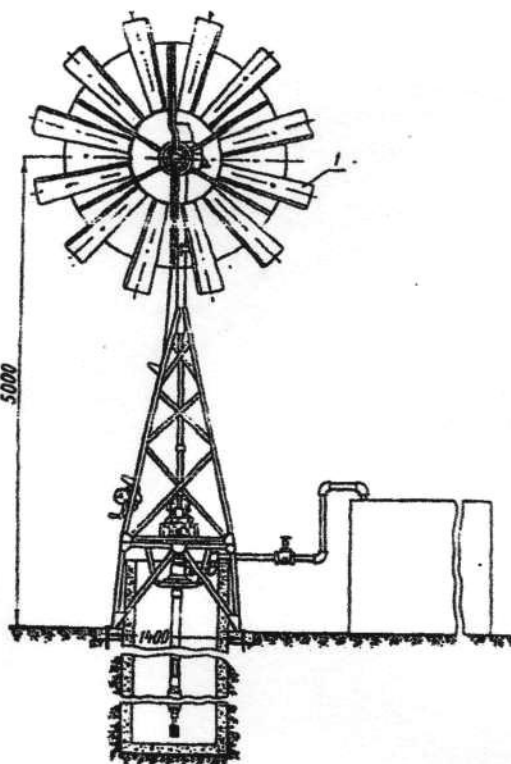


МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
(ННГАСУ)

Факультет инженерно-экологических систем и сооружений  
Кафедра теплогазоснабжения

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии  
для получения теплоты в системах теплоснабжения:  
ЭНЕРГИЯ ВЕТРА**

Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения  
специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и  
270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция



Нижегород  
ННГАСУ  
2013

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения: энергия ветра [Текст]: Методическая разработка для студентов очной и заочной форм обучения специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и 270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет: сост. Г.М. Климов. — Н.Новгород: НН1 АСУ, 2013. — 50 с.: ил.

В методической разработке приведена информация об энергии ветра и её использовании для получения теплоты в системах теплоснабжения. С этой целью в основном реализуется ступенчатый метод: энергия ветра - механическая энергия - электроэнергия - теплота. Рассмотрены также схемы для получения теплоты при использовании энергии ветра совместно с другими нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии (НиВЭИ). Приводимая информация предназначена для использования студентами указанных специальностей (140104.65 и 270109.65) при написании рефератов и выполнении расчётно-графической работы по дисциплине «НиВИЭ».

Рис. 25. Табл. 4. Библиография 13 назв.

Составитель: Г,М. Климов

Рецензент - доцент каф. ТГС Е.Н. Цой

Компьютерный набор - Д.А. Юрочкина гр. 306

1. Основные характеристики ветра	4
2. Что такое «роза ветров»	8
2.1 Флюгер. Энергия воздушного потока	9
2.2 Ветроэнергетический кадастр	10
3. Ветроэнергетические ресурсы	12
3.1 Ветроэнергетика	13
3.2 Энергетические ресурсы ветра	14
3.3 Краткая история развития ветроэнергетики	16
4. Классификация ветроустановок	17
5. Типы ветродвигателей	20
6. Элементы ветряных энергетических установок	23
6.1 Роторы (коллекторы)	24
6.2 Аккумуляторы энергии	24
7. Схемы ветроагрегатов	35
8. Ветроагрегаты для получения электроэнергии	39
8.1 Схемы электрических ветроагрегатов	40
9. Расчёт ветродвигателей	41
10. Установки для получения теплоты	43
11. Источники. Вопросы для самопроверки	47
12. Приложение А	
Вопросы для самопроверки	
1. Что такое ветроэнергетический кадастр?	
2. Какие (примерно) скорости ветра пригодны для работы ветроэнергетических установок?	
3. Что называется коэффициентом мощности ветродвигателя?	
4. Чему равна удельная мощность ветропотока?	
5. Чему равен максимальный коэффициент мощности идеального ветродвигателя с горизонтальной осью?	
6. В каких случаях применяются трехлопастные ветродвигатели, а в каких - многолопастные?	
7. За счет чего появляется окружная сила, с которой ветропоток действует на лопасти вращающегося ветроколеса?	
8. Чему примерно равен оптимальный коэффициент мощности для 2-х, 3-х и многолопастных ветроколес?	
9. Как зависит коэффициент мощности ветродвигателя от коэффициента быстроходности ветроколеса?	
10. Что такое ветропарк? Где чаще всего создают ветропарки?	

## 1. Основные характеристики ветра

Ветер – постоянное циркуляционное перемещение воздушных масс в атмосфере, вызванное неравномерным нагревом Солнцем земной поверхности, - является одним из наиболее мощных источников энергии, которая при благоприятных условиях может быть использована в народном хозяйстве. Ветроэнергетические установки обычно используют ветер на высотах до 70 м от поверхности земли, поэтому рассмотрим его характеристики в этом слое. На больших высотах (8 – 12 км), в так называемой тропопаузе, имеют место более постоянные ветры, названные струйными течениями. Эти ветры отличаются большой скоростью (25 – 80 м/с), их энергетическая ценность значительно выше, а характеристики существенно отличаются от характеристик приземного ветра. Однако использование этих течений связано с преодолением серьезных технических трудностей при передаче электрической энергии на землю с больших высот, и, вероятно, проблема использования энергии струйных течений практически может быть решена не ранее чем через 30 лет.

Ветер является сложным геофизическим процессом, поэтому его изменчивость можно прогнозировать только с той или иной степенью вероятности.

Важнейшей энергетической характеристикой ветра, оценивающей его кинетическую энергию, является скорость. Под влиянием ряда метеорологических факторов (возмущения атмосферы, изменения солнечной активности и количества тепловой энергии, поступающей на землю, и т. д.), а также рельефных условий местности скорость ветра изменяется по величине и направлению. Направление вектора скорости показывает его угловое положение относительно направления, принятого за начало отсчета (обычно, это северное направление).

Для измерения мгновенной скорости ветра пользуются флюгером Вильда или малоинерционными анемометрам; осредненную скорость за длительные промежутки (несколько десятков секунд или минут) измеряют анемометрами различных типов, которые имеют показывающие приборы и регистрирующую часть, обеспечивающую запись скоростей на ленту. Погрешность измерения скорости анемометром может составлять 5 – 7 %, поэтому, если требуется большая точность, например при испытаниях ветродвигателей и их моделей в аэродинамических трубах, используют трубку Пито, соединенную с микроманометром [35].

В то время как мгновенная скорость ветра оказывает существенное динамическое воздействие на ветродвигатель и влияет на работу систем автоматического регулирования, выработка энергии зависит в первую очередь от осредненной скорости как по времени, так и по площади поверхности, ометаемой ветроколесом.

Средняя скорость ветра  $\bar{v}$  за промежуток времени определяется отношением суммы измеренных значений мгновенной скорости  $v_i$  к количеству измерений  $n$  за этот промежуток времени:  $\bar{v} = (\sum v_i) : n, \text{ м/с}$  (1)

Аналогично, среднесуточная скорость  $\bar{v}_{\text{сут}}$  определяется как частное от деления на 24 суммы среднечасовых скоростей, а среднегодовая:  $\bar{v}_г = (\sum v_{\text{сут}}) : 365 \text{ м/с}$  (2)

Средние значения скоростей в рассматриваемом районе определяют по данным наблюдений метеостанций или специальных анеморазведок. На большинстве метеостанций показания приборов, измеряющих скорость ветра, регистрируют 6 раз в сутки, через каждые 4 ч. Эти показания дают возможность получить достаточно точные сведения о среднепериодных скоростях, при этом расхождения их с данными, вычисленными по среднечасовым скоростям, не превышают 1 %.

Однако на показания анемометров влияют макро- и микрорельеф окружающей местности, степень закрытости метеостанции, что следует принимать во внимание при пересчете скоростей для каждого конкретного района, даже если он расположен сравнительно недалеко от станции.

**Средние скорости ветра существенно меняются в различные периоды суток, в разные месяцы и сезоны. В соответствии с этим различают суточный, месячный и сезонный ход скоростей, характеризующий общую тенденцию их изменения в указанные периоды. Эти изменения оценивают макроструктуру воздушного потока.**

Предельные значения скоростей ветра, данные об его интенсивности и микроструктуре потока за относительно короткие интервалы времени являются важными режимными характеристиками, знание которых необходимо при расчетах прочности агрегатов, проектировании устройств автоматического регулирования, ориентации и т. п.

**Пульсация скорости, а следовательно, и энергии потока вызывается общим характером формирования структуры ветра, местными особенностями, а также влиянием ландшафтных и рельефных условий. На важность этой характеристики указывает то обстоятельство, что часто решающей причиной разрушений агрегата является не столько общий уровень скорости ветра, сколько динамика потока и вариации скорости за достаточно короткие промежутки времени. Они оцениваются ускорениями потока, длительностью порыва, совпадением порывов в различных точках поверхности, ометаемой ветроколесом, и коэффициентом порывистости потока  $K_{\text{пор}}$ , являющимся отношением максимальной замеренной скорости  $v_{\text{max}}$  к средней  $\bar{v}$  за избранный интервал времени (обычно, не более 2 мин):  $K_{\text{пор}} = v_{\text{max}} : \bar{v}$  (3)**

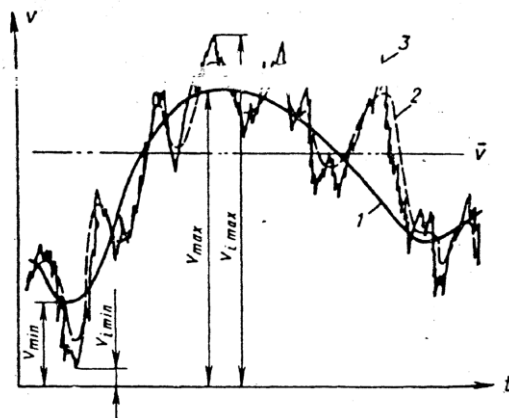


Рис. 1. Схематическое изображение записи скорости ветра

Если схематически представить образец записи скорости ветра в одной точке графиком на рис. 1, то можно обнаружить колебания 1, формирующие порывы, колебания 2, соответствующие микропорывам ветра, и, наконец, микропульсации 3 скорости [10]. При длительном интервале записи сезонные изменения общего уровня скорости можно считать закономерными явлениями, связанными с изменчивостью элементов крупномасштабной циркуляции атмосферы, а накладываемые на них вихревые образования более мелких масштабов, формирующие порывы ветра, - случайными.

**Обычно на метеостанциях фиксируется средняя скорость ветра за интервал времени не менее 2 мин.** На практике часто нужно иметь характеристики ветра за несколько секунд, которые, естественно, могут быть иными. Оценивая вероятность  $F(v)$  того, что мгновенная скорость ветра может быть больше, чем средняя измеренная, находим расчетные скорости с заданной нормой обеспеченности: 
$$F(v) = e^{-\left(\frac{v}{B}\right)^{\gamma'}}, \quad (4)$$

где  $\beta$  и  $\gamma'$  - параметры, зависящие от ветрового режима и для метеостанций 7 - 8-го классов открытости равные соответственно 1,3 - 1,5 и 5-6,5 [2].

Коэффициент порывистости ветра является функцией ряда факторов и для разных географических зон его характеристики варьируют в больших пределах. **Исследованиями установлено, что чем больше скорость ветра, тем меньше величина порывистости, хотя при этом абсолютные отклонения скорости от средней возрастают [3, 4, 28, 55].**

**Изменения  $K_{пор}$ , показанные на рис. 2, характеризуют порывистость потока, площадь сечения которого не велика и равна площади, омываемой крыльчаткой анемометра, расположенными на расстоянии 10 м один от другого.** Суточный ход скорости ветра в пунктах, находящихся на расстоянии нескольких километров один от другого, показывает, что даже среднечасовые скорости существенно различны между собой (см.рис.4).

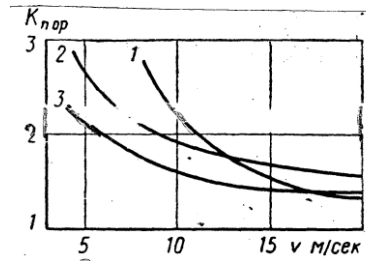


Рис. 2. Коэффициенты порывистости скорости ветра:

1 – по данным Г. Савицкого; 2 – по данным В. Большакова; 3 – по данным автора

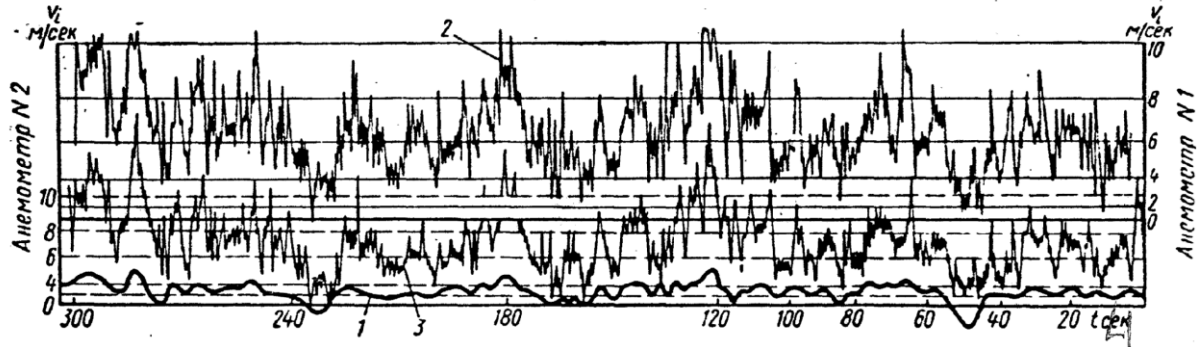


Рис. 4. Одновременная запись скорости ветра:

1 – электроанемометром; 2 – малоинерционным анемометром № 1; 3 – малоинерционным анемометром № 2.

Рассмотрим характеристики, позволяющие судить об изменениях скорости ветра по высоте приземного слоя толщиной до 300 м; оценим вертикальный профиль ветра. Влияние земной поверхности на скорость и направление воздушных течений уменьшается по мере увеличения расстояния от земли. **Поэтому скорость ветра на больших высотах обычно возрастает, а его порывистость и ускорения потока снижаются.** Градиент скоростей летом, как правило, меньше, чем зимой, что в первую очередь объясняется различным характером изменения перепада температур в зимний и летний периоды.

Результаты непосредственных наблюдений во многих районах на разных высотах показали, что при адиабатическом состоянии атмосферы вертикальный профиль ветра  $v_h$

хорошо аппроксимируется зависимостями вида:  $v = v_1 (h : h_1)^{\frac{1}{5}}$  (6)

$$\text{или } v = v_1 \cdot (\lg h / h_0 : \lg h / h_1), \quad (7)$$

где  $v$  - искомая скорость ветра на высоте  $h$ , см;  $v_1$  - скорость ветра, замеренная вблизи земли на высоте  $h_1$ , см;  $h_0$  - высота, на которой скорость ветра равна нулю, см.

Высоту  $h_0$  обычно рассматривают как меру шероховатости подстилающей поверхности и принимают равной: 0,5 см для снежного покрова; 3,2 см для поверхности, покрытой низкой травой, и 5 - 7 см для поверхности с более высокими растениями. Максимальное значение  $h$  равно 20 см.

Направление ветра обычно играет меньшую роль при использовании ветровой энергии. Однако в различных ландшафтных условиях ветры разных направлений имеют

характерные особенности: большую или меньшую порывистость и скорость. Их повторяемость определяют по розе ветров, которая в графической форме показывает, какой процент общего времени года ветер имеет заданное направление. Угловые градиенты скорости оказывают существенное влияние на работу механизмов автоматической ориентации и на величину гироскопических нагрузок; порывистость, вызванная турбулентной структурой потока, сказывается на работе систем автоматического регулирования частоты вращения и ограничения мощности ветроколеса, а также влияет на надежность агрегатов.

## **2. Что такое «роза ветров»?**

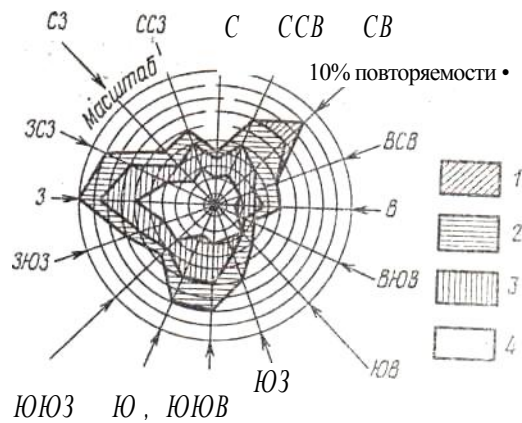
Роза ветров - диаграмма, показывающая повторяемость ветров различных направлений для какого-либо пункта. Строится обычно по средним многолетним данным для месяца, сезона, года. Диаграмма представляет собой пучок лучей, исходящих из одной точки и направленных по румбам горизонта. На каждом луче от центра в сторону, откуда дует ветер, откладывается в определенном масштабе отрезок, пропорциональный повторяемости ветра данного направления. Концы отрезков обычно соединяются прямыми линиями. Рядом с розой ветров или в ее центре указывается повторяемость безветренной погоды. Первые письменные упоминания розы ветров относятся к XII в. Где найти «розу ветров» для своей местности?

Можно построить «розу ветров» для своей местности, исходя из собственных наблюдений. Для получения достоверных данных необходимы длительные (многолетние!) наблюдения. Перенос воздушных масс в основном определяет экологическое состояние окружающей природной среды. Роза ветров или иначе характеристика направления ветра является обязательной характеристикой погодно-климатических условий данной территории. Она учитывается в решении ряда проблем в градостроительстве, интерпретации данных загрязнения, оценке переносов загрязненных воздушных масс как в пределах территории города, так из других районов.

При выборе месторасположения ветроэнергетических установок учитывают розу ветров, построение которой в виде диаграммы характеризует преобладающее направление и силу ветра в данном районе.

Пример построения розы повторяемости и силы ветров, длина лучей которой соответствует величине средней скорости ветра (м/с) в указанном направлении, а также проценту его повторяемости в течение года, приведен на рис. 3.





**Рис. 3. Пример построения розы повторяемости и силы ветров**

1- шторм  $v > 18$  м/с; 2 - сильный ветер  $18 > v > 10$  м/с; 3 – средний ветер; 4 – слабый ветер  $5 > v > 0,5$  м/с

Построение розы ветров проводится по специально разработанному модулю векторного анализа метеорологических данных. Обозначенная красным внутри круга линия - результат обработки метеорологических данных по восьми направлениям ветра (места перегибов ломанной линии). Чем ближе точка перегиба к линии окружности, тем больше случаев этого направления ветра регистрировалось.

### 2.1. Флюгер. Энергия воздушного потока

Флюгер (от голландского *vleugel* - буквально крыло) - прибор для определения направления и скорости ветра. На вертикальной оси расположен металлический флажок, поворачивающийся под воздействием ветра; противовес этого флажка направлен в сторону, откуда дует ветер; направление ветра читается по горизонтальным штифтам, ориентированным по восьми румбам. На флюгере перпендикулярно направлению ветра укреплена свободно качающаяся металлическая дощечка, по углу отклонения которой от вертикали можно с помощью специальной таблицы определить силу ветра. Флюгер устанавливается на высоте 8 – 10 м.

Энергия  $E$  воздушного потока, имеющего поперечное сечение площадью  $F$ , определяется по выражению:  $E = 0,5 \cdot m \cdot v^2$ , Дж (8)

Так как секундная масса  $m$  воздуха, протекающая со скоростью  $v$  через это сечение,  $m = \rho F v$  кг/с, то энергия  $E = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F$ , Дж/с (9)

где  $\rho$  - плотность воздуха, равная для нормальных условий  $1,23$  кг/м<sup>3</sup> (при  $t = 15$  °С и  $p = 760$  мм рт. ст.).

Таким образом, энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости. Ветроколесо может преобразовать в полезную работу часть этой энергии, которая оценивается коэффициентом использования энергии ветра  $\xi$ .

## 2.2. Ветроэнергетический кадастр

Под ветроэнергетическим кадастром понимают совокупность достоверных и необходимых сведений, характеризующих ветер как источник энергии и позволяющих выявить его энергетическую ценность. Он представляет собой систему численных характеристик режима ветра в различных зонах, на основании которой можно судить о режимах и длительности работы агрегата с той или иной мощностью, суммарной выработке энергии и др. Важнейшими кадастровыми характеристиками являются повторяемость (плотность распределения) различных скоростей, чередование рабочих и штилевых периодов, режимы максимальных (буревых) скоростей. Значения среднегодовых  $\bar{v}_г$  и среднесезонных  $\bar{v}_с$  скоростей также являются важными, а главное, удобными кадастровыми характеристиками общего уровня интенсивности ветра, но их величина еще не определяет в полной мере эффективности применения ветроустановок.

Наиболее важной характеристикой следует считать функцию статистической закономерности частот вариаций скоростей ветра за определенное время. Зная закономерности, определяющие вид и параметры этой функции, и имея характеристики ветроэнергетического агрегата, можно подсчитать его выработку, длительность простоев, коэффициент использования установленной мощности, экономическую эффективность и т. д.

Г.А. Гриневич [11] предложил для ряда зон следующее уравнение кривой распределения существенно положительных величин:  $y = \alpha_1 x^p e^{-kx^n}$  (10)

(где  $y, x$  – переменные;  $\alpha_1, p, k, n$  – коэффициенты, зависящие от типа кривой), на основании которого, переходя к абсолютным значениям скоростей ветра и их повторяемости

в долях от времени периода, получим:  $t = \frac{\Delta v}{v} \alpha_1 \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^p e^{-k\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^n}$ , (11)

где  $t$  – частота или повторяемость скорости  $v$ ;  $\bar{v}$  – средняя скорость за расчетный период;  $v$  – скорость, относительная повторяемость которой определяется в интервале от  $(v - (\Delta v / 2))$  до  $(v + (\Delta v / 2))$ ;  $\Delta v$  – выбранные интервалы градаций скорости.

Благодаря типизации режимов повторяемости скоростей ветра для большинства районов Средней Азии и Казахстана определены коэффициенты кривой и основные статистические характеристики распределения, что позволило дать в табличной или графической форме удобные для практического использования цифровые материалы по числу часов действия различных скоростей.

Для некоторых зон с относительно высокими значениями  $\bar{v}_r$  и  $\bar{v}_c$  (6 - 7 м/с) результаты типизации режимов ветра, хорошо удовлетворяющие практическим запросам, получаются при использовании зависимостей, вытекающих из уравнения Р.Д. Гудрича в дифференциальной форме:  $y = knx^{n-1}e^{-kx^n}$ . (12)

Это уравнение применено М.В. Колодиным для выравнивания эмпирических распределений скоростей [16]. Зная параметры  $n$  и  $k$  уравнения:  $t_{v_i} = \frac{\Delta v}{v_i} \left(\frac{v_i}{v}\right)^{a-1} e^{-k\left(\frac{v_i}{v}\right)^a}$ , (13)

легко подсчитать, сколько часов в году (сезоне) будет повторяться ветер с искомой скоростью. Эти данные приводятся обычно в виде таблиц и графиков. В них, как правило, повторяемость относится к высоте, на которой установлен флюгер (обычно, 12 – 15 м).

Высота  $h_{BK}$  расположения центра ветроколеса от земли может быть любой. Для определения повторяемости скорости на высоте  $h_{BK}$  следует использовать формулу пересчета

$$t_{v_{h_{BK}}} = t_{v_{15}} \frac{h_{BK}}{h_{15}} = k_{t_{h_{BK}}} t_{v_{15}} \text{ ч,} \quad (14)$$

где  $t_{v_{15}}$  - повторяемость скорости  $v$  на высоте 15 м;  $k_{t_{h_{BK}}}$  - коэффициент пересчета повторяемости скоростей ветра, значения которого, в зависимости от расчетной высоты, следующие:

$h_{BK}$ в м .....	15	10	7	5	4
$k_{t_{h_{BK}}}$ .....	1,0	0,933	0,875	0,82	0,785

Таким образом, получается, что при других высотах исходная повторяемость относится как бы к новым значениям скорости. Итоговые данные пересчета повторяемости скоростей в промилле ( $\frac{0}{100}$ ) приведены в табл. 1 для двух типов распределения скоростей, определяемых выражениями:

$$\text{при скоростях ветра } \bar{v} = 3 \div 5 \text{ м/с: } t = 1258 \frac{\Delta v}{v} \left(\frac{v_i}{v}\right)^{0,45} e^{-0,867\left(\frac{v_i}{v}\right)^{1,45}}; \quad (15)$$

$$\text{при } \bar{v} = 6 \div 7 \text{ м/с: } t = 1571 \frac{\Delta v}{v} \cdot \frac{v_i}{v} e^{-0,785\left(\frac{v_i}{v}\right)^2}. \quad (16)$$

Повторяемость больших скоростей ветра оценивается кривой распределения менее точно. Л.Е. Анапольская и Л.С. Гандин [2] предложили определять величину  $n$ , показывающую, за сколько лет (или за какую часть года) наблюдается один случай скорости, большей чем  $v$ , по выражению  $n = 1/(N_v F(v))$ , (17)

где  $N_v$  - число наблюдений в течение года.

### 3. Ветроэнергетические ресурсы

В литературе часто приводят данные об энергии ветра, которую можно получить с 1 км<sup>2</sup> земной поверхности. Так, подсчитано, что установленная мощность ветроэнергетических агрегатов по РФ может составить около 11 млрд. кВт с ежегодной выработкой энергии более  $1,8 \cdot 10^{13}$  кВт·ч [18]. В последние годы справедливо указывается, что специфика ветра как энергетического источника, характер и техника его использования делают подобные расчеты и приводимые цифры в некоторой мере абстрактными, поскольку практически реализовать всю эту энергию, преобразовать её в энергию механическую, тепловую или электрическую невозможно, и пока удастся полезно использовать лишь очень малую её часть, измеряемую сотыми долями процента.

Потенциальные возможности использования энергии ветра практически не ограничены в большинстве зон. Однако, эти возможности постоянно меняются в зависимости от совершенствования технических средств, использующих энергию тех высот, на которые можно проникнуть с новыми агрегатами, от изменения структуры общего энергетического баланса страны, экономических критериев и т. п.

Например, в конце 50-х годов появились проекты высотных (тропопаузных) ветроэлектрических станций, применение которых может существенно увеличить долю практически используемой ветровой энергии. Между тем ресурсы, как таковые, остались, конечно, неизменными. **Поэтому подсчёты ресурсов энергии ветра, дающие объективный прогноз, могут базироваться только на конкретных технических решениях, предназначаться для определенных целей, учитывать толщину воздушного слоя, который будет использоваться двигателями (она определяется диаметром ветроколеса), и его расположение относительно поверхности земли.** Естественно, что число агрегатов, устанавливаемых на определенной площади, должно подсчитываться исходя не только из физических возможностей, диктуемых соображениями аэродинамики и недопущения вредного взаимовлияния ветроколес, но и выбираться с учетом расположения потребителей, рельефа местности и прочих условий.

В то же время качественная сторона оценки ресурсов энергии ветра в зависимости от местных условий может быть выявлена, если судить о ней по величине среднегодовой скорости ветра. **Отечественный и зарубежный опыт показывает, что использование ветроэнергетических агрегатов небольшой мощности (5 – 6 кВт) почти всегда экономически оправдано в зонах, где  $\bar{v}_r \geq 4$  м/с, а применение современных ветроэлектрических станций большой мощности (30 кВт и выше) – при  $\bar{v}_r \geq 5,5 \div 6$  м/с. Строительство высотных ВЭС безусловно расширит эти зоны.**

### 3.1. Ветроэнергетика

Ветроэнергетика – отрасль науки и техники, разрабатывающая теоретические основы, методы и средства использования энергии ветра, для получения механической, электрической и тепловой энергии и определяющая области и масштабы целесообразного использования ветровой энергии в народном хозяйстве. Ветроэнергетика состоит из двух основных частей: ветротехники, разрабатывающей теоретические основы и практические приёмы проектирования технических средств (агрегатов и установок), и ветроиспользования, включающего теоретические и практические вопросы оптимального использования энергии ветра, рациональной эксплуатации установок и их технико-экономических показателей, обобщение опыта применения установок в народном хозяйстве.

Ветровую энергию, прежде всего, следует использовать в таких производственных процессах, которые допускают перерывы в подаче энергии, или в тех случаях, когда продукт переработки может быть заготовлен впрок (подъём воды, орошение, дренаж, помол зерна, зарядка электрохимических аккумуляторов и т. п.).

Ветер является одним из наиболее мощных энергетических источников и может быть утилизирован в народном хозяйстве в значительно больших масштабах, чем в настоящее время. К главным факторам, определяющим возможность использования энергии ветра, относятся: метеорологические условия, выбор оптимального расположения ветроэнергетической установки (ВЭУ), метод преобразования кинетической энергии ветра в электрическую, её использование в общей системе энергоснабжения и, кроме того, экономическая эффективность.

Важнейшей характеристикой, определяющей энергетическую ценность ветра, является его скорость и направление. Эти величины зависят от влияния сил, действующих как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях на движущиеся воздушные массы. В силу ряда метеорологических факторов (возмущения атмосферы; изменения солнечной активности; количества тепловой энергии, поступающей на Землю, и др.), а также вследствие влияния рельефных условий непрерывная длительность ветра в данной местности, его скорость и направление изменяются по случайному закону. Поэтому мощность, которую способна выработать ВЭУ в различные периоды времени, можно предсказать с малой вероятностью. В то же время суммарная выработка агрегата, особенно за длительный промежуток времени, рассчитывается с высоким уровнем достоверности, так как средняя скорость ветра и частота распределения скоростей в течение года или сезона изменяются мало.

### 3.2. Энергетические ресурсы ветра

**Необходимо различать три вида энергетических ресурсов ветра: природные ресурсы (теоретический потенциал); ресурсы, пригодные для практического использования (технический потенциал); экономические ресурсы (экономический потенциал).**

**Природные ресурсы энергии ветра** – это содержащаяся в нем кинетическая энергия. Наибольшая доля кинетической энергии ветра, которая в соответствии с законами природы и современным уровнем развития техники может быть преобразована в полезную энергию, составляет **ресурсы, пригодные для практического использования. Доля энергии, которую можно преобразовать в традиционный вид энергии с экономически оправданными затратами по сравнению с обычными энергоресурсами, относится к экономическим ресурсам. Критерии, определяющие выбор оптимального расположения ВЭУ. Для использования энергии ветра наиболее пригодны места, обладающие следующими метеорологическими характеристиками:** высокой среднегодовой скоростью ветра как наиболее важным фактором, определяющим годовую выработку на одну ВЭУ; редко встречающимися условиями с высокой интенсивностью турбулентности воздушных потоков, т.е. в среднем незначительными изменениями направления и скорости ветра как предпосылкой работы ВЭУ без помех; наличием доминирующего направления основных потоков ветра, что позволяет уменьшить площадь, необходимую для размещения многоагрегатной ВЭУ.

**Кроме метеорологических характеристик существенную роль в окончательном выборе места для использования энергии ветра играют следующие факторы:** наличие транспортной сети и возможность включения в действующую энергосистему; экономические факторы (стоимость ВЭУ, стоимость земли, срок окупаемости и пр.); законодательные факторы, такие, как закон об охране природы, правила безопасности полетов, охрана здоровья населения, непосредственно проживающего в данном районе; отрицательное воздействие на окружающую среду (шум, искажение ландшафта и помехи для приема радио- и телепередач).

**Ветровая энергия, наряду с солнечной и водной, принадлежит к числу постоянно возобновляемых и, в этом смысле, вечных источников энергии, обязанных своим происхождением деятельности Солнца.** Вследствие неравномерного нагрева солнечными лучами земной поверхности и нижних слоев земной атмосферы, в приземном слое, а также на высотах от 7 до 12 км возникают перемещения больших масс воздуха, то есть рождается ветер. Он несёт колоссальное количество энергии:  $96 \cdot 10^{21}$  Дж ( $26,6 \cdot 10^{15}$

кВт·ч), что составляет почти 2 % энергии всей солнечной радиации, попадающей на Землю. Сила ветра, зависящая от его скорости, изменяется в очень широких пределах – от лёгкого дуновения до урагана, скорость которого достигает 60 – 80 м/с. **Причиной возникновения ветров является поглощение земной атмосферой солнечного излучения, приводящее к расширению воздуха и появлению конвективных течений. В глобальном масштабе на эти термические явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра.** Кроме этих общих, или синоптических, закономерностей многое в этих процессах определяется местными особенностями, обусловленными определенными географическими или экологическими факторами. **Скорость ветров увеличивается с высотой, а их горизонтальная составляющая значительно больше вертикальной.** Последнее обстоятельство является основной причиной возникновения резких порывов ветра и некоторых других мелкомасштабных эффектов. Вследствие трения, в основном в атмосфере, а также при контакте с земной и водной поверхностями эта энергия непрерывно рассеивается, при этом рассеиваемая мощность – порядка 1200 ТВт ( $1,2 \cdot 10^{15}$  Вт), что равно примерно 1 % поглощенной энергии солнечного излучения.

Следует отметить, что была разработана классификация силы ветра по шкале Бофора и изучено влияние её на характеристики ветроэнергетических установок различных классов и условия их работы.

**Табл. 3.2.1. Сила ветра по шкале Бофора и её влияние на ветроустановки и условия их работы.**

Баллы Бофора	Скорость ветра, м/с	Характеристика силы ветра	Наблюдаемые эффекты действия	Воздействие ветра на ВЭУ	Условия для работы ВЭУ при средней в данном диапазоне скорости ветра
0	0,0-0,4	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально	нет	отсутствуют
1	0,4-1,8	Тихий	Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры не подвижны. На воде появляется рябь.		
2	1,8-3,6	Легкий	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение		Плохие для всех установок
3	3,6-5,8	Слабый	Колеблются листья на деревьях, развеваются флаги, на отдельных волнах барашки	Начинают вращаться тихоходные колеса	Хорошие для тихоходных ветроколес

4	5,8-8,5	Умеренный	Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много барашков	Начинают вращаться колеса аэрогенераторов	Хорошие для аэрогенераторов
5	8,5-11	Свежий	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках	Мощность ВЭУ достигает 30% проектной	Хорошие
6	11-14	Сильный	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн.	Мощность в расчетном диапазоне близка к максимальн.	Приемлемы для прочных малогабаритных установок
7	14-17	Крепкий	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена	Максимальная мощность	Предельно допустимые
8	17-21	Очень крепкий	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены	Ряд ветроустановок начинает отключаться	Недопустимые
9	21-25	Шторм	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы	Все установки отключаются	
10	25-29	Сильный шторм	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем	Предельные нагрузки	
11	29-34	Жесткий шторм	Широко масштабные разрушения	Повреждение некоторых установок	
12	Более 34	Ураган	Опустошительные разрушения	Серьезные повреждения, до разрушения установок	

### 3.3. Краткая история развития ветроэнергетики

С древнейших времён человек использовал энергию ветра сначала в судоходстве, а затем для замены своей мускульной силы. Первые простейшие ветродвигатели применяли в глубокой древности в Египте и Китае. В Египте (около г. Александрии) сохранились остатки каменных ветряных мельниц барабанного типа, построенных ещё во 2 – 1 вв. до н. э. В 7 в. н. э. персы строили ветряные мельницы уже более совершенной конструкции – крыльчатые. Несколько позднее, в 8 – 9 вв., ветряные мельницы появились на Руси и в Европе. Начиная с 13 в., ветродвигатели получили широкое распространение в Западной Европе, особенно в Голландии, Дании и Англии, для подъёма воды, размола зерна и приведения в движение различных станков. До Великой Октябрьской социалистической революции в крестьянских хозяйствах России насчитывалось около 250 тыс. ветряных мельниц, которые ежегодно перемалывали половину урожая (около 33 млн. т, или 2 млрд. пудов зерна). С изобретением паровых машин, а затем двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей старые примитивные ветряные двигатели и мельницы были вытеснены из многих отраслей и остались, главным образом, в сельском хозяйстве. В начале 20 в. русский учёный Н.Е.



Жуковский разработал теорию быстроходного ветродвигателя и заложил научные основы создания высокопроизводительных ветродвигателей, способных более эффективно использовать энергию ветра. Они были построены его учениками после организации в 1918г. Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). Советские учёные и инженеры теоретически обосновали принципиально новые схемы и создали совершенные по конструкции ветроэнергетические установки и ветроэнергетические станции (ВЭС) различных типов мощностью до 100 кВт для механизации и электрификации процессов сельскохозяйственного производства и др. целей. Большие заслуги в создании основ ветроэнергетики и ветроиспользования получили советские учёные Н.В. Красовский, Г.Х. Сабинин, Е.М. Фатеев и др. Систематические разработки современных ветротурбин начались в 1920 году в окрестностях Москвы - городке Кучино. **Первая пилотная ветряная электростанция Д-30 с мощностью 100 кВт была разработана и построена в Центральном аэрогидродинамическом институте в 1931-1941 гг. вблизи поселка Балаклава (Крым). Диаметр ротора ветряка был равен 30 метрам. На тот момент данная ветряная электростанция была самой мощной в мире. В 1935 году был опубликован первый «Атлас ресурсов энергии ветра».** Развитие ветроэнергетики после Второй мировой войны претерпело существенные изменения. Дешевое топливо и тенденция к увеличению мощности отдельного энергетического агрегата с целью повысить его эффективность практически вытеснили ветровую энергетику в область мелких и изолированных потребителей. Однако в сельском хозяйстве старые механические ветряные мельницы заменялись ветряными мельницами, оснащёнными электрогенераторами.

В 1947 году в СССР было начато производство первой серии высокоскоростных трехлопастных ветряных двигателей Д-18 с горизонтальной осью вращения и с мощностью агрегата 25 кВт. Эта ветряная мельница и ее модификации Д-12 и Д-18 в течение нескольких лет были основными и использовались для внедрения ветроэнергетики в промышленности и сельском хозяйстве. В последующие годы вплоть до мировых нефтяных кризисов, разразившихся в середине 70-х, практическая деятельность и развитие ветроэнергетики, а также мелкомасштабной гидроэнергетики, значительно снизилась [9].

#### **4. Классификация ветроустановок**

**Ветроэнергетические установки классифицируются по двум основным признакам: геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра.** На рис. 4.1 показаны ветроустановка; а на рис. 4.2 взаимодействие воздушного потока с лопастью ветроколеса и возникающие при этом силы. При взаимодействии потока с лопастью возникают:

- Сила сопротивления  $F_D$ , параллельная вектору относительной скорости набегающего потока  $V_r$ .
- Подъёмная сила  $F_L$ , перпендикулярная силе  $F_D$ ; слово «подъёмная» в этом термине, конечно, не означает, как в аэродинамике, что эта сила направлена вверх. Завихрение, обтекающего лопасти потока, в результате это приводит к закрутке воздушного потока за плоскостью ветроколеса, т. е. к его вращению относительно вектора скорости набегающего потока.
- Турбулизация потока, т. е. хаотические возмущения его скорости по величине и направлению; турбулентность возникает как за колесом, так и перед ним, в результате лопасть часто оказывается в потоке турбулизированном другими лопастями.

**Препятствие для набегающего потока – это его свойство характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением и равным отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади; например, при одинаковых лопастях четырехлопастное колесо имеет вдвое большее геометрическое заполнение, чем двухлопастное.**

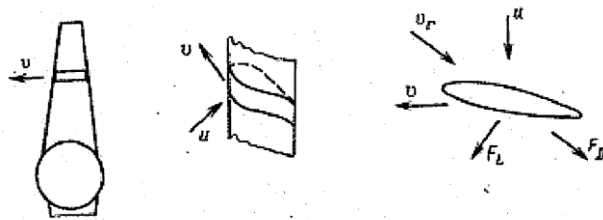


Рис. 4.2. Схематичное взаимодействие воздушного потока и ветроколеса

**Основные классифицирующие признаки ветроэнергетических установок можно определить с помощью приведенного ниже опросника (рис.4.3.).**

1. Ось вращения ветроколеса параллельна или перпендикулярна воздушному потоку? В первом случае установка будет горизонтально-осевой, во втором – обычно вертикально-осевой.

2. Вращающей силой является сила сопротивления или подъемная сила? Установки, использующие силу сопротивления (драг-машины), как правило, вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра, а установки, использующие подъемную силу (лифт-машины), имеют линейную скорость концов лопастей, существенно большую скорости ветра. Здесь та же ситуация, как с парусными судами типа яхт, которые могут передвигаться быстрее ветра.

3. Чему равно геометрическое заполнение ветроколеса? Для большинства установок оно определяется числом лопастей. ВЭУ с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивают значительную мощность при относительно слабом ветре и максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса. ВЭУ с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах и дольше выходят на этот режим. Поэтому первые установки используются, например, в качестве водяных насосов и даже при слабом ветре сохраняют работоспособность, вторые – в качестве электрогенераторов, где требуется высокая частота вращения.

4. Для какой цели предназначена ветроэнергетическая установка? Установки для непосредственного выполнения механической работы часто называют ветряной мельницей или турбиной, установки для производства электроэнергии, т. е. совокупность турбины и электрогенератора, называют ветроэлектрогенераторами, аэрогенераторами, а также установками с преобразованием энергии.

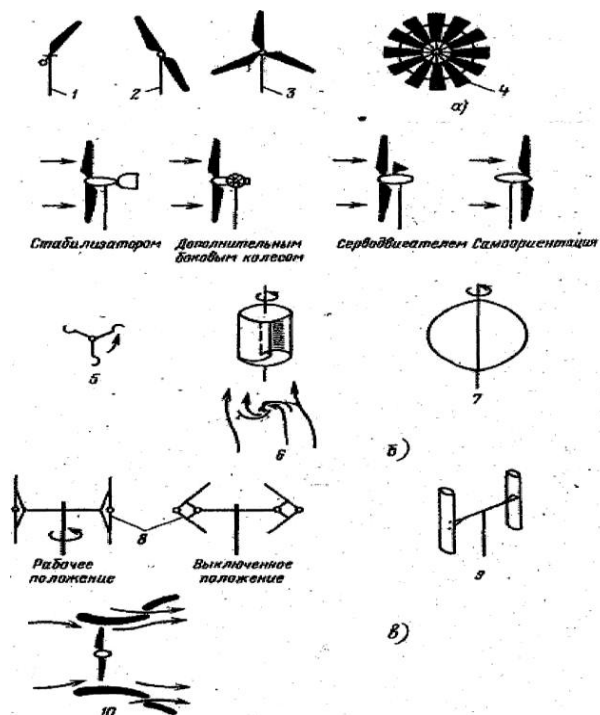


Рис.4.3. Основные типы ветрогенераторов

5. Частота вращения ветроколеса постоянна или зависит от скорости ветра? У аэрогенераторов, подключенных напрямую к мощной энергосистеме, частота вращения постоянна вследствие эффекта автосинхронизации, но такие установки менее эффективно используют энергию ветра, чем установки с переменной частотой вращения.

6. Ветроколесо соединено с электрогенератором напрямую (жесткое сопряжение) или через промежуточный преобразователь энергии, выполняющий роль буфера? Наличие

буфера уменьшает последствия флуктуации частоты вращения ветроколеса, позволяет более эффективно использовать энергию ветра и мощность электрогенератора. Кроме того, существуют частично развязанные схемы соединения колеса с генератором, называемые мягкосопряженными. Таким образом, нежесткое соединение наряду с инерцией ветроколеса уменьшают влияние флуктуаций скорости ветра на выходные параметры электрогенератора. Уменьшить это влияние позволяет также упругое соединение лопастей с осью ветроколеса, например с помощью подпружиненных шарниров.



Рис.4.1. Ветроустановка

Ветроустановки, предназначенные в первую очередь для отдалённых сельскохозяйственных ферм, выпускались промышленностью СССР; в настоящее время в эксплуатации их насчитывается свыше 10 тыс. На рисунке 4.1 показана одна из них.

## 5. Типы ветродвигателей

Большинство типов ветродвигателей известны так давно, что история умалчивает имена их изобретателей. Основные разновидности ветроагрегатов изображены на рис. 2,3. Они делятся на две группы:

1. ветродвигатели с горизонтальной осью вращения (крыльчатые) (2-5);
2. ветродвигатели с вертикальной осью вращения (карусельные: лопастные (1) и ортогональные (6)).

Типы крыльчатых ветродвигателей отличаются только количеством лопастей.

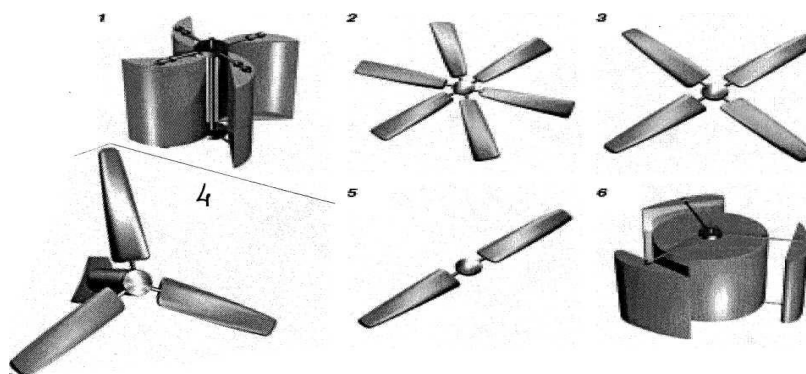
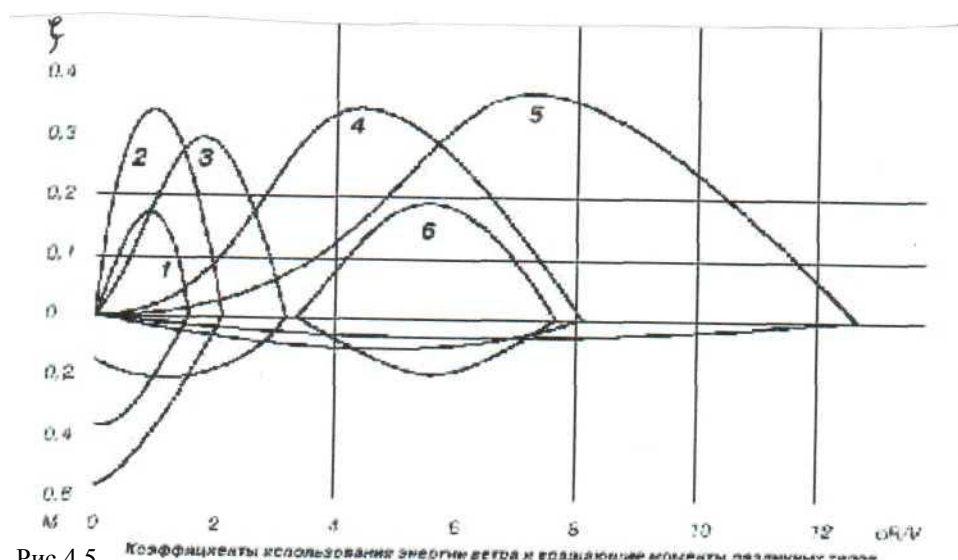


Рис.4.4. Типы ветродвигателей



### 5.1. Крыльчатые

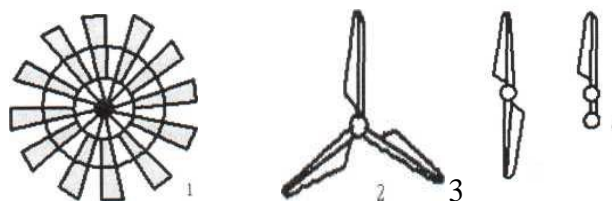
Для крыльчатых ветродвигателей, наибольшая эффективность которых достигается при действии потока воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей крыльев, требуется устройство автоматического поворота оси вращения. С этой целью применяют крыло-стабилизатор. Карусельные ветродвигатели обладают тем преимуществом, что могут работать при любом направлении ветра не изменяя своего положения.

Коэффициент использования энергии ветра (см. рис. 4.5) 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.**

Исторически первым стационарным агрегатом, использующим энергию ветра, была ветряная мельница, которая вручную ориентировалась на ветер. Основным её рабочим органом являлось многолопастное колесо с горизонтальной осью вращения, устанавливаемое по направлению ветра. Такие ветродвигатели широко применялись в средние века и в последующем для размла зёрна, подъёма и перекачки воды, а также для привода некоторых производств. Крупные ветряные мельницы заводского изготовления при высоких скоростях ветра могли развивать мощность до 60 кВт. В XIX веке число ветряных мельниц на территории России превышало 200 тысяч, их суммарная мощность составляла примерно 1,3 млн. кВт, а в 1930 г. в СССР их насчитывалось более 800 тыс. штук.[9]

В настоящее время известно много различных типов ветроэнергетических установок (ВЭУ). Широкое распространение имеют ветроустановки с крыльчатыми ветроколесами и горизонтальной осью вращения (рис. 4.1). Среди них наибольшее развитие получили двух- и трёхлопастные ветроколеса. Вращающий момент ветроколеса создаётся подъёмной силой, образующейся при обтекании профиля лопастей воздушным потоком. В результате кинетическая энергия воздушного потока в пределах площади, ометаемой лопастями, преобразуется в механическую энергию вращения ветроколеса.



**Рис. 5.1. Ветроколеса крыльчатых ветроустановок**

1 - многолопастное, 2 — трёхлопастное, 3 — двухлопастное, 4 — однолопастное с противовесом

Мощность, развиваемая на оси ветроколеса, пропорциональна квадрату его диаметра и кубу скорости ветра. По классической теории Н.Е. Жуковского для идеального ветроколеса коэффициент использования энергии ветра  $\xi = 0,593$ . То есть идеальное ветроколесо (с бесконечным числом лопастей) может извлечь 59,3% энергии, проходящей через его поперечное сечение. Реально на практике у лучших быстроходных колес максимальное значение коэффициента использования энергии ветра доходит до 0,45 - 0,48, а у тихоходных - до 0,36 - 0,38.[7]

Важной характеристикой ветроколеса является его быстроходность  $Z$ , представляющая отношение скорости движения конца лопасти к скорости ветрового потока. Конец лопасти обычно движется в плоскости ветроколеса со скоростью, которая в несколько раз выше скорости ветра. Оптимальные значения быстроходности двухлопастного колеса - 5-7, трёхлопастного - 4-5, шестилопастного - 2,5 - 3,5. Из конструктивных характеристик на мощность ветроколеса основное влияние оказывают его диаметр, а также форма и профиль лопастей. Мощность мало зависит от числа лопастей. Частота вращения ветроколеса пропорциональна быстроходности и скорости ветра и обратно пропорциональна диаметру. На величину мощности влияет также высота расположения центра колеса, так как скорость ветра зависит от высоты.

Мощность ВЭУ, как отмечалось, пропорциональна скорости ветра в третьей степени. При расчетной скорости ветра и выше, обеспечивается работа ВЭУ с номинальной мощностью. При скоростях ветра ниже расчетной мощность ветроустановки может составлять 20 - 30% от номинальной и менее. При таких режимах работы происходят большие потери энергии в генераторах вследствие их низких к.п.д. на малых нагрузках, а в асинхронных генераторах возникают, кроме того, большие реактивные токи, которые необходимо компенсировать. Для исключения этого недостатка в некоторых ВЭУ применяют 2 генератора с номинальными мощностями 100 и 20 - 30% от номинальной мощности ВЭУ. При слабых ветрах первый генератор отключается. В некоторых ВЭУ малый генератор обеспечивает также возможность работы установки при малых скоростях ветра при пониженных оборотах с высоким значением коэффициента использования энергии ветра. [7]

Установка ветроколеса на ветер, т.е. перпендикулярно к направлению ветра, производится в агрегатах очень малой мощности с помощью хвоста (хвостового оперения), в агрегатах небольшой и средней мощности - посредством механизма виндроз, а в современных крупных установках — специальной системой ориентирования, получающей управляющий импульс от датчика направления ветра (флюгера), установленного наверху на гондоле ветроустановки. Механизм виндроз представляет собой одно или два небольших ветроколеса, плоскость вращения которых перпендикулярна к плоскости вращения основного колеса, работающего на привод червяка, поворачивающего платформу головки ветродвигателя до тех пор, пока виндрозы не будут лежать в плоскости, параллельной направлению ветра.

Крыльчатое ветроколесо с горизонтальной осью вращения может располагаться перед башней и за ней. В последнем случае лопасть подвергается постоянному многократному воздействию переменных сил при прохождении в тени башни, что одновременно значительно повышает уровень шума. Для регулирования мощности и ограничения частоты вращения ветроколеса применяется ряд способов, в том числе поворот лопастей или их части вокруг своей продольной оси, а также закрылки, клапаны на лопастях и другие способы.[6...9]

Основными преимуществами ветроустановок с горизонтальной осью вращения ветроколеса является то, что условия обтекания лопастей воздушным потоком постоянны, не изменяются при повороте ветроколеса, а определяются только скоростью ветра. Благодаря этому, а также достаточно высокому значению коэффициента использования энергии ветра, ВЭУ крыльчатого типа в настоящее время получили наибольшее распространение.

Другой разновидностью ветроколеса является ротор Савониуса (рис. 5.2.). Вращающий момент возникает при обтекании ротора потоком воздуха за счёт разного сопротивления выпуклой и вогнутой частей ротора. Колесо отличается простотой, но имеет очень низкий коэффициент использования энергии ветра - всего 0,1 - 0,15.

Другой разновидностью ветроколеса является ротор Савониуса (рис. 5.2.). Вращающий момент возникает при обтекании ротора потоком воздуха за счёт разного сопротивления выпуклой и вогнутой частей

ротора. Колесо отличается простотой, но имеет очень низкий коэффициент использования энергии ветра - всего 0,1 - 0,15.

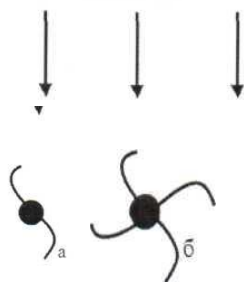


Рис. 5.2. Ротор Савониуса

а) — двухлопастный, б) — четырёхлопастный

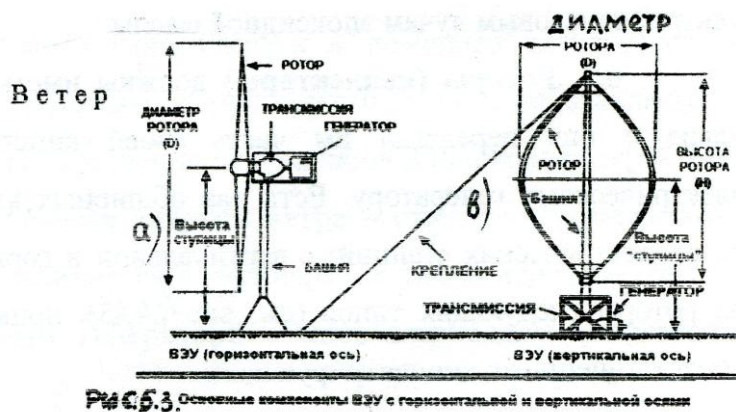


Рис. 5.3. Основные компоненты ВЗУ с горизонтальной и вертикальной осями

В последние годы в ряде зарубежных стран, особенно в Канаде, начали заниматься разработкой ветродвигателя с ротором Дарье, предложенным во Франции в 1920г. Этот ротор имеет вертикальную ось вращения и состоит из двух - четырех изогнутых лопастей (рис. 5.3.). Лопасти образуют пространственную конструкцию, которая вращается под действием подъёмных сил, возникающих на лопастях от ветрового потока. В роторе Дарье коэффициент использования энергии ветра достигает значений 0,30 - 0,35. В последнее время проводятся разработки роторного двигателя Дарье с прямыми лопастями (рис. 5.3. в). Главным преимуществом ветроустановок Дарье является то, что они не нуждаются в механизме ориентации на ветер. У них генератор и другие механизмы размещаются на незначительной высоте возле основания. Все это существенно упрощает конструкцию. Однако серьезным органическим недостатком этих ветродвигателей является значительное изменение условий обтекания крыла потоком за один оборот ротора, циклично повторяющееся при работе. Это может вызывать усталостные явления и приводить к разрушению элементов ротора.

## 6. Элементы ветряных энергетических установок

Все ветроэнергетические установки имеют следующие общие конструктивные элементы (см. рис. 5.3): **ротор** (различной конструкции), с помощью которого отбирается часть энергии воздушного потока; **опора**, на которой укреплен коллектор. Она не только выполняет функции несущего элемента, но и служит для того, чтобы удерживать коллектор над землей на некоторой высоте, где скорость воздушного потока больше. В качестве опорной конструкции может служить здание, что позволяет использовать более высокие скорости ветра, возникающие при разделении потока; **предохранительный механизм**, защищающий генератор от воздействия слишком больших скоростей ветра; **устройство, вырабатывающее электроэнергию** (генератор), аккумуляторы и преобразователь энергии; **запасные устройства** для накопления энергии ветра (см. рис. 4.1).

Материалы, применяемые для изготовления лопастей, должны быть легкими, прочными и стойкими к погодным условиям. Прежде для изготовления лопастей использовали дерево, сталь, алюминий, пластик, стекловолокно и перфорированную бумагу. Из перфорированной бумаги, находящейся в сжатом состоянии, вырезали лопасть, которую затем растягивали до необходимого размера и фиксировали с помощью алюминиевого стержня, проходящего в середине лопасти. Поверхность лопасти покрывали тонким слоем

стеклопластика, а затем слоем водостойкой, погодоустойчивой и стойкой к ультрафиолетовым лучам эпоксидной смолы.

**6.1. Роторы (коллекторы)** должны иметь такую конструкцию, чтобы ветер при ударе о них передавал им часть своей кинетической энергии, которая передается электрическому генератору. Есть два обширных класса роторов, которые применяют для ветроэлектрических станций: с вертикальной и горизонтальной осью. Они подразделяются на роторы следующих типов (см. рис.4.4 и 4.3): лопастного (пропеллерного); «улиточного»; лопастно-цепного; концентрирующего.

Для удобства сравнения различных типов роторов введём коэффициент эффективности  $C_M$ .

Потенциальная энергия ветрового потока  $E_V$  равна  $1/2$  плотности воздуха, умноженной на площадь поперечного сечения, образуемого лопастями двигателя, и на скорость ветра.

Роторы лопастного типа получили наибольшее распространение в качестве устройства, позволяющего использовать энергию ветра. Называемые обычно пропеллерами, они, по сути дела, являются импеллерами.

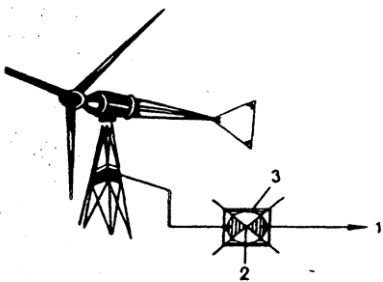


Рис. 6.1. Схема ветрогенераторной установки без аккумуляторной батареи

1 – переменный ток к ЛЭП; 2 – переменный ток к потребителю (нагрузке); 3 – выключающаяся коробка передач и антиреверсивное устройство в случае слабого ветра.

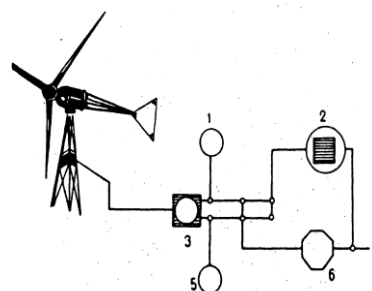


Рис. 6.2. Схема ветрогенератора с электролизной установкой (с топочной камерой)

1 – аккумулятор газа - водорода; 2 – топочная камера; 3 – электролизер; 4 – переменный ток к потребителю; 5 – аккумулятор кислорода; 6 – газовая турбина.

## 6.2. Аккумуляторы энергии

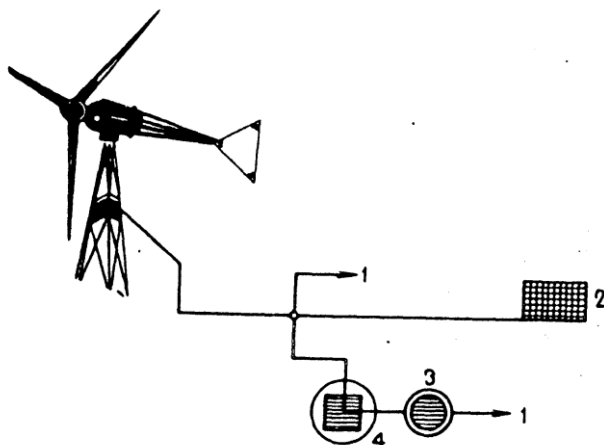
**6.2.1. Энергию, получаемую с помощью ветрогенераторов, можно накапливать, используя для этого резервуары с водой. В то время когда ветрогенератор производит избыточное количество энергии, ее используют для того, чтобы поднять воду в специальный резервуар, установленный на некоторой высоте. В случае необходимости этот запас применяют для выработки энергии с помощью воды. Для небольших установок воду можно накапливать в резервуарах, а для более крупных установок необходимо устройство специальной накопительной ёмкости (на горе или на холме). Ещё**



одно преимущество этой системы состоит в том, что если основная цель состоит в подъёме воды, то это гораздо более эффективно можно сделать в помощью электроэнергии, полученной от ветродвигателя, чем с помощью механического насоса, работающего от такого же двигателя, установленного непосредственно над скважиной или колодцем.

**6.2.2. Другой способ преобразования энергии ветра – пневмокомпрессионные установки. Сжатый воздух легко накапливается в ресиверах, а затем используется для приведения в действие электрического генератора с пневмоприводом (параметры такой установки даны в табл. 6.1).**

**6.2.3. Наконец, последний тип аккумулятора ветровой энергии, разработка (см. рис.6.3)**



**Рис. 6.3. Схема ветрогенератора с механическим аккумулятором (маховиком)**

1 – переменный ток к потребителю; 2 – солнечный источник энергии; 3 – маховик; 4 – мотор-генератор постоянной частоты.

которого находится сейчас на стадии эксперимента, - маховое колесо. Предел аккумулирующей способности махового колеса определяется значением центробежной силы, при которой колесо может разрушиться. Таким образом, аккумулирующая способность махового колеса зависит от прочности материала, из которого оно изготовлено.

За последнее время разработаны материалы, которые обладают очень высокой прочностью по одному из направлений, например на разрыв. В некоторых из этих материалов применяется усиление по радиальному направлению, выполненное из прочных струн, графита, волокнистых материалов.

Использование новых материалов для создания маховых колес позволяет делать более легкие и компактные аккумуляторы энергии. Разрабатываются маховики, которые имеют аккумулирующую способность, приходящуюся на единицу массы, в 4 раза больше, чем современные кислотные аккумуляторы.

Проектируется помещать маховик в герметичном отсеке, где создано разрежение, равное 0,01 ат. В качестве опоры следует применять бесфрикционную магнитную подвеску.

Генератор-двигатель связан с маховиком с помощью магнитной муфты, исключая непосредственный контакт с вакуум-камерой.

Вращая маховик, ветродвигатель будет обеспечивать выработку энергии с помощью мотор-генератора. Во время непродолжительного затишья маховик будет вырабатывать с помощью генератора электроэнергию (см. табл. 1).

Некоторые из рассмотренных систем накопления энергии пока дорогостоящи, технически сложны и нереальны, но они отражают направления поисков и разработок в области создания энергетически и экономически эффективных способов аккумулирования энергии.

**6.2.4. Другие методы накопления энергии (см. рис. 5)** Вследствие переменчивого характера ветра емкость аккумуляторов, применяемых в системе, имеет огромное значение для всей системы. Из-за сложности и наличия промежуточных элементов стоимость аккумулирующих систем весьма велика. **Характеристика различных аккумулирующих систем приведена в табл. 6.1.**

**Таблица 6.1. Характеристика различных аккумулирующих элементов**

Тип аккумулятора	Емкость, БТЕ/фунт	К.п.д., %	Стоимость, БТЕ/долл
Батарея	18-35*	70	25
Маховик	20-90	35	35
Сжатый воздух	100	67	25
Топочное устройство	90	50	35
Емкость с водой	0,25 (при высоте 30 м)	67	18
Массивная емкость	0,25 (при высоте 30 м)	67	18

\* Прогнозируемое значение для новых типов батарей 350 БТЕ/фунт.

Существует тенденция к применению генераторов как постоянного, так и переменного тока. В состав установки в этом случае входят два генератора. Получаемый постоянный ток используется для осветительных и нагревательных приборов, силовых установок, а переменный ток используется для универсальных электродвигателей (см. рис. 6.3).

В последнее время были созданы генераторы переменного тока, вырабатывающие ток с частотой 60 Гц при любой скорости вращения ветродвигателя. В отличие от обычного такой генератор не требует фиксированного количества полюсов. Генератор переменного тока имеет ротор из специального магнитного материала, а статор – обмотку, которые, взаимодействуя, создают необходимое количество электромагнитных пар.

Существует метод, который позволяет исключить аккумулирующие устройства, но он требует подсоединения к силовой линии. Ветрогенератор, который может быть подсоединен непосредственно к силовой линии, должен вырабатывать ток с постоянной

частотой. Можно установить реверсивный счетчик для определения количества энергии, подаваемой ветрогенератором в силовую линию (рис. 6.3).

**Энергия, вырабатываемая ветрогенератором, может быть направлена на электролизные установки, которые разлагают воду на два её основных компонента - водород и кислород (рис. 6.2).** Таким образом, допустимо преобразование электрической энергии в химическую и использование водорода в качестве основного элемента.

**Водород накапливают как сжатый газ, как соединение с металлом или как криогенную жидкость.** В настоящее время наиболее экономичным способом считается накопление сжатого водорода, весьма обещающе и использование гидридов. Криогенные системы обладают достаточно высокой эффективностью (37,4 кВт на 1 кг), но пока очень дорогостоящи.

**По-видимому, водород найдет самое широкое применение в промышленности.** Его будут использовать в качестве топлива дополнительно к природному газу или вместо него. Допустимо, но пока дорогостояще, применение водорода для двигателей внутреннего сгорания.

Ветроустановки классифицируются по следующим признакам:

- положению ветроколеса относительно направления ветра; геометрии ветроколеса;
- по мощности ветроустановки.

В настоящее время технические средства включают два основных типа промышленных ветроустановок: горизонтальные - с горизонтально осевой турбиной (ветроколесом), когда ось вращения ветроколеса параллельна воздушному потоку; вертикальные с вертикально осевой турбиной (ротором), когда ось вращения перпендикулярна воздушному потоку (см. рис. 5.3; 4.1; 4.4).

Ветроколеса с горизонтальной осью делятся на однолопастные, двухлопастные, трехлопастные, многолопастные; с вертикальной осью различают следующие конструкции роторов: чашечный анемометр, ротор Савониуса, ротор Дарье, также имеются конструкции с концентраторами (усилителями) ветрового потока, такие, как ротор Масгрува, ротор Эванса, усилители потока специальной конструкции.

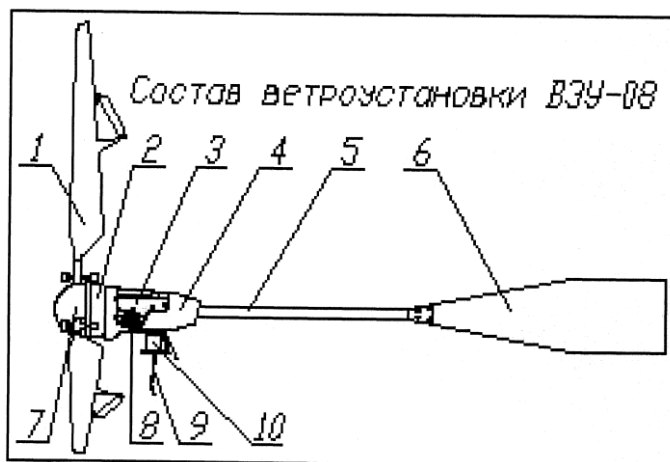
Следует отметить, что ветроколеса с вертикальной осью вращения, в отличие от таковых с горизонтальной, находятся в рабочем положении при любом направлении ветра, однако их принципиальными недостатками являются большая подверженность усталостным разрушениям из-за возникающих в них автоколебательных процессов и пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора. Из-за этого подавляющее большинство ветроагрегатов выполнено по горизонтально-осевой схеме,

хотя продолжают всесторонние проработки различных типов вертикально-осевых установок [1].

**По мощности ветроустановки делятся на: малой мощности - до 100 кВт, средней - от 100 до 500 кВт, и большой (мегаваттного класса) – 0,5-4 МВт и более.**

Ветроустановка ВЭУ-08 предназначена для обеспечения электроэнергией небольших объектов. Применяется как в местах, где отсутствует сетевая энергия (туристические лагеря, фермерские хозяйства, дачные участки, питание автономных комплексов), так и в качестве резервного источника электроэнергии для частных домов, коттеджей.

На ВЭУ-08 применена аэромеханическая система стабилизации частоты вращения ветротурбины, позволяющая эксплуатировать ее в широком диапазоне скоростей ветра. Тихоходный генератор на постоянных магнитах прямо приводится турбиной. Отсутствие мультипликатора и системы возбуждения генератора обеспечивает высокий ресурс ветроустановки. Этой установкой обеспечивается питание нагрузки мощностью до 1,5 кВт стабилизированным синусоидальным напряжением 220В/50Гц, а также возможность подключения к системе фотоэлектрических модулей.



**Рис. 6.4.**

1 – Ветротурбина, 2 – Генератор, 3 – Центральная рама, 4 – Кожух, 5 – Хвостовая балка, 6 – Киль, 7 – Кок ветротурбины, 8 – Выпрямитель, 9 – Трос флюгирования ветротурбины, 10 – Опорно-поворотное устройство с токосъемом

Если на участке не построен домик для подсобного хозяйства, тогда можно солнечные батареи укрепить на мачте ветроустановки. На рис. 6.5 представлена подробная схема, с помощью которой осуществляется получение энергии от ВЭУ и от солнечной батареи (фотоэлектрического модуля).

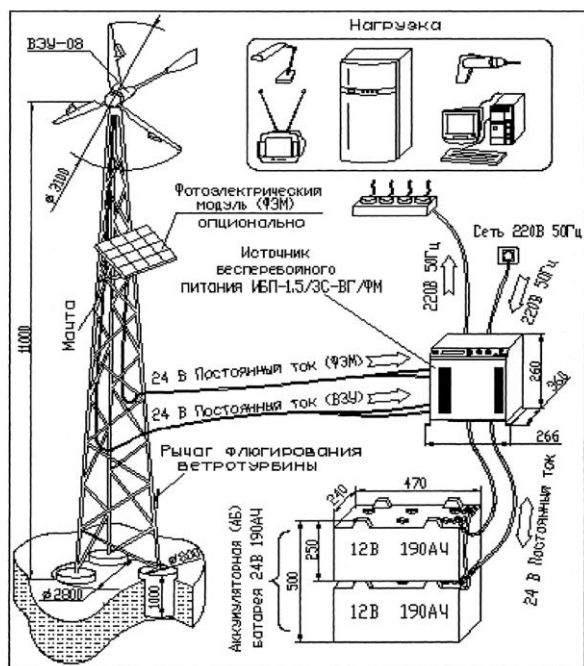


Рис. 6.5

### Основные характеристики ВЭУ-08.

Номинальная мощность 800 Вт; диаметр ветротурбины 3,1м; стартовая скорость ветра 2,5 м/с; расчетная скорость ветра 8 м/с; макс. эксплуатационная скорость ветра 50 м/с; номинальная частота вращения 310 об/мин; метод остановки флюгирование; регулирование оборотов изменение шага; номинальное напряжение генератора 24 В; ЭДС генератора до 60 В; рекомендуемая высота мачты 11-17 м;

В типовой состав системы энергообеспечения нагрузок 220В/50Гц на основе ВЭУ-08 входят следующие компоненты:

**Головка ВЭУ-08** - вырабатывает "грубую" электроэнергию с нестабильными параметрами, зависящими от скорости ветра.

**Фотоэлектрический модуль (ФЭМ)** - опциональный компонент, вырабатывающий дополнительную "грубую" энергию. Повышает надежность энергообеспечения и суммарную выработку энергии.

**Аккумуляторная батарея (АБ)** - накопитель энергии для согласования графиков выработки и потребления энергии. Применяется кислотная АБ с номинальным напряжением 24В и рекомендуемой емкостью 190 АЧ. Может быть составлена из двух автомобильных стартерных АБ 12В.

**Источник бесперебойного питания** - устройство, согласующее между собой указанные выше компоненты, нагрузку и внешнюю сеть 220В. Заряжает АБ от ВЭУ, ФЭМ и внешней сети 220В. Преобразует накопленную в АБ энергию в стабилизированные 220В/50Гц с номинальной мощностью до 1,5 кВт. Автоматически коммутирует нагрузку на

питание от внешней сети 220В или от преобразователя. Отображает параметры системы на цифровом индикаторе.

**Мачта** - служит для установки головки на высоте 11-17 м, на которой ветровой поток не затеняется препятствиями и имеет достаточную скорость.

**Энергия ветра.** Во многих районах страны скорость ветра превышает 5...6 м/с. Использование энергии ветра в этих районах оправдано. Потенциальные возможности ветровой энергии в нашей стране равны примерно 11 млрд. кВт. Только на европейской части РФ за счёт ветра можно получить за год  $3 \cdot 10^3$  млрд. кВт·ч энергии.

Выбор площадки для ветроэнергетической установки осуществляется с учётом возможности использования развитой скорости ветрового потока, поэтому учёт топографических особенностей местности приобретает решающее значение; площадка должна быть ровной без препятствий - деревьев, скал, холмов с крутыми склонами и др. **При этом следует иметь в виду, что скорость ветра для ветроагрегатов должна составлять не менее 3 м/с на уровне до 1,5 м от земли, а на высоте около 10 м - на 15...20 % более.**

Комплекс ветроэнергетической установки включает в себя следующие элементы: (см.1,4...8) *ветродвигатель*, преобразующий ветровую энергию в электрическую или механическую с вертикальной и горизонтальной осями вращения ветрового колеса, устанавливаемого на опорных каркасных конструкциях в виде мачты, трубы, столба с подкосами или растяжками, закрепленных в фундаменте; *преобразователь механической энергии*, применяющийся в виде компрессора, энергогенератора или гидронасоса с частотой вращения, большей, чем ротора ветродвигателя; *аккумулятор*, используемый для сохранения энергии преимущественно в безветренный период.

**Как правило, в ветровых агрегатах энергию ветра преобразуют в механическую, а затем с помощью электрических генераторов - в электрическую. Ветровые агрегаты используют для различных нужд: освещение, водоподъёмные установки, привод механизмов и т. д. Ветроэлектрические установки устанавливают в основном в труднодоступных районах или местах удаленных от централизованных энергосистем. Их целесообразно использовать в тех случаях, когда скорость ветра не менее 5 м/с.**

**Использование энергии ветра связано с определенными трудностями: непостоянством скорости и направления ветра и малой концентрацией воздушного потока на единицу площади. Плотность воздуха невелика и поэтому диаметр лопастей рабочего колеса ветродвигателя должен быть большим.**

**6.2.5. Можно ли использовать его энергию и рассчитывать на его помощь, если это едва ли не самое неустойчивое и мало предсказуемое явление природы?**

Сильные холодные и горячие ветры приносят подчас большие беды. Применение ветроагрегатов позволит отбирать часть их энергии, ограничивая тем самым глубину их проникновения. Так, например, существует идея создания специальной «ветроплотины», лежащей на пути суховеев, регулярно обрушивающихся на Ферганскую долину. Аналогичные соображения высказываются относительно знаменитой боры в Новороссийске.

**Энергию ветра весьма просто использовать конструктивно, она – один из наиболее экологически чистых видов энергии и практически неисчерпаема.** Интересно и то, что большинство районов с богатыми ветроэнергетическими ресурсами – районы Крайнего Севера, не связанные единой энергосистемой и не имеющие возможности просто и удобно снабжаться органическим топливом.

**Какие же препятствия стоят на пути широкого использования ветра? Их в основном два: непостоянство его направления и силы и необходимость аккумуляирования энергии на случай отсутствия ветра или малой его мощности. Прежде всего, видимо, необходимо рассматривать ветроэнергетические установки как один из путей получения дополнительной энергии, позволяющей сократить расход органического топлива.**

**Проблема аккумуляирования энергии – одна из главных не только в ветроэнергетике. Электрические аккумуляторы громоздки и дороги. Например, в электрических ветроагрегатах их стоимость доходит до 20 % от стоимости всей установки. Наиболее приемлемым на сегодня способом «складирования» энергии является хранение её в виде переработанных продуктов – перемолотого зерна, поднятой воды, измельченного корма. Есть проекты, по которым энергию ветра можно использовать для производства водорода при электролизе воды для дальнейшего хранения или использования его в традиционных энергетических установках. Расчёты показывают, что транспортировка водорода по трубам значительно дешевле, чем передача того же количества энергии в виде электричества.**

При эксплуатации ветроагрегатов желательно иметь постоянную скорость воздушного потока, но «приручить» ветер нельзя. Поэтому **установки рассчитываются на номинальную скорость, а при её повышении уменьшается путём разворота лопасти колеса мощность, воспринимаемая агрегатом. Очень плохо влияет на работу порывистость.** Существуют различные конструкции, поддерживающие постоянное число оборотов ротора и демпфирующие скачки скорости. Например, конструкция, предложенная советским изобретателем А.Г. Уфимцевым и профессором В.П. Ветчинкиным, предусматривает использование винта регулируемого шага и специального инерционного

аккумулятора – маховика, который воспринимает энергию ветра при порывах и отдает ее при коротких затишьях (см. рис.6.6).

Эффективное использование энергии ветра зависит от успешного решения ряда аэродинамических, электротехнических, метеорологических, экономических задач, применения новых материалов, удовлетворительной работы антиобледенительных устройств и т. д. На сегодняшний день эти проблемы во многом сводят почти на нет «бесплатность» ветра.

**Что же представляют собой современные ветровые двигатели и каково современное использование этого «голубого угля» планеты? Отметим преобразование энергии ветра в механическую и электрическую. Первая применяется человеком с незапамятных времен и используется сегодня не для привода традиционных мельниц, а водяных насосов в поливном земледелии и животноводстве.** Такое применение непостоянной энергии ветра имеет ряд преимуществ. Во-первых, обеспечение водой – процесс не постоянный, а во-вторых, удобно аккумулировать энергию в виде накопленной в определенных объемах воды. Отпадает необходимость устанавливать передвижные энергоустановки или тянуть линии электропередач в эти районы, как правило, расположенные за многие сотни километров от густонаселенных мест.

**Ветронасосный агрегат представляет собой металлическую ферму высотой несколько десятков метров, на которой расположен воздушный двух- или многолопастный винт с горизонтальной осью вращения. Через механическую коническую передачу крутящий момент передается вертикальному валу, соединенному с ротором водяного насоса. Насос с таким приводом, опущенный в скважину, способен подавать воду с глубины до 150 – 200 м. Диаметр ветроколеса и скорость его вращения зависят от конструкции, способа регулирования числа оборотов, преимущественной скорости ветра и некоторых других факторов. В данном случае не требуется строго поддерживать число оборотов и постоянство крутящего момента, что существенно упрощает и удешевляет конструкцию (см. титульный лист – рис.).**

**Однако, как и в случае использования других нетрадиционных источников энергии, наибольший интерес представляет преобразование энергии ветра в электрическую. В настоящее время разработка и совершенствование агрегатов для этих целей идут по двум направлениям – создание изолированных ветроэлектрических установок (ВЭУ) индивидуального пользования малой мощности и мощных ветроэлектрических станций или даже целых систем (ВЭС), обеспечивающих энергией отдельные районы или работающих совместно с существующими энергосистемами.**



**Мощность изолированных ВЭУ несколько киловатт, и они могут снабжать энергией маяки, сигнальные огни, отдельные небольшие жилые дома. Используются они и для катодной защиты магистральных подземных трубопроводов от коррозии.** Такие установки, как правило, не связаны с внешней сетью. Хотя бывают и исключения. В Соединенных Штатах, например, начато производство ветрогенератора индивидуального пользования, подключаемого к энергосистеме небольшого дома. При наличии ветра часть энергии, потребляемой в доме, компенсируется ветрогенератором, и скорость вращения электросчетчика при этом замедляется. Если же энергия не потребляется совсем или ее меньше, чем полученной от ветра, счетчик начинает вращаться в другую сторону.

**Современные ветроагрегаты, работающие в энергосистемах, имеют мощность несколько сот киловатт и представляют собой внушительные инженерные сооружения.** Ветроколесо диаметром несколько десятков метров, как правило, с двумя или тремя лопастями установлено на высокой металлической ферме. На одном валу с ним расположен в обтекаемом кожухе электрогенератор. Для поддержания постоянного числа оборотов и соответственно частоты вырабатываемого тока при разных скоростях ветра лопасти винта выполняются поворотными со специальной системой регулирования. Имеется устройство ограничения мощности и слежения за направлением ветра. Такие конструктивные решения делают эти агрегаты более мобильными и надежными. Но ветер все-таки остается ветром и дует тогда, когда «вздумается» ему, а не человеку.

Однако на земном шаре существуют определенные районы, простирающиеся на тысячи километров, в которых ветер дует попеременно на разных участках. Таким образом, если ветроэнергетические установки соединить в одну замкнутую систему, то она сможет работать постоянно. Есть такие районы и у нас. Анализ синхронных записей метеонаблюдений показал, что, например, в прибрежной зоне от Кольского полуострова до бухты Тикси на протяжении 4500 км непрерывно дует ветер.

Сегодня уже имеется отечественный проект ВЭС мощностью 1000 МВт из двадцати пяти ветроагрегатов единичной мощностью 40 МВт. Каждый такой агрегат представляет собой ферму высотой около 250 м с расположенными на ней восемь ветрогенераторами мощностью 5 МВт каждый. Основные параметры ветрогенератора: диаметр ветроколеса – 60 м, частота вращения – 56,6 об/мин, расчетная скорость ветра – 18 м/с, профиль лопасти - «Эсперо», разработанный и испытанный в ЦАГИ. Энергетика уже имеет опыт создания и эксплуатации подобных многогенераторных станций, существуют практически готовые к использованию элементы контроля и управления, отработанные при аналогичных условиях работы на ГЭС.

Различают три типа ветродвигателей. К первому типу относят ветродвигатели, у которых ветровое колесо расположено перпендикулярно направлению ветра; ко второму типу – ветродвигатели с горизонтальным расположением ветрового колеса; к третьему – барабанные, работающие по принципу водяного мельничного колеса.

**Прогрессивное направление в ветроэнергетике – использование ветродвигателей с диффузорным усилителем.** В этом случае рабочее колесо расположено в диффузорном патрубке, что приводит к большему снижению давления за колесом, чем в свободном потоке. Соответственно растет масса воздуха, проходящего через колесо, а это приводит к увеличению мощности двигателя.

В предвоенные годы (до 1941 г.) ветродвигатели широко использовались в нашей стране, а в 1956 году их выпуск достиг 9 тыс. штук. Затем в связи с электрификацией села интерес к ветроустановкам упал. В 70-е годы ветряные двигатели стали снова привлекать внимание специалистов.

**В нашей стране работает приблизительно 5 тысяч ветроустановок. Ведутся разработки и выпускаются ветроэлектрические агрегаты мощностью 2, 4, 8, 16, 30, 60 и 100 кВт на базе четырех типоразмеров ветродвигателей с диаметром рабочего колеса 6, 12, 18 и 24 м. Первая партия автоматизированных ветроэлектроустановок (АВЭУ) была выпущена в 1979 г. В таблице 6.2 приведены основные технико-экономические характеристики АВЭУ мощностью до 100 кВт.**

**Таблица 6.2. Основные технико-экономические характеристики АВЭУ**

Показатель	Значения показателей для типов установок			
	АВЭУ-6	АВЭУ-12	АВЭУ-18	АВЭУ-24
Номинальная мощность, кВт	1...4	8...16	16...30	60...100
Скорость ветра, м/с	6,5...9	8...10	7,5...9,5	10...12
Начало работы при скорости ветра, м/с	3	3,5	3,5	5
Конструктивные параметры:				
высота, м	7	12,5	16,5	24
диаметр колеса, м	6	12	18	24
число лопастей	2	2	3	3

**Наибольшего распространения ветроэлектроустановки получили в Поволжье, Астраханской области, Калмыкии, Молдавии, Эстонии.**

**Большой практический интерес представляют установки, обеспечивающие комплексное использование солнечной и тепловой энергии и энергии ветра (КГВТУ), а также установки по превращению энергии солнечного излучения и энергии ветра в электрическую (КГВЭУ).** Они позволяют повысить надежность энергоснабжения потребителя. Кроме того, такие комплексные установки содействуют сглаживанию

неравномерности выработки энергии. Одна из возможных конструкций гелиоветроэнергетических комплексов разработана в Киевском политехническом институте. Она включает 8 ветроэнергетических установок суммарной мощностью 160 кВт и 7 гелиотеплиц суммарной площадью 525 м<sup>2</sup>.

Повышение эффективности теплоснабжения автономных потребителей от гелиоветротепловых установок возможно при их работе с тепловым насосом. Такие установки можно эксплуатировать как летом для выработки холода, так и зимой для получения теплоты (см.рис. 6.6).

## **7. Схемы ветроагрегатов**

**Принципиальная схема агрегата диктуется его назначением, типом ветроколеса и характеристикой рабочей машины. На выбор схемы оказывают влияние также режим и структура ветра в заданном районе, хозяйственные и гидрогеологические условия, особенности привода.** Только учитывая указанные факторы, можно добиться оптимальных характеристик энергетического ветроагрегата, его высокой надежности и эффективности. При этом должны быть учтены также способность рабочей машины и агрегата в целом работать при постоянно изменяющейся скорости, устойчивость функционирования привода, влияние нестационарности и динамических процессов, происходящих в ветровом потоке, на характер выполнения агрегатом технологического процесса и т. д.

**Следовательно, выбор схемы и ее кинематических элементов – это один из главных этапов создания установки, оптимальное выполнение которого повышает эффективность и надежность установки, а также облегчает ее эксплуатацию. При рассмотрении этих вопросов удобно пользоваться структурной схемой, показанной на рис. 7.1. Из схемы видно, что между рабочим органом, т. е. ветроколесом, исполнительным органом, т. е. рабочей машиной (водоподъемником, генератором и т. д.), имеется только трансмиссия (привод), которая может состоять из механизмов, соединенных между собой посредством механических, электрических, пневматических или гидравлических устройств или их сочетаний (смешанный привод).** Остальные устройства или элементы ветроагрегата выполняют, как правило, вспомогательную роль, причём многие из них не участвуют непосредственно в передаче момента или мощности от рабочего органа к исполнительному. Устройства, очерченные прямоугольниками, являются обязательными для агрегата; очерченные окружностью, - как правило, необходимы. Остальные механизмы используются в зависимости от конкретной схемы и могут отсутствовать.

Рассмотрим важнейшие типовые схемы агрегатов, классифицируя их по следующим группам: водоподъемные, универсальные, силовые, ветроэлектрические.

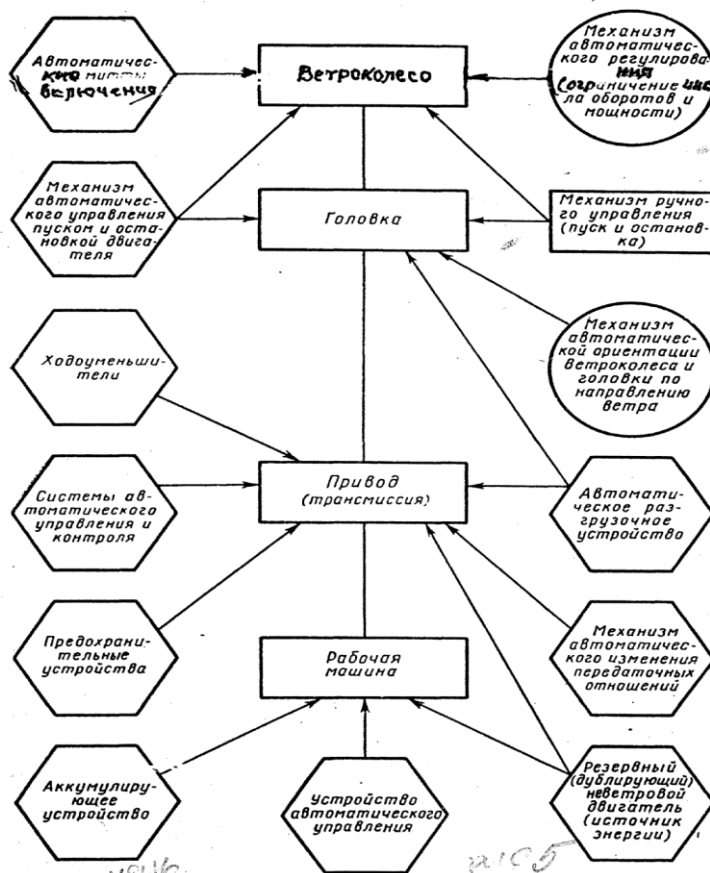


Рис. 7.1. Структурная схема ветроэнергетической установки

### 7.1. Схемы водоподъемных агрегатов

Большинство водоподъемных агрегатов, особенно прежних выпусков, работают с поршневыми насосами или ленточными водоподъемниками, характеристики которых обусловили применение двигателей и приводов соответствующих типов. Чаще это тихоходные агрегаты с механическим приводом, который затрудняет установку двигателя на расстоянии более 2 м от водоисточника и повышает металлоёмкость агрегатов большой и средней мощности. Более простые схемы имеют агрегаты, состоящие из тихоходного колеса, соединенного через верхний кривошипно-шатунный механизм со штанговым насосом; быстроходного колеса, соединенного через эксцентриково-шатунный механизм с вибрационным (инерционным) насосом; быстроходного колеса с беспоршневым компрессором и пневматическим насосом; колеса средней быстроходности, соединенного через механическую трансмиссию с ленточным водоподъемником или с винтовым насосом, и быстроходного колеса с генератором, питающим магнитное устройство (вибратор) вибрационного насоса. Эти же агрегаты, как показали оптимизационные расчеты, являются и наиболее эффективными.

Что касается менее экономичных ветроэлектрических агрегатов с центробежными насосами, то при использовании их (преимущественно на крупных объектах с большим водопотреблением) приходится считаться с тем, что для больших глубин ( $H > 60$  м) пока еще не созданы достаточно эффективные водоподъемники других типов.

При использовании насосов штангового типа (поршневых, плунжерных), совершающих возвратно-поступательное движение, чаще всего применяют следующие схемы агрегатов.

1. Привод насоса обычно осуществляется от тихоходного ветроколеса через кривошипно-шатунный механизм головки. Вращательное движение ветроколеса преобразуется в движение штанги. **Эта схема (рис.7.2,а)** использована в отечественных насосных агрегатах типа ТВ-3, ТВ-5, ДДК-4 и во многих зарубежных двигателях.

2. Насос работает от универсальной лебедки, приводимой в движение ветроколесом через верхний и нижний редукторы, соединенные вертикальным валом (рис.7.2, б, в). Верхний редуктор головки конический или коническо-цилиндрический. Такие схемы имеют агрегаты ТВ-8 (рис.7.2, б), УВД-8 и Д-12 (рис.7.2, в).

3. Привод насоса осуществляется непосредственно от кривошипного или коленчатого вала, на котором укреплено колесо, обычно быстроходное (рис.7.2, г). Эта схема применена в агрегатах Д-3, ВД-5,5; зарубежные ветротехники применяют ее редко по причинам, изложенным дальше. **Оценка принципиальных схем агрегатов дана в табл. 6.2 и 7.1.**

Несмотря на наметившиеся тенденции по агрегатированию ветродвигателей с другими типами водоподъемников, совершенствовались схемы агрегатов со штанговыми насосами путём применения более быстроходных ветроколес, введения систем разгрузки на период пуска, использования более современных передач, насосов двойного действия и плунжерных. В агрегате ПД-3М число лопастей уменьшено до 12 (агрегаты ТВ-5 и ТВ-8 имеют соответственно 24 и 18 лопастей), в головке применен эксцентриковый механизм с шатуном и коромыслом.

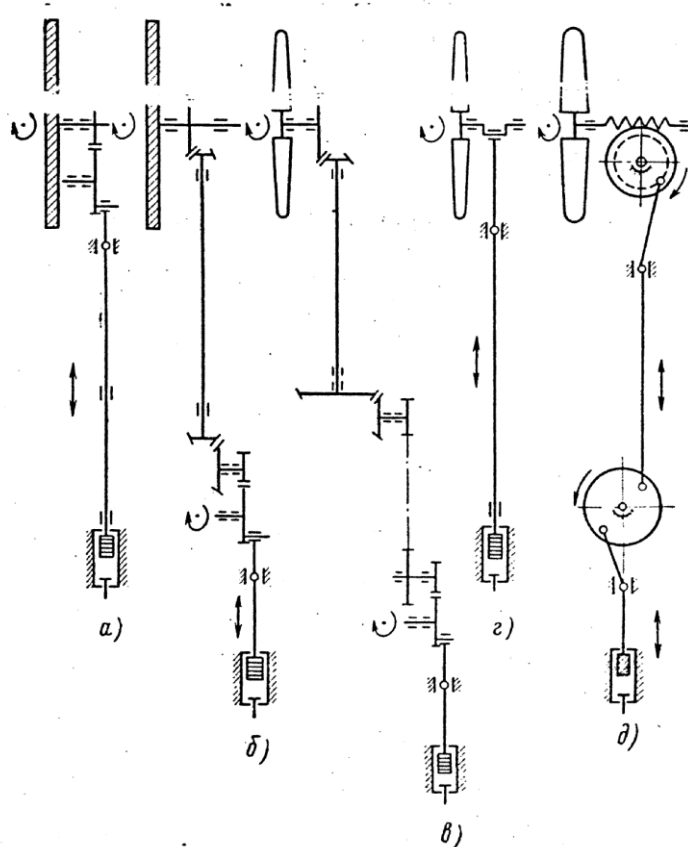


Рис. 7.2. Кинематические схемы агрегатов со штанговыми насосами

Агрегат ПД-5М имеет двухлопастное ветроколесо. В трансмиссии агрегата для снижения начальных рабочих скоростей ветра  $v_0$  применена автоматическая муфта сцепления, поэтому двигатель начинает работать при  $v_0 = 3,5$  м/с, а при  $v_0 = v_{\text{раб min}} = 3,7$  м/с включается нагрузка. Применение такой схемы позволило существенно снизить вес машины, но конструкция ее усложнилась из-за наличия дополнительного нижнего червячного редуктора (лебедки) и автоматической фрикционной муфты сцепления. Последняя из-за постоянных изменений скорости ветра, а следовательно, и частоты вращения вала работает ненадежно, и при включениях нагрузки, особенно в моменты, когда поршень насоса находится в нижней мертвой точке (н. м. т.) или движется вверх (подача воды), возникают значительные динамические перегрузки в трансмиссии. Опыт показывает, что для специализированных агрегатов малой мощности с поршневыми насосами применение подобных схем, усложняющих конструкцию и снижающих к. п. д. агрегата, чаще всего нецелесообразно.

Кроме применения автоматической муфты сцепления, можно указать и другие способы улучшения схем.

**Таблица 7.1. Оценка некоторых принципиальных схем агрегатов с поршневыми насосами**

Схема на рис. 7.2	Преимущества	Недостатки
а	Простота конструктивного исполнения; высокое значение общего к. п. д.; устойчивая работа при малых скоростях ветра	Необходимость устанавливать двигатель вблизи от водоисточника или над ним
б, в	Универсальность и, в связи с этим, возможность комплексного использования; малые значения минимальных рабочих скоростей ветра	Относительно большая металлоемкость; трудность монтажа в стороне от водоисточника (по схеме б)
г	Малая металлоемкость; простота конструктивного исполнения агрегата; высокое значение общего к. п. д.	Малая надежность привода, особенно при больших скоростях ветра; начало устойчивой работы при относительно высоких значениях скоростей

## 7.2. Схемы ветросиловых агрегатов

Наиболее распространена схема ветросилового агрегата, показанная на рис. 39, б и в. Она применена в двигателях ТВ-8, Д-12, которые в течение многих лет выпускались серийно, а также в ряде установок, производимых зарубежными фирмами. В зависимости от применяемой системы регулирования мощности и частоты вращения ветроколеса верхний редуктор делают одноступенчатым с парой конических шестерен или двухступенчатым с одной цилиндрической и одной конической парами. Привод рабочих машин осуществляют от шкивов нижнего редуктора, обычно одноступенчатого, реже – двухступенчатого.

Недостатком схемы является наличие длинного вертикального вала с большим количеством промежуточных опор, что повышает потери на трение и металлоемкость двигателя. Наличие реактивного момента ухудшает условия работы системы регулирования, осуществляемого выводом колеса из-под ветра, а при изменениях нагрузки вызывает дополнительные колебания головки относительно вертикальной оси, что увеличивает гироскопические нагрузки. Поэтому в последние годы ветросиловые агрегаты с механическим приводом находят небольшое распространение.

При работе ветродвигателей мощностью более 4 кВт с комплексом машин стараются применять электрический привод. Хотя это вызывает снижение общего к. п. д., но делает агрегат более удобным в эксплуатации и менее металлоемким.

## 8. Ветроагрегаты для получения электрической энергии

Энергию ветра можно применить для подачи воды животным, содержащимся на отдаленных пастбищах и фермах.

Водоподъемные установки включают ветроэнергетические агрегаты (ветроагрегаты), которые должны работать в автоматическом режиме с водоподъемными механизмами. Этому отвечают тихоходные многолопастные и быстроходные малолопастные ветроагрегаты, надежно работающие при скорости ветра 3...20 м/с. Благодаря ветроэлектрическим агрегатам (ветродвигателям), входящим в ветроагрегаты, годовые затраты на водопой животных снижаются в 3 раза при значительной экономии топлива и электрической энергии.

В районах, удаленных от сетей электроснабжения, применяют передвижные опреснительные станции (подачей 25 м<sup>3</sup>/сут), укомплектованные ветроагрегатами. Они могут работать также в локальных системах отопления и горячего водоснабжения. При этом к ветроэнергетическому оборудованию не предъявляют высокие требования по качеству вырабатываемой электрической энергии (постоянство частоты, уровень напряжения, отсутствие амплитудной пульсации и др.), в результате чего значительно упрощаются системы автоматического регулирования.

Накапливать энергию ветра можно, получая водород при электролизе воды, используя тепловые и электрические аккумуляторы.

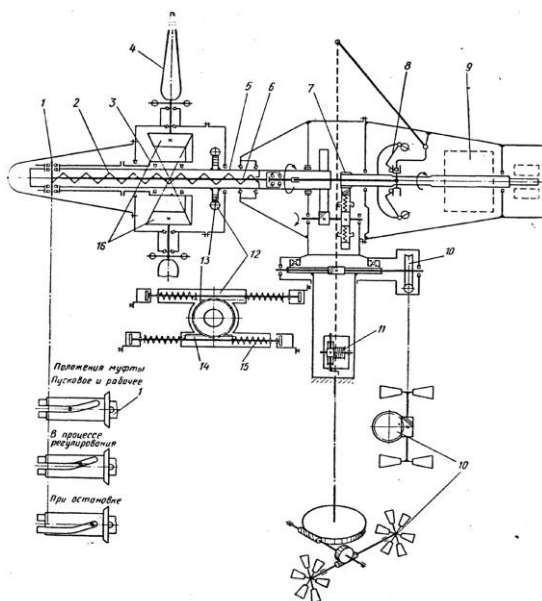
### **8.1. Схемы электрических ветроагрегатов**

Схемы электрических зарядных ветроагрегатов (станций) небольшой мощности аналогичны схемам насосных электрических агрегатов. При диаметре ветроколес до 3 м предпочтение отдают схеме с безредукторным приводом. При использовании быстроходных генераторов хорошие результаты дает применение двух ветроколес (винтов), вращающихся в разные стороны, одно из которых связано с ротором, а другое – со статором генератора, также укрепленным на подшипниках.

Ветроэлектрические агрегаты и станции (ВЭС) средней и большой мощности обычно проектируют по типовой схеме: колесо-редуктор – генератор, при этом все основные элементы (редуктор, генератор и др.) располагаются наверху и образуют головку. По такой схеме выполнен, в частности, агрегат «Сокол» с моментно-центробежной системой регулирования (рис. 42). Корпусы редуктора и генератора этого агрегата конструктивно объединены; это делает головку его более компактной.

В отечественных ветроэлектрических станциях 1Д-18 ЦАГИ, а также в первой партии станций Д-18 генератор располагается внизу, поэтому применены два редуктора





**Рис. 42. Схема электрического ветроагрегата «Сокол»:**

1 – муфта с пазом; 2 – пружина регулятора; 3 – шестерня кинематической связи; 4 – ветроколесо; 5 – главный вал; 6 – тяга регулятора; 7 – редуктор; 8 – центробежный регулятор; 9 – генератор; 10 – механизм ориентации;

11 – лебедка пуска-остановки; 12 – моментный регулятор; 13 – зубчатое колесо; 14 – зубчатые рейки; 15 – пружина моментного регулятора; 16 – шестерня маха.

вертикальный вал. Преимуществом такой схемы является упрощение обслуживания и возможность механического привода машин от шкива нижнего редуктора. В ВЭС 1Д-18 применен также инерционный аккумулятор, размещение которого на поворотной головке затруднено.

## 9. Расчет ветродвигателей

Использование энергии ветра связано с определенными трудностями, обусловленными непостоянством скорости и направления ветра, а также малой концентрацией воздушного потока на единицу площади. Плотность воздуха невелика, и поэтому диаметр лопастей рабочего колеса ветродвигателя должен быть большим - он должен превышать в сотни раз диаметр колеса гидротурбины такой же мощности, так как плотность атмосферного воздуха примерно в 800 раз меньше плотности воды.

Обозначим через  $m$  массу воздуха, протекающего через поперечное сечение площадью  $A$  со скоростью  $v$ . Очевидно,  $m = \rho Av$ , (4.1)

где  $\rho$  - плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Кинетическая энергия ветра равна  $mv^2/2$ . Подставив значение  $m$  из формулы (4.1), получим:  $mv^2/2 = \rho Av^3/2$

Мощность  $N$  ветроколеса определяется произведением силы  $F$  ветра на скорость его  $v$ . На тело произвольной формы действует сила  $F = C_x A \rho v^2 / 2$

где  $C_x$  - аэродинамический коэффициент [1];  $A$  - площадь миделевого сечения.

Обозначим через  $u$  скорость перемещения поверхности лопастей ветроколеса. Тогда относительная скорость набегающего ветра будет  $v-u$ , а сила  $F_x = C_x A \rho (v-u)^2 / 2$

Отсюда мощность  $N = C_x A \rho (v-u)^2 u / 2$

Отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью площадью сечения  $A$ , к энергии ветрового потока  $\rho A v^3 / 2$ , площадь поперечного сечения которого равна площади сечения этой поверхности, определяет значение коэффициента использования ветра

$$\zeta = \frac{C_x A \rho (v-u)^2 u / 2}{\rho A v^3 / 2} = (1-u/v)^2 u/v.$$

В таком случае мощность  $N = \rho A v^3 \zeta / 2$

Обозначим через  $D$  диаметр ветроколеса. Для воздуха при температуре  $t_B = 15$  °С и давлении  $P = 1,013 \cdot 10^5$  Па мощность ветродвигателя, кВт,  $N = 0,481 D^2 v^3 \zeta \cdot 10^{-3}$  (4.2)

Диаметр ветроколеса, м,  $D = \sqrt{2080 N / v^3 \zeta}$ .

Для других значений  $t_d$  и давления  $P_1$  мощность  $N_x = NP(273+15)/[P_1(273+t_B)]$ .

Соответственно диаметр ветроколеса  $D = \sqrt{2080 N_x / v^3 \zeta} \sqrt{P_1(273+t_B)/P(273+15)}$

Скорость ветра  $v$ , при которой ветроколесо должно развивать заданную мощность, принимают равной 8...14 м/с. Быстроходность ветродвигателя  $z = 2\pi nR/v$

где  $n$  - частота вращения ветроколеса;  $R$  - радиус ветроколеса.

Так как для определения местности средняя скорость относительно постоянна, то, как следует из формулы (4.2), мощность ветроустановок можно повысить, увеличив площадь  $A = \pi D^2 / 4$  сечения, через которое проходит ветровой поток.

Экономический эффект от использования энергии ветра определяется главным образом ее количественным и качественным показателями.

**Выбор ветроустановки.** Диаметр рабочего колеса  $D$ , м, находят по формуле

$$D = \sqrt{\frac{2080 N_B}{v^3 \xi}}$$

где  $v$  - скорость ветра, при которой рабочее колесо должно развивать проектную мощность. Значение  $v$  колеблется в пределах 8...14 м/с;  $N_B$  - мощность ветродвигателя, кВт;  $\xi$  - коэффициент использования энергии ветра.

Значение  $\xi$  равно:  $\xi = MZ$

где  $Z$  – быстроходность ветродвигателя, равная отношению окружной скорости лопасти рабочего колеса к скорости ветра;  $M$  - момент концевых потерь. Зависимость  $\xi$  от  $Z$  для числа лопастей 2...4 приведена на рисунке 9.1.

Для выбранного значения  $Z$  (рис. 9.1) определяют частоту вращения рабочего колеса  $n = \frac{Zv}{2\pi R}$ ,

где  $R$  - радиус колеса, м.

По значению  $N_e$  подбирают электродвигатель.

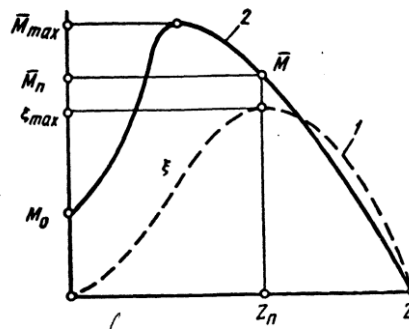


Рис. 9.1. Характеристика  $\xi$  рабочих колес ветроустановок с различным числом  $i$  лопастей: 1- $i = 2$ ; 2- $i = 3$ .

## 10. Установки для получения теплоты

Для тепловых процессов (нагревание технологической воды и других сред) применяют производные энергии ветра - механическую и электрическую энергии. Механическую энергию получают с помощью импеллерных установок, электрическую - резистивных устройств. Например, в импеллерной установке ("ветровой мешалке"), разработанной Корнеллским университетом (США), под действием энергии ветра вращаются лопасти, размещенные в баке с большим количеством воды, нагревая ее тем самым до 45 °С.

Резистивные устройства представляют собой трубчатые электрические нагреватели, устанавливаемые в емкостях с водой (электрические бойлеры), или нагревательные провода, закладываемые в почву теплиц, в полы и др.

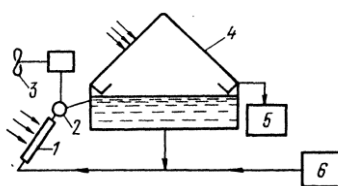
Аккумулирующая способность нагреваемых средств позволяет одновременно использовать для тепловых процессов источники энергии нескольких типов, в том числе одновременно энергию ветра и Солнца. В результате затраты на нагревание среды сводятся к минимуму.

Для получения теплоты энергия ветра не столь эффективна, как энергия Солнца. Однако ветроэнергетические установки в сочетании с солнечными могут быть использованы весьма успешно для выработки теплоты. Солнечная радиация характеризуется суточным и

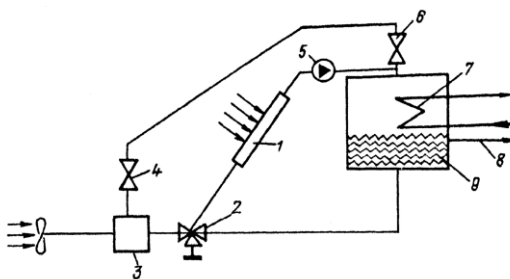
годовым циклом, закономерность же изменения энергии ветра иная. Энергия ветра на определенной территории может существовать в любое время – в облачные и безоблачные дни, днем и ночью, зимой и летом, поэтому при комбинированном использовании возобновляющихся источников энергии сглаживается неравномерность ее получения.

Комбинированные гелиоветротепловые установки (КГВТУ) можно применять для опреснения воды (рис. 10.1). Вода нагревается в плоском солнечном коллекторе 1 электрическим или фрикционным нагревателем 2, связанным с ветроагрегатом 3, и, наконец, в бассейне 4 с соленой водой. Накапливается пресная и соленая вода в аккумуляторах 5 и 6. Такая компоновка элементов установки поддерживает естественную циркуляцию соленой воды в системе. В данном случае работа солнечных коллекторов на отопление в осенне-зимний период и опреснение воды и горячее водоснабжение в остальное время дает возможность значительно повысить коэффициент использования мощности КГВТУ.

В установке, изображенной на рисунке 10.2, теплоноситель, направляемый на отопление и горячее водоснабжение, нагревается в теплообменнике под действием солнечной энергии и электрического нагревателя, использующего энергию ветра.



**Рис. 10.1.** Схема гелиоветротепловой опреснительной установки

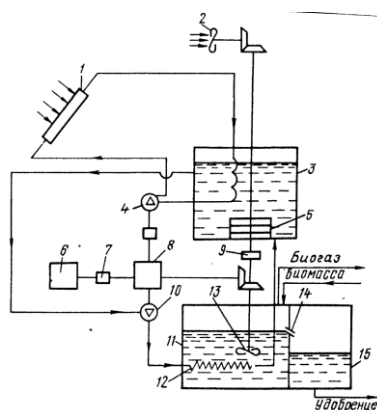


**Рис. 10.2.** Схема гелиоветротепловой установки:

1 – солнечный коллектор; 2 – трехходовой регулятор; 3 – ветроаэродинамический нагреватель; 4 – регулирующий клапан; 5 – вентилятор; 6 – обратный клапан; 7 – система горячего водоснабжения; 8 – потребитель; 9 – термоаккумулятор

Энергия ветра и Солнца используется в гелиоветроэнергетической метаногенерирующей установке (рис. 10.3). В зависимости от метеорологических условий источником для непрерывной работы ее служат солнечный нагреватель 1 жидкости, фрикционный 5 или электрический нагреватель, связанные с ветроагрегатом 2, их комбинация или тепловой аккумулятор 3.

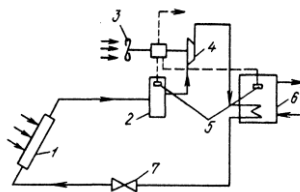
Циркуляционные насосы первого 4 и второго 10 контуров и механическая мешалка 13 приводятся в движение от ветроагрегата 2 или двигателя внутреннего сгорания 6. Для



**Рис. 10.3.** Схема гелиоветроэнергетической метаногенирующей установки

автоматического переключения приводов имеются передаточное устройство 7, редуктор 8 и храповой механизм 9. Температура процесса ферментации поддерживается теплообменником 12, погруженным в камеру сбраживания 11 реактора. Отработанная биомасса через переливное устройство 14 поступает в бак-накопитель 15 и в последующем применяется как органическое удобрение. Для привода циркуляционных насосов, мешалки и нагрева жидкости в аккумуляторе 3 теплоты можно использовать электроэнергию, вырабатываемую ветроагрегатом 2.

Наиболее эффективна для теплоснабжения автономных потребителей КГВТУ с теплонасосным агрегатом.



**Рис. 10.4.** Схема гелиоветротеплонасосной установки

Принцип действия гелиоветротеплонасосной установки (рис. 4.4) заключается в следующем. Теплота отбирается фреоном от солнечного коллектора-испарителя 1. Образовавшиеся пары его сжимаются компрессором 4, приводимым в движение ветряной турбиной 3, в результате чего их температура повышается. Сжатые пары подаются в конденсатор 6, где отдают теплоту, а сконденсировавшийся фреон после снижения давления в дросселе 7 поступает снова в солнечный коллектор-испаритель 1. Кроме того, фреон может нагреваться в промежуточном теплообменнике 2 с помощью электрического или фрикционного нагревателя 5.

В последние годы в РФ и других странах расширились работы по использованию энергии возобновляющихся источников (ветра, солнца, геотермальных вод, приливов), в

первую очередь для районов, не обеспеченных централизованным энергоснабжением. Наибольшее развитие получила ветроэнергетика.

Расширяющиеся объемы электрификации, в том числе сельского хозяйства, обусловили необходимость нового подхода к решению ряда проблем ветроэнергетики. Это выразилось, в частности, в разработке основ оптимального проектирования агрегатов, более полно отвечающих зональным условиям, в формулировании новых принципов и создании методов расчета, конструирования и унификации ветродвигателей, использовании более прогрессивных типов привода и рабочих машин, агрегатируемых с ветродвигателями, в автоматизации ветроустановок.

На базе новых исследований и изобретений в последние годы созданы принципиально новые и более совершенные агрегаты различного назначения.

Оптимальное решение многих из перечисленных вопросов осложняется тем, что ветроагрегат работает в сложных условиях, в переходных режимах, зависящих от многих факторов. Конструктивные решения и расчет ряда элементов агрегата также достаточно сложны.

Хотя ветроагрегаты используют «даровой» источник энергии, их эффективность, определяемая приведенными затратами, не должна быть ниже эффективности других энергоустановок, которые могут использоваться в конкретных условиях. Они должны иметь и ряд преимуществ перед неветровыми установками: больший срок службы, более простое обслуживание и т. д.

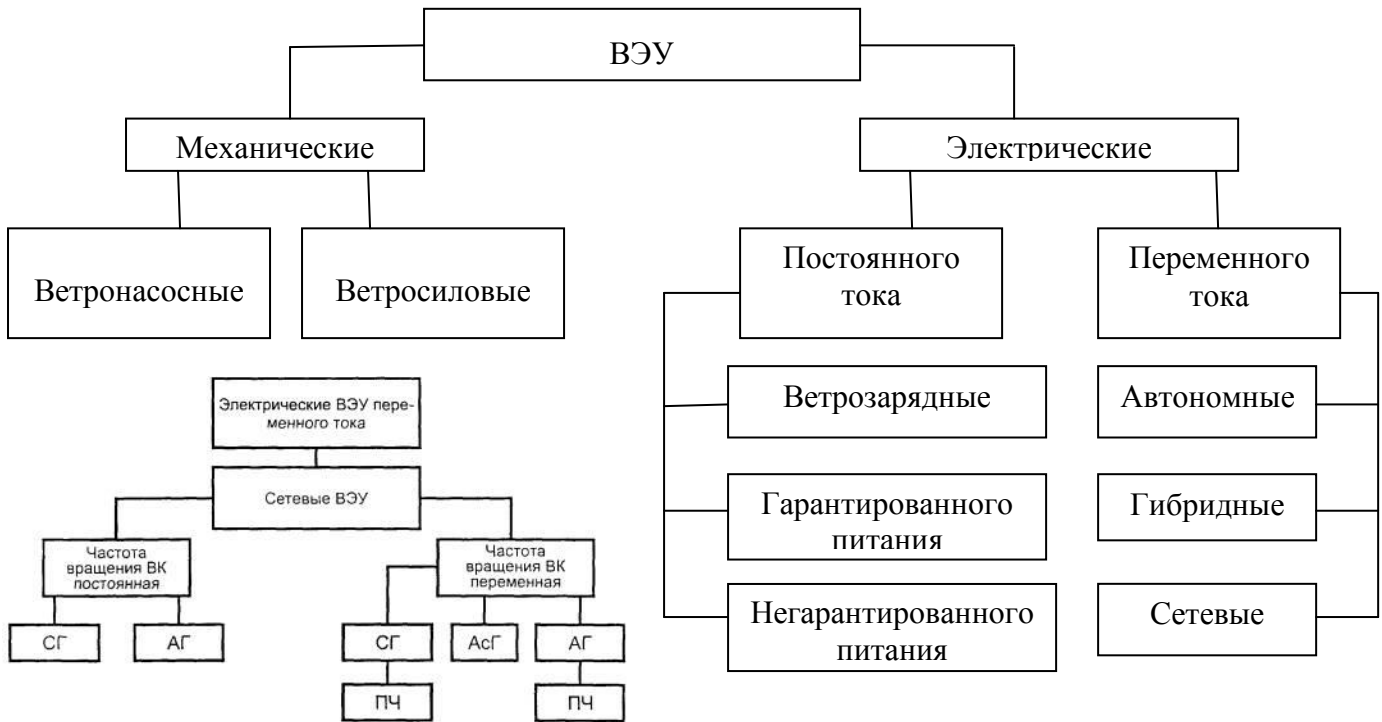
Ветроустановки должны разумно и органически вписываться в общую систему энергообеспечения с учетом специфики технологических процессов, для которых они предназначены. В первую очередь, это процессы сельскохозяйственного производства, где имеется много рассредоточенных объектов, потребляющих небольшую мощность и расположенных в труднодоступных зонах, удаленных от электрических сетей. Поэтому получили наибольшее распространение и на ближайший период будут наиболее перспективными установки мощностью до 15 кВт.

Наиболее широко ветроагрегаты применяются для механизации подъема воды на пастбищах, фермах, осушаемых и орошаемых участках, а также для зарядки аккумуляторных батарей. Это – традиционные направления использования ветра. В последние годы появились новые, весьма перспективные области, где также экономически оправдано использование ветроустановок; это, в частности, опреснение воды, так называемая катодная защита трубопроводов и морских сооружений от коррозии, вертикальный дренаж мелиорируемых земель, питание энергией автономных установок специального назначения (аппаратура для радиорелейной связи, автоматические метеостанции, маяки, бакены и др.).

## Источники

1. ФЗ № 28 Федеральный закон об энергосбережении [Текст] - Принят Государственной Думой 13.03.1996 г. – М.: Кремль/ в редакции Федерального закона от 05.04.2003 № 42-ФЗ
2. СНиП 23-01-99\* Строительная климатология [Текст]: с изм. № 1. введ. в д. 01.01.03: приняты и введ. в д. Госстроем России 01.01.2003: взамен СНиП 2.01.01-82: дата введ. 01.01.2000 / Госстрой России. – изд.офиц. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 79 с.
3. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]: приняты и введ. в д. 26.06.03: взамен СНиП 2.04.05-91: дата введ. 01.01.04 /Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 29 с.
4. Николаев, В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения [Текст]: В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов. – М.: Атмограф, 2007.
5. Алексеев, Б.А. Современные ветроэнергетические установки и прибрежные ветроэнергетические комплексы. Энергетика за рубежом. Вып. 1 [Текст]: Б.А. Алексеев. – 2008,33 – 48 с.
6. Шефтер, Я.И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты[Текст]: Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. – М.: Колос,1967. – 376 с.
7. Шефтер, Я.И. Ветроэнергетические агрегаты [Текст]: Я.И. Шефтер. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.: ил.
8. Минин, В.А. Перспективы применения ветроэнергетических установок для теплоснабжения потребителей Севера. Теплоэнергетика. № 1 [Текст]: В.А. Минин. – 2003.
9. Фатеев, Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки [Текст]: Е.М. Фатеев. – М.: ОГИЗ – Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
- 10.Твайделл, Д. Возобновляемые источники энергии [Текст]: Д. Твайделл, М. Уэйр. – М.: ЭАИ, 1990. – 239 с.
11. Дэвинс, Д. Энергия [Текст]: перевод с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
- 12.Энергия окружающей среды и строительное проектирование [Текст]/ перевод с англ. Г.А. Ивановой; под ред. В.Н. Богословского и Л.М. Махова. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.: ил.
- 13.Девис, А., Шуберт. Альтернативные природные источники энергии в строительном проектировании [Текст]/ перевод с англ. А.С. Гусева; под ред. Э.В. Сарнацкого. – М.: Стройиздат, 1983. – 190 с.: ил.
14. ГОСТ Р 51990-2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация.

## Приложение А (справочное)



СГ - синхронный генератор; АГ - асинхронный генератор;  
АсГ - асинхронизированный генератор; ПЧ - преобразователь частоты

Рисунок 2 Структурная схема сетевых ВЭУ

Рисунок 1. Общая классификация ВЭУ

Крупнейшая в России ветровая электростанция с общей мощностью 5,1 МВт работает в деревне Куликово Калининградской области. Первая 600-киловаттная турбина была возведена в апреле 1998 года в рамках российско-датского сотрудничества. Она генерирует в среднем 900000 кВт-час электроэнергии в год. Вслед за первым демонстрационным проектом к июлю 2002 года были введены в строй еще 20 датских турбин Vesta V27, мощностью 225 кВт каждая. Ветровая станция производит около 8,2 ГВт-час электроэнергии в год. Замещая ископаемое топливо для генерации электричества, станция уменьшает выбросы в атмосферу  $CO_2$  на 7380 тонн в год. В будущем область планирует построить свою первую морскую ветровую станцию, которая будет иметь мощность 50 МВт. Она будет иметь 25 турбин, расположенных в 500 метрах от берега на шельфе Балтийского моря недалеко от поселка Приморск.



## Приложение Б (справочное)

### Б.1. Происхождение ветра, ветровые зоны России

Основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание Солнцем земной поверхности. Земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений. Все эти причины осложняют общую циркуляцию атмосферы. Возникает ряд отдельных циркуляций, в той или иной степени связанных друг с другом.

На экваторе у земной поверхности лежит зона затишья со слабыми переменными ветрами. На север и на юг от зоны затишья расположены тоны пассатов, которые вследствие вращения Земли с запада на восток имеют отклонение к западу. Таким образом, в северном полушарии постоянные ветры приходят с северо-востока, в южном с юго-востока, как показано на схеме **рис. Б.1.1. Пассаты** простираются примерно до  $30^\circ$  северной и южной широт и отличаются равномерностью воздушных течений по направлению и скорости. Средняя скорость юго-восточных пассатов северного полушария у поверхности земли достигает 6-8 м/сек. Эти ветры вблизи больших континентов нарушаются сильными годовыми колебаниями температуры и давления над материками. Высота слоя пассатов простирается от 1 до 4 км. Выше над пассатами находится слой переменных ветров, а над этим слоем находится зона антипассатов, дующих в направлении, противоположном направлению пассатов. Высота слоя антипассатов меняется от 4 до 8 км в зависимости от времени года и от места.

В субтропических широтах в поясах высокого давления зоны пассатов сменяются штилевыми областями. К северу и югу от этих областей приблизительно до  $70^\circ$  на всех высотах дуют ветры между западным и юго-западным румбами в северном полушарии и между западным и северо-западным - в южном полушарии. В этих широтах, кроме того, в атмосфере непрерывно возникают и затухают вихревые движения, усложняющие простую схему общей циркуляции атмосферы, показанную на **рис. Б.1.1.**

**Местные ветры.** Особые местные условия рельефа земной поверхности (моря, горы и т. п.) вызывают местные ветры.

**Бризы.** Вследствие изменения температур днём и ночью возникают береговые морские ветры, которые называются бризами.

Днём при солнечной погоде суша нагревается сильнее, чем поверхность моря, поэтому нагретый воздух становится менее плотным и поднимается вверх. Вместе с этим более холодный морской воздух устремляется на сушу, образуя морской береговой ветер. Поднимающийся над сушей воздух течёт в верхнем слое в сторону моря и на некотором

расстоянии от берега опускается вниз.



**Рис. Б.1.1. Схема общей циркуляции земной атмосферы**

Таким образом возникает циркуляция воздуха с направлением внизу - на берег моря, сверху - от суши к морю. Ночью над сушей воздух охлаждается сильнее, чем над морем, поэтому направление циркуляции изменяется: внизу воздух течёт на море, а сверху с моря на сушу. Зона распространения бриза около 40 км в сторону моря и 40 км в сторону суши. Высота распространения бризов в наших широтах достигает от 200 до 300 м. В тропических странах бризы наблюдаются почти в течение всего года, а в умеренном поясе только летом, при жаркой погоде. У нас бризы можно наблюдать летом у берегов Чёрного и Каспийского морей.

**Муссоны.** Годовые изменения температуры в береговых районах больших морей и океанов также вызывают циркуляцию, аналогичную бризам, но с годовым периодом. **Эта циркуляция, более крупного размера, чем бризы, называется муссонами.** Возникают муссоны по следующим причинам. Летом континент нагревается сильнее, чем окружающие его моря и океаны; благодаря этому над континентом образуется пониженное давление, в воздух внизу устремляется к континенту от океанов, а сверху наоборот, течёт от континентов к окружающим океанам. **Эти ветры носят название морских муссонов.** Зимой континенты значительно холоднее, чем поверхность моря; над ними образуется область повышенного давления; вследствие этого нижние слои воздуха направляются от континента к океанам, а в верхних слоях - наоборот, от океанов к континентам. **Эти ветры называются материковыми муссонами.**

Сильные муссоны можно наблюдать на южном побережье Азии - в Индийском океане и Аравийском море, где летом они имеют юго-западное направление, а зимой - северо-восточное. У восточных берегов Азии также наблюдаются муссоны. Зимой дуют суровые северо-западные материковые ветры; летом юго-восточные и южные морские влажные ветры. Эти ветры значительно влияют на климат Дальневосточного края.

**Различные зоны страны имеют ветровые режимы, сильно отличающиеся один от другого.** Значение среднегодовой скорости ветра в данном районе дает возможность приблизительно судить о целесообразности использования ветродвигателя и об эффективности агрегата. **Карта ветроэнергетических ресурсов России представлена на рис. Б.1.2.**

Прибрежные зоны северной части страны, Каспийское побережье и северная часть Сахалина отличаются, как это видно на карте, высокой интенсивностью ветрового режима. Здесь среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/сек. В этих районах часто наблюдаются ураганные ветры (выше 30 м/сек), которые сопровождаются снежными метелями и буранами. Поэтому в указанной зоне можно использовать только агрегаты с ветродвигателями высокой быстроходности (двух-трехлопастные), прочность которых рассчитана на ветровые нагрузки при скоростях ветра 40 м/сек. В Арктике и на побережье наиболее эффективно применение ветроэлектрических станций, работающих совместно с тепловым резервом, а также небольших ветроэлектрических агрегатов.



**Рис. Б.1.2. Карта ветроэнергетических ресурсов России.** Цифрами обозначены зоны со среднегодовыми скоростями ветра: 1 - выше 6 м/сек; 2 - от 3,5 до 6 м/сек; 3 - до 3,5 м/сек.

Большинство областей европейской части России относятся к зоне средней интенсивности ветра. В этих районах среднегодовая скорость ветра составляет от 3,5 до 6 м/сек. К этой же зоне относится часть территории, лежащая юго-восточнее озера Байкал.

Третья зона занимает обширную территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока, некоторых областей европейской части России. В этой зоне скорости ветра относительно невелики - до 3,5 м/с, и широкое применение здесь ветроэнергетических установок не рекомендуется.

## Б.2. Классификация ветродвигателей по принципу работы

Существующие системы ветродвигателей по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра разделяются на три класса.

**Первый класс** включает ветродвигатели, у которых ветровое колесо располагается в вертикальной плоскости; при этом плоскость вращения перпендикулярна направлению ветра, и, следовательно, ось ветроколеса параллельна потоку. **Такие ветродвигатели называются крыльчатými.**

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

$$Z = \omega R / V, \quad (\text{Б.2.1})$$

**Крыльчатые ветродвигатели**, согласно ГОСТ 2656-44, в зависимости от типа ветроколеса и быстроходности, разделяются на три группы (рис. Б.2.1).

Ветродвигатели многолопастные, тихоходные, с быстроходностью  $Z_n \leq 2$ ; ветродвигатели малолопастные, тихоходные, в том числе ветряные мельницы, с быстроходностью  $Z_n > 2$ ; ветродвигатели малолопастные, быстроходные,  $Z_n \geq 3$ .

Ко **второму классу** относятся системы ветродвигателей с вертикальной осью вращения ветрового колеса. **По конструктивной схеме они разбиваются на группы:**

карусельные, у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра; роторные ветродвигатели системы Савоинуса.

К **третьему классу** относятся ветродвигатели, работающие по принципу водяного мельничного колеса и **называемые барабанными**. У этих ветродвигателей ось вращения горизонтальна и перпендикулярна направлению ветра.

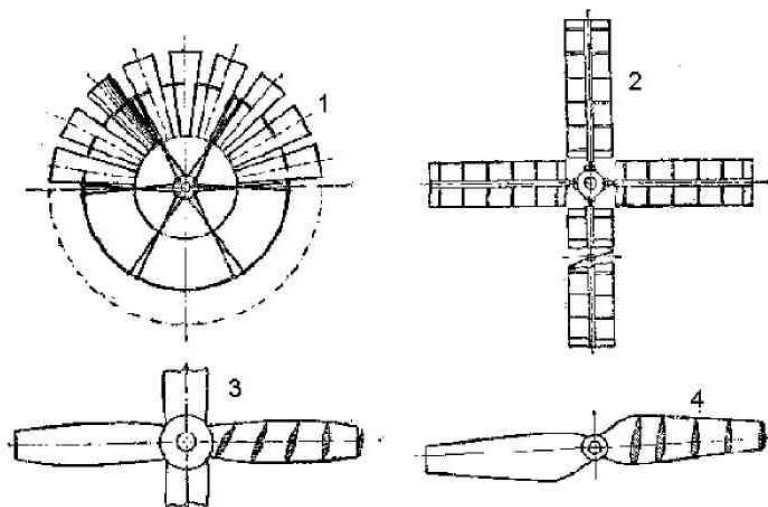


Рис. Б.2.1. Схемы ветроколес крыльчатых ветродвигателей:

1 - многолопастных; 2-4 - малолопастных

Климов Геннадий Матвеевич

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения  
теплоты в системах теплоснабжения: энергия ветра

Методическая разработка  
для студентов очной и заочной форм обучения  
специальностей 140104.65 Промышленная теплоэнергетика и  
270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат 60x90 1/8 Бумага газетная. Печать трафаретная.  
Уч. изд. л 5,7. Уел. печ. л 6,4. Тираж 300 экз. Заказ № 143

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет» 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65.  
Полиграфцентр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65