

ЕЖЕКЦІЙНА ВІТРОВА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

З. С. СІРКО, кандидат технічних наук

С. М. ОХРИМЕНКО, О. Ю. ЦАПКО, PhD,

Д. П. ТОРЧИЛЕВСЬКИЙ, Є. А. СТАРИШ, В. М. ГРИЦУН

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

E-mail: z.sirko@ukr.net

[https://doi.org/10.31548/dopovidi3\(103\).2023.015](https://doi.org/10.31548/dopovidi3(103).2023.015)

Анотація. У статті висвітлені питання, пов'язані із нетрадиційними джерелами електроенергії, а саме з вітровою енергетикою. Показано, що енергія вітру з кожним роком використовується все більшими масштабами з метою задоволення потреби людства у надійних та екологічно чистих джерелах енергії. Зазначено, що у багатьох країнах Європи у вітроенергетиці було вироблено значну кількість енергії, що складає приблизно 2 % її світового споживання. У розвинутих країнах Європи вітроенергетика уже зараз становить досить вагомую частку всієї електроенергетики. У порівнянні з країнами Західної Європи та Середземномор'я, Україна являє собою безвітряний регіон, де більш стабільно вітри дмуть тільки в Прикарпатті та на азовському узбережжі. Незважаючи на це, в Україні уже побудовано значну кількість вітрових електростанцій. Швидкість вітру для роботи промислових вітрових електростанцій повинна бути не менше 3 м/с. Внаслідок слабого вітру або його тимчасової відсутності вітроустановки в середньому працюють на 35 % розрахункової потужності. У статті запропонована конструкція ежекційної вертикальної вітрової електростанції, яка забезпечить ефективну роботу та зможе працювати на 100 % розрахункової потужності за рахунок створення постійного висхідного потоку повітря. У роботі виконані розрахунки швидкості повітряного потоку на ежекційному вітрозабірнику, динамічного тиску вентилятора, імпульсу сили повітряного потоку на лопаті ротора, прогнозованої потужності, терміну окупності. Наведені показники лінійного переміщення обтічника який є в конструкції ежекційної електростанції, в залежності від перепаду атмосферного тиску. Розроблена ежекційна вітрова електростанція забезпечить електронезалежність, охорону довкілля, безпеку експлуатації та економічність.

Ключові слова: ежекційна вітрова електростанція, конструкція, потужність, термін окупності, економічність

Постановка проблеми.

Технологія вітрової енергетики є визначальною на сьогоднішній день і безперечно буде передовою у майбутньому. Існує відоме прислів'я «Хто підкорить вітер, підкорить й

майбутнє».

Енергія вітру

використовується з кожним роком все більшими масштабами з метою задоволення потреби людства у надійних та екологічно чистих джерелах енергії [1-3]. Вітрова

Сірко З. С., Охріменко С. М., Цапко О. Ю., Торчиловський Д. П., Стариш Є. А., Грицун В. М.

енергетика вважається найекологічнішим та найбезпечнішим видом відновлювальних джерел енергії. Сучасна вітроенергетика зосереджується насамперед на отримання електроенергії, хоча іноді вітряки використовують для виконання механічної роботи. За даними World Wind Energy Association станом на 2019 рік у вітроенергетиці було вироблено 340 ТВт·год енергії, це приблизно 2 % її світового споживання. У багатьох країнах Європи вітроенергетика уже зараз становить досить вагомую частку всієї електроенергетики: в Данії – 20 %, в Іспанії – 14 %, в Португалії – 14 %, в Німеччині – 12 %. У порівнянні з країнами Західної Європи та середземномор'я, Україна являє собою безвітряний регіон, де більш стабільно вітри дмуть тільки в Прикарпатті та на азовському узбережжі. Незважаючи на це, в Україні уже побудовано значну кількість вітрових електростанцій. Стимулами темпів росту вітроенергетики є проблеми, що гостро постали перед країнами світу – енергонезалежність, охорона довкілля, безпека експлуатації та економіка. На відміну від основного виду енергетичних ресурсів – викопного палива, енергія вітру практично невичерпна, скрізь доступна та досить екологічна [4-7].

Швидкість вітру для роботи промислових вітрових

електростанцій становить від 3 м/с. Внаслідок слабого вітру або його тимчасової відсутності, вітроустановки працюють в середньому на 35 % розрахункової потужності. Для забезпечення ефективної роботи вітрової електростанції, яка не залежить від низької вітрової активності, є необхідність створити вітрову електростанцію, що зможе працювати на 100 % розрахункової потужності за рахунок створення постійного висхідного потоку повітря.

Мета дослідження – розробити ежекційну вітрову електростанцію, що зможе працювати на 100 % розрахункової потужності за рахунок створення постійного висхідного потоку повітря.

Методика досліджень. В роботі застосували аналітичний метод дослідження, який ґрунтується на розрахунках швидкості повітряного потоку на ежекційному вітрозабірнику, динамічного тиску вентилятора, імпульсу сили повітряного потоку на лопатки ротора, прогнозованої потужності, терміну окупності.

Для визначення швидкості повітряного потоку використовували анемометр цифровий моделі GM 816 (Китай) з точністю вимірювання швидкості повітря $\pm 5\%$.

Результати досліджень. На основі експериментальних досліджень була створена

вертикальна
ежекційна
електростанція (рис. 1) [8].

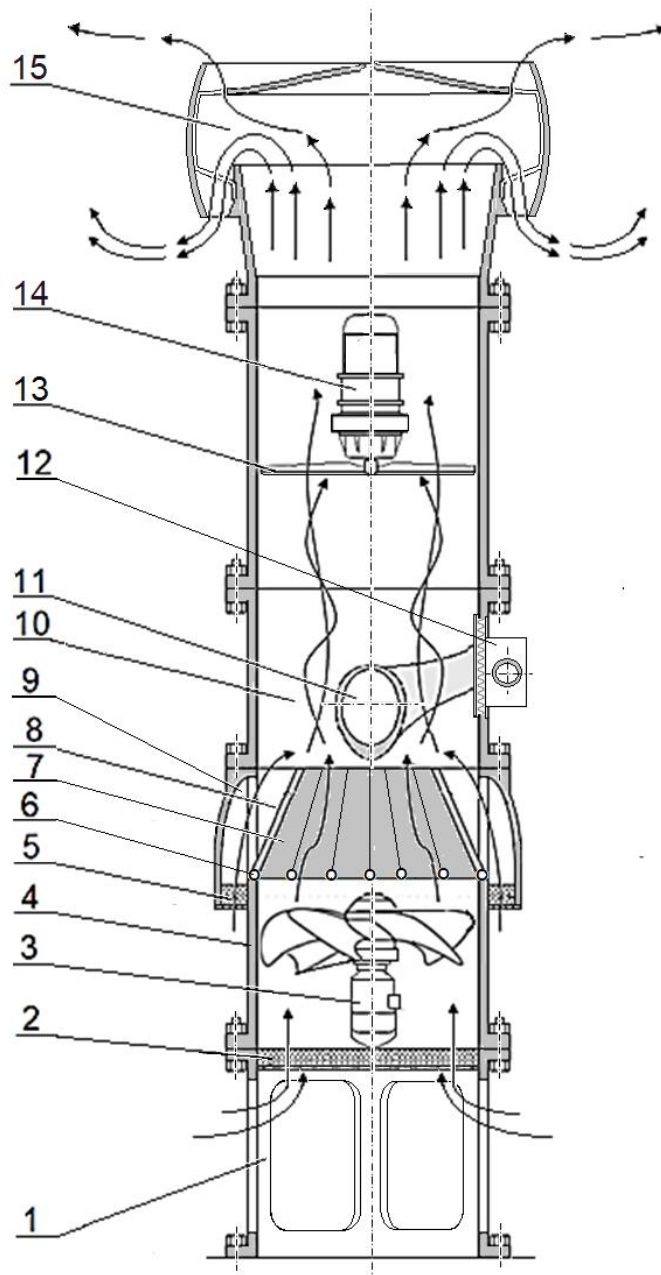


Рис. 1. Загальний вигляд вертикальної ежекційної електростанції: 1 – повітряний канал; 2 – фільтр; 3 – вентилятор; 4 – ежектор; 5 – фільтр; шарніри; 7 – елементи-пелюстки конфузора; 8 – конфузозом; 9 – повітрозбірник; 10 – змішувальна камера потоків повітря; 11 – обтічник яйцевидної (овоїдної) форми; 12 – рейковий пристрій для піднімання та лінійного переміщення обтікача; 13 – лопаті вітроелектричної установки; 14 – вітроелектрична установка; 15 – турбодефлектор

Отримані шляхом експериментальних досліджень дані, щодо кінематичної структури потоку в камері змішування ежектора, засвідчили, що при малих коефіцієнтах ежекції виникають відривні зони, які характеризуються високим рівнем дисипативних процесів, на підтримання яких витрачається певна частина кінетичної енергії потоку, що призводить до зниження коефіцієнта корисної дії вітроелектростанції. Для усунення відривних зон була застосована заміна області їх

існування твердими поверхнями-обтікачами, що вводяться до камери змішування ежектора.

З метою створення активного висхідного потоку повітря, на вході повітряного каналу встановлюється нагнітальний вентилятор, продуктивністю $W = 3.650 \text{ м}^3/\text{год}$ ($1,015 \text{ м}^3/\text{сек}$); динамічним тиском $P = 10.000 \text{ кгс}/\text{м}^2$ (1 атм) + 2,7...3,5%; електроспоживанням $N = 1,1 \text{ кВт}$.

Площу поперечного перетину ежекційних щілин, яких конструктивно приймаємо 8 елементів, вираховуємо, як:

$$\Delta Se = 0,85\pi(R^2 - r^2) \times Ke = 2,67 \times (0,41^2 - 0,38^2) \times 1,2 = 0,095 \text{ м}^2.$$

Швидкість повітряного потоку на ежекційному вітрозабірнику складе:

$$Ve = W : \Delta Se = 1,015 \text{ м}^3/\text{сек} : 0,095 \text{ м}^2 = 10,7 \text{ м/с}.$$

Площа 3-х лопаток 1 ротора, наприклад, $Sr = 0,05 \text{ м}^2$. У приводного вітрогенератора перепад тиску на лопатці невеликий, тому для збільшення сили тиску і підвищення ККД необхідно збільшувати площу лопаток або середній перепад тиску, оскільки сила тиску: $F = \Delta P \times Sr$.

з нього може потребувати декількох радіально розташованих на валу ступенів тиску.

Динамічний тиск вентилятора, з урахуванням сумарного коефіцієнта ежекції ΣKe , складе: $\Sigma P = 10.350 \text{ кгс}/\text{м}^2 \times (1,2 \times 2 \text{ секції}) = 24.840 \text{ кгс}/\text{м}^2$.

Збільшення перепаду тиску на вході в лопатковий апарат і на виході

Імпульс сили повітряного потоку на лопатки ротора складе:

$$F = \Sigma P \times \Sigma Sr = 24.840 \text{ кгс}/\text{м}^2 \times (0,05 \text{ м}^2 \times 2 \text{ ротори}) = 2.484 \text{ кгс}.$$

Пропонована конструкційна схема ежекційної вітроелектростанції, з її комплектацією двома роторами і

двома секціями щілинних повітрозабірників, забезпечать виробництво прогнозованої потужності:

$$Ne = F \text{ кгс} \times Ve \text{ м/с} \times 0,00981 \text{ кВт}/(\text{кгс} \cdot \text{м/с}) = 260,7 \text{ кВт}.$$

Річний об'єм генеруємої комерційної електроенергії, з урахуванням власних потреб

виробництва 2,7 кВт і щорічного техобслуговування

Сірко З. С., Охріменко С. М., Цапко О. Ю., Торчиловський Д. П., Стариш Є. А., Грицун В. М.

вітроелектростанції ТО - 15 днів,
складе:

$$W = (260,7 - 2,7) \text{ кВт} \times (365 - 15) \text{ дн.} \times 24 \text{ год/дн.} = 2.167.200 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Пільговий тариф на продаж
електроенергії становить:

$$FT = P \times K \times A \times VAT \times R = 2,27 \text{ грн/кВт, де}$$

$P = 0,05385 \text{ €/кВт}$ - роздрібна ціна електроенергії 2 класу напруги споживачів, станом на 2009 р, згідно Постанови НКРЕ від 23 грудня 2008 року № 1440;

$K = 0,96$ - коефіцієнт «зеленого» тарифу для об'єктів, введених в експлуатацію, згідно Закону України від 4 червня 2015 року № 514-VIII, для електроенергії, виробленої з енергії вітру вітроелектростанціями, які складаються з вітроустановок одиничною встановленою

потужністю до 600 кВт, в період 01.01.2020...31.12.2024 р.;

$A = 1,1 - 10\%$ надбавка до «зеленого» тарифу, при рівні 50 % використання обладнання українського виробництва;

$VAT = 1,2 - 20\%$ податок на додану вартість;

$R = 33,266 \text{ грн/€}$ - поточний курс НБУ гривні до Євро.

Щорічний валовий дохід від продажу електроенергії по «зеленому» тарифу державному підприємству «Енергоринок» складе:

$$NR = W \times FT = 2.167.200 \times 2,27 = 4.919.600 \text{ грн.}$$

Сума коштів, що мають бути вкладені в капітальні витрати та витрати на роботи і послуги при будівництві об'єкта, буде залежати від існуючих технологічно-конструктивних можливостей, запланованої потужності, постачальника енергогенеруючого

обладнання, місця розташування тощо. ТОВ «Віндкрафт Україна» пропонує поставку із країн ЄС бувших у використанні вітрових турбін за 30...50 % від ціни нових вітряків. Орієнтовні витрати наведені у табл. 1 та складуть:

1. Орієнтовні витрати на використанні вітрові турбіни

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи	240000
Передпроектні роботи	180000
Робоча документація	600000
Загальнобудівельні роботи	280000
Металоконструкції	350000
Вітрова турбіна	3400000
Електрогенератор	2000000
Допоміжне обладнання	1000000
Монтаж-пусконаладження	1000000
Витрати на запуск виробництва	690000
Введення об'єкта в експлуатацію	20000
IP:	9760000

Щорічні валові витрати експлуатаційного підприємства наведені у табл. 2 і можуть скласти:

2. Щорічні валові витрати експлуатаційного підприємства

Фонд оплати праці	795000
Адміністративно-управлінські витрати	25000
Спецодяг персонала	15000
Техобслуговування обладнання	1850000
Страховання технологічного обладнання	35000
GE:	2720000

Питома вартість ежекційної електростанції при будівництві буде становити: $CPU = IP : Ne = 9.760.000 \text{ грн} : 260.700 \text{ Вт} = 37,4 \text{ грн/Вт}$,

що дорівнюється будівництву сонячних електростанцій (33,5 грн/Вт) і значно нижче будівництва ТЕС (79,8 грн/Вт).

Термін окупності Проекту буде включати строк створення об'єкта (РС

0,5 року) і складе: $PB = IP : EBITDA + PC$;

$PB = 9.760.000 : (4.919.600 - 2.720.000) + 0,5 \text{ року} = 4,9 \text{ року}$, де $EBITDA = 2.199.600 \text{ грн}$ – різниця між валовими доходом і витратами, до сплати податків та амортизаційних вірахувань.

Підвищенні ККД ежекційної вітроелектростанції досягається

Сірко З. С., Охріменко С. М., Цапко О. Ю., Торчиловський Д. П., Стариш Є. А., Грицун В. М.

шляхом розміщення перед конфузором, в циліндричній змішувальній камері повітряних потоків (інжектуючого та інжектуємого), обтікача овоїдної (яйцеподібної) форми з пристроєм лінійного переміщення, в якій здійснюється передача кінетичної енергії інжектуючого потоку інжектуємому, при їх безперервному змішуванні, з подальшим збуренням повітряного потоку перепорою овоїдної форми для формування досконалого потоку повітря при розкручуванні лопатей турбіни вітроелектричної установки.

У трубах круглого перерезу з гладкою внутрішньою поверхнею, при значенні числа Рейнольдса $Re > 2300 \dots 2320$ (критичне значення), створюється стійкий турбулентний режим потоку повітря. За рахунок збурення потоку перепорою при обтіканні овоїда обертання (опуклої кривої з однією віссю симетрії), що зменшує показник критичного значення, досягається багаторазове перевищення числа Рейнольдса його критичного значення, з метою мінімізації сили в'язкого тертя потоку, що спрямована проти руху, в повітряному каналі ежекційної електростанції та забезпечення лінійної швидкості лопаток турбіни $V \geq 7$ м/с.

Характеристики газового потоку в каналі електростанції залежать від вираженого числом Рейнольдса співвідношення показників густини,

швидкості повітря, лінійного розміру аеродинамічного тунелю та реальної в'язкості, що змінюється за рахунок регулюємого переміщення обтікача потоку.

Емпіричні дослідження показали можливість змінення сили в'язкого тертя та зміни швидкості потоку, за рахунок лінійного переміщення обтікача потоку вздовж осі повітряного каналу, за допомогою пристрою забезпечення механічним способом плавного руху у зворотно-поступовому напрямку. При зміні атмосферних умов змінюються і характеристики вхідного повітряного потоку. Регульованим переміщенням обтічника встановлюється оптимальна швидкість потоку в повітряному каналі електростанції, що забезпечує розрахункові характеристики ККД вітрової турбіни.

Анемометр, встановлений в повітряному каналі ежекційної електростанції для визначення швидкості повітряного потоку, з'єднаний з контролером, який передає керуючий сигнал на механізм забезпечення зворотно-поступовому руху овоїдного обтікача, для підтримки постійної швидкості повітряного потоку.

Число Рейнольдса становить:

$$R_e = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\eta} = \frac{u \cdot d}{\nu}, \text{ де}$$

- динамічна в'язкість $\eta = \nu \rho$;
- ν - кінематична в'язкість;
- ρ - густина газу;

Сірко З. С., Охріменко С. М., Цапко О. Ю., Торчиловський Д. П., Стариш Є. А., Грицун В. М.

- u - характеристична швидкість;

діаметр повітряного каналу $d =$

- d – визначальний діаметр

0,75 м;

повітряного каналу;

середня за перерізом повітряного

Дослідження робочого газу в

каналу швидкість $u = 10,7$ м/с;

аеродинамічному каналі проводились

критерій Рейнольдса $Re =$

при наступних константах:

531.457

температура потоку $T = 20^{\circ}\text{C}$;

Показники лінійного переміщення

кінематична в'язкість повітря

обтічника потоку дослідної установки,

$\nu = 1,51 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

в залежності від перепаду

атмосферного тиску, наведені в табл. 3.

3. Показники лінійного переміщення обтічника

№ досліджу	Атмосферний тиск		Лінійне переміщення обтікача, мм
	МПа	мм рт ст	
1.	0,0960	720	0,00
2.	0,0973	730	1,25
3.	0,0993	745	3,75
4.	0,0999	750	6,00
5.	0,1013	760	11,50
6.	0,1027	770	18,75
7.	0,1040	780	35,35

Залежність лінійного перепаду атмосферного тиску переміщення обтічника потоку представлена на графіку (рис. 2). ежекційної вітроелектростанції від

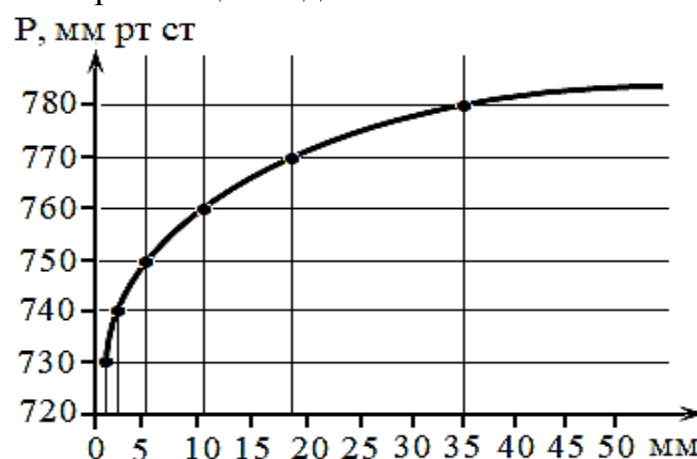


Рис. 2. Залежність лінійного переміщення обтічника ежекційної вітроелектростанції від перепаду атмосферного тиску

Із графіка, що наведений на рис. 2, випливає, що від перепаду

атмосферного тиску суттєво залежить лінійне переміщення обтічника.

Висновки.

1. Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати дані щодо кінематичної структури потоку в камері змішування ежектора.

2. Проведені розрахунки швидкості повітряного потоку на ежекційному вітрозабірнику, динамічного тиску вентилятора, імпульсу сили повітряного потоку на

лопаті ротора, прогнозованої потужності, терміну окупності.

3. Розроблена ежекційна вітрова електростанція забезпечує 100 % розрахункову потужність за рахунок створення постійного висхідного потоку повітря, енергонезалежність, охорону довкілля, безпеку експлуатації та економічність.

Список використаних джерел

1. Бурячок Т.О., Буцьо З.Ю., Варламов Г.Б., Дубовської С.В., Жовтянський В.А. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі. Київ: «Фоліо», 2013. 250 с.

2. Книш К., Кудря С., Лівіцька А., Галабала М., Січківська О., Шморган Б., et al. Біла книга 2021. Офшорна вітроенергетика та «зелений» водень: відкриття нових меж енергетичної потужності України. Київ: «Астерс», 2021. 12 с.

3. Сиротюк С.В., Боярчук В.М., Гальчак В.П. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: навчальний посібник. Київ: Магнолія, 2020. 182 с.

4. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Циценков Д. Основи вітроенергетики: підручник. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2015. 335 с.

5. Оніпко О.Ф. Вітроенергетика та енергетична стратегія. Київ: Фенікс, 2008. 250 с.

6. Сидоров В.І. Технології гідро-та вітроенергетики. Черкаси: Вертикаль, 2016. 166 с.

7. Василюк О., Кривохижа М., Прекрасна Є., Норенко К. Київ: UNCG, 2015. 32 с.

8. Охріменко С.М., Вишняков І.Ю., Протасов О.С., Сірко З.С., Вождяєнко М.О., винахідники. Вертикальна ежекційна

електростанція. Український патент, № 147080, 2021.

Reference

1. Buryachok T.O., Butso Z.IU., Varlamov G.B., Dubovskoi S.V., Zhovtyanskii V.A. (2013). Elektroenergetyka ta okhorona navkolyshnogo seredovyscha. Funktsionuvanya energetyky v suchasnomu sviti. Kyiv: «Folio», 250.

2. Knysh K., Kudrya S., Livitska A., Galabala M., Sichkovska O., Shmorgun B., et al. Bila knyga (2021). Ofshorna vittroenergetyka ta «zelenyi» voden: vidkryttya novykh mezh energetychnoi potuzhnosti Ukrainy. Kyiv: «Asters», 12.

3. Syrotyk S.V., Boyarchuk V.M., Galchak V.P. (2020). Alternatyvni dzhерela energii. Energiya vitru: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Magnoliya, 182.

4. Pivnyak G., Shkrabets F., Noiberger N., Tsyplenkov D. (2015). Osnovy vitroenergetyky: pidruchnyk. Dnipropetrovsk: Natsionalnyi girnychiy universytet, 335.

5. Onipko O.F. (2008). Vitroenergetyka ta energetychna strategiya. Kyiv: Feniks, 250.

6. Sydorov V.I. (2016). Tekhnologii gidro-ta vitroenergetyky. Cherkasy: Vertykal, 166.

7. Vasyluk O., Kryvokhyzha M., Prekrasna E., Norenko K. (2015). Kyiv: UNCG, 32.

8. Okhrimenko S.M., Vyshnyakov I.Yu., Protasov O.S., Sirko Z.S., Vozhdaenko M.O., (2021). vynakhidnyky. Vertykalna ezhektsiina elektrostantsiya. Ukrainskii patent, № 147080.

EJECTION WIND POWER PLANT

Z. Sirko, S. Okhrimenko, O. Tsapko, D. Torchilevsky,
E. Starish, V. Hrytsun

Abstract. *The article covers issues related to non-traditional sources of electricity, namely wind energy. It is shown that every year wind energy is used on an increasingly large scale in order to satisfy the need of mankind for reliable and environmentally friendly sources of energy. It is noted that in many European countries a significant amount of energy was produced in wind energy, which is approximately 2 % of its global consumption. In the developed countries of Europe, wind energy already makes up a fairly significant share of all electricity. Compared to the countries of Western Europe and the Mediterranean, Ukraine is a windless region, where winds blow more stably only in the Carpathians and on the Azov coast. Despite this, a significant number of wind power plants have already been built in Ukraine. The wind speed for the operation of industrial wind power plants must be at least 3 m/s. As a result of weak wind or its temporary absence, wind turbines operate on average at 35 % of the calculated capacity. The goal of the research is to develop an ejection wind power plant that can operate at 100 % of the calculated capacity due to the creation of a constant upward flow of air. The article proposes the design of an ejection vertical wind power plant, which will ensure efficient operation and will be able to operate at 100 % of the calculated capacity. The methodology uses an analytical research method, which is based on the calculations of the main indicators of the ejection power plant. Also, the methodology provides means of determining the speed of the air flow, which ensures the efficient operation of power plants. In the work, the calculations of the speed of the air flow on the ejection wind intake, the dynamic pressure of the fan, the impulse of the force of the air flow on the rotor blade, the projected power, and the payback period were performed. The indicators of the linear movement of the fairing, which is in the design of the ejection power plant, depending on the drop in atmospheric pressure, are given. The developed ejection wind power plant will ensure electronic independence, environmental protection, operational safety and economy.*

Keywords: *ejection wind power plant, design, capacity, payback period, cost-effectiveness*