

НАУКОВА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**„МОБІЛЬНИЙ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ
ПРИСТРІЙ ЛОПАТЕВОГО ТИПУ”**

Шифр:

“Зимовий ранок”

2021

ЗМІСТ

ВСТУП	3
I. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	4
II. ОПИС МОБІЛЬНОГО ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИСТРОЮ	5
III. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	7
3.1. Розрахунок вітроенергетичного пристрою	7
IV. ІНЖЕРНИЙ РОЗДІЛ	15
4.1. Розрахунок основних параметрів мобільного вітроенергетичного пристрою	15
4.2. Розрахунок вітродвигуна на міцність	21
4.3. Визначення навантаження на нервюру крила	23
4.4. Проектування вежі вітродвигуна	24
4.5. Визначення ваги вежі	26
ВИСНОВКИ	27
ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ	29

ВСТУП

В Україні енергія вітру з далеких часів широко використовувалася головним чином на млинах. Число повітряних млинів в ХІХ столітті досягло біля 50000; в деяких великих селах було до 80 млинів. З розвитком авіації, великий успіх в якому належить Н.Е.Жуковському, створилися умови для вирішення по-новому теоретичних питань в використанні енергії вітру. В 1914 р. Н.Е.Жуковський, В.П.Ветчинкін, Г.Ф. Проскура і інші, вперше створюють теорію вітродвигунів.

В 1935 р. були розроблені проекти вітроелектричних станцій потужністю 1000 кВт в одному агрегаті.

В теперішній час в Україні йде тенденція в використанні енергії вітру, сонця. Це дуже важливо так, як в Україні настала криза в забезпеченні паливом теплових, атомних станцій. Крім того ці станції шкідливо впливають на навколишнє середовище.

В Україні можна широко використовувати вітрову енергію.

Мобільний вітроенергетичний пристрій лопатевого типу може використовуватися в будівельно-меліоративних роботах для живлення споживачів. Даний пристрій може пересуватися, що дає можливість економити паливо для вироблення енергії, так, як енергія виробляється від вітру, непотрібно ліній передач. Важливою перевагою даного пристрою є його компактність, мобільність та простота експлуатації.

I. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вітродвигуни розділяють на три класи за схемою розташування вітроколеса та його положення відносно вітрового потоку.

Перший клас включає в себе вітродвигуни, у яких вітрове колесо розташоване в вертикальній площині, при цьому площина обертання перпендикулярна потоку. Такі вітродвигуни називаються крильчастими. У деяких крильчастих вітродвигунів вісь вітроколеса має нахил від 6° до 8° відносно горизонтальної площини.

Крильчаті вітродвигуни, згідно ГОСТ 2556-44, в залежності від типу вітроколеса і швидкохідності розподіляється на групи:

група 1 - багатолопасні, тихохідні;

група 2 - багатолопасні, тихохідні, з простою деревометалічною конструкцією, а також вітрові млини;

група 3 – багатолопасні;

Другий клас включає системи вітродвигунів з вертикальною віссю обертання вітрового колеса. За конструктивною схемою вони підрозділяються на дві наступні групи:

- *карусельні* вітродвигуни, у яких неробочі лопаті, або закриваються ширмою, або розташовуються ребром проти вітру;

- *роторні* вітродвигуни системи Савонауса.

До третього класу відносяться вітродвигуни, які працюють за принципом водяного млинного колеса та називаються барабанними.

Вітродвигуни карусельного та барабанного типу відрізняються простою схемою роботи вітроколеса. В карусельних вітродвигунах повітряний потік набігає на вітроколесо, тисне на лопаті з однієї сторони осі обертання; з другої сторони він зустрічає перешкоду, прикриваючи лопаті, що направлені проти вітру, або ребра лопатей, якщо вони повертаються.

Основні недоліки карусельних і барабанних вітродвигунів визначаються самим типом розташування робочих поверхонь вітроколеса в потоці вітру:

II. ОПИС МОБІЛЬНОГО ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРИСТРОЮ

Мобільний вітроенергетичний пристрій лопатевого типу призначений для комплексного використання в будівельних та меліоративних роботах, а також в сільському господарстві. Він може живити електроспоживачів, потужність яких не перевищує 8 кВт, заряджувача акумулятора, а також качати воду. Установка складається з двох основних елементів: причепа та вітряного пристрою. Вітродвигун марки ВУД-10 та насос марки 1000В-4/63-0.

Дволопасне вітроколесо закріплене на валу, який змонтований в чавунному корпусі головки на двох опорах з шаропідшипниками. На задньому кінці вала закріплена велика конічна шестерня, яка знаходиться в зачепленні з малою шестернею, яка насаджена на вертикальний вал.

Вітроколесо діаметром 10 метри має дві лопаті з дерев'яним каркасом, який обшитий оцинкованим листовим залізом.

Регулювання здійснюється повітряними гальмами.

Башня - металічна, ферменої конструкції, висотою 10,5 м. Ферма закріплена на причепі та може вкладатись на причіп.

Вертикальна трансмісія складається з п'яти валів, з'єднаних між собою муфтами, та чотирьома підшипниковими вузлами, які кріпляться розтяжками до башні.

На мобільному ВЕП використовується синхронний генератор типу СКТ-30/6. Синхронізація двигунів при включенні на паралельну роботу здійснюється рубильником, який знаходиться у щитку управління.

Щиток управління служить запобіганню від перенавантажень.

Насоси типу В - відцентрові вертикальні одноступінчаті з робочим колесом однобічного входу.

Номинальна подача насосів складає від 3060 до 90000 м³/г при напорах від 19,9 до 100 м.

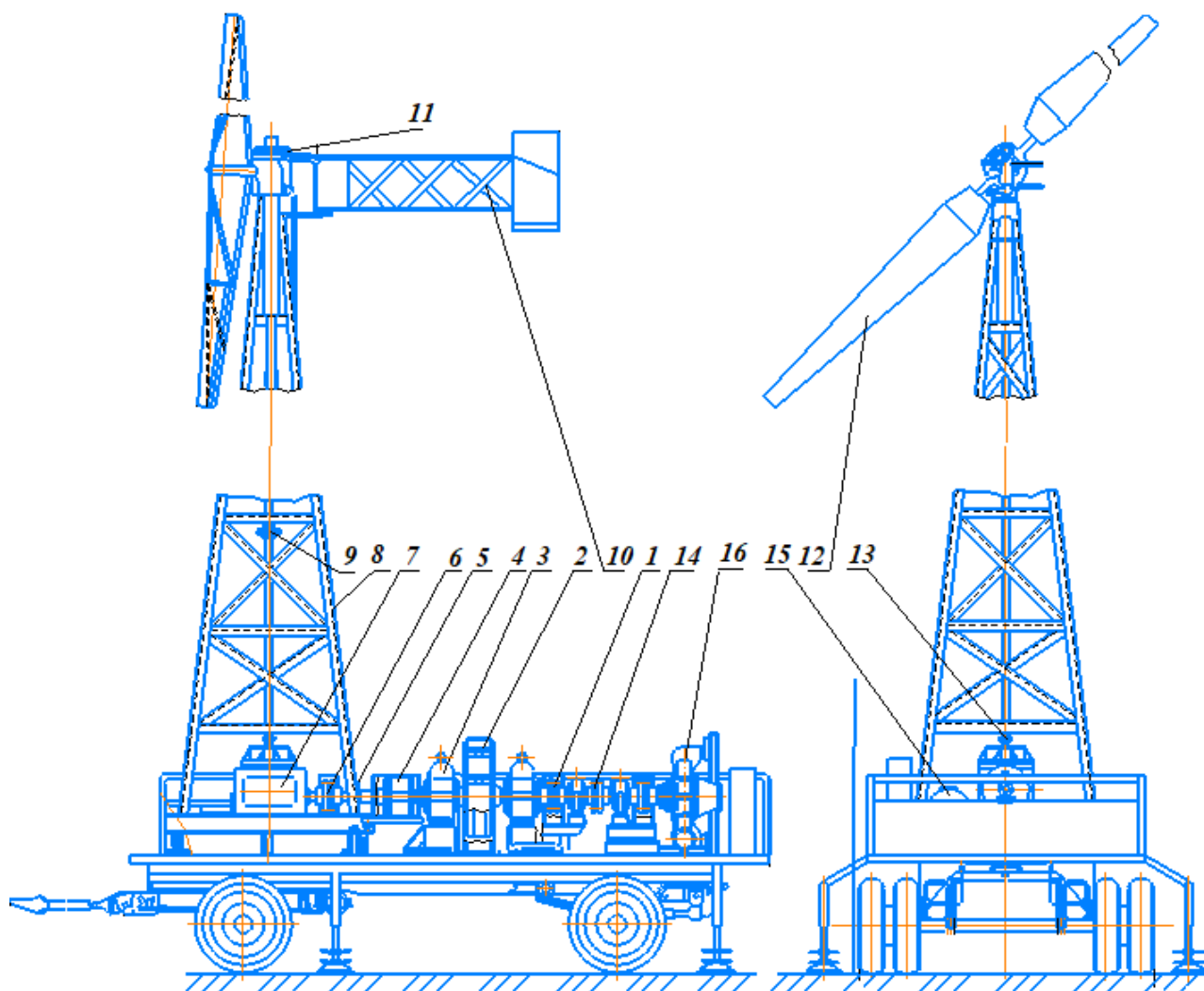


Рис. 2. Мобільний вітроенергетичний пристрій лопатевого типу:
 1, 6, 9, 13, 14 - муфти; 2 - маховик; 3 - поря; 4 - генератор; 5 - опора;
 7 - редуктор нижній; 8 - мачта; 10 - хвіст; 11 - головка; 12 - лопать;
 15 - насос відцентровий; 16 - ресивер

Таблиця 1

Технічна характеристика мобільного вітроенергетичного пристрою лопатевого типу

Показники	Значення показників
- Діаметр вітроколеса.	10 м
- Число лопатей	2
- Максимальний коефіцієнт використання енергії вітру	0,30
- Висота мачти, м.	10,5
- Швидкість вітру, при якій насос починає працювати.	4 м/сек
- Діапазон робочих швидкостей.	4-40 м/сек
- Відцентровий насос	1000В-4/63-0

III. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Розрахунок вітроенергетичного пристрою

Проведений аналіз теоретичних досліджень вітроенергетичних пристроїв, дав можливість відібрати методики та рекомендації з питань дослідження аеродинаміки вітродвигунів, проектування вітроколеса, оцінити швидкості та переміщення, що діють на елементи конструкції, навантаження, визначити геометрію перетину та профіль вітроколеса [1, 2, 17].

Данні для розрахунку вітродвигуна є: радіус вітроколеса R , коефіцієнт використання енергії вітру ξ , коефіцієнт лобового тиску B , кількість лопатей i , модуль швидкохідності z , швидкість вітру U , а також табличні аеродинамічні та геометричні характеристики аеродинамічних профілів [17].

Спрощена схема роботи вітродвигуна наведена на рисунку 3 [16]. Лопаті обертаються навколо осі O з кутовою швидкістю ω . Виділимо елемент $abcd$, обмежений поверхнею профілю і двома циліндричними поверхнями радіуса r та $r + dr$. Кут нахилу профілю до осі обертання позначимо через φ .

Колова швидкість елемента лопаті визначається

$$V = \omega r. \quad (3.1)$$

Тоді відносна швидкість, з яким елемент лопаті зустрічає потік, що набігає, знаходимо з співвідношення:

$$W = \sqrt{U^2 + (\omega r)^2}, \quad (3.2)$$

де U - швидкість обертання, що набігає паралельно осі повітряного потоку.

Кут атаки профілю

$$\alpha = \varphi - \theta, \quad \beta = \arctg \frac{\omega r}{U} \text{ та } \alpha = \varphi - \arctg \frac{\omega r}{U}. \quad (3.3)$$

Відповідно до (3.3) при незмінному куті встановлення профілю пропорційна зміна швидкостей повітряного потоку U і обертання вітродвигуна ωr характеризується сталістю кута атаки, що справедливо для будь-якого елемента лопаті. Кут атаки, що характеризує режим роботи вітродвигуна, визначає

напрямок і точку прикладення аеродинамічних сил, крім того, величина рівнодіючої сили при $\alpha = \text{const}$ пропорційна квадрату швидкості вітру. Сумарний момент рівнодіючої щодо осі обертання також буде пропорційний квадрату швидкості, а потужність вітродвигуна - кубу швидкості

$$M = U^2 f_1([\omega]), \quad (3.4)$$

$$N = U^3 f_2([\omega]), \quad (3.5)$$

де $f_1([\omega])$ та $f_2([\omega])$ - функції, що залежать від форми, профілю і розмірів лопатей, їх кількості та режиму.

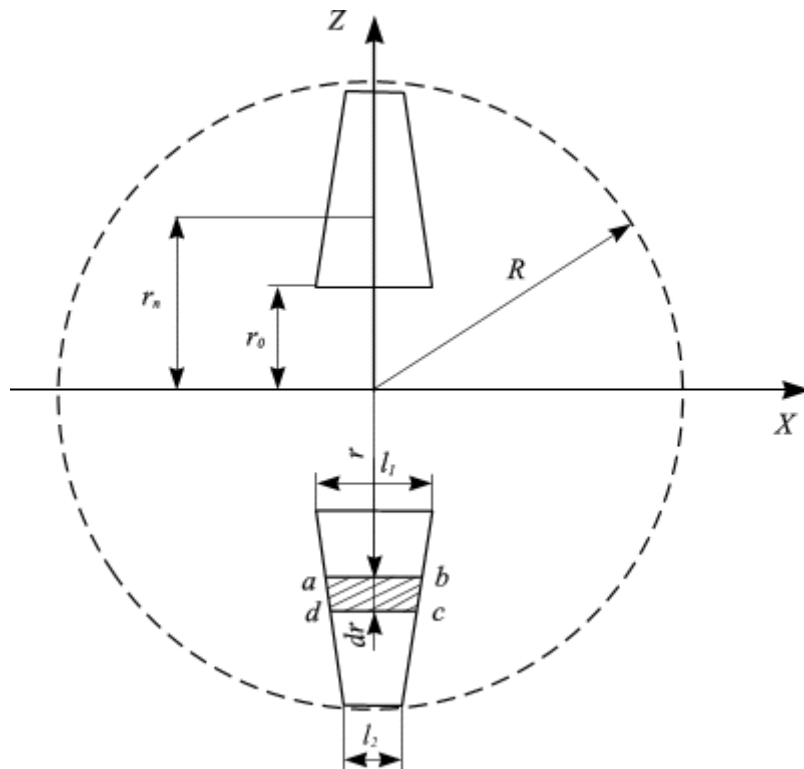


Рис. 3. Схема вітроколеса

Встановимо лопаті так, щоб кожен перетин характеризувався великою піднімальною силою та незначним опором. Тоді елемент крила площею ΔS_n під дією потоку повітря сприймає піднімальну силу $F_Y = \frac{P}{2} U^2 \Delta S_n C_Y$ та силу опору

$$F_X = \frac{P}{2} U^2 \Delta S_n C_X.$$

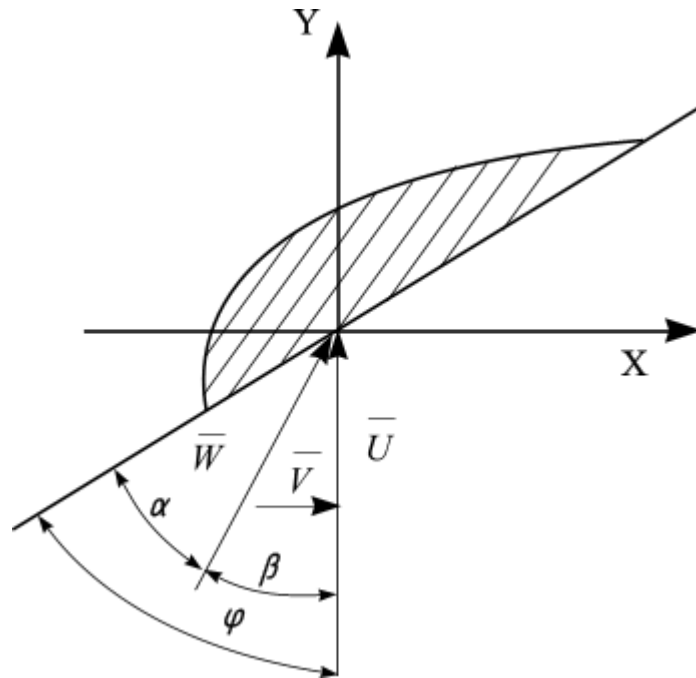


Рис. 4. Схема розташування лопатей вітродвигуна

Розкладемо діючі сили на складові:

- сили, що діють у напрямку обертання крил - такі, що визначають крутний момент $T_1 = F_X \cos \beta$;

$$T_2 = F_Y \cos \beta; \quad T_{\Sigma} = F_X \cos \beta - F_Y \sin \beta; \quad M_{\Sigma} = rT_{\Sigma};$$

- сили, що діють у напрямку осі вітродвигуна - такі, визначають осьове навантаження $G_1 = F_X \sin \beta$;

$$G_2 = F_Y \sin \beta; \quad G_{\Sigma} = F_X \sin \beta - F_Y \cos \beta.$$

Проінтегрувавши отримані вирази для елемента лопаті довжиною dr по всій її довжині та помноживши результат на число лопатей, визначимо наближене значення крутного моменту та осьової сили вітроколеса:

$$M \approx nr_n [F_X \sin (\varphi + \alpha) - F_Y \cos (\varphi + \alpha)];$$

$$N \approx n_n [F_X \cos (\varphi + \alpha) + F_Y \sin (\varphi + \alpha)],$$

де $r_n = r_0 + \frac{R-r}{3} \frac{2R+r_0}{R+r_0}$ - віддалення від осі обертання центра лопаті;

r_0 - радіус обертання внутрішнього краю лопаті;

R - радіус обертання зовнішнього краю лопаті.

Для вітродвигунів з горизонтальною віссю обертання, схема розташування лопаті якого наведена на рис. 4, коефіцієнт використання енергії вітру може бути визначений у такий спосіб [17]:

$$\xi = 4a(1 - a^2), \quad (3.6)$$

де a - коефіцієнт гальмування.

При цьому відповідно до теорії Бетса максимальне значення коефіцієнта використання енергії вітру буде $\xi_{\max} = 0,593$ при $a = 1/3$, а по теорії Сабініна $\xi_{\max} = 0,687$ при $a = 0,414$ [3].

Колова швидкість елемента лопаті дорівнює

$$V_L = \omega \cdot K = z \cdot U, \quad (3.7)$$

ω - кутова швидкість обертання вітроколеса, $\omega = \pi/30$. Сила лобового опору Q визначається як

$$Q = C_x \cdot \rho \cdot (W^2 / 2) \cdot C, \quad (3.8)$$

піднімальна сила P

$$P = C_y \cdot (\rho \cdot W^2 / 2) \cdot C, \quad (3.9)$$

а сила тяги F_m

$$F_m = P_x - Q_x, \quad (3.10)$$

Потужність потоку N_{en} визначиться в такий спосіб:

$$N_{en} = F_m \cdot U_L, \quad (3.11)$$

де U_L - швидкість руху елементів лопаті. Потужність на валу вітроколеса W згідно [3]

$$N = \xi \rho U^3 \pi \frac{R_{BY}^2}{2}, \quad (3.12)$$

де ξ - коефіцієнт використання енергії вітру; ρ - щільність повітря; U - швидкість вітру; R_{BY} - радіус вітроколеса.

Момент на валу вітроколеса

$$M_n = \frac{N}{\omega}, \quad (3.13)$$

де ω - кутова швидкість обертання вітроколеса.

Модуль швидкості вітроколеса

$$z = \frac{V_K}{U} = \frac{\omega R_{BY}}{U}, \quad (3.14)$$

де V_K - лінійна швидкість кінця лопаті.

Лобовий тиск на вітроколесо

$$P_L = B \rho U^2 \pi \frac{R^2}{2}, \quad (3.15)$$

де B - коефіцієнт лобового тиску.

Відцентрова сила, що діє на лопать вітроколеса

$$F_{ц.б.} = m \omega^2 R_{ц.м.}, \quad (3.16)$$

де $R_{ц.м.}$ - радіус центра ваги,

$$R_{ц.м.} = 0,38R. \quad (3.17)$$

Робота вітроколеса характеризується наступними основними показниками;

Синхронна швидкість ω_c - кутова швидкість обертання вітродвигуна, при якій момент всіх аеродинамічних сил, що діють на вітроколесо щодо осі обертання, дорівнює нулю. При цьому кутову швидкість обертання зручно виражати в частках синхронної швидкості, прийнятої за одиницю

$$\omega = \omega_c [\omega], \quad (3.18)$$

де $[\omega]$ - режим роботи вітродвигуна ($[\omega] < 1$) - це відношення дійсної швидкості обертання до синхронної.

Ковзання вітродвигуна Ω визначається виразом:

$$\Omega = 1 - [\omega] = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (3.19)$$

Число модулів z - відношення колової швидкості розглянутої точки до швидкості потоку, що набігає

$$z = \frac{\omega r}{U}. \quad (3.20)$$

Швидкохідність вітродвигуна вимірюється числом модулів на кінці лопаті при максимальній потужності.

Коефіцієнт використання енергії вітру дорівнює $\xi = \frac{N}{N_0}$.

Характеристика потужності - залежність коефіцієнта ξ від режиму $[\omega]$.

Характеристика моменту визначається відношенням характеристики потужності до режиму

$$M = \frac{\xi[\omega]}{[\omega]}. \quad (3.21)$$

Шлях синхронізації вітродвигуна вимірюється довжиною потоку, що приходить через навантажений вітродвигун, при якому ковзання зменшується до 1/2 первісної величини.

Стійкість вітродвигуна характеризує здатність сприймати навантаження з нерухомого стану та вимірюється відношенням моменту обертання при нерухомому вітроколесі до моменту при максимальній потужності.

Коефіцієнт перевантаження - відношення максимального моменту до моменту при максимальній потужності.

Характеристики вітродвигуна характеризуються наступними показниками:

- число обертів вітроколеса

$$n = \frac{60}{\pi} \frac{U_z}{D_{BV}} [\omega]; \quad (3.22)$$

- потужність вітродвигуна

$$N = 1.29 \left[\frac{273p}{760t} \right] \frac{\pi D_{BV}^4}{4} \frac{60}{2} \frac{U^3}{2} = 0,52 \left[\frac{273p}{760t} \right] D_{BV}^2 U^3 \xi, \quad (3.23)$$

де $\left[\frac{273p}{760t} \right]$ - поправка на температуру і барометричний тиск;

- момент обертання

$$M = 1.29 \left[\frac{273p}{760t} \right] \frac{\pi D_{BV}^3}{8z} \frac{U^2}{2} = 0,13 \left[\frac{273p}{760t} \right] D^3 U^2 [M]. \quad (3.24)$$

Визначаємо геометричні параметри для конкретного аеродинамічного

профілю. Для цього за вихідними даним (залежностями $C_x = f(\alpha)$, $C_y = f(\alpha)$, що відповідають заданому номеру аеродинамічного профілю, узятому з атласу профілів, визначаються: аеродинамічна якість профілю K , що відповідає заданим кутам атаки; оптимальне значення швидкохідності z_{opt} ; відносний \bar{R} і абсолютний R_a радіуси розташування розглянутого елемента лопаті; хорда лопаті C , що відповідає кожному значенню радіуса R_e при цьому $R_e = \bar{R} \cdot R_a$; кут підходу результуючого потоку α_w до площини обертання вітроколеса на кожному радіусі R_e ; кут установки (гвинтового закручення) θ лопаті на кожному радіусі R_e .

Аеродинамічна якість профілю визначається як

$$K = \frac{C_y}{C_x}, \quad (3.25)$$

де C_x, C_y - аеродинамічні коефіцієнти піднімальної сили і лобового опору.

Визначається оптимальна швидкохідність елемента лопаті

$$z_{opt} = \frac{4K}{9}. \quad (3.26)$$

Максимальне значення z_{opt} приймається рівним $z_{ном}$.

Установлюється рівняння зв'язку між швидкохідністю елемента лопаті Z та радіусом положення елемента лопаті R_e :

$$z_{opt} = Z_n \frac{R_e}{R}. \quad (3.27)$$

де $\bar{R} = \frac{R_e}{R}$ - відносний радіус, звідки

$$R_e = R\bar{R} \text{ та } \bar{R} = \frac{z_{opt}}{z_n}.$$

Коефіцієнт заповнення поверхні, що захоплюється вітроколесом на радіусі R_e визначається як

$$\delta = \frac{iC}{2\pi R_e}, \quad (3.28)$$

де i - число лопатей, C - хорда профілю.

Оптимальне значення δ_{opt} знаходиться як [22]

$$\delta_{opt} = \frac{13,5}{C_y K^2}, \quad (3.29)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (3.28) і (3.29), визначається хорда C та будується залежність $C = f(R_e)$.

Далі визначається кут підходу набігаючого потоку площини обертання вітроколеса

$$\alpha_w = \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{K^2 + 1}}\right). \quad (3.30)$$

Кут встановлення елемента лопаті розраховується як

$$\theta = \alpha_w - \alpha. \quad (3.31)$$

Після цього будуються залежності $C = f(R_e)$ і в $\theta = f(R_e)$ при обраних вище вихідних параметрів і визначаються геометричні параметри лопаті.

За заданими відносними координатами аеродинамічного профілю будується його перетин, що відповідає обраному значенню хорди C .

IV. ІНЖЕРНИЙ РОЗДІЛ

4.1. Розрахунок основних параметрів мобільного вітроенергетичного пристрою

Вихідні дані:

- середньорічна швидкість вітру, м/с - 4;
- номінальна (розрахункова) швидкість вітру, м/с - 8;
- номінальна потужність, кВт - 10;
- кількість лопатей, шт - 2.

4.1.1. Основні характеристики:

4.1.1.1. За рекомендаціями робіт [1, 17] вибираємо для ротора профіль КАСА - 230.

Для даного профілю приймаємо орієнтовно коефіцієнт швидкохідності $z = 5$.

4.1.1.2. Діаметр ротора визначаємо з потужності від швидкості вітру та площі, що захоплюється крилами вітряка [1]:

$$N = \xi \rho S \frac{U^3}{2}, \quad (4.1)$$

де ξ - коефіцієнт використання енергії вітру дволопатевої машини із зазначеним профілем, $\xi = 0,35$);

ρ - щільність повітря, $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$;

U - номінальна швидкість вітру, м/с;

S - площа вітряка, м^2 .

Для горизонтально-осьових машин:

$$S = \pi \frac{D^2}{4}. \quad (4.2)$$

Тоді

$$N = \xi \rho D^2 \frac{U^3}{2080} \text{ (кВт)}, \quad (4.3)$$

Звідки

$$D = \sqrt{\frac{2080 N}{\xi U^3}} = \sqrt{\frac{2080 \cdot 10}{0,35 \cdot 8^3}} = \sqrt{116} = 10,8 \text{ м.}$$

Орієнтовно приймаємо радіус ротора рівний $R = 5$ м.

4.1.1.3. Визначення величини номінальної кутової швидкості.

$$\omega = \frac{zU}{R} = \frac{5 \cdot 8}{5} = 8 \text{ c}^{-1}.$$

4.1.1.4. Визначаємо швидкості на кінцях крил.

Відповідно до принципової схеми розташування лопатей вітроколеса (рис. 4.1) та вихідної швидкості вітру, що дорівнює 8 м/с, маємо

$$U' = \frac{2U}{2} = \frac{2 \cdot 8}{2} = 8 \text{ м/с}.$$

максимальна швидкість складе:

$$V_{\max} = U \cdot z = 8 \cdot 5 = 40 \text{ м/с}.$$

Згідно схеми розташування лопатей

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{U'} = \frac{3V}{2U} = \frac{3 \cdot 40}{2 \cdot 8} = 7,5.$$

тоді $\beta = 82,4^\circ$ та $\cos \beta = 0,132$.

Результуюча швидкість дорівнює:

$$W = \sqrt{U^2 + V^2} = U \sqrt{\left(\frac{U'}{U}\right)^2 + \left(\frac{V}{U}\right)^2} = 8 \cdot \sqrt{\left(\frac{5,33}{8}\right)^2 + \left(\frac{40}{8}\right)^2} = 40,35 \text{ м/с}.$$

4.1.1.5. Визначаємо дійсний діаметр.

Тоді діаметр дорівнює

$$D' = D + \frac{b}{2} = 10,8 + 0,75 = 11,55 \text{ м}.$$

Довжина кола складає:

$$L = \pi D = 3,14 \cdot 11,55 = 36,29 \text{ м}.$$

Тоді кутова швидкість дорівнює

$$\omega' = \frac{2V}{D'} = \frac{2 \cdot 40}{11,55} = 6,93 \text{ c}^{-1},$$

а число обертів вітроколеса

$$n = \frac{30\omega'}{\pi} = \frac{30 \cdot 6,93}{3,14} = 66,18 \text{ хв}^{-1}.$$

4.1.1.6. Розрахуємо ширину крил на $2/3$ радіуса визначаємо:

$$L_{\frac{2}{3}} = \frac{2}{3} \pi D, \text{ м.}$$

$$\left(\frac{V}{U}\right)_{\frac{2}{3}} = \frac{2}{3} z = \frac{2 \cdot 5}{3} = 3,33;$$

$$\left(\frac{V}{U}\right)_{\frac{2}{3}} = \sqrt{\left(\frac{U'}{U}\right)^2 + \left(\frac{V}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)^2 + 3,33^2} = 3,4.$$

Для обраного профілю NACA-230 кут атаки $\alpha = 1,5^\circ$, $C_y = 0,7$.

Найбільш сприятлива ширина крила дорівнює:

$$t' = \frac{2\pi R}{i} \frac{8}{9C_y} \left(\frac{U}{V}\right)_{\frac{2}{3}} \left(\frac{U}{W}\right)_{\frac{2}{3}} = \frac{2\pi R}{i} \frac{8}{9C_y} \left(\frac{U}{V}\right)_{\frac{2}{3}} \left(\frac{U}{W}\right)_{\frac{2}{3}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5,775}{3} \times \\ \times \frac{8}{9 \cdot 0,7} \frac{1}{3,33} \frac{1}{3,4} = 1,36 \text{ м.}$$

4.1.1.7. Визначаємо положення крил на $2/3$ радіуса.

На $2/3$ радіуса $\text{tg}\beta = \frac{V}{U'} = \frac{3 \cdot 3,33}{2} = 5$.

Тоді кут $\beta = 78,69^\circ$, кут атаки складе $\alpha = 1,5^\circ$.

Положення крила визначиться як

$$\alpha + \beta = 80,19^\circ.$$

4.1.1.8. Проведемо розрахунок ширини крил і визначаємо положення крила на зовнішньому кінці.

Визначаємо довжину кола

$$2\pi R = \pi D = 36,29 \text{ м.}$$

Тоді

$$\frac{V}{U} = 5 \quad \text{та} \quad \frac{W}{U} = \sqrt{\left(\frac{U'}{u}\right)^2 + \left(\frac{V}{U}\right)^2} = \frac{40,35}{8} = 5,04.$$

Якщо на цьому відрізку профілю кут атаки дорівнює $\alpha = 1,5^\circ$, тоді коефіцієнт піднімальної сили - $C_u = 0,7$.

Тоді найбільш сприятлива ширина крила складе

$$t^{II} = \frac{2\pi R}{i} \frac{8}{9 C_Y} \left(\frac{U}{V}\right)_{\frac{2}{3}} \left(\frac{U}{W}\right)_{\frac{2}{3}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5,775}{3} \frac{8}{9 \cdot 0,75} \frac{1}{5} \frac{1}{5,04} = 0,61 \text{ м.}$$

$$\text{При цьому } \operatorname{tg}\beta = \frac{V}{U^I} = \frac{3}{2} \frac{V}{U} = \frac{3 \cdot 40}{2 \cdot 8} = 7,5 \quad \text{та } \beta = 82,4^{\circ}.$$

Та положення крила визначається кутом $\alpha + \beta = 1,5 + 82,4 = 83,9^{\circ}$.

4.1.1.9. Проводимо розрахунок ширини крил на внутрішньому кінці.

На відстані 1/3:

$$\left(\frac{V}{U}\right) = \frac{1}{3} \cdot 5 = 1,67;$$

$$\frac{W}{U} = \sqrt{\left(\frac{U^I}{U}\right)^2 + \left(\frac{V}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)^2 + 1,67^2} = 1,7.$$

Профіль лопаті залишається попереднім, кут атаки $\alpha = 1,5^{\circ}$ та $C_y = 0,7$.

Тоді найбільш сприятлива ширина крила складе

$$t^{III} = \frac{2\pi R}{i} \frac{8}{9 C_Y} \left(\frac{U}{V}\right)_{\frac{1}{3}} \left(\frac{U}{W}\right)_{\frac{1}{3}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5,775}{3} \frac{8}{9 \cdot 0,75} \frac{1}{1,67} \frac{1}{1,7} = 5,41 \text{ м.}$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{V}{U^I} = \frac{2}{3} \frac{V}{U} = \frac{3 \cdot 1,7}{2} = 2,55 \quad \text{та } \beta = 68,59^{\circ}.$$

Положення крила визначається кутом

$$\alpha + \beta = 1,5 + 68,59 = 70,09^{\circ}.$$

4.1.1.10. Визначимо середній коефіцієнт корисної дії крила на 2/3 радіуса:

$$\frac{V}{U^I} = 5.$$

Профіль лопаті залишається кут атаки $\alpha = 1,5^{\circ}$ та $C_y = 0,7$, $C_x = 0,01$.

Тоді середній коефіцієнт корисної дії крила на 2/3 радіуса дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_y} = \frac{0,01}{0,7} = 0,014. \quad \text{та } \varepsilon^I = 0.$$

4.1.1.11. Визначимо коефіцієнт корисної дії на наружних кінцях крил:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{V}{U^I} = 7,5.$$

Кут атаки $\alpha = 1,5$ та $C_y = 0,1$, $C_x = 0,01$.

Тоді середній коефіцієнт корисної дії крила на $2/3$ радіуса дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_y} = \frac{0,01}{0,7} = 0,014. \quad \text{та} \quad \varepsilon^I = 0.$$

Отже $\varepsilon = \varepsilon + \varepsilon^I = 0,014$.

У початкових розрахунках коефіцієнт корисної дії приймається рівним $\eta_F = 0,9$. Уточнене значення коефіцієнта корисної дії на зовнішньому кінці крил визначається за формулою:

$$\eta_F = \frac{1 - \varepsilon \operatorname{tg} \beta}{1 + \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \beta}} = \frac{1 - 0,014 \cdot 7,5}{1 + \frac{0,014}{7,5}} = 0,89.$$

4.1.1.12. Визначаємо коефіцієнт корисної дії на внутрішній частині крил.

$$\operatorname{tg} \beta = 2,55.$$

Профіль лопаті залишається попереднім, кут атаки $\alpha = 1,5$ та $C_y = 0,1$, $C_x = 0,01$.

Тоді середній коефіцієнт корисної дії крила на $2/3$ радіуса дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_y} = \frac{0,01}{0,7} = 0,014. \quad \text{та} \quad \varepsilon^I = 0.$$

Отже $\varepsilon = \varepsilon + \varepsilon^I = 0,014$.

У початкових розрахунках коефіцієнт корисної дії приймається рівним $\eta_F = 0,9$. Уточнене значення коефіцієнта корисної дії на зовнішньому кінці крил визначається за формулою:

$$\eta_F = \frac{1 - \varepsilon \operatorname{tg} \beta}{1 + \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \beta}} = \frac{1 - 0,014 \cdot 7,5}{1 + \frac{0,014}{7,5}} = 0,89.$$

Результати розрахунку характеристик вітродвигуна $N = f(U)$, $M = f(U)$, $n = f(U)$, $P_L = f(U)$, $P_{\text{ц.б.}} = f(U)$ наведені у вигляді графіків на рис. 5, 6, 7 при наступних значеннях параметрів: радіусі вітроколеса $R = 5$ м; коефіцієнті використання енергії вітру $\xi = 0,35$; коефіцієнті лобового тиску $B = 0,88$; модулі швидкості $z = 5$; кількості лопатей $i = 3$ і швидкості вітру $U = 0-10$ м/с.

Номінальні значення параметрів розглянутого вітродвигуна визначені

при номінальній швидкості вітрового потоку, рівної $U = 8$ м/с, при цьому номінальна потужність дорівнює приблизно $N_{\text{НОМ}} = 10$ кВт, номінальний момент на валу $M_{\text{НОМ}} = 1250$ Н•м і номінальна частота обертання складає $n_{\text{НОМ}} = 71$ об/хв.

Залежність лобового тиску $P_L = f(U)$, наведена на рис. 3.4, визначена за формулою:

$$P_L = B \rho \pi \frac{R^2}{2} U^2, H.$$

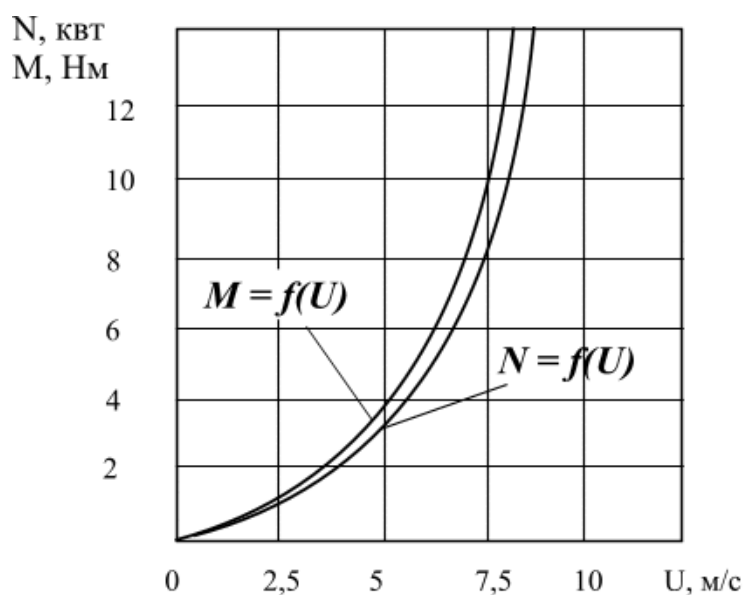


Рис. 5. Залежність моменту та потужності на валу вітроколеса від швидкості вітрового потоку

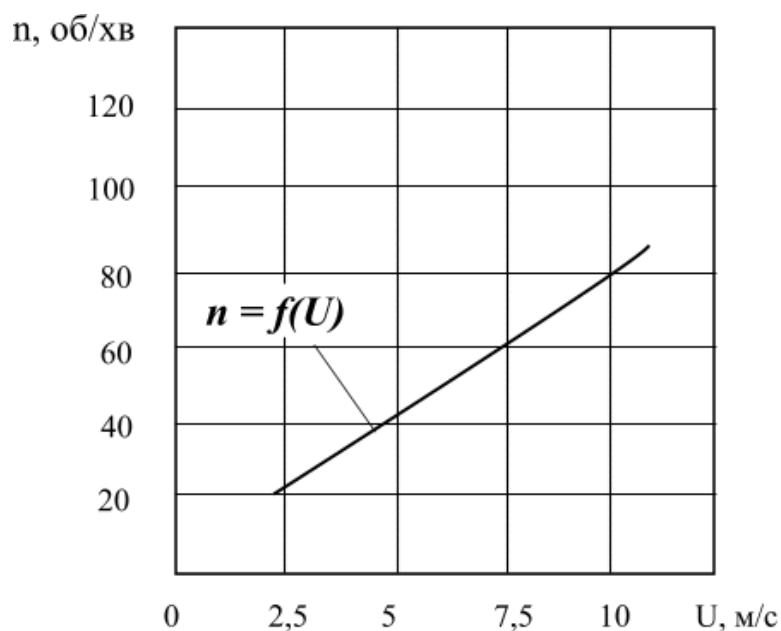


Рис. 6. Залежність числа обертів від швидкості вітрового потоку

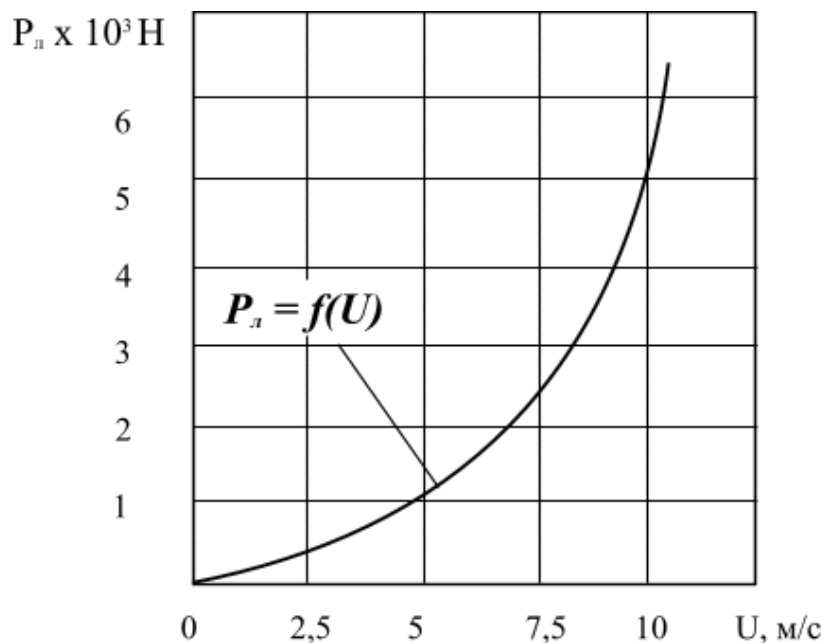


Рис. 7. Залежність лобового тиску від швидкості вітрового потоку

4.2. Розрахунок вітродвигуна на міцність

Розрахунок на вітродвигуна на міцність визначається величинами навантажень і напругами, що допускаються.

Навантаження на елементарну площадку лопаті шириною b та довжиною δ , м, відповідно дорівнює:

$$dP = C_y b dr \rho \frac{W^2}{2}, \quad (4.4)$$

де C_y - коефіцієнт піднімальної сили крила;

ρ - відносна швидкість повітряного потоку, що набігає на елемент лопасті;

r - відстань елемента лопаті від осі обертання вітроколеса.

Відносна швидкість повітряного потоку:

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2}, \quad (4.5)$$

де ω - колова швидкість елемента лопаті;

V — швидкість вітру.

Отже;

$$dP = C_y b dr \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + V^2). \quad (4.6)$$

Лобовий тиск і навантаження на крило вітродвигуна при швидкості вітру

$$V = 10 \text{ м/с}$$

Вітроколесо має: діаметр $D = 8 \text{ м}$; $r_0 = 0,1$ $D_0 = 1,6 \text{ м}$; ширина лопаті на найближчому до центра вітроколеса перетині $b_1 = 1,8 \text{ м}$ і на зовнішньому кінці $b_2 = 0,8 \text{ м}$; $\delta/b = 0,15$.

Число модулів $Z_n = 3$ і число лопатів $i = 2$.

Лобовий тиск дорівнює:

$$P_A = C_y \frac{\rho}{2} S (\omega^2 r_m^2 + V^2) i n. \quad (4.7)$$

$C_y = 1,2$ - максимальний коефіцієнт піднімальної сили знаходимо за графіком рис. 171 (стор.264) [2] при $\delta/b = 0,15$, $\rho = 0,125$ - масова щільність повітря при 15° і 760 мм

$$S = \frac{1,8 + 0,8}{2} (8 - 1,6) = 8,3 \text{ м}^2. \quad \text{- площа лопаті.}$$

$$\omega = \frac{Z_n V}{R} = \frac{3 \cdot 1}{8} = 3,75 \quad \text{- кутова швидкість вітроколеса.}$$

$$r_m = \sqrt{\frac{R^2 + Rr_0 + r_0^2}{3}} = \sqrt{\frac{8^2 + 8 \cdot 1,6 + 1,6^2}{3}} = 5,14 \quad \text{- умовний радіус}$$

крила.

$$n = \frac{Z_m^2 + k^2}{Z_m^2 + 1} = \frac{1,93^2 + 1,5^2}{1,93^2 + 1} = \frac{5,97}{4,72} = 1,26.$$

Тут

$$k = \frac{V_n}{V} = 1,5;$$

$$Z_m = \frac{\omega r_m}{V} = \frac{3,75 \cdot 5,14}{10} = 1,93.$$

Підставляючи цифрові значення в рівняння (3.14), одержимо:

$$P_A = 1,2 \cdot \frac{0,125}{2} \cdot 8,3 (3,75^2 \cdot 5,14^2 + 10^2) \cdot 1,26 \cdot 4 = 1990 \text{ кг.}$$

Навантаження на крило знаходимо з рівняння:

$$P_{max} = \frac{P_n}{4} = \frac{1990}{4} = 498 \text{ кг.}$$

4.3. Визначення навантаження на нервюру крила

Визначити навантаження на нервюру крила, якщо відстань нервюри від осі вітроколеса $r_x = 5$ м; відстань між нервюрами $a = 0,6$ м.

$r_0 = 1,6$ м; $R = 8$ м; $b_1 = 1,8$ м; $b_2 = 0,8$ м (рис. 43.2).

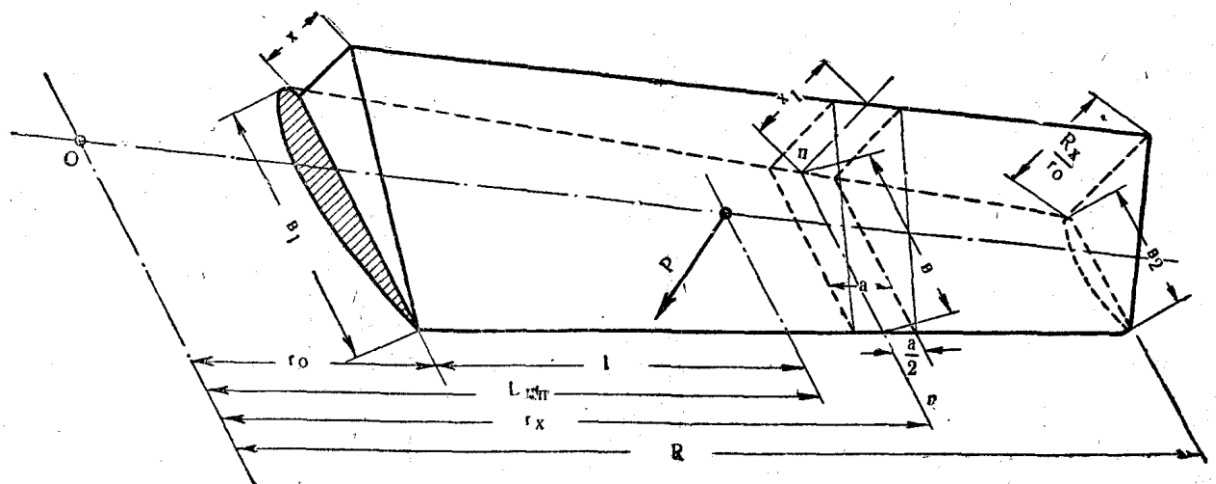


Рис. 8. Об'ємне навантаження на лопать

Навантаження на крило дорівнює $P_{max} = 498$ кг.

Знаходимо обсяг навантаження на крило рівняння (186) [2]:

$$V = \frac{R - r_0}{6} \left[b_1 \left(1 + \frac{R}{2r_0} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0} \right) \right] = \frac{8 - 1,6}{6} \left[1,8 \left(1 + \frac{8}{2 \cdot 1,6} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{8}{1,6} \right) \right] = 11,5 \text{ м}^3.$$

Питоме навантаження p знаходимо згідно рівняння 188 [2]:

$$p = \frac{P_{max}}{\frac{R - r_0}{6} \left[b_1 \left(1 + \frac{R}{2r_0} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r_0} \right) \right]} = \frac{498}{11,5} = 43,5 \text{ кг/м}^3.$$

Навантаження на нервюру крила, розташовану на відстані $r_x = 5$ м; від осі вітроколеса, відповідно до рівняння (191) [2], буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
 Q_x &= \frac{P \cdot a}{2r_0(R-r_0)} \left[(b_1 R - b_2 r_0) r_x - (b_1 - b_2) \left(r_x^2 + \frac{a^2}{12} \right) \right] = \\
 &= \frac{43,5 \cdot 0,6}{2 \cdot 1,6(8-1,6)} \left[(1,8 \cdot 8 - 0,8 \cdot 1,6) 5 - \right. \\
 &\quad \left. - (1,8 - 0,8) \left(5^2 + \frac{0,6^2}{12} \right) \right] = 51,7 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

4.4. Проектування вежі вітродвигуна

Мобільний вітроенергетичний пристрій лопатевого типу складається з трьох основних частин: причепа, головки вітродвигуна з усіма механізмами та вежі, на якій монтується головка.

Вежі в крильчастих вітродвигунах грають надзвичайно важливу роль: вони дозволяють виносити вітроколесо на будь-яку висоту, що обумовлено рельєфом місцевості. Різного роду перешкоди на поверхні землі порушують прямолінійний рух повітряного потоку, викликаючи вихори. Вежа дозволяє винести вітроколесо за межі цих вихорів.

Так як потужність вітродвигуна змінюється пропорційно кубу швидкості вітру, тобто

$$N = N_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^3, \quad (4.8)$$

то, приймаючи в уваги рівняння

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (4.9)$$

можемо написати рівняння потужності вітродвигуна у функції висоти:

$$N = N_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{0,6}, \quad (4.10)$$

де: N_0 — потужність на висоті H_0 ;

N — потужність на висоті H .

Приблизна характеристика потужності вітродвигуна в залежності від висоти положення вітроколеса від землі дана на рис. 3.6, стор. 289 [2].

Для веж нижче 10 м віддаль між ногами рівна $B = 0,30 H$ м.

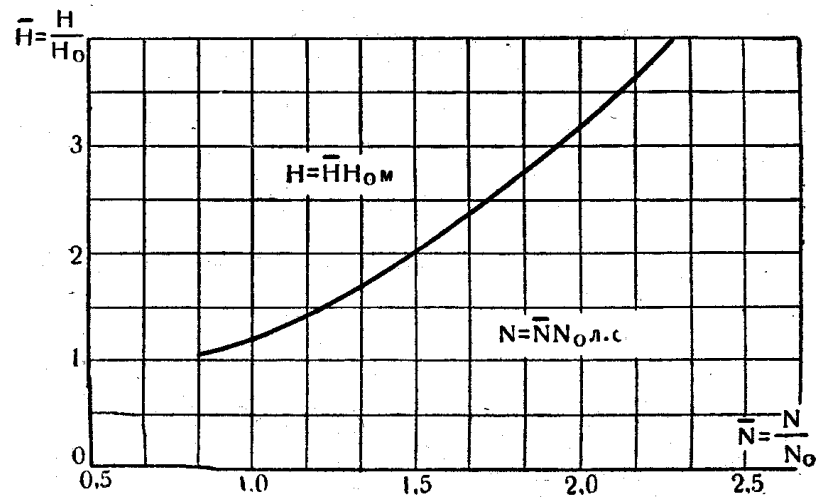


Рис. 9. Характеристика потужності вітродвигуна в залежності від висоти його вежі

Однак, при виборі висоти вежі, необхідно приймати в увагу ще технічні можливості й умови експлуатації вітроустановки.

Мінімальна висота вежі повинна бути рівною (рис. 4.7)

$$H = h + c + R, \quad (4.11)$$

де: h - висота перешкод поблизу вітроустановки;

c - відстань від верхівки перешкод до нижньої точки кола поверхні, що ометається, приймається від 1,5 до 2 м;

R - радіус вітрового колеса.

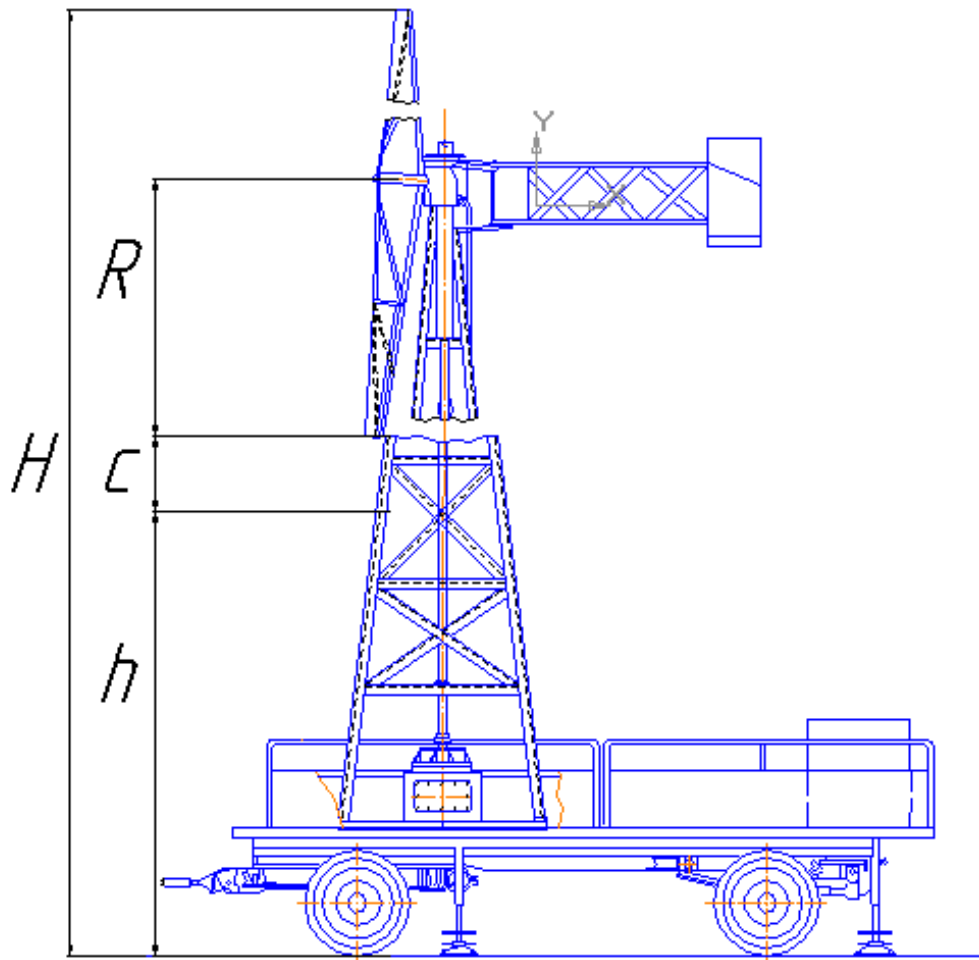


Рис. 10. Визначення висоти вежі

4.5. Визначення ваги вежі

Висота вежі $H = 11$ м дволопастного вітродвигуна $D = 5$ м.

За графіком (рис. 190, стор 293) [2] знаходимо $k = 2,6$; підставляючи значення, отримаємо вагу вежі:

$$G = (16,5 \cdot 15 \cdot 2,5^2 + 0,723 \cdot 15^3 + 5,3 \cdot 2,5^3) \frac{2,6}{10} = 1050 \text{ кг.}$$

ВИСНОВКИ

В роботі було розроблено мобільний вітроенергетичний пристрій з робочим органом активного типу.

У вступі до роботи було розглянуто історію виникнення застосування перших вітродвигунів, перших вчених які працювали над теорією вітродвигунів, та теперішнє застосування вітроенергетичного пристрою.

В 1 розділі – «Стан питання і завдання досліджень» проведено аналіз конструкцій вітродвигунів, наведено та охарактеризовано конструкції вітродвигунів огляд існуючих конструкцій.

В 2 розділі – «Опис мобільного вітроенергетичного пристрою» було наведено призначення, робота та переваги мобільного вітроенергетичного пристрою лопатевого типу, обґрунтована доцільність даної магістерської роботи.

В 3 розділі - «Дослідницький розділ» проведено аналіз теоретичних досліджень вітроенергетичних установок, що дало можливість відібрати методики та рекомендації з питань дослідження аеродинаміки вітродвигунів, проектування вітроколеса, оцінити швидкості та переміщення, що діють на елементи конструкції, навантаження, визначити геометрію перетину та профіль вітроколеса розрахунок вітроенергетичної установки з горизонтальною віссю обертання.

Проведений аналіз теорії вітроколеса показав, що за класичною теорією вітроколеса (теорією ідеального вітроколеса професора Н. Е. Жуковського) максимальний коефіцієнт використання енергії вітру ідеальним вітроколесом дорівнює 0,593.

Найбільш повно, з погляду практичного застосування, теорія ідеального вітроколеса викладена професором Г.Х. Сабініним, відповідно до якої максимальний коефіцієнт використання енергії вітру цим колесом дорівнює 0,687.

Було також встановлено, що крильчасті вітродвигуни значною мірою

вільні від недоліків карусельних і барабанних двигунів, що підтверджується теоретичними розрахунками і практичними даними.

В 4 розділі - «Інженерний розділ» проведено розрахунок основних параметрів мобільної вітроенергетичної установки, розрахунок вітродвигуна на міцність та визначено навантаження на нервюру крила, запроєктовано вежу вітродвигуна та визначена її вага, що підтверджує можливість встановлення її на тракторному причепі.

Джерела інформації

1. Алешко П.И. Механика жидкости и газа. - Харьков: Вища школа, 1997.- 320 с.
2. Краснов Н.Ф. Прикладная аэродинамика. - М: Высшая школа, 1974.-731
3. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. - М.; Высшая школа, 1976. - 368 с.
4. Мхитарян А.М. Аэродинамика. - М: Машиностроение, 1970.- 428 с.
5. Повх И.Я. Техническая гидромеханика. - Л.: Машиностроение, 1999.-524 с.
6. Гольдштейн С. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. - М.: "ИЛ", 1998. - 408 с.
7. Яхно О.М. Гидромеханика, газовая динамика и теория гидродинамических решеток (записки). - Габрово, НРБ: ВЭМИ, 2005.-465с.
8. Федяевский К. К, Войтнунский Я. К, Фадеев Ю,М. Гидромеханика. - Л.: Судостроение, 2008. —568 с.
9. Горшенин Д.С., Мартынов А.К Руководство практических занятий в эродинимической лаборатории. ~ М.: Машино -строение, 1997. - 224 с.
10. Самойловых Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. - М.: Машиностроение, 2005. - 288 с,
11. Вознесенский И.Н. Жизнь, деятельность и избранные труды в области гидромашиностроения, - М.: НТИМЛ, 2004. -353 с.
12. Викторов А.В. «Теория гидродинамических решеток профилей». - Л.: Машиностроение, 1989.-524 с.
13. Жуковский Н.Е. Теоретические основы воздухоплавания. 1995.
14. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. - М.: Машиностроение, 1999. - 200 с.
15. https://pidruchniki.com/83028/tehnika/vitroenergetichni_ustanovki_serednoyi_velikoyi_potuzhnosti
16. https://www.ive.org.ua/?page_id=69 Інститут відновлюваної енергетики НАН України
17. <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf> Основи

вітроенергетики Підручник Г.Півняк, Ф. Шкрабець, Н.Нойбергер, Д.Ципленков,
2015 ISBN 978-966-350-526-8 © Державний ВНЗ «Національний гірничий
університет», 2015