



# 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

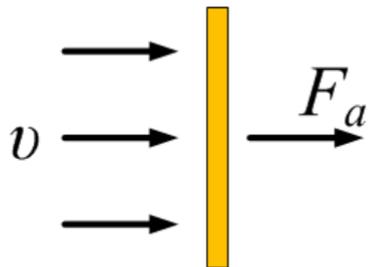
6. Инфразвуковые колебания и вибрации – негативное воздействие на людей, животных и технику (зона отчуждения 350 м) + «вспышки света» из-за лопастей.
7. В районе ветропарка перестают селиться животные и птицы.
8. Утилизация лопастей. К 2035 г. ожидается 200000 тонн на утилизацию. Сжигание?
9. Снижение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

Мария Целеста, 1872 г.

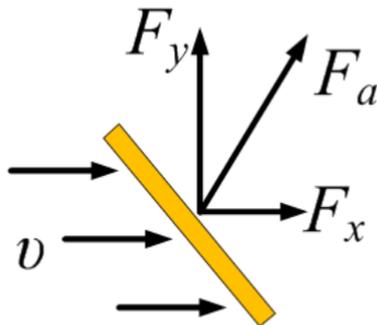
Бель Амика, 2006 г.

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

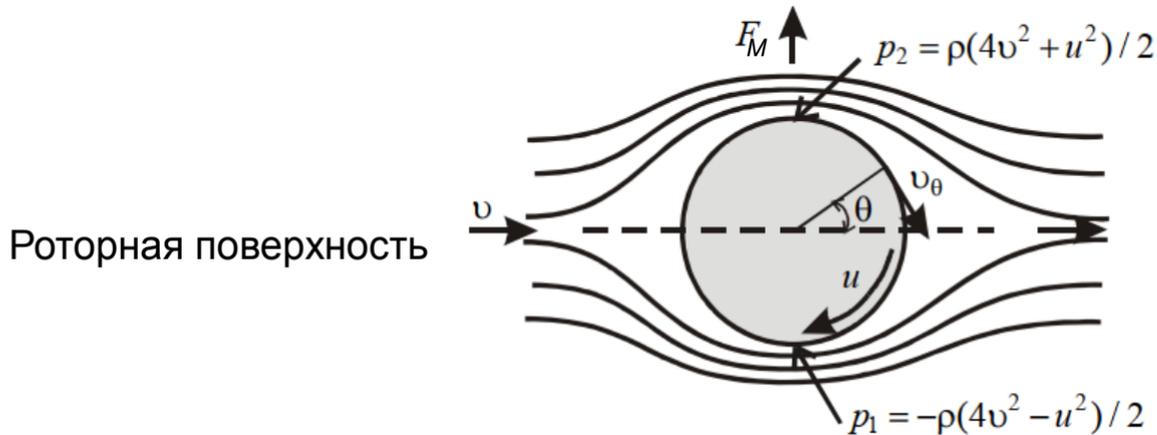
Роторный  
(ротор Савониуса)

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

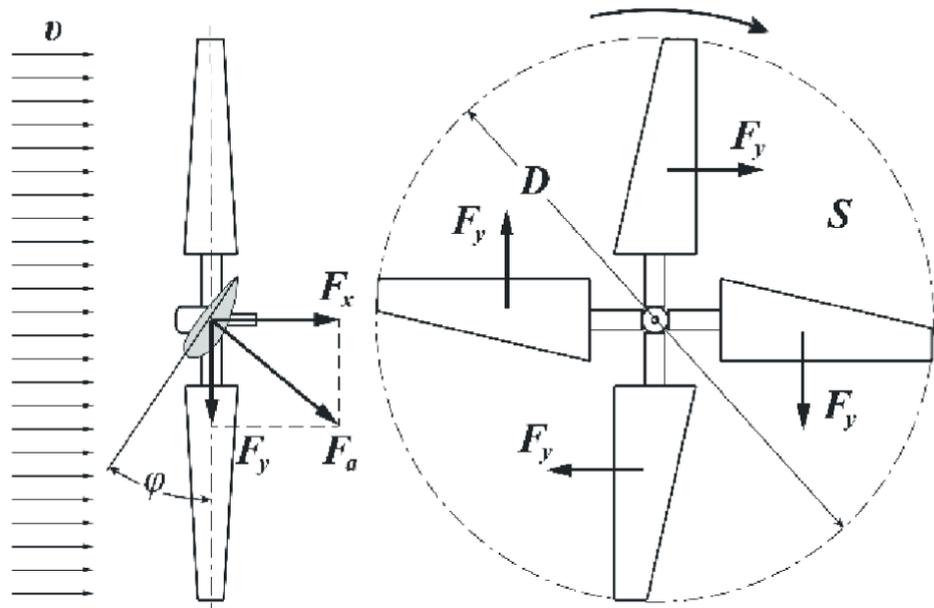
Ветряк колебательного типа  
Vortex Bladeless

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

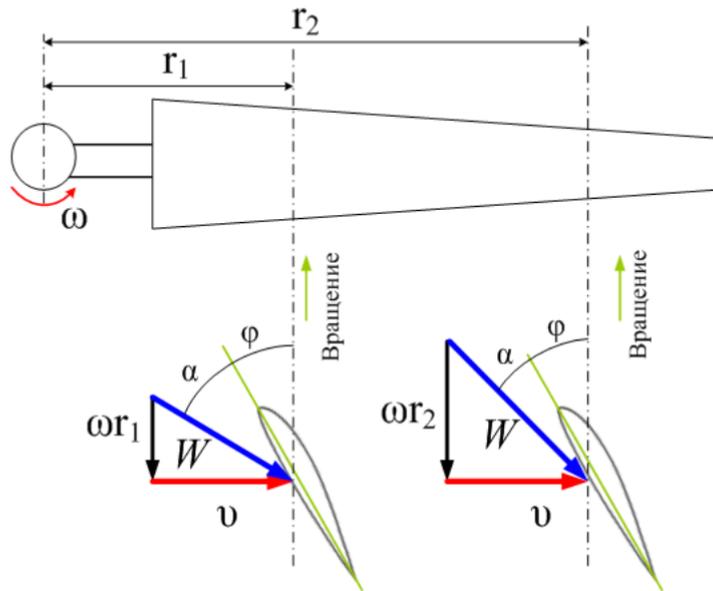
Летающий ветрогенератор аэростатного типа (300 – 600 м).

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
- $\varphi$  – угол заклинения
- $S$  – ометаемая площадь



Изменение угла атаки в разных сечениях лопасти

- Линейная скорость  $\omega r_1$  возрастает –
- уменьшение угла атаки  $\alpha$  –
- необходимость уменьшения угла заклинения  $\varphi$

## Основные типы аэродинамического крылового профиля

Двоковыпуклые симметричные  Малое лобовое сопротивление и малая подъемная сила

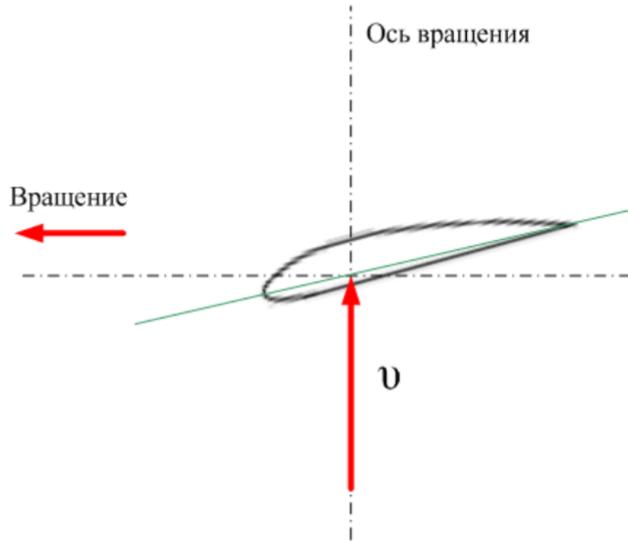
Двоковыпуклые несимметричные 

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,

$\omega$  – угловая скорость вращения колеса,

$r$  – радиус колеса ветротурбины,

$\omega r$  – 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,

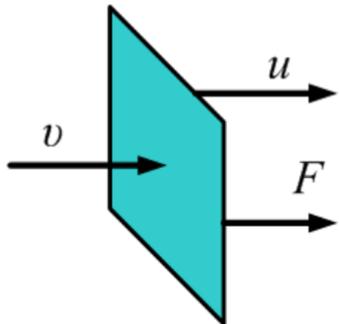
$u_{1n}$  – окружная скорость, реакция от развиваемого лопастями крутящего момента

$\varphi$  – угол заклинения

$\alpha$  – 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

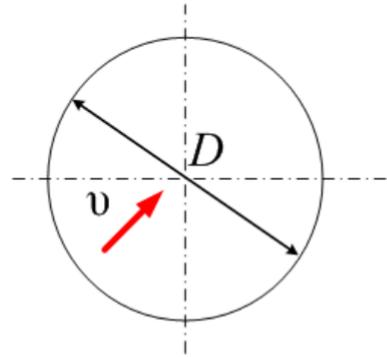
Коэффициент мощности идеального ветроколеса для поверхности, перпендикулярной ветру = коэффициент использования энергии ветра, физический смысл – это аэродинамическое КПД ветроколеса

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

## Задание 2

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

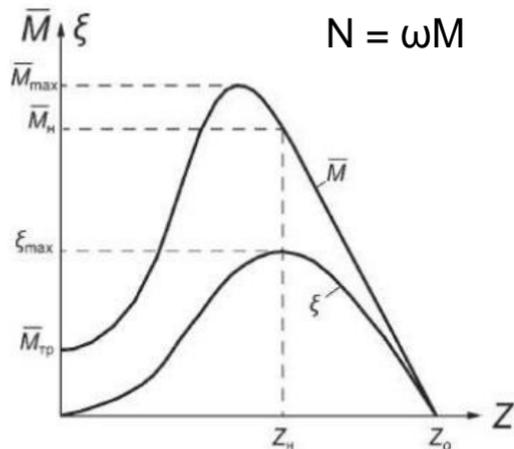
$N_{\text{ВП}}$  – мощность воздушного потока,  
 $\rho$  – плотность воздуха ( $\text{кг/м}^3$ ), стандартное значение равно примерно  $1.2 \text{ кг/м}^3$ ,  
 $u$  – скорость ветра ( $\text{м/с}$ ),  
 $S$  – ометаемая площадь ( $\text{м}^2$ ).



## Три закона крыльчатых ветроколесных двигателей

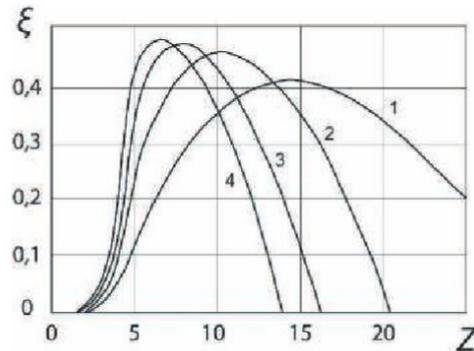
**Первый закон ветродвигателя:** ветроколесо, работающее под нагрузкой, достигает максимального коэффициента мощности  $\xi$  только при определенной быстроходности  $Z$

**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**  $\xi$  (кси) - эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока.

**Коэффициент быстроходности**

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

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

где:  $\rho$  - плотность воздуха;  $D$  - диаметр ветроколеса;

$u$  - скорость ветра;  $\xi$  - 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,

$\rho$  – плотность воздуха,

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

$\xi$  – 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, $\text{кг/м}^3$	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, $\text{кг/м}^3$	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

**Лопасты** – 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>

