

РАСЧЕТ ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРЯКА
ИДЕАЛДУУ ВЕТРЯКТЫН ЭСЕБИ
CALCULATION OF THE IDEAL WIND

Кочкорова М.Б. – преподаватель, ЖАГУ,
Белекова Б.Т. – аспирант, ЖАГУ,
Белеков Б.Т. – аспирант, ЖАГУ

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы анализа ветряной энергоустановки на основе расчетов. Проведен краткий расчет коэффициента использования ветра и коэффициент лобового давления

Аннотация: Макалада шамал энергетикалык орнотмолорду эсептөөнүн негизиндеги талдоолор каралды. Шамалды колдонуунун коэффициентин жана беттик басымдын коэффициентин чыгаруунун кыскача эсеби берилди

Annotation: The article considers the analysis of a wind power installation based on calculations. A short calculation of the coefficient of wind use and the coefficient of the frontal pressure

Ключевые слова: ветряные мельницы, ветроэлектростанция, всемирная метеорологическая организация, ветротурбина, ветроустановка

Ачкыч сөздөр: шамал тегирмендери, шамалэлектростанциялары, бүткүл дүйнөлүк метеорологиялык уюмдар, шамал турбиналары, шамал орнотмолору

Key words: windmills, wind power station, World Meteorological Organization, wind turbine, wind turbines

Ветряные мельницы с крыльями-парусами из ткани первыми начали сооружать древние персы свыше 1,5 тыс. лет назад. В дальнейшем ветряные мельницы совершенствовались. В Европе они не только мололи муку, но и откачивали воду, сбивали масло, как, например в Голландии. Первый электрогенератор был сконструирован в Дании в 1890 г. Через 20 лет в стране работали уже сотни подобных установок. [2, 8]

Энергия ветра очень велика. Ее запасы по оценкам Всемирной метеорологической организации, составляют 170 трлн кВт·ч в год. Эту энергию можно получать, не загрязняя окружающую среду. Но у ветра есть два существенных недостатка: его энергия сильно рассеяна в пространстве и он непредсказуем – часто меняет направление, вдруг затихает даже в самых ветреных районах земного шара, а иногда достигает такой силы, что ломают ветряки. [4]

Строительство, содержание, ремонт ветроустановок, круглосуточно работающих в любую погоду под открытым небом, стоит недешево. Ветроэлектростанция такой же мощности, как ГЭС, ТЭЦ или АЭС, по сравнению с ними должна занимать большую площадь. К тому же ветроэлектростанции небезвредны: они мешают полетам птиц и насекомых, шумят, отражают радиоволны вращающимися лопастями, создавая помехи приему телепередач в близлежащих населенных пунктах. [5]

Принцип работы ветроустановок очень прост: лопасти, которые вращаются за счет силы ветра, через вал передают механическую энергию к электрогенератору. Тот в свою очередь вырабатывает энергию электрическую. Получается, что ветроэлектростанции работают как игрушечные машины на батарейках, только принцип их действия

противоположен. Вместо преобразования электрической энергии в механическую, энергия ветра превращается электрический ток. [6]

На основе теории идеального гребного винта В.П.Ветчинкин в 1914 году разработал теорию идеального ветряка [4]. Н.Е.Жуковский в 1920 году предложил теорию «Ветряной мельницы НЕЖ», где обосновал количественно максимальный коэффициент использования энергии ветра. Позже аналогичные теории были разработаны Г.Х.Сабининым и Н.Ф.Проскурой [4].

Идеальным ветряком называют ветроколесо, у которого [1, 3, 7]:

- ось вращения параллельна скорости ветра;
- бесконечно большое число лопастей очень малой ширины;
- профильное сопротивление лопастей равно нулю, а циркуляция вдоль лопастей постоянна;
- потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности;
- угловая скорость стремится к бесконечности.

Рассмотрим равномерный несжимаемый идеальный поток ветра, набегающий на идеальную ветротурбину со скоростью V в сечении AA' (рис. 1). В сечении BB' на ветротурбине скорость становится $V_1 = V - v_1$, а на некотором расстоянии в сечении CC' $V_2 = V - v_2$. Вращающаяся ветротурбина создает подпор, вследствие чего скорость потока упадет по мере приближения к ней и некоторое время за нею, как показано на рис. 1 (кривая 1). При этом давление воздуха P по мере приближения к ветротурбине повышается (кривая 2), а при прохождении через нее оно резко падает, что приводит к образованию разрежения $P_c - P_2$ за ветротурбиной. По мере удаления от нее это давление восстанавливается до первоначального значения (кривая 3).

Воспользуемся уравнением Бернулли и установим потерю скорости за идеальным ветряком:

$$P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} = P_0 + \frac{\rho V^2}{2},$$

отсюда следует, что при

$$P_2 \text{ p } P_c, \quad V \text{ f } V_2.$$

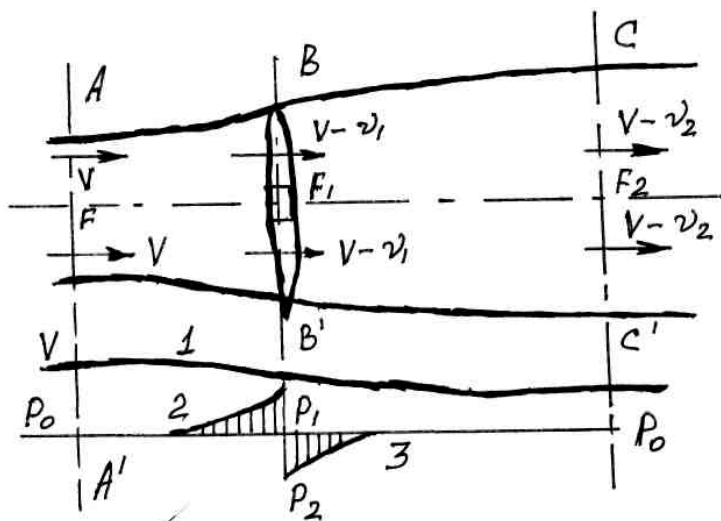


Рис. 1. Характеристика воздушного потока, протекающего через горизонтально-осевую ветротурбину

Кинетическая энергия ветрового потока перед ветряком равна $(mV^2)/2$, а за ним она составляет $m(V - v_2)^2 / 2$. Разность этих энергий затрачивается на ветроколесе и в случае отсутствия потерь может быть оценена как полезная энергия

$$W_1 = \frac{mV^2}{2} - \frac{m(V - v_2)^2}{2}. \quad (1)$$

Преобразовав правую часть уравнения (1), получим

$$\frac{m}{2} \left[V^2 - (V - v_2)^2 \right] = \frac{m}{2} (2Vv_2 - v_2^2) = m v_2 \left(V - \frac{v_2}{2} \right), \quad (2)$$

Откуда

$$W_1 = m v_2 \left(V - \frac{v_2}{2} \right). \quad (3)$$

Энергию W_1 , воспринятую ветроколесом, можно выразить как произведение силы давления P на скорость ветра в плоскости ветротурбины $(V - v_1)$, т.е.

$$W_1 = P(V - v_1). \quad (4)$$

Лобовое давление P на ветротурбину равно приращению количества движения потока воздуха, проходящего через ометаемую поверхность F :

$$P = m v_2,$$

где m – масса воздуха, проходящего через ветротурбину,

(5)

Подставляя $m = \rho F V = \text{const.}$ значение P в уравнение (4), получаем

$$W_1 = m v_2 (V - v_1). \quad (6)$$

Приравнявая (3) и (6), имеем

$$m v_2 \left(V - \frac{v_2}{2} \right) = m v_2 (V - v_1),$$

$$v_1 = v_2 / 2; \quad v_2 = 2v_1. \quad (7)$$

Соотношения (7) показывают, что потеря скорости воздушного потока происходит в сечении ветроколеса и на некотором расстоянии за ним, причем полная потеря скорости в два раза больше потери на ветроколесе.

Подставляя (5) в выражение для кинетической энергии ветра перед ветроколесом, получаем

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho F V V^2}{2} = \frac{\rho F V^3}{2}.$$

Отношение секундной работы идеального ветряка

$$A_1 = P(V - v_1)$$

к энергии ветра, протекающего через сечение, равное ометаемой поверхности ветряка

$$F \frac{\rho V^3}{2}.$$

дает выражение для идеального коэффициента использования энергии ветра

$$C_{P1} = \frac{P(V - v_1)}{F \frac{\rho V^3}{2}}. \quad (8)$$

После преобразования (8), запишем правую его часть в виде

$$C_{P1} = 2 \frac{P(V - v_1)}{F \rho V^3}$$

и введем обозначение

$$B = \frac{2P}{F \rho V^2}, \quad (9)$$

которое называют коэффициентом лобового давления.

После подстановки в (9) значения $P = \rho \cdot F(V - v_1)v_2 = \rho \cdot F(V - v_1)2v_1$ и преобразования получаем

$$B = \frac{2\rho F(V - v_1)2v_1}{\rho F V^2} = \frac{4(V - v_1)v_1}{V^2} = 4e(1 - e), \quad (10)$$

где $e = v_1/V$.

Поступая так же с уравнением (8), получаем

$$C_{P1} = \frac{F \rho (V - v_1)^2 2v_1}{F \frac{\rho V^3}{2}} = \frac{4(V - v_1)^2 v_1}{V^3} = \frac{4(V - v_1)(V - v_1)v_1}{V^3} = 4e(1 - e)^2. \quad (11)$$

Величину $e = v_1/V$ называют коэффициентом торможения, максимальное значение которого можно получить, если взять первую производную по e и приравнять ее нулю:

$$\frac{dC_{P1}}{de} = \frac{d}{de} [4e(1 - e)^2] = \frac{d}{de} (4e - 8e^2 + 4e^3) = 0,$$

или
$$\frac{dC_{P1}}{de} = 4 - 16e + 12e^2 = 0$$

откуда
$$3e^2 - 4e + 1 = 0$$

Из этого равенства легко получить, что C_{P1} принимает максимальное значение при $\hat{a} = 1/3$, т.е.

$$C_{P1\hat{a}\hat{\delta}} = 4 \cdot 1/3(1 - 1/3)^2 = 16/27 = 0,593.$$

Коэффициент лобового давления при максимальном значении $\tilde{N}_{\hat{a}\hat{\delta}}$ находим из (10):

$$\hat{A} = 4(1 - 1/3)1/3 = 8/9 = 0,888.$$

Таким образом, классическая теория идеального ветряка формулирует следующие основные положения:

- максимальный коэффициент энергии ветра идеального ветроколеса достигает значения $\tilde{N}_{\text{ид}} = 0,593$;

- потеря скорости в плоскости ветроколеса составляет одну треть скорости ветра:

$$v_1 = 1/3 \cdot V;$$

- полная потеря скорости ветра за ветроколесом в два раза больше потери скорости в плоскости ветроколеса:

$$v_2 = 2/3 \cdot V;$$

- скорость ветра за ветроколесом в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом; коэффициент лобового давления на идеальное ветроколесо при $\tilde{N}_{\text{ид}}$ будет $B = 0,888$.

Задавая коэффициент торможения $\hat{a} = v_1 / V$ в пределах от 0 до 1, по уравнениям (8) и (9) получаем следующие значения коэффициентов C_{Pl} и B (табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициентов C_{Pl} и B

$e = v_1 / V$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
C_{Pl}	0,324	0,512	0,593	0,576	0,500	0,384	0,252	0,128	0,036	0
B	0,360	0,640	0,888	0,960	1,000	0,960	0,840	0,640	0,360	0

Зависимость $\tilde{N}_{\text{дл}} = f(e)$ изображена на рис. 2 (кривая 1).

Профессор Г.Х.Сабинин ввел понятие «вихревой соленоид», рассчитал импульс сил в потоке в зоне ветротурбины и учел дополнительную массу воздуха, захваченную в плоскости вращения соленоидом. В результате максимальные расчетные коэффициенты использования энергии ветра и лобового давления возросли и стали соответственно равны: $\tilde{N}_{\text{дл}} = 0,687$; $\hat{A} = 1,172$.

Таким образом, по классической теории потеря скорости ветра за ветряком равна удвоенной потере скорости ветра в плоскости ветряка, т.е.

$$v_2 = 2v_1.$$

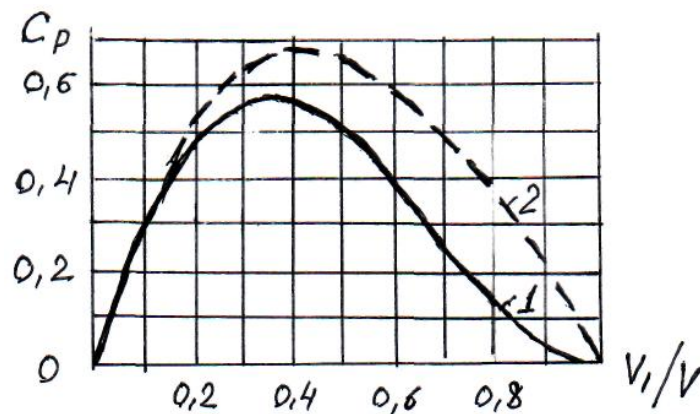


Рис. 2. Изменение коэффициента использования энергии ветра в зависимости от коэффициента торможения: 1 – теория Н.Е.Жуковского; 2 – теория Г.Х.Сабинина

По теории профессора Г.Х.Сабинина это же уменьшение скорости ветра за ветряком выражается соотношением

$$v_2 = \frac{2v_1}{1 + \frac{v_1}{V}}. \quad (12)$$

По классической теории осевое давление ветрового потока

$$P = m_1 v_2,$$

где масса воздуха в потоке

$$m_1 = F_1 \rho (V - v_1),$$

а по теории Г.Х.Сабинина кроме массы воздуха, протекающей через ометаемую поверхность ветроколеса, принимается во внимание дополнительная масса воздуха m_2 , засасываемая внутрь вихревого соленоида. Осевое давление несколько увеличивается и составляет

$$P = (m_1 + m_2) v_2 = \rho F_1 V v_2, \quad (13)$$

при этом увлеченная ветряком масса воздуха будет

$$m_1 + m_2 = F_1 \rho V = \text{const}. \quad (14)$$

Ясно, однако, что технически невозможно построить ветряк с бесконечно большим числом лопастей, имеющий бесконечно большую частоту вращения и работающий без потерь. На практике приходится иметь дело с реальным ветряком, у которого ветротурбина содержит конечное число лопастей (от 1 до 24), имеет конечную частоту вращения и работает с потерями.

Вводя отношение скорости кончика лопасти к скорости ветра, получим коэффициент быстроходности

$$Z = \Omega \cdot R / V,$$

где R – радиус ветротурбины; Ω – ее угловая скорость вращения.

На рис. 3 показан типичный график зависимости $\tilde{N}_D = f(Z)$ для реального ветряка.

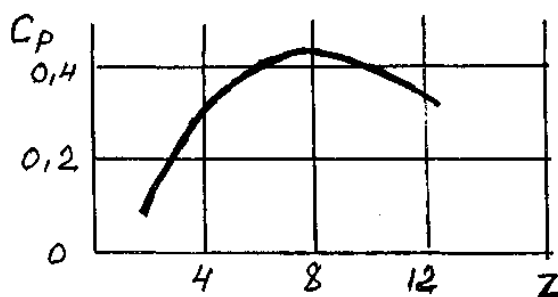


Рис. 3. Изменение коэффициента C_p при изменении быстроходности Z

Список использованной литературы:

1. Конеченков А.Е., Шмидт Г.Б. Ветровой проект века Миддельгруденская ВЭС // Электропанорама. -2001. -№12. –С. 54-55.
2. Янукович В. Ф., А. А. Минаев Перспективы большой ветроэнергетики// Энергетика и электрификация. - 2000. - № 5. - С. 1 - 6.
3. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы. –Х.: ХАИ. 2003.
4. Кривцов В.С., Яковлев А.И. Ветроэнергетика в Украине: Реальность и перспективы//Проспект Правды. – 1998. -№7(14).
5. Шихайлов Н.А. Развитие ветроэнергетики в Украине//Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии. –Х: ХАИ. -1997. –Ч.1. –С. 9-10.

6. Шидловский А.К., Лищенко А.И., Резцов В.Ф. Проблемы преобразования энергии ветроэлектрических установок//Техническая электродинамика. -1993. -№3. –С. 41-45.
Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Брыль А.А. Энергетика автономных ветроустановок //Изв.АН СССР. Сер.Энергетика и транспорт. -1990. -№3. –С. 130-135.
7. Малышев Н.А. Лятхер В.М. Ветроэлектрические станции. –М.: Энергоатомиздат, 1988. -165с.
8. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. –М.: Энергоатомиздат, 1983. -193с.