



Ветроэнергетика

Дисциплина

Общая энергетика

доцент ОЭЭ

Шестакова Вера Васильевна

Ветроэнергетика

Гигант ветроэнергетики:

Ветрогенератор Enercon - 7,58 МВт

Enercon E126 – 7,58 МВт

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

Самый легкий ветрогенератор:

Походный парусный 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.

«Ветреная ветряная энергетика»

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

Наука и жизнь, №7, 2013 г.

ВЭС и экология, опыт 20-ти лет

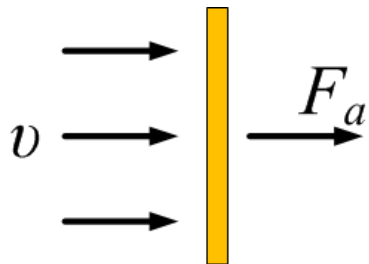
6. Инфразвуковые колебания и вибрации – негативное воздействие на людей, животных и технику (зона отчуждения 350 м) + «вспышки света» из-за лопастей.
7. В районе ветропарка перестают селиться животные и птицы.
8. Утилизация лопастей. К 2035 г. ожидается 200000 тонн на утилизацию. Сжигание?
9. Снижение силы и изменение конфигурации ветров в местности.
10. Экономический порог ветроэнергетики – среднегодовая скорость ветра 5-6 м/с

Мария Целеста, 1872 г.

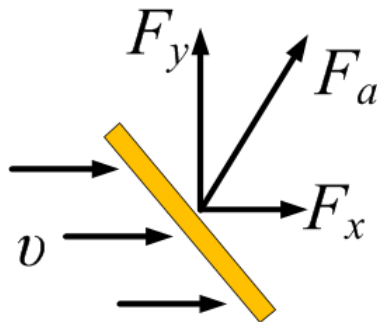
Бель Амика, 2006 г.

Команды
погибли из-за
«голоса
моря»?

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

Крыльчатый

Кольцевой

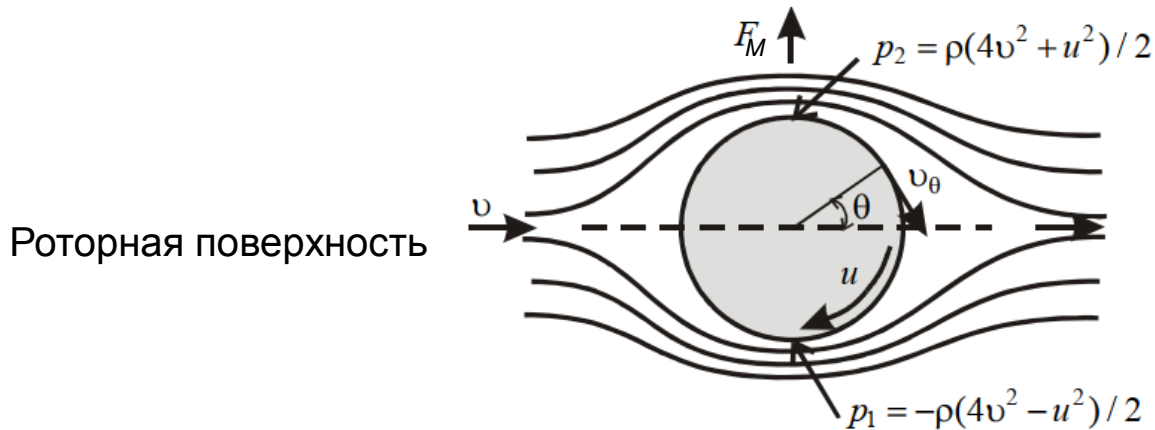
Роторный
(ротор Савониуса)

Ортогональный
(ротор Дарье)

**Самые
распространенные**

Взаимодействие аэродинамической поверхности с ветром

F_M – сила Магнуса = сила ветра + вращение



Голы, забитые по нереальным траекториям –
результат эффекта Магнуса

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

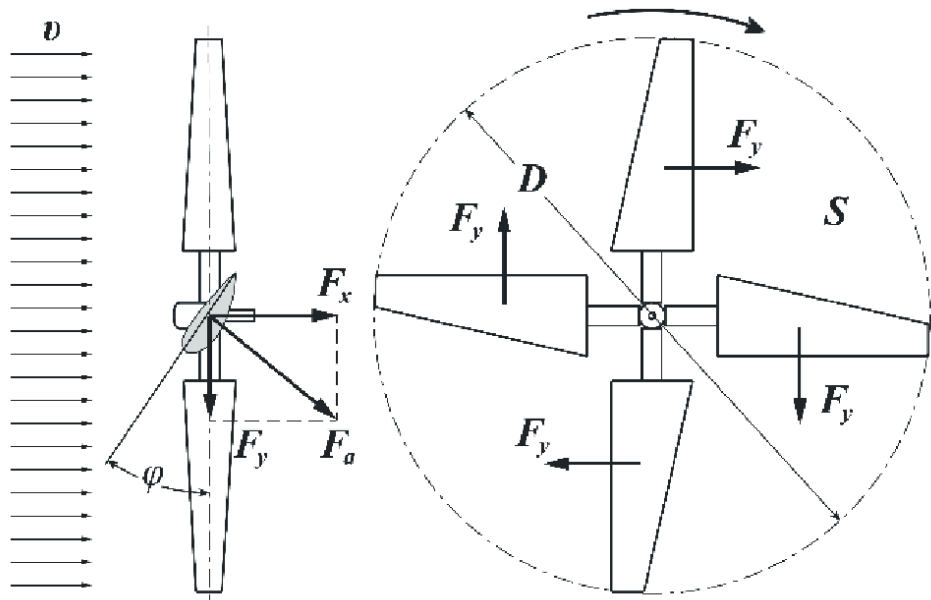
Ветряк колебательного типа
Vortex Bladeless

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

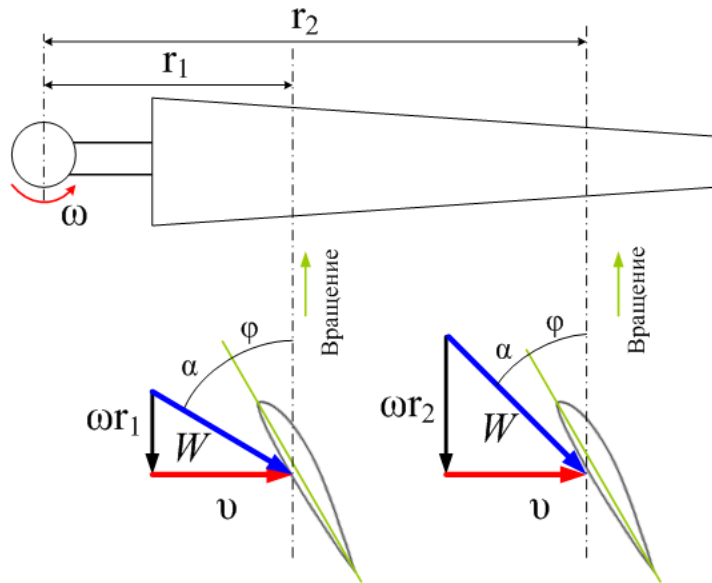
Летающий ветрогенератор аэростатного типа (300 – 600 м).

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

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



Изменение угла атаки в разных сечениях лопасти

- Линейная скорость ωr_1 возрастает –
- уменьшение угла атаки α –
- необходимость уменьшения угла заклинения φ

Основные типы аэродинамического крылового профиля

Двоковыпуклые симметричные  Малое лобовое сопротивление и малая подъемная сила

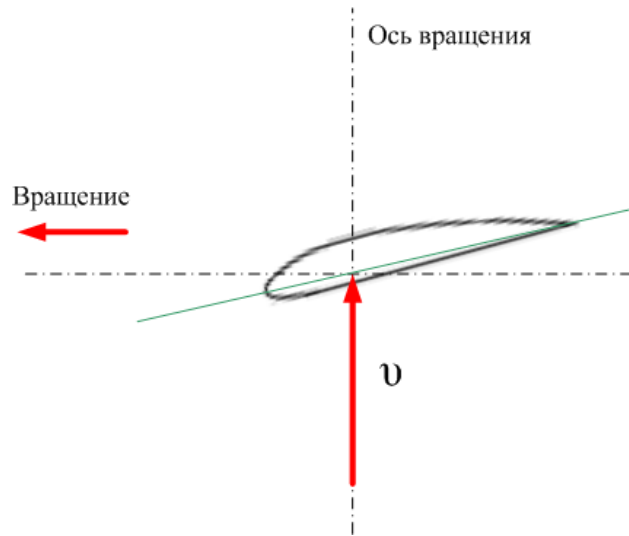
Двоковыпуклые несимметричные 

Плосковыпуклые 

Выпукло-вогнутые  Большое лобовое сопротивление и большая подъемная сила

Задание 1

Составьте план сил и скоростей потока на заданном профиле лопасти.



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,

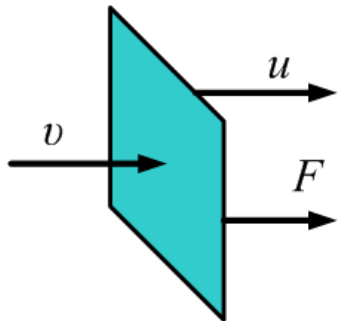
u_{1n} – окружная скорость, реакция от развиваемого лопастями крутящего момента

φ – угол заклинения

α – угол атаки

$\beta = \alpha + \varphi$

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

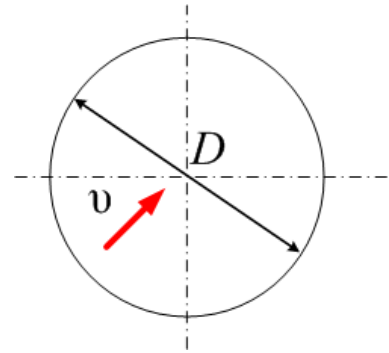
Коэффициент мощности идеального ветроколеса для поверхности, перпендикулярной ветру = коэффициент использования энергии ветра, физический смысл – это аэродинамическое КПД ветроколеса

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

Задание 2

Выведите формулы мощности ветрового потока и мощности ветроколеса с учетом механических потерь.

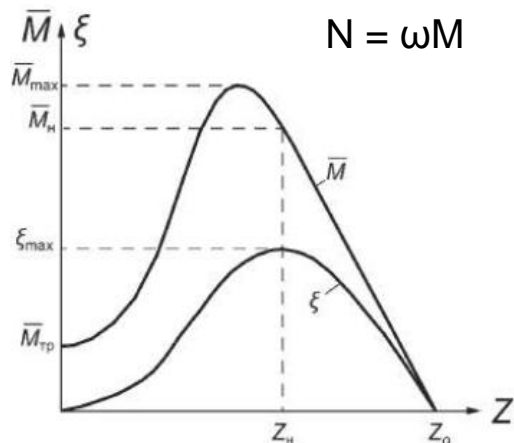
$N_{\text{ВП}}$ – мощность воздушного потока,
 ρ – плотность воздуха (кг/м^3), стандартное значение равно примерно 1.2 кг/м^3 ,
 u – скорость ветра (м/с),
 S – ометаемая площадь (м^2).



Три закона крыльчатых ветроколесных двигателей

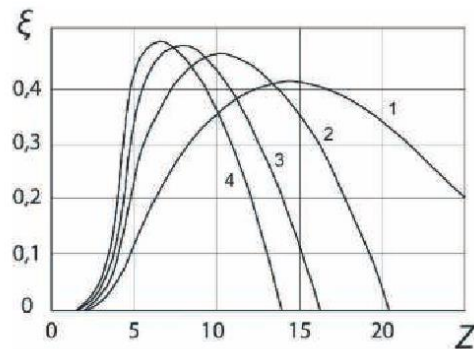
Первый закон ветродвигателя: ветроколесо, работающее под нагрузкой, достигает максимального коэффициента мощности ξ только при определенной быстроходности Z

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 3

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

$\xi_i = 0,593$ – максимальный коэффициент мощности ветроколеса

$e = 0,333$ - идеальный коэффициент торможения потока в плоскости ветроколеса,

КПД – 59%

Основные детали крыльчатых ветрогенераторов

Лопасти – обычно 3.

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

Гондола. В ней расположены редуктор и генератор. Снаружи к ней крепятся лопасти.

Башня – для установки гондолы на определенной высоте.

Датчик ветра – расположен в хвосте гондолы.

Генератор

Редуктор – обеспечивает необходимую частоту вращения ротора генератора.

Поворотный механизм с двигателем – обеспечивает поворот гондолы и лопастей по ветру. Расположен внутри башни.

Рекомендуемая литература



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

