукового поля, небезпечною і непридатною для життя людей. Пульсації низької частоти спричиняють у людини фізіологічні реакції, головним чином такі, як порушення сну, головний біль, порушення концентрації та активності мислення. За певними даними, це є результат резонансної реакції головного мозку людини,  $\beta$ -хвилі якого асоціюються з концентрацією і активним мисленням та збігаються із тоном піків рівня звукового тиску.

#### Список використаної літератури:

1. *Doolan C.* Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control / *Con Doolan* // Proceedings of ACOUSTICS 2011. – Paper Number 17, 2–4 November, 2011.
2. *Embleton T.F.W.* Tutorial on Sound Propagation Outdoors / *Embleton T.F.W.* // Journal of the Acoustical Society of America. – 100 (1), July. – 1996. – Pp. 31–48.
3. *Møller H.* Low-frequency noise from large wind turbines / *Møller H., CS Pedersen* // J. Acoust. Soc. Am. – 129 (6), June. – 2011. – Pp. 3727–3744.
4. *Piercy J.E.* Review of Noise Propagation in the Atmosphere / *Piercy J.E., Embleton T.F.W., Sutherland L.C.* // Journal of the Acoustical Society of America. – 61 (6), June. – 1977. – Pp. 14–18.
5. *Piercy J.E.* Sound Propagation in the Open Air, ch. 3 in C.M. Harris (ed.) / *Piercy J.E., Daigle G.A.* // Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control. – New York : McGraw-Hill, 1991.
6. *Stephen E.* The Bruce McPherson Infrasound and Low Frequency Noise Study : Adverse health effects produced by large industrial wind turbines confirmed / *Stephen E., Ambrose and Robert W. Rand.* – December 14. – 2011.

ПЛЯЦУК Леонід Дмитрович – доктор технічних наук, професор, академік інженерної Академії України, академік Міжнародної Академії наук екології та безпеки життєдіяльності, завідуючий кафедрою «Прикладної екології» Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- екологічна безпека;
- техногенне навантаження на довкілля.

Тел.: +380 (542) 33–12–05.

E-mail: [info@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:info@ecolog.sumdu.edu.ua).

АФАНАСЬЄВА Надія Олександрівна – аспірант кафедри «Прикладної екології» Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

- екологічна безпека;
- техногенне навантаження на довкілля;
- шумове поле довкола вітроенергетичних установок і станцій.

Тел.: +380 (542) 099–778–65–09.

E-mail: [nadiya.afanaseva@yandex.ua](mailto:nadiya.afanaseva@yandex.ua).

Стаття надійшла до редакції 22.05.2014