



Ветроэнергетика

Дисциплина

Общая энергетика

доцент ОЭЭ

Шестакова Вера Васильевна

Ветроэнергетика

Ветрогенератор Enercon - 7,58 МВт

Походный ветрогенератор - 10 Вт

До 7 м/с – типичный ветер, 20 м/с - это очень сильный ветер,
113 м/с – самый сильный ветер, зафиксированный в Австралии в 1996 г.

Общие запасы энергии ветра в мире оценены в 170 трлн. кВт·ч (ТВт·ч), в год, что в семь раз превышает нынешнее мировое потребление электроэнергии.

«Ветреная ветряная энергетика»

<https://www.nkj.ru/archive/articles/22733/>

Наука и жизнь, №7, 2013 г.

Противоречие

Установленная мощность ВЭС в мире достигла 282 ГВт (в 2012 г.) Соизмеримо с мощностью всех АЭС на планете.

Но – доля ВЭС в выработке электроэнергии в мире - 2,4% (в 2013 г.).

1. КПД ветряков ограничен, в теории 59%, на практике 30-35%.
2. Территориальные «ресурсы». ТЭС 1 ГВт занимает 1-10 гектаров. ВЭС 1 ГВт - тысячи гектаров.
3. ВЭС отстают от АЭС и ГЭС по коэффициенту использования установленной мощности АЭС $K_{исп} = 0,84$, ГЭС $K_{исп} = 0,42$, ВЭС $K_{исп} = 0,2$.
4. металлоемкость: ветрогенератор **3 МВт – 350 тонн**, турбогенератор **300 МВт – 340 тонн**
5. Себестоимость 1 кВтч энергии: АЭС и ГЭС 1-10 коп., ТЭС до 100 коп., ВЭС 20-80 коп.
6. Экономический порог ветроэнергетики – среднегодовая скорость ветра 5-6 м/с

«Ветреная ветряная энергетика»

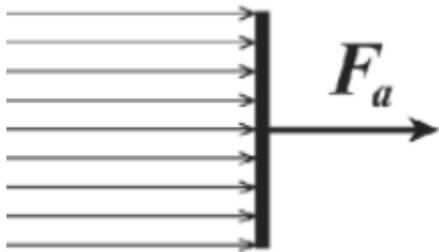
<https://www.nkj.ru/archive/articles/22733/>

Наука и жизнь, №7, 2013 г.

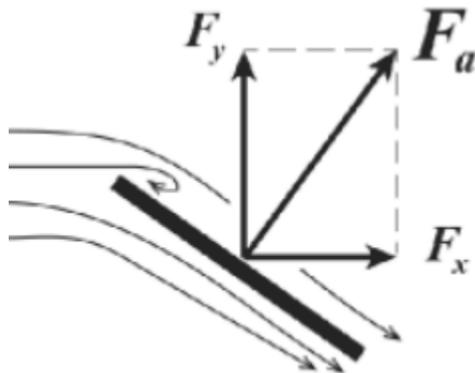
ВЭС и экология, опыт 25-ти лет

1. Инфразвуковые колебания и вибрации – негативное воздействие на людей, животных и технику (зона отчуждения 350 м) + «вспышки света» из-за лопастей.
2. В районе ветропарка перестают селиться животные и птицы.
3. Утилизация лопастей. К 2035 г. ожидается 200000 тонн на утилизацию. Сжигание?
4. Снижение силы и изменение конфигурации ветров в местности.

Взаимодействие аэродинамической поверхности с ветром



Парусная поверхность



Крыльчатая поверхность

- F_a – полная аэродинамическая сила
- F_x – сила лобового сопротивления
- F_y – подъемная сила

Классификация ветрогенераторов по типу ветротурбин



Ветряные мельницы, технологии более 400 лет



Крыльчатый



Кольцевой



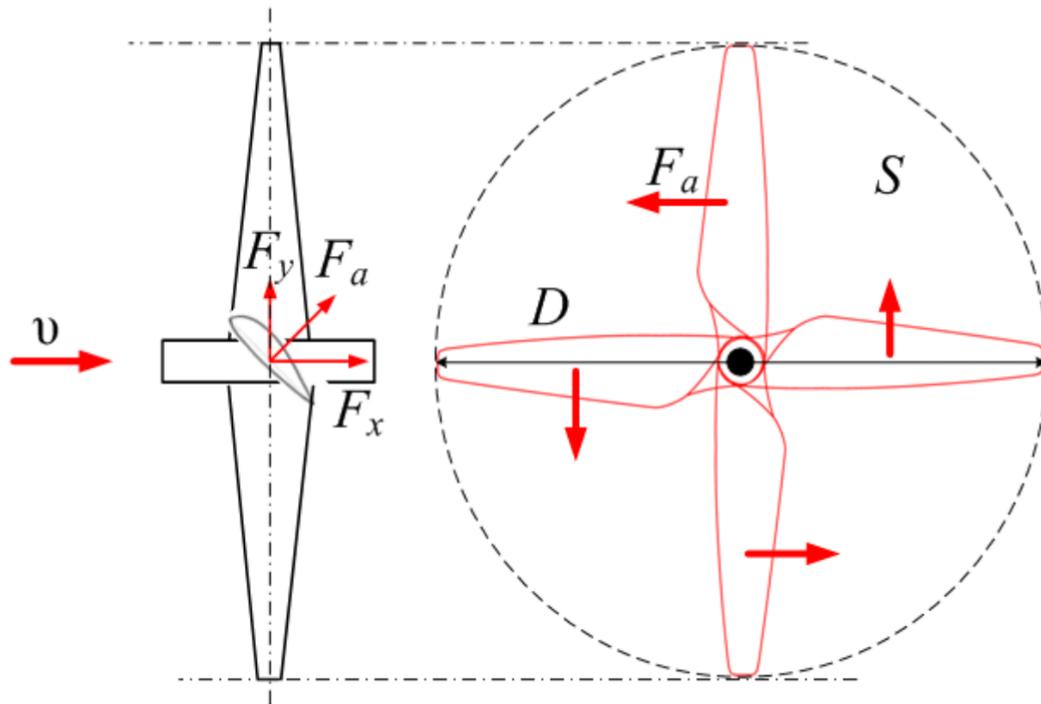
Роторный
(ротор Савониуса)



Ортогональный
(ротор Дарье)

**Самые
распространенные**

Аэродинамическая схема работы ветроколесного двигателя



F_a – полная аэродинамическая сила

F_x – сила лобового сопротивления

F_y – подъемная сила

D – диаметр ветроколеса

φ – угол заклинения

S – ометаемая площадь

Основные типы аэродинамического крылового профиля

Двоковыпуклые симметричные



Малое лобовое сопротивление и малая подъемная сила

Двоковыпуклые несимметричные



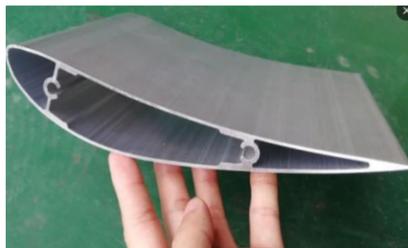
Плосковыпуклые



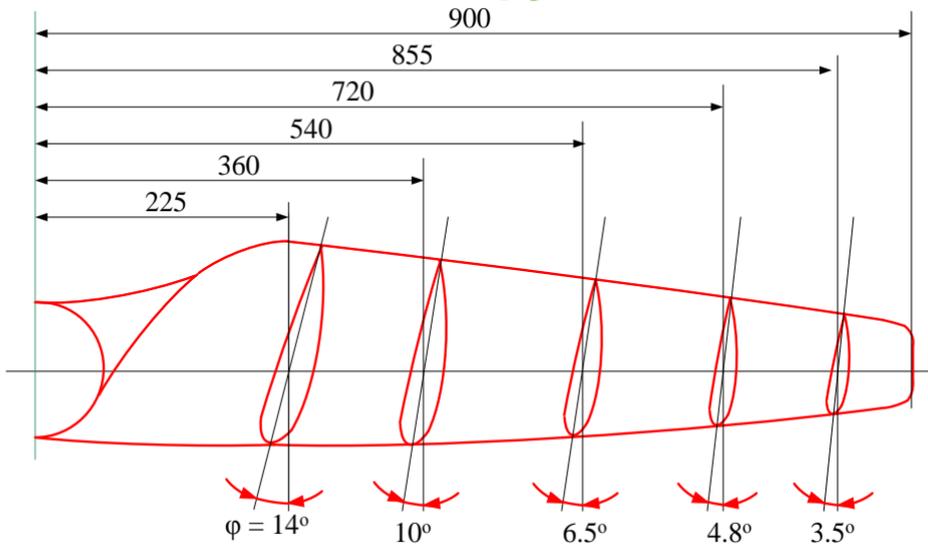
Выпукло-вогнутые



Большое лобовое сопротивление и большая подъемная сила



Конструкция лопасти

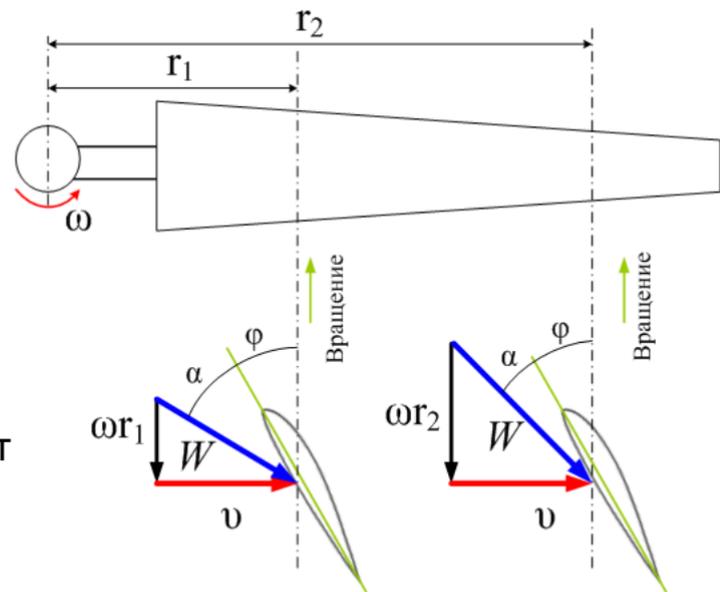


Крутка лопасти вдоль всей лопасти для получения максимальной подъемной силы

Линейная (окружная) скорость $\omega r_2 > \omega r_1$ возрастает

↓
уменьшение угла атаки α

↓
необходимость уменьшения угла заклинения φ



Изменение угла атаки в разных сечениях лопасти

Задание 1

Выведите формулы мощности воздушного потока $N_{\text{ВП}}$ (**закон полезного ветра**) и мощности ветроколеса $N_{\text{К}}$ с учетом механических потерь.

$N_{\text{ВП}}$ – мощность воздушного потока,

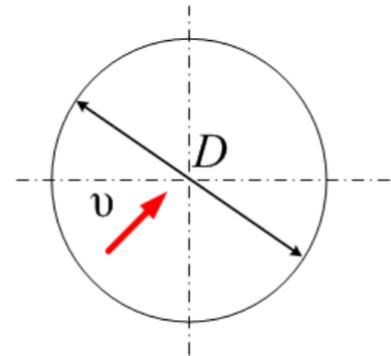
ρ – плотность воздуха (кг/м^3), стандартное значение равно примерно 1.2 кг/м^3 ,

u – скорость ветра (м/с),

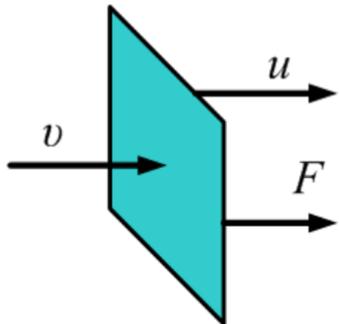
S – ометаемая площадь (м^2).

ξ_j – кси, идеальный коэффициент мощности ветроколеса (коэффициент использования ветра)

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{пр}}$$



Основные характеристики крыльчатых ветродвигателей



Мощность N , получаемая пластиной

$$N = Fu = \frac{\rho}{2} S(v-u)^2 u$$

$$Z = \frac{u}{v} = \frac{\omega R}{v}$$

Коэффициент быстроходности

u – окружная скорость конца лопасти,

v – скорость ветра, м/с

R – радиус ветроколеса, м

Коэффициент мощности идеального ветроколеса для поверхности, перпендикулярной ветру = коэффициент использования энергии ветра, физический смысл – это аэродинамическое КПД ветроколеса

$$\xi_i = 4 \frac{u}{v} \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 = 4e(1-e)^2$$

Задание 2

Определите, при каком соотношении скоростей u и v коэффициент мощности ξ_i будет максимальным.

v – скорость ветра перед колесом

u – скорость ветра за колесом

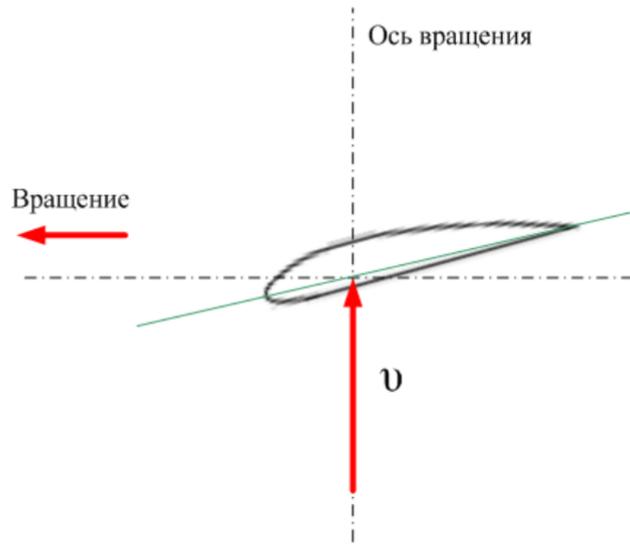
$e = u / v$ – коэффициент торможения потока в плоскости ветроколеса, у реальных ветродвигателей $e = 0,27 - 0,42$.

ξ_i – коэффициент мощности идеального ветроколеса для поверхности, перпендикулярной ветру = коэффициент использования энергии ветра, физический смысл – это аэродинамическое КПД ветроколеса.

$$\xi_i = 4 \frac{u}{v} \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 = 4e(1 - e)^2$$

Задание 3

Составьте план сил и скоростей потока на заданном профиле лопасти.



F_a – полная аэродинамическая сила

F_x – сила лобового сопротивления

F_y – подъемная сила

На плане должны быть обозначены векторы:

v – фронтальная скорость ветра, набегающего на неподвижное колесо,

ω – угловая скорость вращения колеса,

r – радиус колеса ветротурбины,

ωr – линейная (окружная) скорость сечения лопасти на расстоянии r от центра вращения

W – относительная скорость потока ветра (результатирующий поток)

v_{1n} – осевая скорость, потеря скорости потока ветра на ометаемой площади,

u_{1n} – окружная скорость, реакция от развиваемого лопастями крутящего момента

φ – угол заклинивания

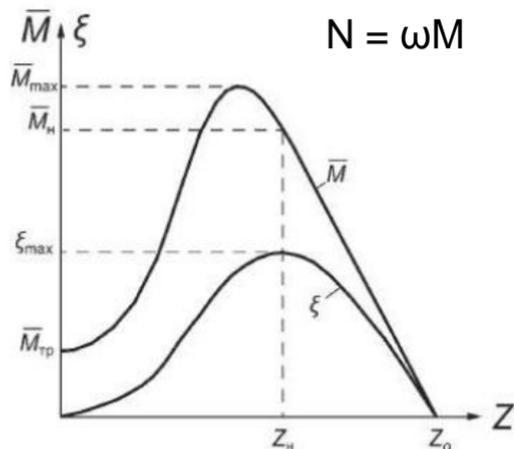
α – угол атаки

$\beta = \alpha + \varphi$

Три закона крыльчатых ветроколесных двигателей

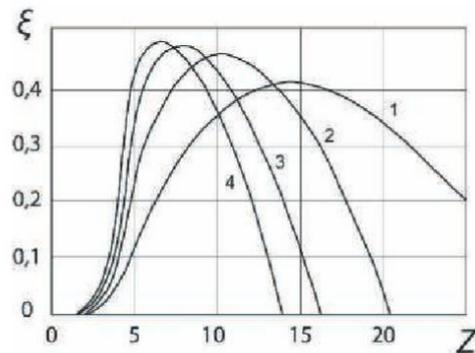
Первый закон ветродвигателя: ветроколесо, работающее под нагрузкой, достигает максимального коэффициента мощности ξ только при определенной быстроходности Z .

Второй закон ветродвигателя: чем меньше лопастей, тем, при прочих равных условиях, обороты крыльчатого ветроколёсного двигателя выше.



Аэродинамическая характеристика ветродвигателя

Третий закон ветродвигателя: мощность крыльчатого ветроколёсного двигателя мало зависит от числа лопастей ветроколеса (воздушный поток тормозит движение лопасти, но и лопасть тормозит движение потока).



Цифры у кривых =
= число лопастей

Основные характеристики ветроколеса

Ометаемая площадь $S = \pi D^2 / 4$, где D - диаметр ветроколеса;

Геометрическое заполнение - отношение площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную ветровому потоку к ометаемой площади S .

Коэффициент мощности ξ (кси) - эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока.

Коэффициент быстроходности

$Z = \omega R / u$, где ω - угловая скорость вращения ветроколеса; R - радиус ветроколеса; ωR - линейная скорость концов лопастей ветроколеса; u - скорость ветра.

Мощность ветроколеса $N_k \cong 0,285 \rho D^2 u^3 \xi$, Вт

где: ρ - плотность воздуха; D - диаметр ветроколеса;

u - скорость ветра; ξ - коэффициент мощности ветроколеса.

Задание 4

Рассчитайте диаметр D крыльчатого ветроколеса, обеспечивающего заданную мощность N_K на приводном валу с учетом климатических условий региона.

Диаметр D выразите из формулы «закон полезного ветра».

N_K – заданная мощность ветроколеса,

ρ – плотность воздуха,

$u_{\text{НОМ}}$ – минимальная скорость ветра, при которой ветродвигатель развивает заданную мощность N_K ,

ξ – коэффициент мощности (использования ветра).

Соответствие среднегодовых скоростей ветров и $u_{\text{НОМ}}$ (по Фатееву)

$$u_{\text{ср}} \leq 5 \text{ м/с}$$

$$u_{\text{ср}} \leq 7 \text{ м/с}$$

$$u_{\text{ср}} > 7 \text{ м/с}$$



$$u_{\text{НОМ}} = 8 \text{ м/с}$$

$$u_{\text{НОМ}} = 10 \text{ м/с}$$

$$u_{\text{НОМ}} = 14 \text{ м/с}$$

$\xi = 0,4 - 0,5$ – коэф. мощности
реального ветроколеса

Зависимость плотности воздуха от температуры
(среднегодовая $t^{\circ}\text{C}$ по СНиП 23-01-99)

Температура, $^{\circ}\text{C}$	35	30	25	20	15	10	5
Плотность, кг/м^3	1,1455	1,1644	1,1839	1,2041	1,2250	1,2466	1,2690
Температура, $^{\circ}\text{C}$	0	-5	-10	-15	-20	-25	
Плотность, кг/м^3	1,2920	1,3163	1,3413	1,3673	1,3943	1,4224	

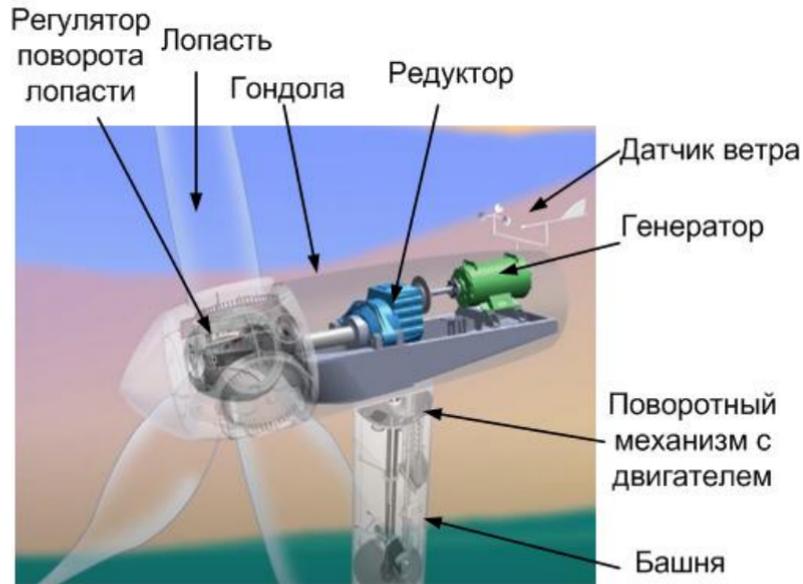
Идеальный ветряк

- 1 – ось вращения параллельна скорости ветра
- 2 – бесконечно большое число лопастей очень малой ширины
- 3 – профильное сопротивление лопастей равно 0 и циркуляция вдоль лопасти постоянна
- 4 – потерянная скорость воздушного потока постоянна по всей ометаемой площади
- 5 – угловая скорость стремится к бесконечности

Гигант ветроэнергетики

Enercon E126 – 7,58 МВт

Диаметр ветроколеса 126 м, высота башни 135 м, общая масса около 6000 т

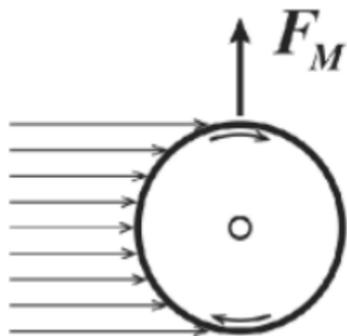


Редуктор – обеспечивает необходимую частоту вращения ротора генератора.

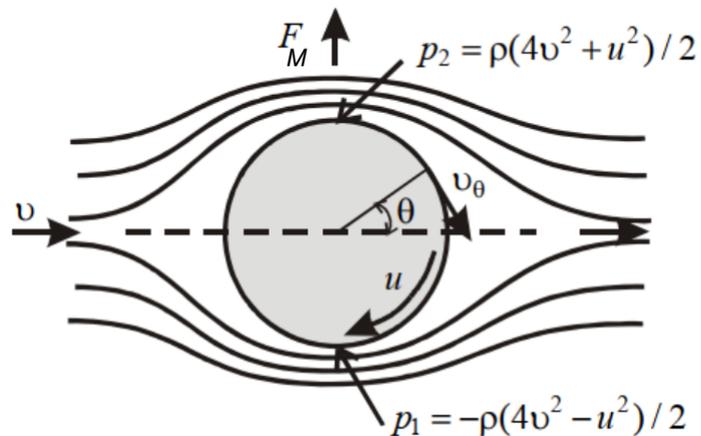
Регуляторы поворота лопастей – изменяют угол поворота лопасти пропорционально изменению скорости ветра, выводят лопасти во флюгерное положение (отключение) при достижении аварийной скорости ветра.

Взаимодействие аэродинамической поверхности с ветром

F_M – сила Магнуса = сила ветра + вращение



Роторная поверхность



Испытательная
ветроустановка, Япония

Новые типы ветроустановок

Технология Saphonian, без
вращающихся частей:
*растянутая на каркасе ткань,
труба с маслом, напорный
гидроаккумулятор в земле.
Колебания «паруса» двигают
поршни гидр. системы*

«Тихий ветер»
Ветрогенератор-труба
INVELOX. Безлопастный ветряк, от 0,5 м/с

Новые типы ветроустановок

Ветряк колебательного типа
Vortex Bladeless

Легкий длинный цилиндр, стоящий вертикально на упругом пруте. Под воздействием силы ветра цилиндра совершает колебательные движения, подобно надувным фигурам

Летающий ветрогенератор аэростатного типа (300 – 600 м).

Оболочка, наполненная гелием, в центре расположены турбина и электрогенератор.

Рекомендуемая литература



- Власов В.К. Ветродвигатели. Теория и практика. ЭБС «Лань» <https://reader.lanbook.com/book/175546#35>

