

УДК 629.5.023

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.4\(502\).3](https://doi.org/10.15589/znп2025.4(502).3)**ANALYSIS OF LOADS, LOAD COMBINATIONS AND STRUCTURAL FEATURES OF FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS – FPV (FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS)****АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕНЬ, КОМБІНАЦІЙ НАВАНТАЖЕНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЛАВУЧИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ – FPV (FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS)**

Margarita M. Niroumand
mn.niroumand@gmail.com
ORCID: 0009-0008-4672-9936

Vladimir V. Zaitsev
Zvv1949@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3637-9273

М. М. Ніруманд,
аспірантка

В. В. Зайцев,
докт. техн. наук, професор

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The paper presents a comprehensive analysis of loads on floating photovoltaic (FPV) systems and their design solutions. The study covers the main types of loads (permanent, operational, environmental, installation and accidental), taking into account their impact on the durability and stability of FPV. Particular attention is paid to wind, wave, and current loads, considered on the basis of ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) data. In addition, modern technological approaches to the design of FPVs, including the classification of structures by materials and type of support elements, are investigated. The results obtained contribute to the development of more efficient designs of floating solar power plants and their adaptation to extreme operating conditions.

Objective. The purpose of this study is to identify and classify the main loads and combinations of loads on floating photovoltaic systems.

The loads were classified into permanent, operational, environmental, installation, and accidental. Snow and wind loads were classified according to the normative construction acts of Ukraine: DBN B.1.2-2:2006 “Loads and impacts” and European standards EN 1991-1-1. Wave and current loads were analyzed according to ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). When selecting the load combinations, in accordance with DIN 1055-100, the concept of divided safety factors must be followed in the limit state tests.

Methods. Analysis of the publications found since 2017, analysis of the European norms for snow and wind loads, as well as the use of data from the DBN of Ukraine, research of scientific articles and results to determine the scientific results obtained during experiments and research.

Results. According to the analysis of the structure of the leading and most modern floating solar installations, the problem with the type of supporting structures, overall stability and the relationship between them has not yet been resolved.

Scientific novelty. The study and classification of floating photovoltaic systems is carried out for the first time, based on the analysis of existing and designed systems over the past 10 years.

Practical significance. The rapid leap in the development of floating solar power plants requires more accurate data on the rational design of the floating installation, a method for checking wind and wave loads, and a separate study of the relationship between weight and stability of the supporting structure.

Key words: floating solar system; FPV system; floating solar installation.

Анотація. У роботі проведено комплексний аналіз навантажень на плавучі фотоелектричні системи (FPV) та їх конструктивних рішень. Дослідження охоплює основні типи навантажень (постійні, експлуатаційні, екологічні, монтажні та випадкові), враховуючи їх вплив на довговічність і стабільність FPV. Особливу увагу приділено вітровим, хвильовим та течійним навантаженням, розглянутим на основі даних ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Крім того, досліджено сучасні технологічні підходи до проектування FPV, включаючи класифікацію конструкцій за матеріалами та типом опорних елементів. Отримані результати сприяють розробці ефективніших конструкцій плавучих сонячних станцій та їх адаптації до екстремальних умов експлуатації.

Мета. Мета цього дослідження – окреслення та класифікація основних навантажень та комбінацій навантажень на плавучі фотоелектричні системи.

Навантаження були класифіковані на постійні, експлуатаційні, екологічні, монтажні та випадкові. Проведена класифікація снігових та вітрових навантажень згідно з нормативними будівельними актами України: ДБН В.1.2-2:2006 « Навантаження і впливи » та Європейськими нормами EN 1991-1-1. Хвильові навантаження та навантаження від течії були досліджені згідно даних ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). При виборі комбінацій навантажень, відповідно до норм DIN 1055-100, при перевірках на граничний стан необхідно дотримуватися концепції розділених коефіцієнтів запасу міцності.

Методика. Аналіз знайдених публікацій з 2017 року, аналіз Європейських норм для снігових та вітрових навантажень, також використання даних ДБН України, дослідження наукових статей і результатів для визначення наукових результатів, отриманих під час проведення експериментів та досліджень.

Результати. Згідно з аналізом будови провідних та найсучасніших плавучих сонячних установок проблема з типом несучих конструкцій, загальною остійністю та взаємозв'язком між ними досі не вирішена.

Наукова новизна. Дослідження та класифікація плавучих фотоелектричних систем проводиться вперше, на основі аналізу існуючих та проєктованих систем за останні 10 років

Практична значимість. Швидкий стрибок у розвитку плавучих сонячних електростанцій потребує більш точних даних щодо раціональної конструкції плавучої установки, методу перевірки вітрових та хвильових навантажень, та окремого дослідження зв'язку між вагою та остійністю несучої конструкції.

Ключові слова: плавуча сонячна система; система FPV; плавуча сонячна установка.

ВСТУП

Плавучі фотоелектричні системи (FPV) є перспективним напрямом розвитку сонячної енергетики, оскільки вони дозволяють ефективно використовувати водні поверхні, зменшуючи потребу у земельних ресурсах. FPV мають низку переваг, включаючи зниження випаровування води, охолодження панелей, що підвищує їхню ефективність, та можливість інтеграції з іншими видами відновлюваної енергетики. Проте, через складні умови експлуатації, такі системи піддаються значним навантаженням, які потребують ретельного інженерного аналізу.

Розвиток FPV відбувається швидкими темпами. У 2021 році загальна встановлена потужність плавучих сонячних електростанцій перевищила 2,6 ГВт, а за прогнозами, до 2030 року може досягти понад 10 ГВт. Основними перевагами таких систем є використання водойм замість зайняття сільськогосподарських земель, а також можливість комбінованого використання з гідроелектростанціями. З іншого боку, існують технологічні виклики, пов'язані з проєктуванням несучих конструкцій, швартовних систем та забезпеченням стабільності FPV в умовах змінного середовища.

Оскільки плавучі сонячні електростанції стають все більшими та розташовуються у більш відкритих водоймах, що піддаються екстремальним погодним умовам, проєктування для виживання стає дедалі складнішим. Навантаження на понтони є результатом фізичних властивостей гравітаційних водяних хвиль, які зустрічаються в океанах, морях, озерах і водосховищах, які є результатом вітру, що дме над поверхнею води. Течії пов'язані з чистим перенесенням води і є найбільш очевидні в річках, коли вода тече вниз за течією.

Однак вони також можуть бути значними у водосховищах поблизу до точок входу і виходу води,

а також біля узбережжя через припливи та інші морські течії. Як і у випадку з вітровим навантаженням, часові та просторові характеристики хвильових та течійних навантажень хвильових і течійних навантажень необхідно враховувати при проєктуванні плавучих сонячних електростанцій.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Огляд плавучих фотоелектричних установок у зв'язку з достатньо новими технологіями, які ще перебувають у розвитку, технічні дані та нормативна література для конструкцій та установок вкрай обмежена.

Багато досліджень плавучих фотоелектричних установок проводиться у рамках досліджень в університетах для техніко-економічної оцінки електричних характеристик та оптимізації.

КЛАСИФІКАЦІЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПЛАВУЧІ СОНЯЧНІ СИСТЕМИ

Снігові навантаження

Снігові навантаження слід визначати таким чином [1]:

для постійних/перехідних розрахункових ситуацій за формулою:

$$S = \mu_i C_e C_r S_k$$

μ_i – коефіцієнт форми снігового навантаження (див. Національний додаток ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3). Наприклад, для плоскої покрівлі коефіцієнт форми $\mu_i = 0,8$, рис. 1, 2; S_k – характеристичне значення снігового навантаження на ґрунт (див. Національний додаток НБ.Ф ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3);

Характеристичні значення S_k снігових навантажень визначаються для середнього періоду повторюваності у 50 років, рис. 3 та рис. 4, і зазначені в Додатку ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3, що відповідає

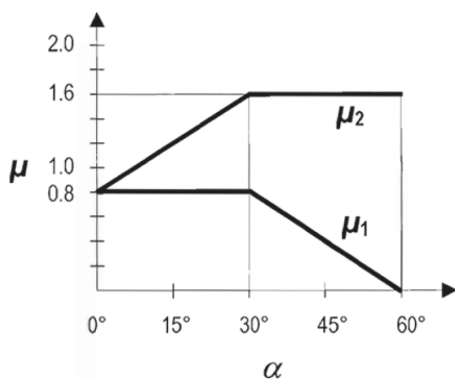


Рис. 1. Коефіцієнти форми покрівлі згідно Євронормам EN 1991-1-3

BS EN 1991-1-3:2003
EN 1991-1-3:2003 (E)

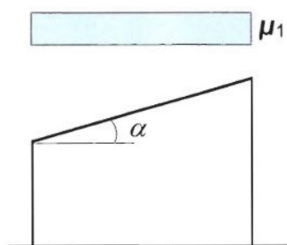


Рис. 2. Снігове навантаження для плоскої форми покрівлі

карті районування України за характеристичними значеннями снігового покриву та Додатку Е ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи» та також згідно Євронормам EN 1991-1-3:2003, рис. 5

Для інших періодів повторюваності, які для об'єктів масового будівництва приймаються такими, що дорівнюють проектному терміну експлуатації, вводиться коефіцієнт за Додатком НБ.Г Національного додатка ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3.

C_e – коефіцієнт навколишнього середовища;

C_t – температурний коефіцієнт

Значення коефіцієнта C_e зазвичай приймається $C_e = 1,0$, якщо інше не визначено для конкретних топографічних умов.

Під час визначення снігових навантажень для неутеплених покрівель цехів із підвищеною тепловіддачею та ухилами покрівлі понад 3 % за умови забезпечення належного відведення талої води слід приймати $C_t = 0,8$. У всіх інших випадках $C_t = 1,0$.

На території України Національний додаток ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3 виключає надзвичайні снігопади. Вважається, що вони не виникають і не враховуються.

Отже снігові навантаження повинні враховуватися наступними розрахунковими ситуаціями:

Постійна/тимчасова розрахункова ситуація:

- без урахування занесення $\mu_i C_e C_t S_k$ (рівномірний розподіл снігу);
- з урахуванням занесення $\mu_i C_e C_t S_k$ (нерівномірний розподіл снігу).

ВІТРОВІ НАВАНТАЖЕННЯ

Дослідження вітрових навантажень проводилося відповідно до процедур випробувань в аеродинамічній трубі граничного шару, описаних в європейському стандарті EN 1991-1-4:2005 [4], а також відповідно до керівництва з аеродинамічних випробувань Німецької вітроенергетичної асоціації, WTG, згідно з вимогами німецького національного додатку, DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [4]. Крім того, дослідження проводилося відповідно до процедур випробувань в аеродинамічній трубі граничного шару, викладених в ASCE 7-10 [5] і ASCE 49-12 [5].

Досліджувана навітряна місцевість (експозиція) відповідала місцевості з низькою рослинністю, наприклад, травною та ізольованими перешкодами

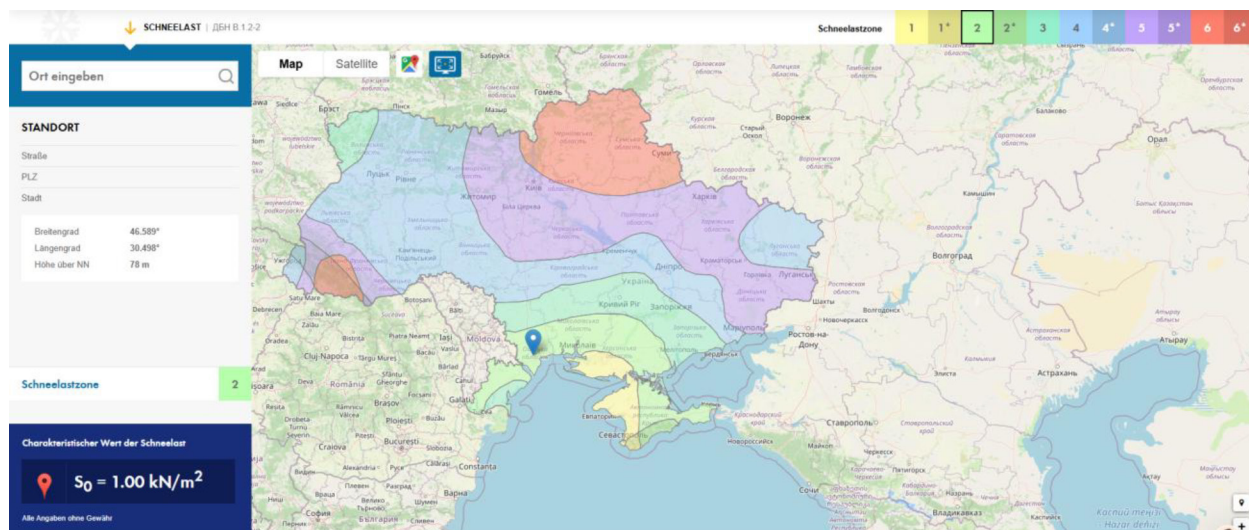


Рис. 3. S_k – характеристичні значення снігового навантаження на ґрунт

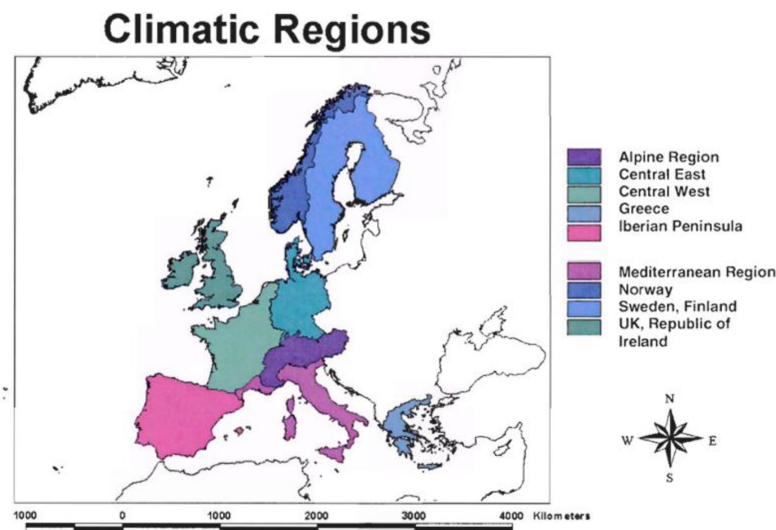


Рис. 4. Європейські кліматичні регіони

BS EN 1991-1-3:2003
EN 1991-1-3:2003 (E)

Table C.1. Altitude - Snow Load Relationships

Climatic Region	Expression
Alpine Region	$s_k = (0,642Z + 0,009) \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right]$
Central East	$s_k = (0,264Z - 0,002) \left[1 + \left(\frac{A}{256} \right)^2 \right]$
Greece	$s_k = (0,420Z - 0,030) \left[1 + \left(\frac{A}{917} \right)^2 \right]$
Iberian Peninsula	$s_k = (0,190Z - 0,095) \left[1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right]$
Mediterranean Region	$s_k = (0,498Z - 0,209) \left[1 + \left(\frac{A}{452} \right)^2 \right]$
Central West	$s_k = 0,164Z - 0,082 + \frac{A}{966}$
Sweden, Finland	$s_k = 0,790Z + 0,375 + \frac{A}{336}$
UK, Republic of Ireland	$s_k = 0,140Z - 0,1 + \frac{A}{501}$

s_k is the characteristic snow load on the ground [kN/m²]
 A is the site altitude above Sea Level [m]
 Z is the zone number given on the map.

Рис. 5. S_k – характеристичне значення снігового навантаження для європейського регіону

(експозиція на відкритій місцевості). Це еквівалентно категорії місцевості II та експозиції С. Однак результати випробувань також підходять для навітряних категорій місцевості від 0 до IV за умови використання відповідно до EN 1991-1-4:2005 [4]. Відповідно, результати випробувань застосовні для навітряного впливу В, С і D за умови використання відповідно до ASCE/SEI 7-10, глава 30.1.3 [5].

Вітрове навантаження на наземні фотоелектричні системи змінюється не тільки залежно від нахилу, але й від співвідношення висоти корпусу до висоти коника, $(h - s)/h$, на яке впливає низький дорожній просвіт

і коефіцієнт покриття землі $GCR = B/R$, рис. 6. Тому розрахункові коефіцієнти тиску є консервативними лише для співвідношень $(h - s)/h$, вищих, ніж під час тестування, та GCR в межах тестового діапазону. Однак наведені допуски та формули поправок, що враховують такі ефекти.

Навантаження змінюються залежно від положення в масиві рис. 7, і, як і очікувалося, найгірші навантаження були виявлені по периметру масиву. Внутрішні частини масиву, як правило, мають значно менші вітрові навантаження, ніж периферійні ділянки, завдяки захисту від вітру. Тому дані були зведені

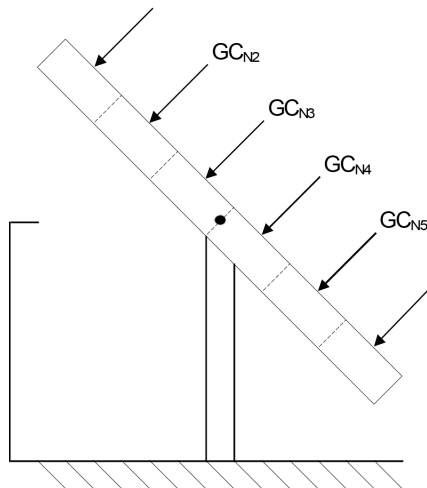


Рис. 6. Спрощена загальна схема коефіцієнтів вітрового навантаження

до коефіцієнтів тиску для червоної, жовтої та зеленої зон масиву.

Вітрові навантаження на наземну систему кріплення залежать від жорсткості з'єднувальних елементів. Жорсткі елементи використовують відсутність

одночасної дії поривів, викликаних масивом, на великі навантажені зони. Якщо вітрове навантаження на високонавантажені зони масивів може бути значною мірою перерозподілене взаємопов'язаною підконструкцією, переваги розподілу навантаження можуть бути застосовані.

ЕКВІВАЛЕНТНІ СТАТИЧНІ ВІТРОВІ НАВАНТАЖЕННЯ

Виміряні локальні тиски усереднювалися по всьому структурному елементу і ділилися на опорний швидкісний тиск, вимірюваний безпосередньо перед моделлю, для отримання коефіцієнта чистого тиску, що репрезентує цей компонент в цілому. Для розрахунку миттєвих коефіцієнтів чистого тиску розраховували зважену за площею суму коефіцієнтів тиску для кранів на верхній і нижній поверхнях модуля як функцію часу, щоб отримати коефіцієнт чистого тиску. Опорний швидкісний тиск реєструвався на висоті 10 м за повною шкалою.

Таке усереднення миттєвих тисків за площею дало часовий ряд коефіцієнта чистого тиску. За методом було проведено статистичну обробку часових рядів. Чисті коефіцієнти нормальної сили,

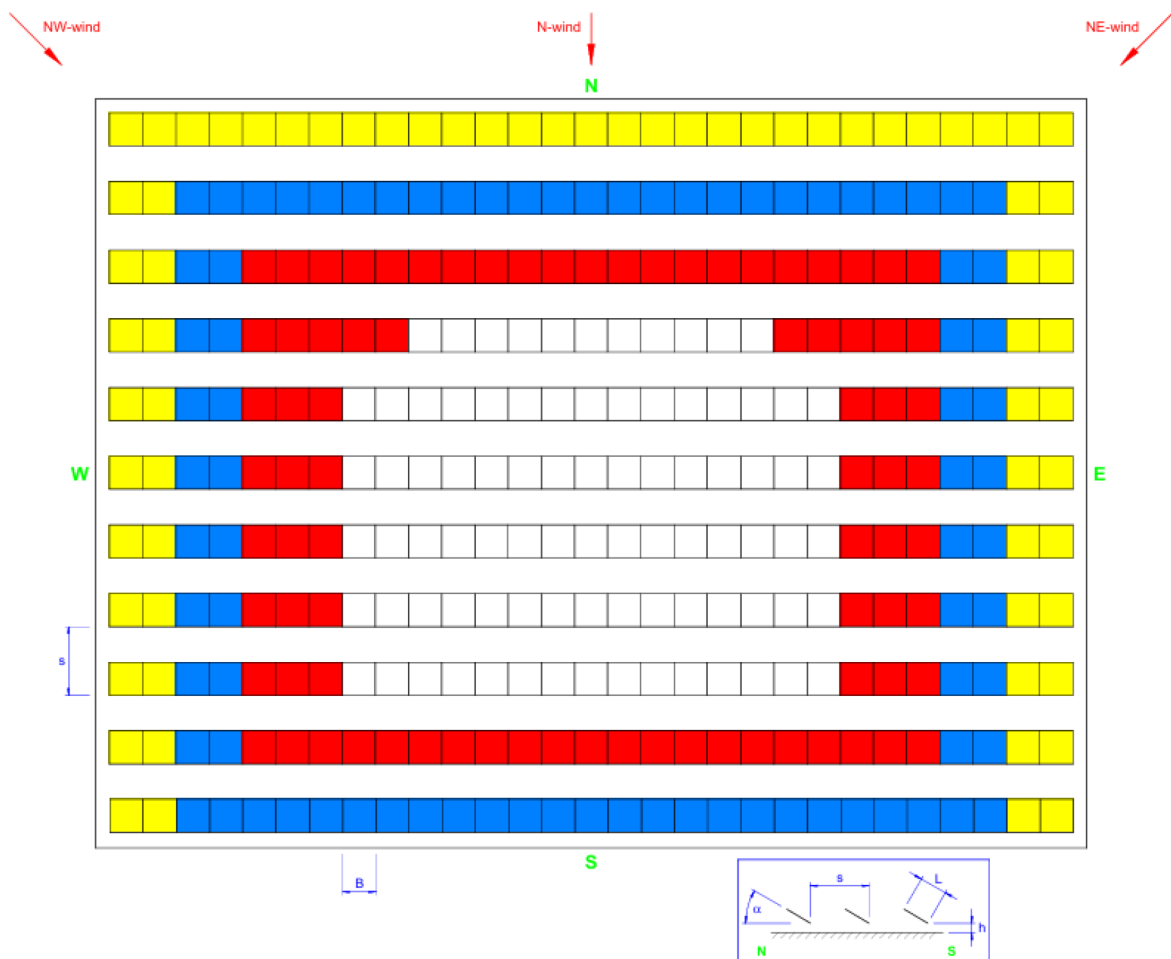


Рис. 7. Зони масивів, система координат і напрямки вітру для пікових нормальних навантажень, модулів і затискачів

$GC_{(N)}$, що поєднують коефіцієнт пориву, G , і коефіцієнт чистої нормальної сили, $C_{(N)}$, були згенеровані і переприв'язані до опорного тиску 3-секундного пориву для сумісності з форматом, що використовується в EN 1991-1-4:2005 [4] і ASCE 7-10 [5].

Коефіцієнти тиску, наведені в цьому звіті, є статично-еквівалентними коефіцієнтами і не включають резонансну (інерційну) реакцію конструкції, яка може виникнути внаслідок вихрового осипання або буферизації поривів. Така динамічна поведінка враховується шляхом множення статично-еквівалентних коефіцієнтів на динамічні коефіцієнти підсилення

Для проміжних приток застосовується логарифмічна інтерполяція.

ДИНАМІЧНЕ ПОСИЛЕННЯ

Динамічні коефіцієнти підсилення були визначені на основі окремого аналізу з використанням часових рядів тиску та можливого діапазону структурних властивостей (власних частот, коефіцієнта демпфування та найбільш близького режиму вібрації) типової наземної фотоелектричної системи з фіксованим кутом нахилу.

Для того, щоб врахувати вплив динамічної реакції (інерційних навантажень), важливо розуміти форми режимів, які може демонструвати конструкція при вітровому збудженні. У даному дослідженні було виявлено два режими, чутливі до вітрового збудження:

- Нормальне зусилля на повну хорду/ширину панелі, (GC_N), в прольоті між стійками вздовж ряду
- Згинальний момент консольного прольоту ($GC_{(M-Cant)}$)

РЕЗУЛЬТАТИ

Використовуючи метод, описаний в розділі, було досліджено кілька ефектів проектного навантаження з урахуванням площі притоку для створення пікових нормальних сил або моментів для проектування наземної фотоелектричної системи з фіксованим кутом нахилу, як описано в розділі 3. Схеми впливу вітрового навантаження наведено на рис. 6. Стрілки моментів і сил вказують на позитивний напрямок дії.

В якості основи для аналізу вітрових навантажень були розглянуті чотири фундаментальні ефекти навантаження: Пікова нормальна сила для різних площ притоків, консольний момент для заданих консольних прольотів, модульні навантаження і навантаження від затискачів, що діють на площу, еквівалентну половині модуля. Результати аналізу представлені у вигляді розподілів навантажень GC_N на рис. 7.

Вплив нормальної сили навантаження (GC_N) створює пікову нормальну силу на панелі. Позитивне значення асоціюється з притисною силою, тоді як негативне значення асоціюється з підйомною силою відповідно стандартів EN 1991-1-4:2005 [4] та ASCE 7-10 [5]. Ці коефіцієнти зазвичай використовуються для

проектування вертикальних стійок, прольотів між стійками і прольотів не коротше 1 м.

Максимальна позитивна і негативна нормальна сила приблизно на половині площі модуля (для конструкції затискачів) позначається як $GC_{(N-Clip)}$. Зазвичай вона застосовується для проектування модульних затискачів. $GC_{(N-Mod)}$ відповідає максимальній позитивній і негативній нормальній силі, що діє приблизно на всю площу модуля.

Ефект консольного моментного навантаження, $GC_{(M-Cant)}$, створює піковий згинальний момент консольного прольоту. Коефіцієнт нормальної сили GC_N визначається як:

$$GC_N = F(F(N)/qz \cdot A_{ref},$$

$q(z)$ – тиск вітру з еталонною швидкістю, оцінений на висоті 10 м над рівнем землі в EN 1991-1-4:2005 [4] та ASCE 7-10 [5]. q_z називається тиском з піковою швидкістю в EN 1991-1-4:2005 [4] та швидкісного тиску в ASCE 7-10 [5].

A_{ref} – являє собою опорну площу, або площу притоку модулів, L на B . Зауважте, що L відрізняється для ефектів навантаження.

B – опорна довжина (довжина хорди), відстань від нижнього краю нижнього модуля до верхнього краю верхнього модуля.

L – опорна ширина/проліт. Для стовпових навантажень вона дорівнює прольоту притоки для одного стовпа, який вважається обмеженим в середині між двома стовпами (або, як альтернатива, дорівнює відстані між послідовними стовпами для прогонових навантажень). Для впливу консольного навантаження L дорівнює довжині консолі. Однак, для забезпечення гнучкості проектування були розглянуті додаткові значення для L . Шість коефіцієнтів нормальної сили (GC_{N1} , $GC_{(N)}(2)$, $GC_{(N)}(3)$, $GC_{(N)}(4)$, $GC_N(5)$ і $GC_{(N)}(6)$) представлені для кожного випадку навантаження, що представляють одночасні навантаження на шість однакових за розміром ділянок припливної зони вздовж хорди панелі.

$$GCR = B/R$$

де B – довжина хорди, а R – ширина міжряддя. Для проміжних коефіцієнтів покриття застосовується логарифмічна інтерполяція. Для проміжних кутів нахилу застосовується лінійна інтерполяція.

Вищезазначені правила інтерполяції застосовуються як до коефіцієнтів нормальної сили, так і до коефіцієнтів динамічного підсилення.

Загалом, менша відстань між рядами збільшує захисний ефект навітряних рядів на підвітряні, тоді як більша відстань зменшує цей ефект.

Аналогічно, зі збільшенням відстані від одного ряду до іншого досягається точка, в якій захисний ефект навітряних рядів стає незначним, а навітряний ряд поводить себе так, ніби він лежить периметру масиву.

ХВИЛЬОВІ НАВАНТАЖЕННЯ

– Хвилі. Фізика хвиль. [7]

Оскільки плаваючі сонячні електростанції розташовуються на великих водних просторах, таких як озера, внутрішні моря та прибережні зони, хвилі стають критично важливим фактором у проектуванні, особливо для забезпечення стійкості в умовах штормів. Щоб оцінити виклики, які створюють потужні морські умови, необхідно розуміти основи фізики водних хвиль, що формуються під впливом вітру.

Хвиля – це більше, ніж здається на перший погляд. Зовні вона виглядає як рух гребенів по поверхні води, але самі частинки рідини не здійснюють поступального переміщення з однієї точки в іншу. Насправді хвилювання виникає через енергію, що передається воді вітром, який дме над її поверхнею. Незважаючи на видимий рух хвиль, сама вода переміщується лише локально.

Як показано на рис. 8, у глибоких водоймах частинки рідини рухаються по кругових орбітах, радіус яких експоненційно зменшується з глибиною. На рівні, що дорівнює половині довжини хвилі, радіус траєкторії складає всього 3 % від початкового на поверхні. При зменшенні глибини до значень, менших за половину довжини хвилі, траєкторія руху частинок стає більш еліптичною, а вертикальна складова руху зменшується. Це добре ілюструє діаграма для умов проміжної та мілководної зон.

Таким чином, коли плаваюче тіло знаходиться у зоні хвильового впливу, воно реагує не лише на рух поверхні води, але й на переміщення частинок рідини під нею. Отже, на таке тіло впливають як потенційна, так і кінетична енергія хвиль.

Синусоїдальні хвилі малої амплітуди, описані вище, є базовими елементами, з яких складаються більш складні хвильові явища в морі. Спостереження за вітровими хвилями у відкритому морі свідчать, що вони не є простими одноманітними хвилями з фіксованою частотою. Навпаки, це складне поєднання хвиль різної довжини, періодів і напрямків руху.

ГЕНЕРАЦІЯ ХВИЛЬ

Кожен, хто спостерігав за поверхнею води, наприклад, у морі або басейні у вітряну погоду, міг

помітити, що вітер створює невеликі хвилі або рябь на поверхні. Це ж явище лежить в основі формування більших хвиль, таких як ті, що використовують серфери на Гаваях.

Головна відмінність між малими та великими хвилями полягає у тривалості їхнього утворення під впливом вітру. Якщо припустити, що вітер дме постійно, то період генерації хвиль визначається довжиною водного простору у напрямку вітру. Ця довжина має вирішальне значення і називається «довжиною хвильового розгону» (Fetch). Іншим важливим чинником формування хвиль є швидкість вітру, яка разом із довжиною розгону впливає на характеристики хвиль.

Хвильовий спектр

Зі збільшенням швидкості вітру та відстані розгону зростає і довжина хвиль, а також їхній піковий спектральний період, рис. 9. Щоб зрозуміти, що таке піковий спектральний період хвиль, варто розглянути, як хвильова мінливість описується у природних морських умовах.

Цю мінливість прийнято виражати через частотний спектр хвильової енергії, який відображає залежність висоти водної поверхні від частоти хвиль. При цьому енергія у кожному частотному діапазоні пропорційна площі відповідного сегмента спектру.

Частота хвилі є величиною, оберненою до її періоду: хвилі з довшим періодом мають нижчу частоту. Зазвичай частотний спектр хвильової поверхні розглядається як накладання кількох синусоїдальних хвильових компонентів, кожна з яких має свою частоту, амплітуду (визначену рівнем енергії на цій частоті) і випадкову фазову залежність від інших хвиль у спектрі.

– Хвильові навантаження

Хвильові навантаження, що діють на плаваючі споруди, можна розглядати як сукупність кількох типів сил, зумовлених дифракцією, опором і інерцією. Дифракційні (та випромінювальні) сили набувають особливого значення, коли розміри конструкції є достатньо великими для утворення хвиль. Це стає критичним у випадках, коли габарити споруди перевищують приблизно половину довжини хвилі.

Якщо висота хвиль (H) і переміщення конструкції є незначними порівняно з її розмірами (D), тоді вплив

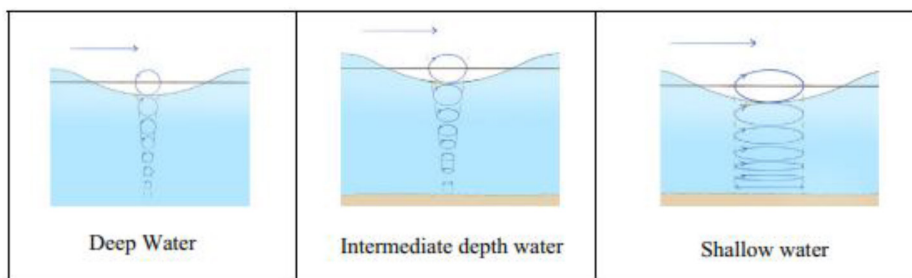


Рис. 8. Рух частинок води, викликаний хвилями.

(А) Глибоководна вода; (В) Вода середньої глибини; (С) Мілководдя

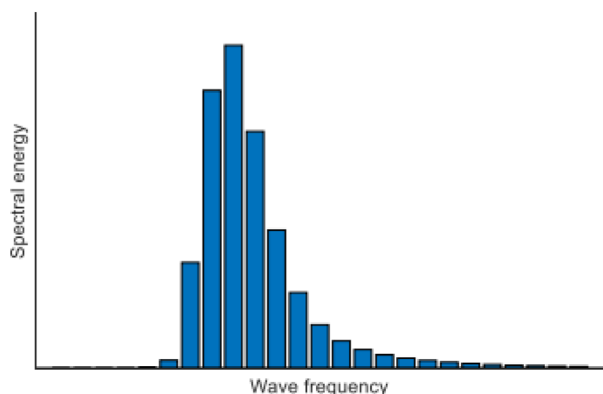


Рис. 9. Приклад спектра хвиль

сил опору зменшується, а інерційні сили починають домінувати.

Дифракційні сили виникають через відбиття та випромінювання хвиль, спричинені присутністю та рухом тіла у воді. Для ідеалізованих форм, наприклад сфер, існують аналітичні розрахунки дифракційних сил, проте для більш складних конструкцій їх зазвичай визначають за допомогою лінійних розв'язувачів потенціального потоку, таких як WAMIT (www.wamit.com/).

Ці розв'язувачі дозволяють обчислювати коефіцієнти хвильової сили, що залежать від частоти, визначаючи вплив хвильової дії на одиницю амплітуди хвилі або переміщення конструкції.

Джерела водних течій

Водні течії, які можуть впливати на станцію, залежать від її розташування. Основними типами водних потоків у потенційних зонах встановлення плавучих електростанцій є річкові, водосховищні та морські течії, кожні з яких мають різні джерела виникнення.

Крім того, існують місця, де можуть взаємодіяти кілька типів течій, наприклад, естуарії або озера з інтенсивними припливами та відтоками води. У таких випадках необхідно враховувати комплексний вплив різних потоків для точного оцінювання їхнього впливу на споруду.

Вплив водних течій і глибини на хвильовий спектр

Хвильовий спектр залежить не тільки від характеристик вітрових хвиль, але й від водних течій і глибини водойми. Ці фактори можуть змінювати частоту та напрямок хвиль, що робить їхній вплив складним для аналізу.

Зазвичай для точного прогнозування змін у спектрі хвиль використовують чисельне моделювання. Однак, навіть без детальних розрахунків можна оцінити основні фактори, що визначають їхній вплив.

Зокрема, водні течії можуть змінювати спостережувану частоту хвиль (рис. 10) через ефект Доплера, а також впливати на зміну їхнього напрямку, що необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації плавучих конструкцій.

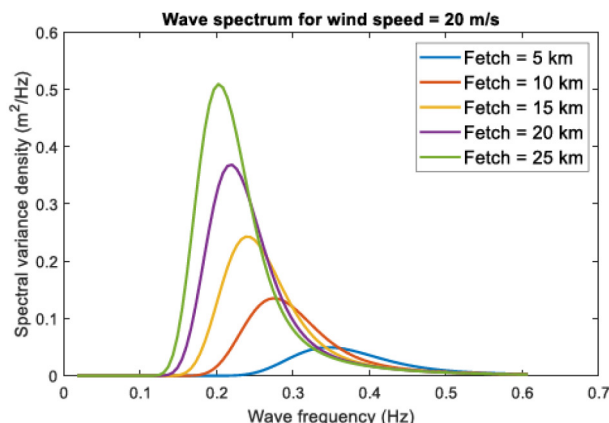


Рис. 10. Частота хвиль

КОМБІНАЦІЇ НАВАНТАЖЕНЬ

Відповідно до норм, при перевірках на граничний стан необхідно дотримуватися концепції розділених коефіцієнтів запасу міцності. Відповідно, для навантажувальних впливів повинні бути встановлені певні часткові коефіцієнти безпеки. Застосовуються наступні умовні позначення:

$\gamma_g = 1,35$ для несприятливих постійних навантажень (власна вага конструкції)

$\gamma_g = 0,9$ для сприятливих постійних навантажень (у поєднанні з вітровим всмоктуванням)

$\gamma_q = 1,5$ для змінних навантажень (вітер і сніг)

Припущення щодо вітрового та снігового навантаження застосовуються до події, яка відбувається або перевищується один раз за 50-річний період спостережень. Оскільки ймовірність того, що найнесприятливіша снігова подія відбудеться одночасно з найнесприятливішою вітровою подією, дуже низька, вітрове або снігове навантаження може бути зменшене за допомогою так званих коефіцієнтів поєднання: $0, w = 0,6$. Коефіцієнт комбінації зі снігом як напрямним ефектом та вітром

$\psi_{0,s} = 0,5$. Коефіцієнт комбінації з вітром як напрямним впливом та снігом

Наступні комбінації навантажень впливають з описаних вище правил:

Комбінація навантаження 1: $\gamma_{(g)}g + \gamma_{(q)}s + \psi_{(0,w)} - \gamma_{(q)}w = 1,35g + 1,5s + 0,6 - 1,5w$.

Комбінація навантаження 2: $\gamma_g g + \psi_{(0,w)} \gamma_q s + \gamma_q w = 1,35g + 0,5 - 1,5s + 1,5w$.

Комбінація навантаження 3: $\gamma_{(g)}g + \gamma_q w_{\text{(всмоктування)}} = 0,9g + 1,5w_{\text{всмоктування}}$.

ВИСНОВКИ

У цій роботі розглянуто різні види навантажень, що впливають на плавучі фотоелектричні системи, а також комбінації навантажень. Подальший розвиток цього напрямку передбачає вибір оптимальної конструкції, що відповідатиме критеріям економічної доцільності, енергоефективності та довговічності.

Особливу увагу слід приділити аналізу навантажень, які можуть вплинути на міцність, стійкість та функціональність конструкції, зокрема динамічним впливам вітру, хвиль і течій. Для цього необхідно вивчити чинні норми та стандарти проектування як в Україні, так і в країнах Європейського Союзу.

Попри те, що плаваючі сонячні електростанції наразі на 10–15 % дорожчі за наземні проекти, вони мають значний потенціал у регіонах із обмеженими земельними ресурсами. Дослідження показують, що глобальний потенціал генерації електроенергії від таких установок сягає 9434 ТВт-год на рік, охоплюючи 30 % площі 114 555 водосховищ світу.

Подальша робота у цьому напрямі потребує пошуку оптимальних конструктивних рішень, які

підвищать міцність конструкцій без значного збільшення їхньої маси. Одним із можливих шляхів є застосування легших матеріалів або зменшення поперечного перерізу профілів. Важливо враховувати, що міцність і маса профілів безпосередньо впливають на загальну стійкість конструкції, яка визначається метацентричною висотою надводної частини системи. Цей параметр, у свою чергу, залежить від розмірів сонячних панелей та їхнього кута нахилу до сонця.

Результати проведеного аналізу сприятимуть розробці плаваючих сонячних електростанцій, які будуть не лише економічно вигідними, але й достатньо надійними для довготривалої експлуатації в умовах змінних природних факторів.

REFERENCES

- [1] DSTU-N B EN 1991-1-3:2010 Eurocode 1. Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1–3. Allgemeine Einwirkungen. Schneelasten (EN 1991-1-3:2003, IDT)
- [2] DSTU-N B EN 1991-1-4:2010 Eurocode 1. Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 1–4. Allgemeine Einwirkungen. Windlasten (EN 1991-1-4:2005, IDT)
- [3] Windlasten an einer Musterkonfiguration für PV-Freiland-Anlagen in Süd-Aufständigung Ruscheweyh Consult GmbH Aachen
- [4] EN 1991-1-4:2005: Eurocode1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–4: Allgemeine Einwirkungen – Einwirkungen auf Wind, CEN, 2005
- [5] ASCE7-10, Amerikanische Gesellschaft der Bauingenieure: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2010
- [6] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, 2010.
- [7] Trevor Whittaker, PhD, BSc, FEng., FRINA, FICE, CEng; Matt Foley, PhD, BSc; Jonathan Hancock, MEng (Hons), PhD, MICE, CEng, DNV, Environmental conditions and environmental loads – Recommended practice, DNVGL-RP-205, 2017.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] DSTU-N B EN 1991-1-3:2010 Eurocode 1. Actions on structures. Part 1–3. General actions. Snow loads (EN 1991-1-3:2003, IDT)
- [2] DSTU-N B EN 1991-1-4:2010 Eurocode 1. Actions on structures. Part 1–4. General actions. Wind loads (EN 1991-1-4:2005, IDT)
- [3] Windlasten an einer Musterkonfiguration für PV-Freiland-Anlagen in Süd-Aufständigung Ruscheweyh Consult GmbH Aachen
- [4] EN 1991-1-4:2005: Eurocode1: Дії на конструкції – Частина 1–4: Загальні дії – Дії на вітер, CEN, 2005
- [5] ASCE7-10, Американське товариство інженерів-будівельників: Мінімальні розрахункові навантаження для будівель та інших споруд, 2010
- [6] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, 2010
- [7] Trevor Whittaker, PhD, BSc, FEng., FRINA, FICE, CEng; Matt Foley, PhD, BSc; Jonathan Hancock, MEng (Hons), PhD, MICE, CEng, DNV, Environmental conditions and environmental loads – Recommended practice, DNVGL-RP-205, 2017.

© Ніруманд М. М., Зайцев В. В.

Дата надходження статті до редакції: 06.10.2025

Дата затвердження статті до друку: 28.10.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0