

# Ветровая энергетика



# Ветроэнергетика

- Ветроэнергетика, использующая ветроколеса и ветрокарусели, возрождается сейчас, прежде всего, в наземных установках. Ветер дует везде - на суше и на море. Человек не сразу понял, что перемещение воздушных масс связано с неравномерным изменением температуры и вращением земли, но это не помешало нашим предкам использовать ветер для мореплавания. В глубине материка нет постоянного направления ветра. Так как разные участки суши в разное время года нагреваются по-разному можно говорить только о преимущественном сезонном направлении ветра. Кроме того, на разной высоте ветер ведет себя по-разному, а для высот до 50 метров характерны рыскающие потоки. Для приземного слоя толщиной в 500 метров энергия ветра, превращающаяся в тепло, составляет примерно 82 триллиона киловатт-часов в год. Конечно, всю ее использовать невозможно, в частности, по той причине, что часто поставленные ветряки будут затенять друг друга. В то же время отобранная у ветра энергия, в конечном счете, вновь превратится в тепло. Среднегодовые скорости воздушных потоков на стометровой высоте превышают 7 м/с. Если выйти на высоту в 100 метров, используя подходящую естественную возвышенность, то везде можно ставить эффективный ветроагрегат.

# Упряжь для ветра

- Принцип действия всех ветродвигателей один: под напором ветра вращается ветроколесо с лопастями, передавая крутящий момент через систему передач валу генератора, вырабатывающего электроэнергию, водяному насосу или электрогенератору. Чем больше диаметр ветроколеса, тем больший воздушный поток оно захватывает и тем больше энергии вырабатывает агрегат. Принципиальная простота дает здесь исключительный простор для конструкторского творчества, но только неопытному взгляду ветроагрегат представляется простой конструкцией. Традиционная компоновка ветряков - с горизонтальной осью вращения - неплохое решение для агрегатов малых размеров и мощностей. Когда же размахи лопастей выросли, такая компоновка оказалась неэффективной, так как на разной высоте ветер дует в разные стороны. В этом случае не только не удастся оптимально ориентировать агрегат по ветру, но и возникает опасность разрушения лопастей. Кроме того, концы лопастей крупной установки, двигаясь с большой скоростью создают шум. Однако главное препятствие на пути использования энергии ветра все же экономическая - мощность агрегата остается небольшой и доля затрат на его эксплуатацию оказывается значительной. В итоге себестоимость энергии не позволяет ветрякам с горизонтальной осью оказывать реальную конкуренцию традиционным источникам энергии. По прогнозам фирмы Боинг (США) - длина лопастей крыльчатых ветродвигателей не превысит 60 метров, что позволит создать ветроагрегаты традиционной компоновки мощностью 7 МВт. Сегодня самые крупные из них - вдвое "слабее". В большой ветроэнергетике только при массовом строительстве можно рассчитывать на то, что цена киловатт-часа снизится до десяти центов. Маломощные агрегаты могут вырабатывать энергию примерно втрое более дорогую. Для сравнения отметим, что серийно выпускавшийся в 1991 году НПО "Ветроэн" крыльчатый ветродвигатель, имел размах лопастей 6 метров и мощность 4 кВт. Его киловатт-час обходился в 8...10 копеек.

- Большинство типов ветродвигателей известны так давно, что история умалчивает имена их изобретателей. Основные разновидности ветроагрегатов изображены на рисунке. Они делятся на две группы:
  - ветродвигатели с горизонтальной осью вращения (крыльчатые) (2...5);
  - ветродвигатели с вертикальной осью вращения (карусельные: лопастные (1) и ортогональные (6)).Типы крыльчатых ветродвигателей отличаются только количеством лопастей.

1



2



3



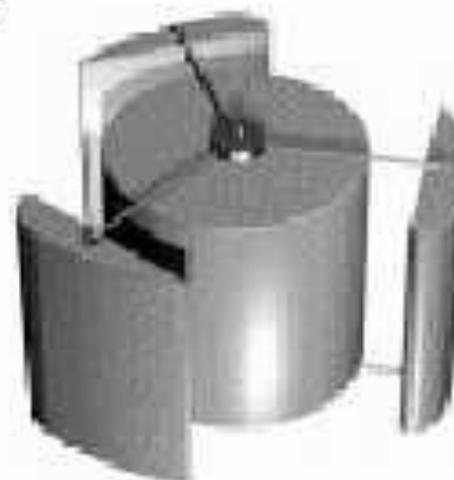
4



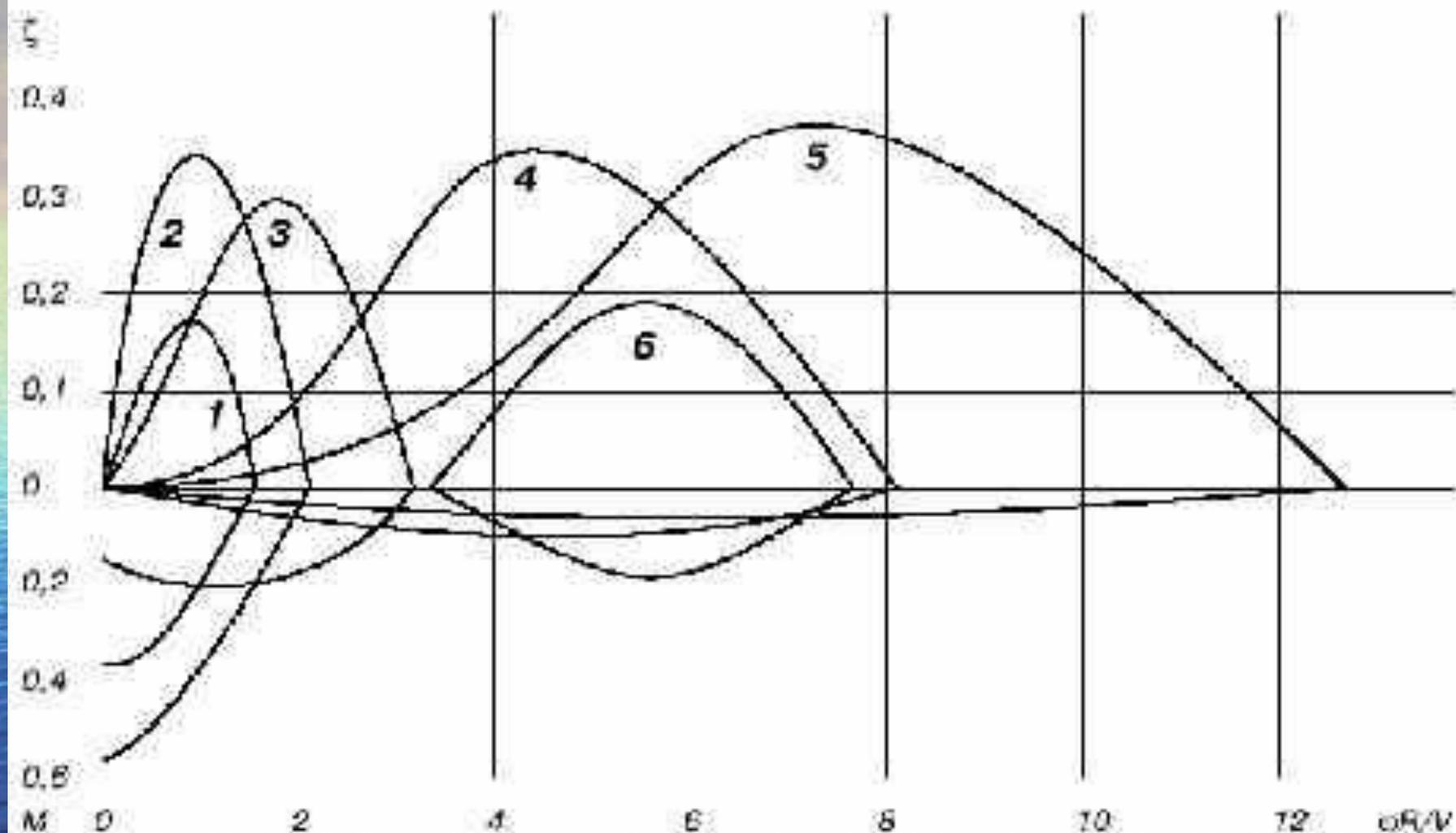
5



6



*Типы негребных винтов*



Коэффициенты использования энергии ветра и вращающие моменты различных типов ветродвигателей

# Крыльчатые

- Для крыльчатых ветродвигателей, наибольшая эффективность которых достигается при действии потока воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей-крыльев, требуется устройство автоматического поворота оси вращения. С этой целью применяют крыло-стабилизатор. Карусельные ветродвигатели обладают тем преимуществом, что могут работать при любом направлении ветра не изменяя своего положения. Коэффициент использования энергии ветра (см. рис.) у крыльчатых ветродвигателей намного выше чем у карусельных. В то же время, у карусельных - намного больше момент вращения. Он максимален для карусельных лопастных агрегатов при нулевой относительной скорости ветра. Распространение крыльчатых ветроагрегатов объясняется величиной скорости их вращения. Они могут непосредственно соединяться с генератором электрического тока без мультипликатора. Скорость вращения крыльчатых ветродвигателей обратно пропорциональна количеству крыльев, поэтому агрегаты с количеством лопастей больше трех практически не используются.
-

# Карусельные

- Различие в аэродинамике дает карусельным установкам преимущество в сравнении с традиционными ветряками. При увеличении скорости ветра они быстро наращивают силу тяги, после чего скорость вращения стабилизируется. Карусельные ветродвигатели тихоходны и это позволяет использовать простые электрические схемы, например, с асинхронным генератором, без риска потерпеть аварию при случайном порыве ветра. Тихоходность выдвигает одно ограничивающее требование - использование многополюсного генератора работающего на малых оборотах. Такие генераторы не имеют широкого распространения, а использование мультипликаторов (мультипликатор [лат. multiplicator умножающий] -- повышающий редуктор) не эффективно из-за низкого КПД последних. Еще более важным преимуществом карусельной конструкции стала ее способность без дополнительных ухищрений следить за тем "откуда дует ветер", что весьма существенно для приземных рыскающих потоков. Ветродвигатели подобного типа строятся в США, Японии, Англии, ФРГ, Канаде. Карусельный лопастный ветродвигатель наиболее прост в эксплуатации. Его конструкция обеспечивает максимальный момент при запуске ветродвигателя и автоматическое саморегулирование максимальной скорости вращения в процессе работы. С увеличением нагрузки уменьшается скорость вращения и возрастает вращающий момент вплоть до полной остановки.

# Ортогональные

- Ортогональные ветроагрегаты, как полагают специалисты, перспективны для большой энергетики. Сегодня перед ветропосадками ортогональных конструкций стоят определенные трудности. Среди них, в частности, проблема запуска. В ортогональных установках используется тот же профиль крыла, что и в дозвуковом самолете (см. рис. (6)). Самолет, прежде чем "опереться" на подъемную силу крыла, должен разбежаться. Так же обстоит дело и в случае с ортогональной установкой. Сначала к ней нужно подвести энергию - раскрутить и довести до определенных аэродинамических параметров, а уже потом она сама перейдет из режима двигателя в режим генератора. Отбор мощности начинается при скорости ветра около 5 м/с, а номинальная мощность достигается при скорости 14...16 м/с. Предварительные расчеты ветроустановок предусматривают их использование в диапазоне от 50 до 20 000 кВт. В реалистичной установке мощностью 2000 кВт диаметр кольца, по которому движутся крылья, составит около 80 метров. У мощного ветродвигателя большие размеры. Однако можно обойтись и малыми - взять числом, а не размером. Снабдив каждый электрогенератор отдельным преобразователем можно просуммировать выходную мощность вырабатываемую генераторами. В этом случае повышается надежность и живучесть ветроустановки.

# Неожиданные применения ветроустановок

- Реально работающие ветроагрегаты обнаружили ряд отрицательных явлений. Например, распространение ветрогенераторов может затруднить прием телепередач и создавать мощные звуковые колебания. Ветродвигатели могут не только вырабатывать энергию. Способность привлекать внимание вращением без расходования энергии используется для рекламы. Наиболее простой - однолопастный карусельный ветродвигатель представляет собой прямоугольную пластинку с отогнутыми краями. Закрепленный на стене он начинает вращаться даже при незначительном ветре. На большой площади крыльев карусельный трех-четырёх лопастный ветродвигатель может вращать рекламные плакаты и небольшой генератор. Запасенная в аккумуляторе электроэнергия может освещать крылья с рекламой в ночное время, а в безветренную погоду и вращать их.

# Опишем некоторые ветряные генераторные установки

- В состав многих ветровых установок входят такие необходимые элементы как разборная мачта, блок управления, нагреватель, соединительные кабели. Кроме того, дополнительно могут предлагаться солнечные батареи, аккумуляторы, инверторы. Однако, указанные элементы, как правило, гораздо дешевле можно приобрести в других местах. Так в частности, предлагаются инверторы типа АКСИОМ или ТРАНСВАТТ (Германия) - с трапециевидной формой тока 1,5 кВт за 1738 \$ или типа ГЛОБАЛ (Германия) - с синусоидальной формой тока 1 кВт за 1711 \$. В тоже время, аналогичный по мощности инвертор (с функцией UPS) МАП "Энергия" (см. [www.invertor.ru](http://www.invertor.ru)) стоит порядка 250 - 300(!) \$. Это отечественная разработка (заявка на патент №2001125519), на основе новейших импортных комплектующих. Для справки: инвертором называется электронное устройство преобразующее постоянное напряжение (например, аккумуляторов) в переменное (в нашем случае - в 220 В).
-

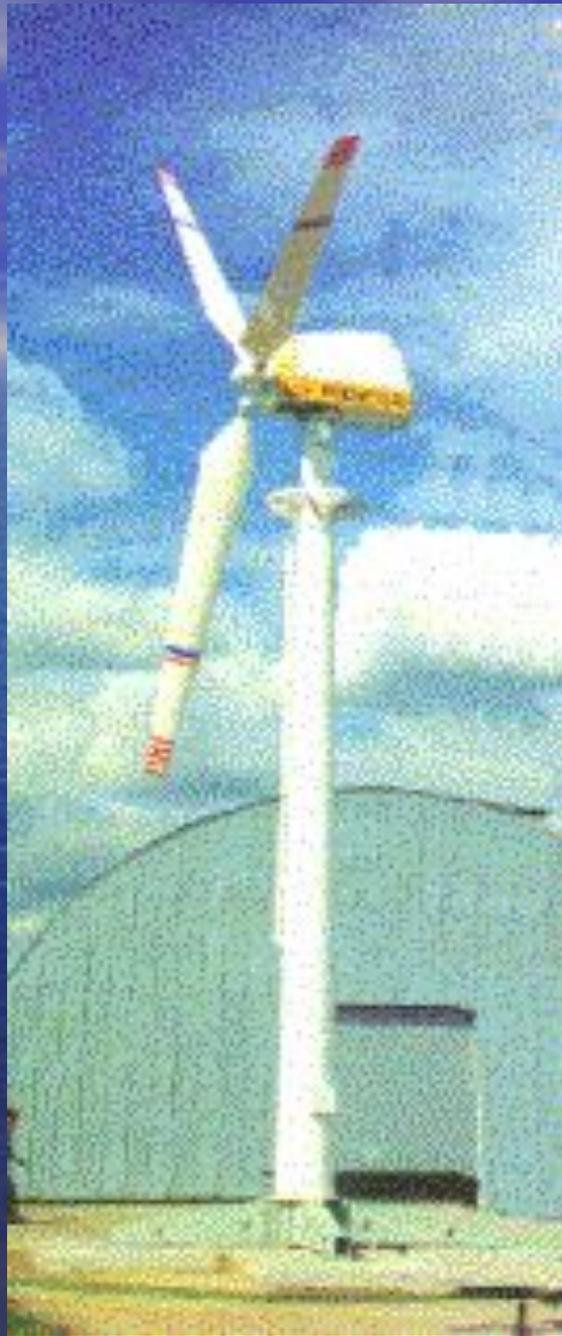
# ГОСУДАРСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ КБ "РАДУГА"

- Автономная ветроэнергетическая установка мощностью 1 кВт "Радуга-001"
- 
- Мощность генератора номинальная - 1,0 кВт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 3,6:25 м/с
- Система генерирования электрической энергии обеспечивает выдачу однофазного переменного тока частотой 50 Гц, а также выход с аккумуляторной батареи 12 В и 24 В постоянного тока. В безветренную погоду система аккумулирования обеспечивает электроэнергией в течение 4-х суток при экономном режиме потребления. Предусмотрена возможность комплектации ВЭУ панелями солнечных батарей.
-



# ветроэнергетическая установка мощностью 8 кВт "Радуга-008"

- 
- Мощность генератора номинальная - 8,0 кВт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 4,5:25 м/с
- Система генерирования электрической энергии обеспечивает выдачу 3-х фазного переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380/220 В, секционированное подключение потребителей (три канала по 2-3 кВт с возможностью их независимого включения). Предусмотрена возможность комплектации ВЭУ панелями солнечных батарей, аккумуляторами, дизель-электрической установкой. В штить аппарат бесперебойного питания обеспечит электроэнергией мощностью до 500 Вт.
- В установке имеется система автоматического управления, обеспечивающая автоматические запуск и управление ВЭУ в рабочем диапазоне скоростей ветра, автоматические или по командам перевод ВЭУ в режим холостого хода при скорости ветра, превышающей границу рабочего диапазона, или при возникновении аварийной ситуации. При проектировании установки учтены условия эксплуатации в районах Крайнего Севера. Агрегаты и узлы установки испытаны на соответствующие температуры эксплуатации в термобарокамерах.



# ЦНИИ "ЭЛЕКТРОПРИБОР"

- **Ветроэлектрическая установка УВЭ-500**

- 
- Предназначена для автономного снабжения электроэнергией индивидуальных потребителей.
- Номинальная мощность - 500 Вт
- Выходное напряжение - постоянное 12, 24 В, переменное (с инвертором) - 220 В.
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 2,5:25 м/с

- **Описание разработки**

Установка обеспечивает использование осветительных приборов, электроинструментов, бытовых электроприборов, теле- и радиоаппаратуры, зарядку аккумуляторов. Автономно вырабатывает при работе в буферном режиме с аккумуляторной батареей следующие виды электропитания:

- напряжение постоянного тока 24 В;
- переменное напряжение 220 В 50 Гц (в комплекте с инвертором).

Состав установки: ветроколесо, генератор с поворотным устройством, разборная мачта, блок управления, нагреватель, соединительные кабели. Масса установки без инвертора - 60 кг.

Емкость подключаемой потребителем кислотной или щелочной аккумуляторной батареи - не менее 190 Ач. Установка может работать в комплексе с солнечной батареей мощностью до 300 Вт, а также в режиме без аккумулятора для питания нагрузки, не требующей стабилизации напряжения.

Предусмотрены: индикация состояния аккумулятора, защита аккумулятора от перезаряда и переразряда, автоматическая защита ветроагрегата от механических повреждений при скорости ветра, превышающей 12 м/с. Мощность по постоянному току - до 500 Вт при скорости ветра 10 м/с. Рабочий диапазон скоростей ветра - 3-25 м/с. Диаметр ветроколеса - 2,2 м. Высота мачты - 4,5 м.





# РЫБИНСКИЙ ЗАВОД ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- **Ветроэнергетическая установка "ВЕТЭН-0,16"**

- Позволяет получать электроэнергию постоянного тока напряжением 12 В и переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц путём преобразования энергии ветра.
- Мощность генератора 160 Вт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 3,5:25 м/с

- **Ветроэнергетическая установка "ВТН8-8"**

- Ветроагрегат предназначен для преобразования энергии ветра в электрическую энергию переменного трёхфазного тока напряжением 230/400 В частотой 50 Гц.
- Область применения - в составе ветроэлектрических установок (отопительных, зарядных, водоподъёмных, катодной защиты и т.п.).
- Мощность генератора - 8000 Вт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 3,5:25 м/с
- Нижнее значение температуры - 40°C

- **Ветронасосная установка "Водолей"**

- Предназначена для подъёма воды из источников с помощью энергии ветра.
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 3:25 м/с
- Производительность при скорости ветра 5 м/с и общей высоте подъёма воды 10 м не менее 300 л/час
- Максимальная высота подъёма воды 9,6 м

- **Установка ветроэлектрическая "Шексна-1"**

- Применяется на объектах, удалённых от энергосистем и расположенных в различных климатических районах с благоприятными ветровыми условиями. Преимущественная область использования - отопление, освещение, питание бытовых электроприборов, систем автоматики и сигнализации и т.д.
- Номинальная мощность - 0,5 кВт

# ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАКЕТНЫЙ ЦЕНТР "КБ ИМЕНИ. АКАДЕМИКА В.П. МАКЕЕВА

- 
- **Ветроэнергетическая установка ВА05**
- Номинальная мощность - 30 кВт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 4:30 м/с
- 
- **Ветроустановка HR-40**
- Совместно с фирмой "Magnet Motors" (г. Штарнберг, ФРГ) ведутся разработки ветроустановок мощностью 10, 40, 300 кВт на базе серийно выпускаемых немецкой стороной установок HR-1, HR-40, YR-300.
- Без мультипликатора, генератор бегущей волны с непосредственным приводом, возбуждаемый от постоянных магнитов.
- Номинальная мощность - 40 кВт.
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 3,5:26 м/с.
- 
- **Ветродизельная электростанция ВДЭС-100**
- Мощность ВЭУ - 100 кВт.
- Мощность двух дизель-электрических станций -  $60+30=90$  кВт.
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 4:25 м/с.

# АО "ВЕТРОЭНЕРГОМАШ"

- 
- **Агрегат ветроэлектрический АВЭУ6-4М**
- Номинальная мощность генератора - 4 кВт
- Рабочий диапазон скоростей ветра - 4,5:40 м/с.
- Номинальное напряжение - 400/230 В.

# Принципы преобразования энергии ветра

- Воздушный поток, как и любое движущееся тело, обладает энергией движения или запасом кинетической энергии, которая преобразуется в механическую энергию. Мощность  $W$ , Вт воздушного потока с поперечным сечением  $F$ , м<sup>2</sup>

Секундная масса  $m$  воздуха, протекающая со скоростью  $v$  через это сечение, кг/с

$$W = \frac{mv^2}{2}$$

$$m = \rho \cdot F \cdot v$$

Таким образом, мощность потока, Вт

$$W = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot F}{2}$$

- где  $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха для нормальных условий ( $t = 15^\circ\text{C}$ ,  $p = 101,3 \text{ кПа}$ ).
- Ветроколесо может преобразовывать в полезную работу только часть этой энергии, которая оценивается коэффициентом использования энергии ветра  $\xi$ .
- Для идеального крыльчатого ветроколеса максимально достижимая величина  $\xi$ , рассчитанная по классической теории Жуковского Н.Е. и теории Сабинина Г.Х., соответственно равна:
- $\xi = 0,593$  – Жуковский Н.Е.;
- $\xi = 0,687$  – Сабинин Г.Х.
- Современные ветродвигатели преобразуют в механическую работу не более 45...48% кинетической энергии ветрового потока. Поэтому теоретическая максимальная мощность ветроустановки не превышает

$$W_T = \frac{\xi \cdot \rho \cdot v^3 F}{2}$$

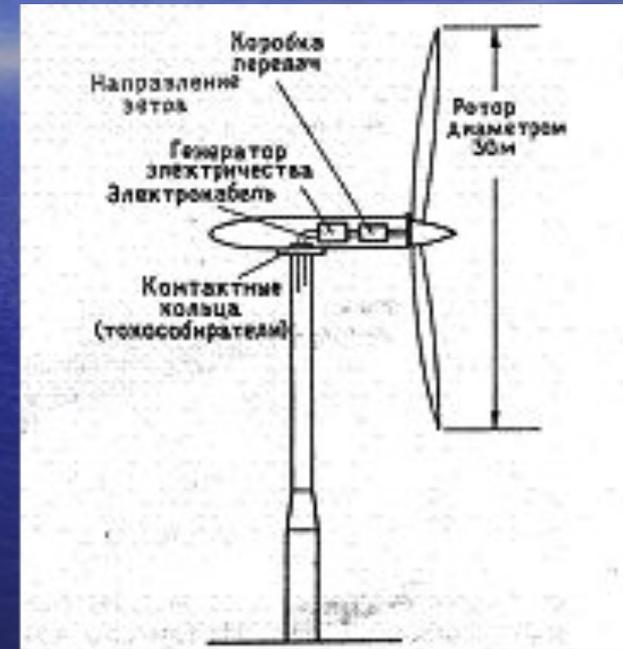
Удельная мощность потока, имеющего поперечное сечение 1 м<sup>2</sup>, при  $t = +15$ ;  $P = 101,3 \text{ кПа}$

# Показатели мощности ветрового потока и ветроустановки (теоретические)

- В зависимости от назначения ветроустановки механическая энергия с помощью исполнительных механизмов (генератора, компрессора, насоса и др.) может быть преобразована в электрическую, тепловую или механическую энергию, а также энергию сжатого воздуха.
- Для установки с горизонтальной осью пропеллерного типа (рис. 14) теоретическую мощность можно определить по выражению

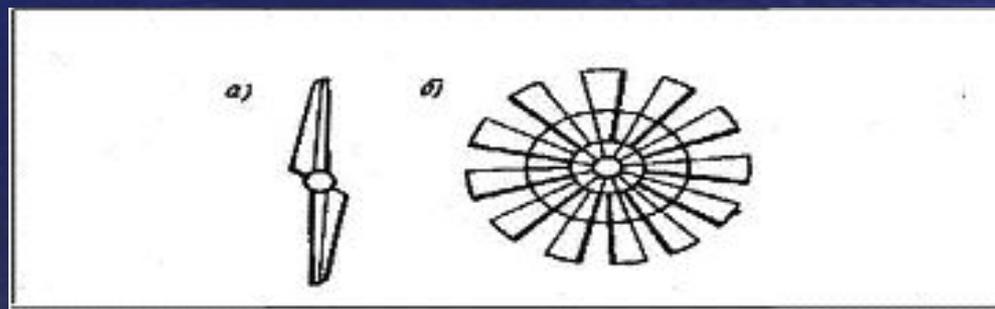
$$W = \rho \cdot \pi \cdot v^3 \cdot \frac{R^2}{2} \cdot C_p$$

$$F = \pi \cdot R^2$$

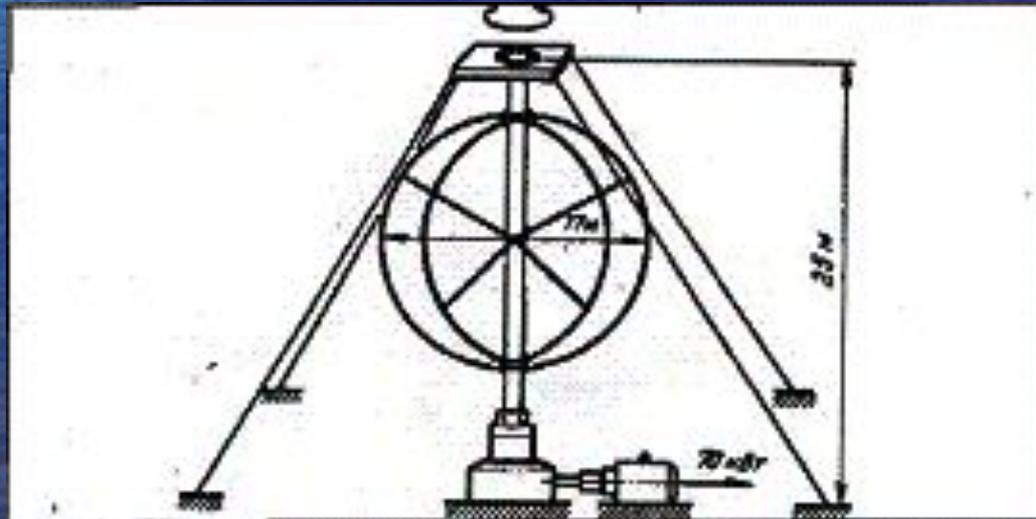


- где  $R$  – радиус ветроколеса, м;  $F$  – площадь, ометаемая колесом, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость воздуха, м/с;  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра.
- Постоянные изменения скорости ветра приводят к тому, что мощность, развиваемая двигателем, изменяется в очень больших пределах от нуля во время штиля до величины, в десятки раз превышающей установленную мощность при буревых порывах ветра.

Схема ветроколеса пропеллерного типа изображена на рис. 15



- Эти типы ветроколес работают в результате наличия разности сил лобового давления на лопастях относительно оси вращения, образуемых при обдувании их ветром.
- Большинство из указанных типов имеют довольно простую конструкцию, однако и очень малый коэффициент использования энергии ветра .
- В последние годы большое развитие получил так называемый профиль Дарье для ветродвигателей с вертикальной осью (рис. 16).



Этот ветродвигатель отличается тем, что его ротор состоит из 2–4 изогнутых лопастей, имеющих аэродинамический профиль.

Коэффициент использования энергии ветра для этих профилей равен

$$\xi = 0,3 \dots 0,32$$

- Преимущество этого типа ветродвигателей:
- меньшая относительная масса на единицу мощности;
- - большая быстроходность;
- - отсутствие механизма ориентации по потоку.
- В настоящее время наиболее совершенными являются крыльчатые ветродвигатели с горизонтальной осью вращения ветроколеса.
- Такие ветродвигатели более быстроходны, имеют меньшую относительную массу, снабжены устройствами, автоматически регулирующими развиваемую мощность, ограничивающими частоту вращения и ориентирующими ось вращения ветроколеса по направлению вектора скорости ветра.
- У лучших быстроходных ветроколес число лопастей – 2...24.
- Одна из основных характеристик ветроколеса – быстроходность, которая определяется по выражению

$$\Sigma = \frac{\omega \cdot R_{\text{в.к.}}}{v}$$

- где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $r$  – радиус ветроколеса, м.
- Для тихоходных колес, используемых, например, для привода насосов:

$$Z = 1,5 \dots 3$$

Для быстроходных колес, используемых для привода генератора:

$$Z = 5 \dots 8$$