

**ОСОБЛИВОСТІ ВЛАШТУВАННЯ ФУНДАМЕНТІВ
ВІТРОДВИГУНІВ, ЩО СПРИЙМАЮТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНІ І
КРУТИЛЬНІ НАВАНТАЖЕННЯ**

**CONSTRUCTION FEATURES OF WIND TURBINES' FOUNDATIONS,
WITHSTANDING HORIZONTAL AND TORSIONAL LOADS**

**Плахотний Г.Н., к.т.н., доц., Чернецьва О.С., к.т.н., доц., Чорна Л.В.,
к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури)**

**Plahotny G.N., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Chernieva
O.S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Chorna L.V. Ph.D. in
Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil
Engineering and Architecture)**

У статті викладені варіанти фундаментів для вітрогенераторів різної потужності та висоти, які здатні сприймати значні горизонтальні і крутильні навантаження. Конструктивно установки можуть бути моновітрорухливими (лопати розташовуються у стовбурі щогли) і полівітрорухливими (лопати або їх комплекс знаходяться перпендикулярно напрямку щогли). Підземна частина споруди повинна забезпечити стабілізаційну стійкість.

В якості фундаментів можуть застосовуватися монолітні стовпчасті плитні; пальові з пірамідальних або козлових паль, що самозакриваються при забиванні; бурові комбіновані.

In the article the variants of foundations for wind engines of different capacity and height, able to withstand considerable horizontal and torsional loads, are stated. Wind power plants for homes have been widely used on country plots and other sites that are remote from the main power grid. The height of the mast is 4-6m with a wind speed of 2.5 to 35m/s. The wind direction is determined by the side from which it blows. Meteorological data about wind direction is laid out in the form of a wind rose, which indicates its average speed in different directions.

Structurally, installations can be mono-wind (blades are located in the mast alignment) and multi-wind (blades or their complex are located perpendicular to the mast direction). Structurally, the mast can be one-piece tubular. At higher heights, lattice-space masts with strakes are used.

The underground part of the structure should provide stability. The loads which affect the foundations are as follows: permanent (its own weight, vertical load), temporary, temperature, and seismic.

Monolithic columnar slab foundations, piles made of pyramidal or batter piles, self-closing when driven, and drill-combined foundations can be used.

The construction of combined drilled-injection foundations is divided into several steps:

- *drilling a hole ϕ 250-350mm to a depth of 2.5 to 4.0m (image 1a);*
- *installation of a metal embedded pipe ϕ 217mm with slots (4-8 pieces), in which the blades are embedded, attached to the pipe with special bolts (image 1b);*
- *lay the pipe in the drilled hole, and then with an anchor to crush the blades so that they through slots entered into the ground (image 1c);*
- *fill in the tube with anchor with concrete C15/20 with layer-by-layer compaction;*
- *ready-made combined drill-injection foundation can be used at installation of wind turbine with mast height 4.0-6.0m.*

The main conclusions of the article are:

- *wind turbines with a horizontal arrangement of the generator and the blades found wide application in suburban areas and other objects, which are remote from the main power grids.*
- *features of their work is the independence of the action of different wind direction from the wind rose, and the value of the load is transferred through the mast to the underground part of the structure.*
- *the joint operation of soil base with foundations on horizontal and torsional loads depends on the physical and mechanical characteristics of soils (density of dry soil, moisture, friction, etc.)*
- *from the considered variants of foundations, the most effective are foundations of driven seal piles (pyramidal batter), as well as combined drilled-injection foundations that allow to increase the resistance of piles to external loads due to compaction of soil during pile driving.*

Ключові слова: вітродвигун, щогла, трубчасті щогли, решітчасті щогли, фундаменти монолітні стовпчасті плитні, пальові з пірамідальних або козлових паль, бурові комбіновані.

Keywords: wind turbine, mast, tubular masts, lattice masts, foundations monolithic columnar plate foundations, pyramidal or batter pile foundations, drill-combined foundations.

Актуальність питання вітроенергетики в умовах дефіциту енергоресурсів в Україні не має сумнівів і доведена в праці Гайдаєнко [1].

Споруди вітродвигунів сприймають значні горизонтальні і крутильні навантаження. Причиною виникнення вітрів є поглинання земною атмосферою сонячного випромінювання, що призводить до розпарення повітря і появи конвекторних течій. Метеодані про напрям вітру відображають у вигляді троянди вітрів, що вказує на його середню швидкість у різних напрямках.

Застосування вітродвигунів поширюється для будинків і заміських ділянок, які віддалені від основних електричних мереж. Різноманітність вітродвигунів дозволяє застосовувати їх при різному розташуванні робочих лопатей. Моновітродвигуни мають 2-3 робочих лопаті, які знаходяться в стовбурі щогли, полівітродвигуни застосовуються з перпендикулярним розташуванням лопатей по відношенню до робочої щогли.

Висота щогли буває 4-6м зі швидкістю вітру 2.5-35 м/с. Конструктивно щогли можуть бути трубчастого і гратчастого просторового перетину. При необхідності щогли додатково підсилюють відтяжками (рис.1), особливо при верхньому розташуванні генератора.

Особливістю горизонтального розташування робочих лопатей є можливість різного напрямку вітру. Крутильні навантаження при цьому можуть мати різнознакові напрямки. Подібні навантаження передаються через щоглу на підземну частину споруди.

У будівельній практиці застосовуються різні конструкції фундаментів. На їхню спільну роботу з основою впливають особливості фізико-механічних характеристик ґрунтів (щільність складання сухого ґрунту, вологість, тертя тощо). Ґрунти можуть бути як в природному стані, так і ущільнені при забиванні паль і зануренні окремих елементів.

Аналіз попередніх досліджень

У літературі широко обговорювались питання проектування башт вітрогенераторів з точки зору параметрів фундаменту. Для визначення параметрів фундаменту запропоновано аналітичний, а також новий експериментальний підхід [1].

Ерік Нім (Nim 2007) [2] запропонував і запатентував новий плавучий фундамент для вітрогенераторів, де фундамент, по суті, складається щонайменше з трьох занурених тіл плавучості, з'єднаних з нижнім кінцем башти вітрогенератора у спільному вузлі, розташованому далеко над поверхнею моря. Завдяки конструкції фундаменту, у відповідності до цього винаходу, зменшуються концентрації напружень і моменти в елементі вузла, завдяки чому стає можливим застосування відносно легкого і, отже, дешевого вузла.

Чисельні та експериментальні дослідження поведінки при короткочасному та довгостроковому циклічному навантаженні пальових фундаментів для морських вітрогенераторів обговорював Куеллар (Cuéllar 2011) [3] у своїй дисертації. Свенссон (Svensson 2010) [4] досліджував основи наземних вітрогенераторів, де досліджується як більш конвенціональний метод з великою бетонною плитою, так і альтернативні методи фундаменту, переважно пальові фундаменти. Бірн та Хаулсбі (Birn та Haulsby 2003) [5] досліджували проблеми цивільного будівництва, що виникають у морських вітрогенераторах, та вивчали недоліки сучасних підходів до проектування. Рукопис Домініка Роддіє та інших (Roddier 2010) [6] узагальнює техніко-економічне обґрунтування, проведене для технології WindFloat.

Ще один новий тип пальового фундаменту був розроблений Самохваловим (Samokhvalov 2017) [7]. Статичні дослідження палі, що мають на своєму кінці розширення у вигляді мембранної чашки, показали, що контрольоване розширення на кінці палі в середньому викликає двократне збільшення несучої здатності масиву ґрунту в районі

розширення. Пронозін (Pronozin 2018) [8] також вивчав конструкцію буроін'єкційних паль, виготовлених за технологією чашки, з нагнітанням розчину в режимі утворення "гідравлічних руйнувань" з утворенням контрольованого розширення в кінці палі.

Різновиди фундаментів

Розглядаються різні види фундаментів:

- Окремо розташовані монолітні залізобетонні плитні фундаменти, маса яких значно перевищує величину різнознакових крутильних моментів. Рационально застосовувати такі фундаменти в середньозернистих піщаних ґрунтах і щільних глинистих, при $\rho_d \geq 1.45\text{г/см}^3$. Щогла жорстко пов'язана з тілом фундаменту.

- Фундаменти з похилих призматичних паль, голови яких жорстко з'єднані бетонним ростверком. Палі своїми вістрями спираються на практично нестискувані ґрунти.

- Фундаменти з пірамідальних паль. Навантаження від щогли передаються через бетонний ростверк, жорстко пов'язаний з головами паль, на бічні грані. Ґрунт вздовж граней палі попередньо ущільнений при забиванні і його щільність збільшена в 1.15-1.2 рази в порівнянні з природним ґрунтом.

- Фундаменти з козлових паль, що розкриваються самостійно при забиванні. Особливості їх спільної роботи з ґрунтами основи полягають у влаштуванні при забиванні ущільненого ґрунтового ядра з $\rho_d \geq 1.75\text{г/см}^3$ і зовнішньої зони ущільнення з $\rho_d \geq 1.65\text{г/см}^3$, які сприймають діючі навантаження через ростверк.

- Комбіновані буроін'єкційні фундаменти (рис.1). Рациональним є застосування цих фундаментів в глинистих ґрунтах середньої щільності.

Технологія

Влаштування цих фундаментів розділене на кілька етапів:

- буріння свердловини $\phi 250\text{-}350\text{мм}$ на глибину від 2.5 до 4.0м (Рис.1б);

- влаштування металевої закладної труби $\phi 217\text{мм}$ з прорізами (4-8шт), в які закладені лопаті, прикріплені до труби спеціальними болтами (Рис.1в);

- в пробурену свердловину закласти трубу, а потім за допомогою анкера задавити лопаті так, щоб вони через прорізи увійшли в ґрунт (Рис.1г);

- трубу з анкером заповнити бетоном С15/20 з покровим ущільненням;

- готовий комбінований буроін'єкційні фундамент може бути використаний при монтажі установки вітродвигунів з висотою щогли 4.0-6.0м.

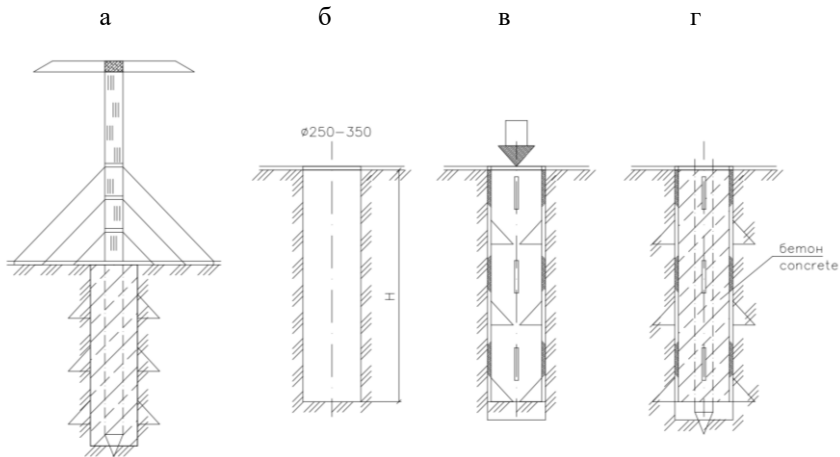


Рис. 1. Комбінований бурин'екційний фундамент: а - загальний вигляд з підсиленням відтяжками, б - буріння свердловини, в – встановлення металеві труби, г – розкриття лопатей

Опір горизонтальним і обертальним навантаженням здійснюється за допомогою випускних лопатей і вертикальної труби.

Висновки

1. Вітродвигуни з горизонтальним розташуванням генератора і лопатей знайшли широке застосування на замських ділянках і інших об'єктах, які віддалені від основних електромереж.

2. Особливості їх роботи полягають в незалежності дії різнознакового напрямку вітру від рози вітрів, а величина навантаження передається через щоглу на підземну частину споруди.

3. Спільна робота ґрунтів основи з фундаментами на горизонтальні і круті навантаження залежить від фізико-механічних характеристик ґрунтів (щільності сухого ґрунту, вологості, тертя тощо).

4. Із запропонованих варіантів фундаментів найбільш ефективними можна вважати фундаменти із забивних паль ущільнення (пірамідальних, козлових), а також комбіновані бурин'екційні, що дозволяють підвищити опір паль дії зовнішніх навантажень за рахунок ущільнення ґрунту при забиванні.

References

1. Haydayenko Ihor. Vitroenerhetyka na terenakh Ukrayiny v XIX - pershiy polovyni XX st.: Istorychna retrospektyva. *Naukovi zapysky: Seriya "Istoriya"*, 2014. CH3. P.114-118.

2. Adhikari, S., Bhattacharya, S. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations. *Shock and Vibration* 19, no. 1 (2012)., P. 37-56.

3. Nim, E. Wind turbine with floating foundation. Patent US7156586B2 (2007).

4. Cuéllar, Pablo Pile foundations for offshore wind turbines: Numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading. *Tesis Doctoral, Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt*, (2011), 273 p.
5. Svensson, Henrik Design of Foundations for Wind Turbines. *Master's Dissertation, Lund University, Department of Construction Sciences* (2010), 161 p.
6. Byrne B. W., Houlsby G. T. Foundations for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Mathematics, Physical and Engineering Sciences*, 361 (2003): 2909–2930 p.
7. Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., Weinstein, A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2, 033104 (2010).
8. Samokhvalov M.A., Geydt L.V., Paronko A.A., Geydt A.V. Opredeleniye osadki buroinyektsionnykh svay s kontroliruyemym ushireniyem. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura»* 2019. T. 19, № 1. P. 27–34.
9. Pronozin YA.A., Samokhvalov M.A. Rezul'taty polevykh i teoreticheskikh issledovaniy izgotovleniya buroinyektsionnoy svai s kontroliruyemym ushireniyem *Vestnik PNIPU «Stroitel'stvo i arkhitektura»*, 2014. №3. P. 197-216.

Список використаної літератури

1. Гайдаєнко Ігор. Вітроенергетика на теренах України в XIX - першій половині XX ст.: Історична ретроспектива. *Наукові записки: Серія "Історія"*, 2014. ЧЗ. С.114-118.
2. Adhikari, S., Bhattacharya, S. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations. *Shock and Vibration* 19, no. 1 (2012), 37-56.
3. Nim, E. Wind turbine with floating foundation. Patent US7156586B2 (2007).
4. Cuéllar, Pablo Pile foundations for offshore wind turbines: Numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading. *Tesis Doctoral, Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt*, (2011), 273.
5. Svensson, Henrik Design of Foundations for Wind Turbines. *Master's Dissertation, Lund University, Department of Construction Sciences* (2010), 161.
6. Byrne B. W., Houlsby G. T. Foundations for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Mathematics, Physical and Engineering Sciences*, 361 (2003): 2909–2930.
7. Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., Weinstein, A. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2, 033104 (2010).
8. Самохвалов М.А., Гейдт Л.В., Паронко А.А., Гейдт А.В. Определение осадки буройнъекционных свай с контролируемым уширением. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»* 2019. Т. 19, № 1. С. 27–34.
9. Прозин Я.А., Самохвалов М.А. Результаты полевых и теоретических исследований изготовления буройнъекционной свай с контролируемым уширением *Вестник ПНИПУ «Строительство и архитектура»*, 2014. №3. С. 197-216.