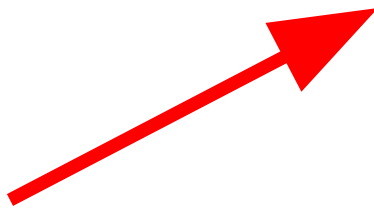


# Мировая практика выбора конструкций ВЭУ, их влияние на экономические характеристики и выбор ВЭУ для России



В учебнике «Ветро двигатели и ветроустановки» д.т.н. Фатеева Е.М. изд. 1948г. описаны следующие типы ветроколёс («ветротурбин» в современной международной терминологии) :

Крыльчатое

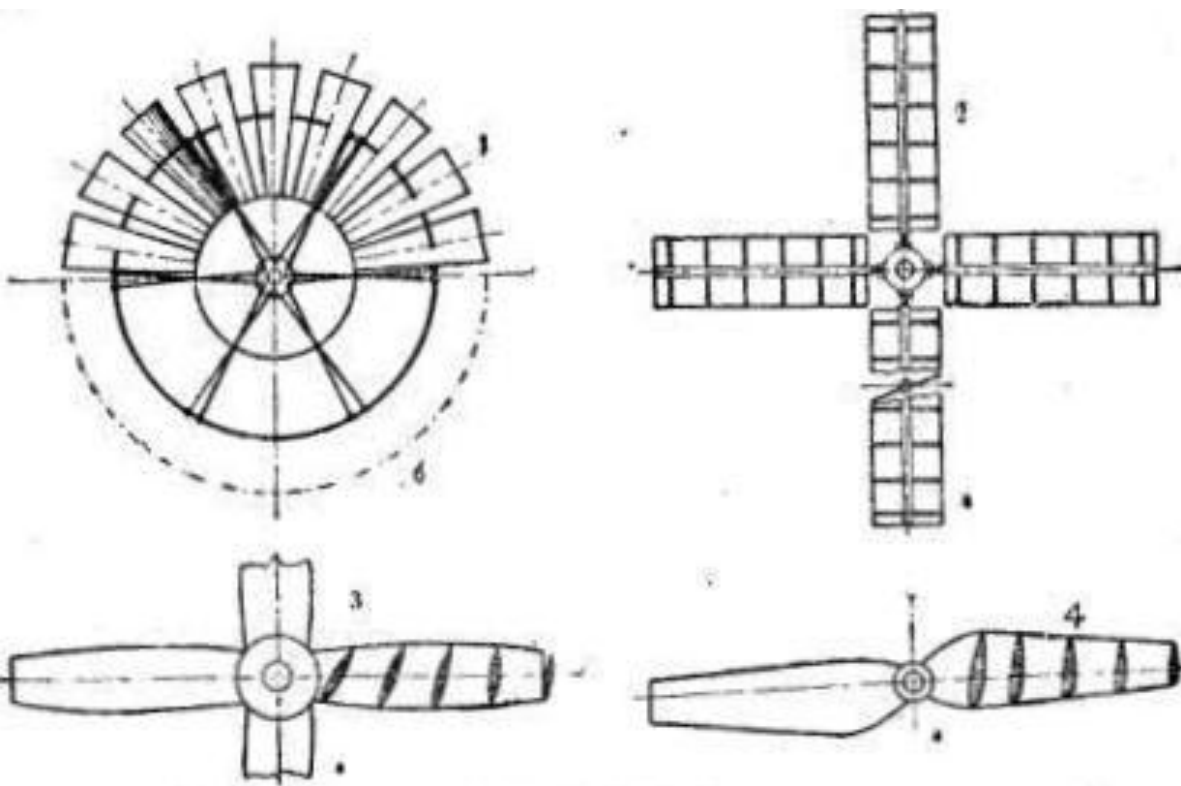


Рис. 37. Схемы ветроколёс крыльчатых ветродвигателей: I — многолопастное ветроколесо; II, III и IV — малолопастные ветроколёса.

Роторное карусельное

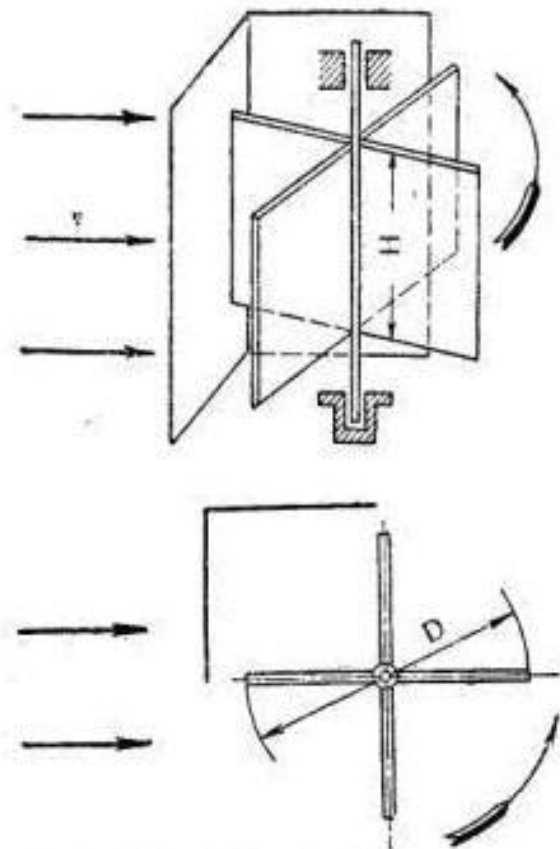


Рис. 38. Схема карусельного ветряка.

## Роторное барабанное

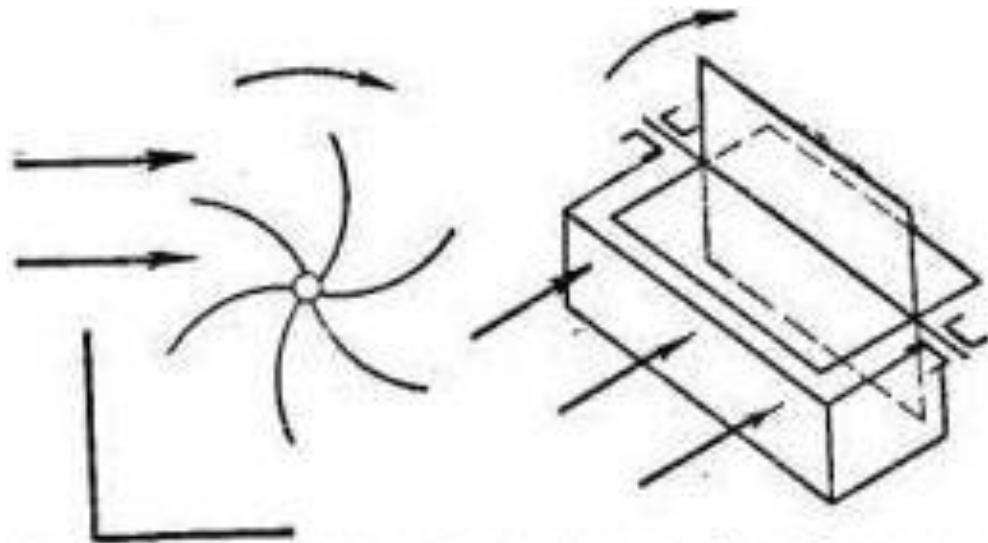


Рис. 40. Схема ветроколеса барабанного типа.

## Савониуса

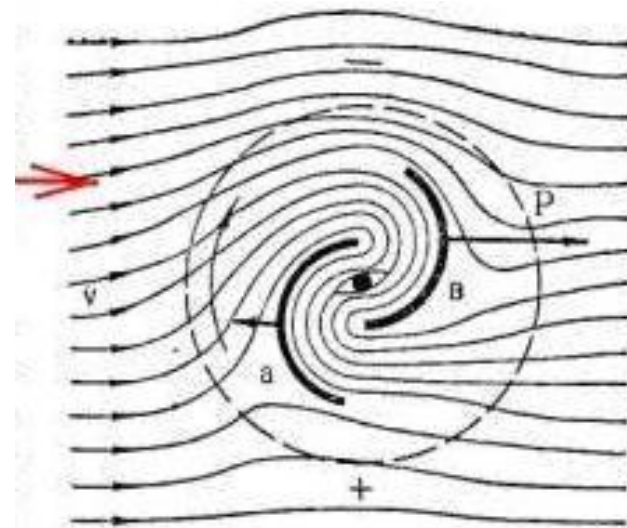


Рис. 49. Схема движения ветрового потока при обтекании ротора Савониуса.

## Эффект Магнуса/Флеттнера

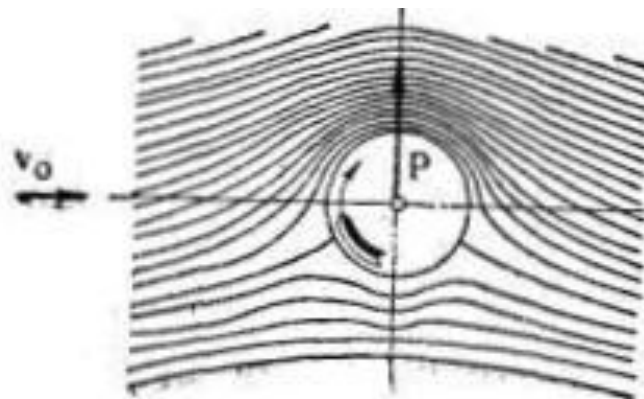
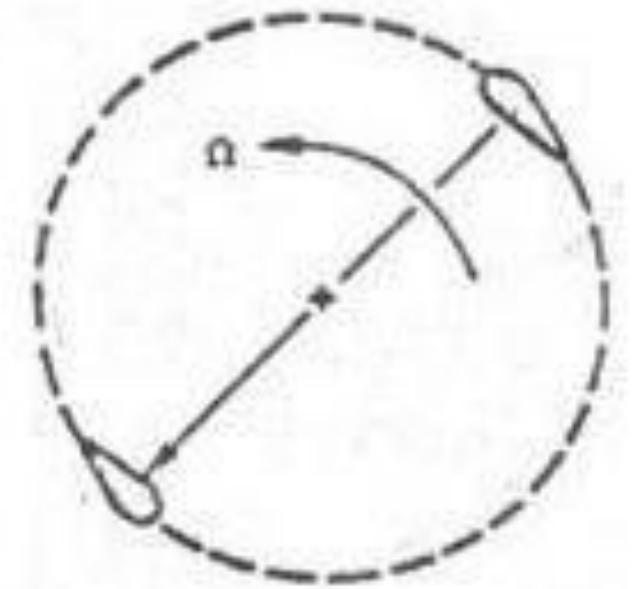


Рис. 46. Схема возникновения подъемной силы на цилиндре, вращающемся в воздушном потоке.


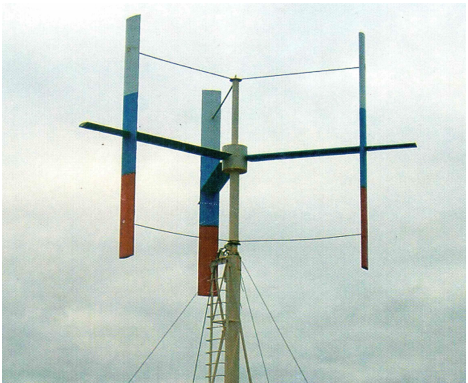
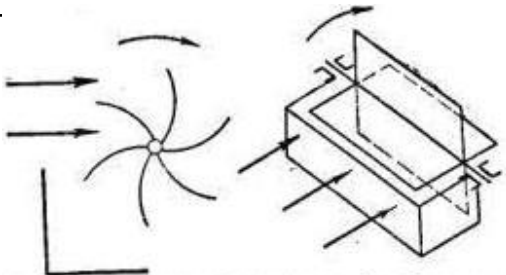


# Роторная крыльчатая установка

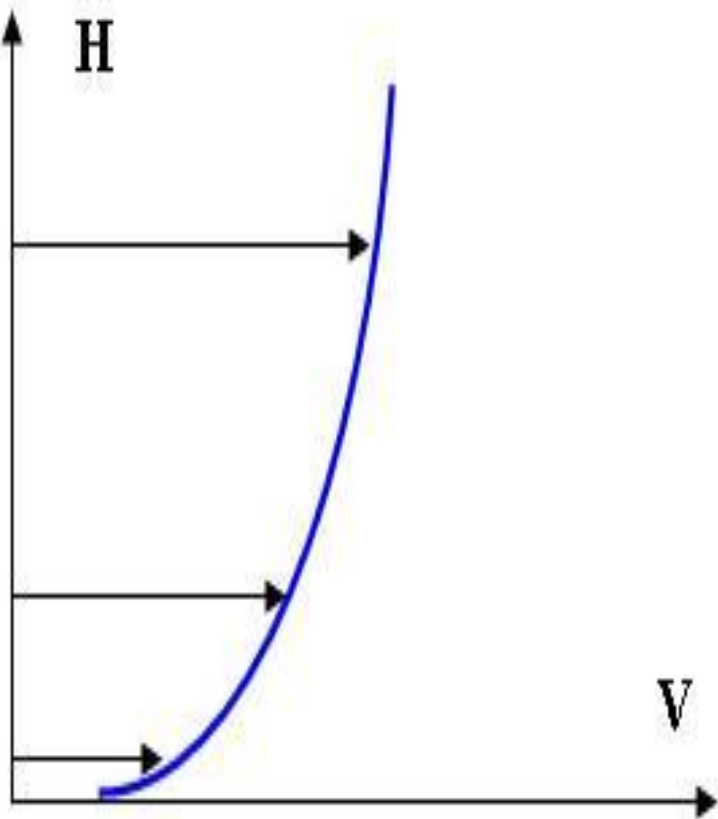




# Сравнение типов ветротурбин по теоретической аэродинамической характеристике $\xi$ (КПД ветротурбины)

Тип ветротурбины	Коэф. $\xi$	рисунок
Крыльчатая с горизонтальной осью вращения параллельной потоку воздуха (классическая)	0,593	
Карусельная крыльчатая ветротурбины с вертикальной осью перпендикулярной направлению движения потока	0,41	
Роторная карусельная с осью перпендикулярной направлению движения потока	0,192	 <p data-bbox="1319 1372 1827 1422">Рис. 40. Схема ветроколеса барабанного типа.</p>

# Ветер



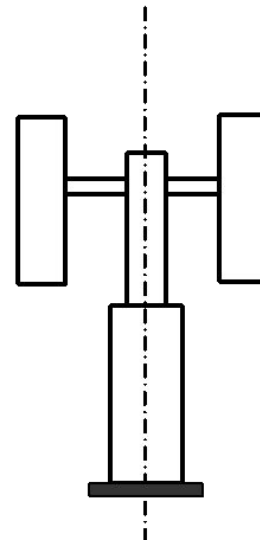
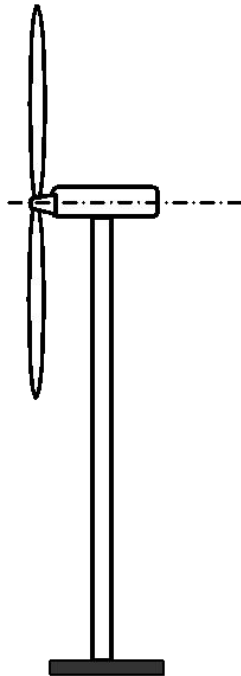
<b>м/с</b>	<b>Вт/м<sup>2</sup></b>
<b>1</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>477</b>
<b>11</b>	<b>815</b>
<b>15</b>	<b>2067</b>
<b>18</b>	<b>3572</b>
<b>21</b>	<b>5672</b>
<b>23</b>	<b>7452</b>

# Облик современной ВЭУ

## ВЭУ

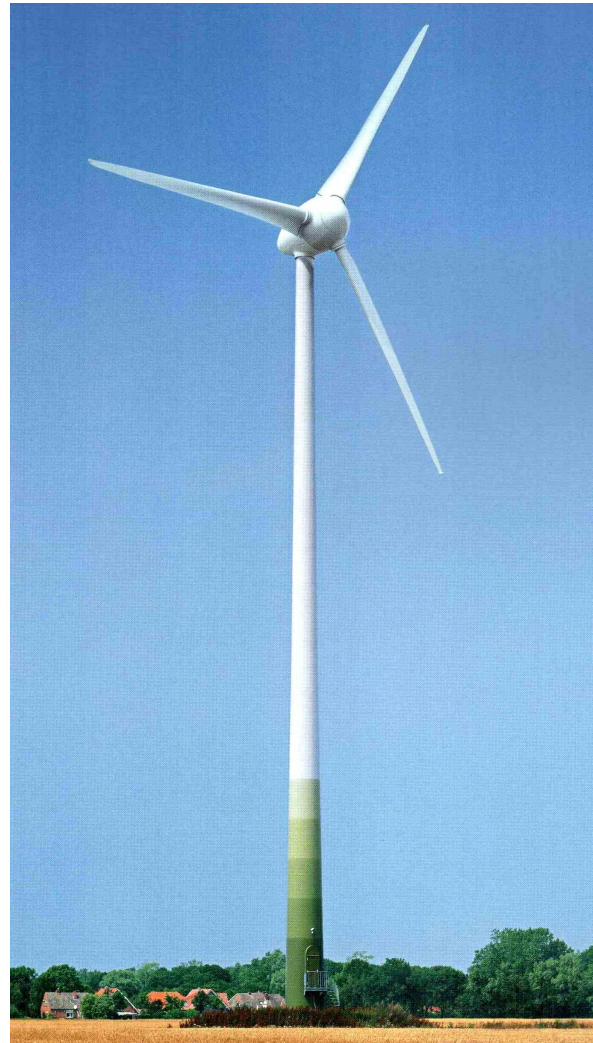
Горизонтальная ось вращения ветроколеса (ось расположена вдоль потока воздуха).  
Основное количество в мировом ветроэнергетическом парке

Вертикальная ось вращения ветроколеса (ось расположена поперёк потока воздуха)





# Современная ВЭУ



Главная характеристика ВЭУ - себестоимость получаемой электроэнергии.

$$\xi = 0,593$$



Wieringermeer Nederlande

Классическая

$$\xi = 0,41$$



Карусельная крыльчатая

$$\xi = 0,192$$

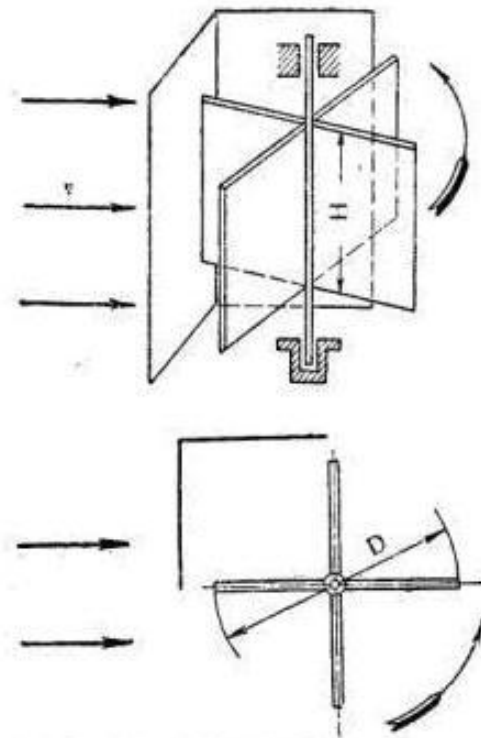


Рис. 38. Схема карусельного ветряка.

Карусельная роторная



# ВЭУ на основе эффекта Магнуса-Флеттнера

Эффективность несущего профиля лопасти или крыла характеризуется коэффициентом качества профиля  $K$ :

$$K = C_y / C_x$$

$C_y$  – характеризует подъёмную силу профиля (т.е. полезный эффект),

$C_x$  – характеризует силу сопротивления профиля (т.е. вредный эффект).

Для вращающегося цилиндра  $K = 3$

Для профилей достигим  $K = 28$ .

Теоретический КПД  $\xi = 0,593$ .





# Реальные ветроустановки

Производитель ВЭУ	$\xi_{\max}$
<b>Enercon</b>	<b>0,52</b>
<b>Vestas</b>	<b>0,5</b>
<b>Nordex</b>	<b>0,5</b>
<b>Gamesa</b>	<b>0,5</b>
<b>Umoe</b>	<b>0,5</b>
<b>Sinoi</b>	<b>0,5</b>
<b>Euros</b>	<b>0,5</b>

Основная борьба между теми или иными производителями идет не в разрезе типов ветродвигателей,

а в технологии производства, надежности и стоимости оборудования.



# Мировые тенденции развития конструкций ВЭУ

- увеличение КПД ВЭУ;
- увеличение коэффициента использования установленной мощности;
- рост единичной мощности установки;
- размещение оси ветротурбины на максимально возможной высоте;
- адаптивность ВЭУ (приспосабливаемость базовой конструкции) к району и особенностям применения;
- формирование цены по размеру ветротурбины и высоте башни;
- уменьшение количества механически изнашиваемых агрегатов;
- минимизация участия человека в управлении установкой;
- снижение материалоёмкости, в первую очередь металлоёмкости;
- снижение трудозатрат на механическую обработку деталей;
- снижение вредного влияния на макросистему (ВЭС на сеть и шум ВЭУ);
- снижение массы агрегатов ВЭУ для снижения требования грузоподъёмности (и соответственно цены) к строительно-монтажной технике и обустройству строительной площадки,
  - минимизация требования к квалификации работников выполняющих монтаж и наладку.
  - снижение требований к эксплуатации ВЭУ для минимизации затрат на эксплуатацию и ремонт, а также снижения требования к квалификации эксплуатационного персонала.

## Почему три лопасти?

### Формула идеальной ветротурбины:

- Ось вращения параллельна направлению скорости ветра.
- Бесконечное количество лопастей, ширина которых стремится к нулю.
- Сопротивление лопастей равно нулю, а сами лопасти по всей своей длине одинаково эффективно работают.
- Количество энергии, снимаемое с потока в каждой точке ометаемой площади, постоянно.
- Угловая скорость вращения стремится к бесконечности.

### Три лопасти компромисс между

С одной стороны

стремлением обеспечить конструктивную прочность лопастей и снизить динамические нагрузки,  
удешевить ВЭУ путём уменьшения количества лопастей,  
обеспечить допустимый уровень аэродинамических шумов и вибраций, усиливающихся с ростом скорости движения концов лопастей

**И**

с другой стороны

стремлением к увеличению КПД ветротурбины, растущего с увеличением оборотов ветротурбины и числа лопастей.



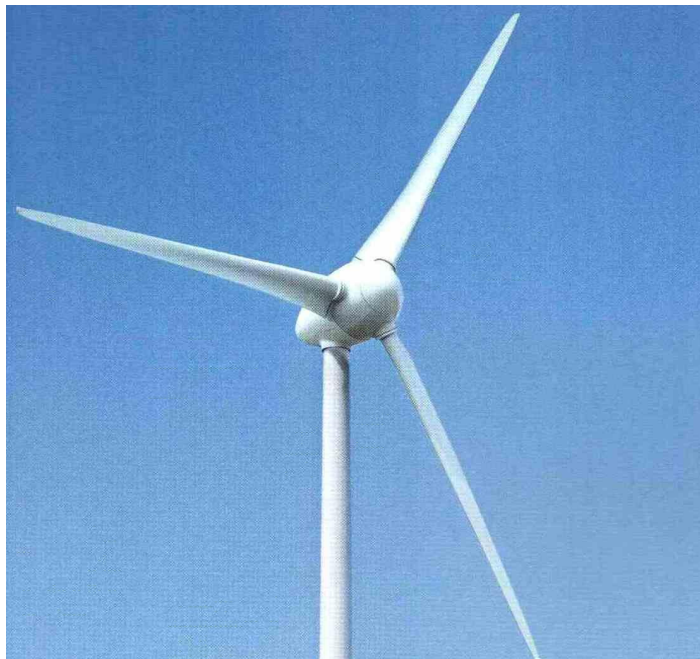
## Какие ВЭУ лучше – с мультипликатором или без?

ВЭУ с низкооборотными генераторами занимают около 15...17%рынка.



**ВЭУ**

с мультипликаторным  
приводом, ширина  
гондолы 2,5м



**ВЭУ Enercon**

Диаметр гондолы 8м



**ВЭУ Harakosan**

Диаметр гондолы 4м

### Преимущества прямоприводных ВЭУ:

- выше КПД;
- проще монтаж;
- дешевле эксплуатация;
- выше межремонтный ресурс;
- ниже вредное влияние на макросистему (ВЭС на сеть);
- проще при освоении производства.

## Для чего такая тонкая высокая башня?

Высокая башня позволила поднять ветротурбину повыше, что повысило выработку энергии



С созданием системы pitch-контроля (управления углом атаки лопастей), разрушающие нагрузки на башню намного снизились (на лопасти и прочие элементы также). Конструкторы ВЭУ создали «Гибкую башню», как более лёгкую и дешёвую.

## Какой мощности ВЭУ наиболее востребованы в мире?

Наиболее востребованными в мире сегодня стали установки мощностью в пределах 1,5...2,5МВт, применяемые для строительства ВЭУ на суше

и установки от 3-х МВт и выше, как правило, применяемые для строительства ВЭС в прибрежной зоне с фундаментом на морском дне.

Такое разделение по размерам в первую очередь связано с возможностями транспорта и монтажной техники.

## Как изменяется удельная цена ВЭУ с ростом установленной мощности?

В сегодняшнем мире более корректно связывать цену установки не с мощностью установленного генератора, а с размером ветротурбины и высотой башни.

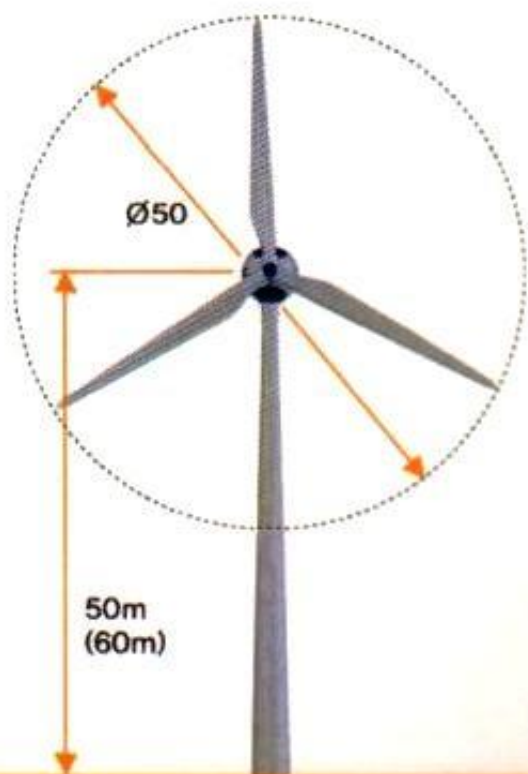
Производители для различных по силе ветра районов предлагают различного размера установки при одном и том же генераторе.



# Разделение ВЭУ одной мощности по ветровым районам

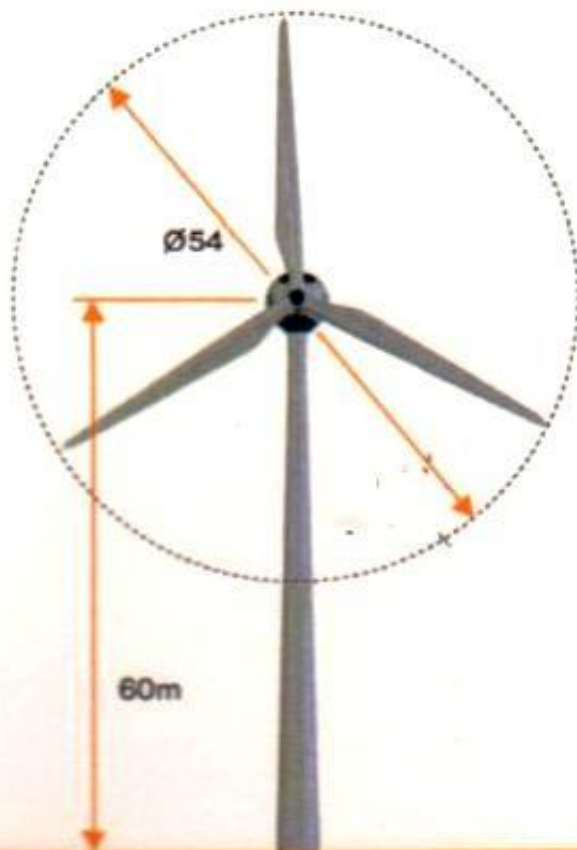
I район

Model\_ U50



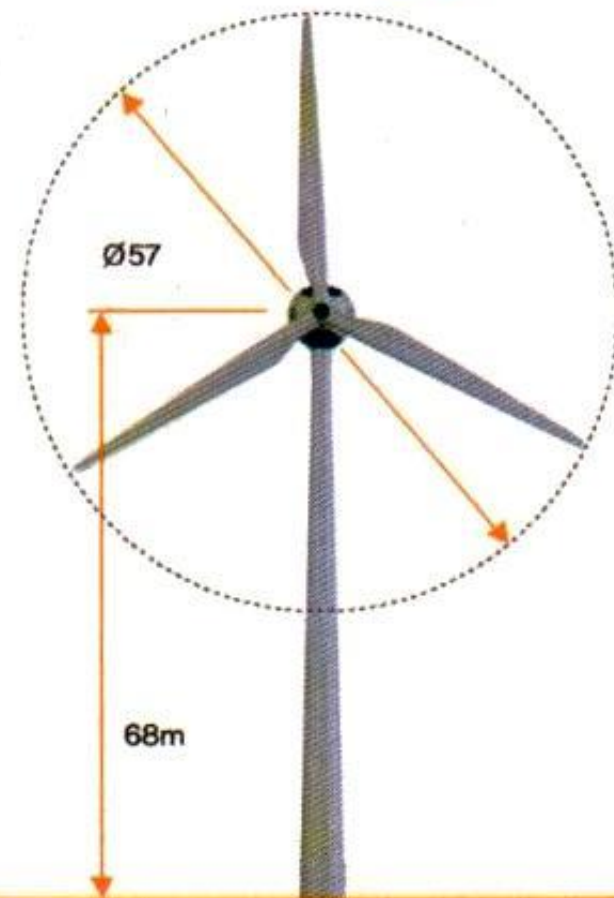
II район

Model\_ U54



III район

Model\_ U57



# Эти различия ВЭУ для разных ветровых районов отражаются в наименованиях

## GAMESA G83-2.0 MW



## GAMESA G90-2.0 MW

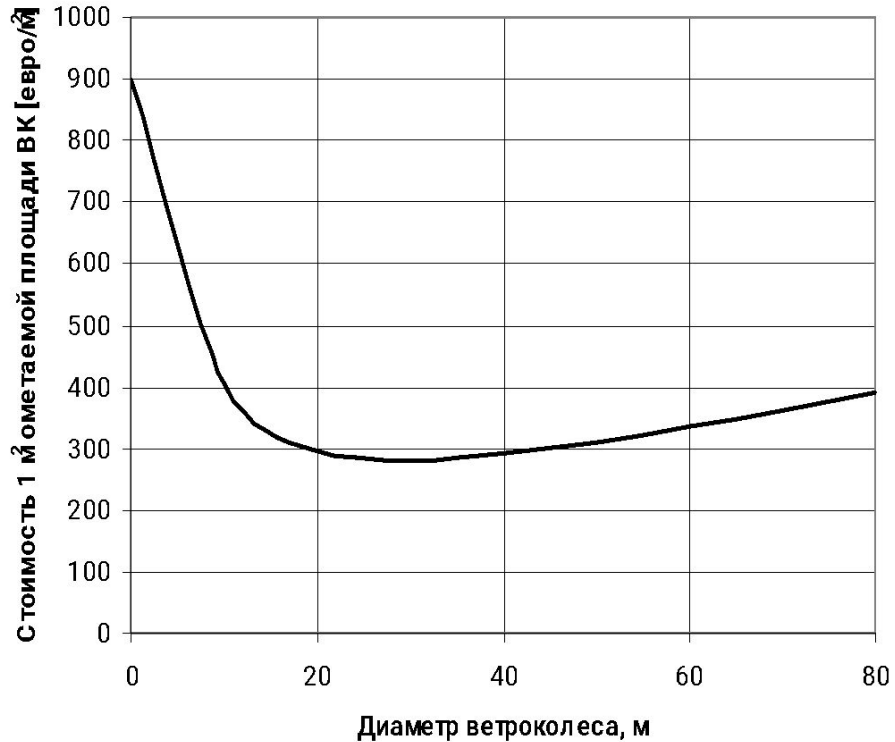




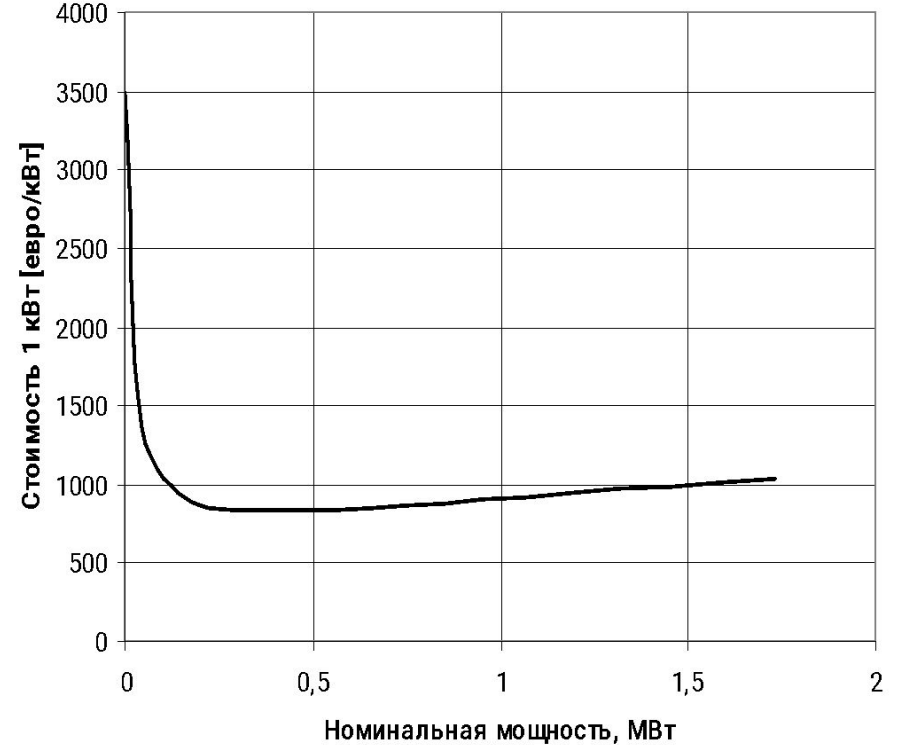
# Зависимость стоимости ВЭУ от диаметра ветротурбины и единицы установленной мощности

(цифры 2002 года, на сегодня их нужно увеличить на 25..30%).

От диаметра ветротурбины



От мощности генератора



# ВЭУ для России



В качестве основных критериев выбора конструкции ВЭУ для строительства ВЭС в России приняты

**минимальные затраты  
времени и средств**

как для строительства ВЭС, наладки и эксплуатации, так и для освоения производства этих ВЭУ в России.

В соответствии с этими критериями предложены основные принципы по выбору ВЭУ.



# Основные принципы по выбору ВЭУ:

1. Конструкция ВЭУ должна строиться на основе принятых в мире отработанных технических решений и, в противоположность, не содержать (или содержать минимум) технических решений, требующих конструктивной доводки и отработки.

2. Конструкция ВЭУ должна следовать мировым тенденциям развития техники в общем смысле и ВЭУ-строения в частности:

- увеличение КПД машины;
- размещение оси ветротурбины на максимально возможной высоте для максимального использования установленной мощности;
- адаптивность ВЭУ (приспосабливаемость базовой конструкции) к району и особым условиям применения;
- уменьшение количества механически изнашиваемых агрегатов и деталей;
- минимизация технического обслуживания;
- минимизация участия человека в управлении установкой;
- снижение материалоемкости, в первую очередь металлоёмкости;
- снижение трудозатрат на механическую обработку деталей;
- снижение вредного влияния на макросистему (ВЭС на сеть и шум ВЭУ);
- стабилизация выходных параметров тока ВЭУ (в первую очередь частоты) мощной силовой электроникой;
- приближение производства к месту применения (локализация).

3. Конструкция ВЭУ должна иметь наибольший эффективный потенциал развития и совершенствования (т.е. улучшения характеристик, приведенных и п.2 по сравнению с предлагаемыми на рынке).

4. Конструкция ВЭУ должна быть наиболее пригодной для производства в России с минимально возможными начальными затратами.

5. Агрегаты, закупаемые на первом этапе производства ВЭУ за рубежом, должны быть такими, чтобы затраты и технические проблемы при освоении их производства в России могли быть минимальными.

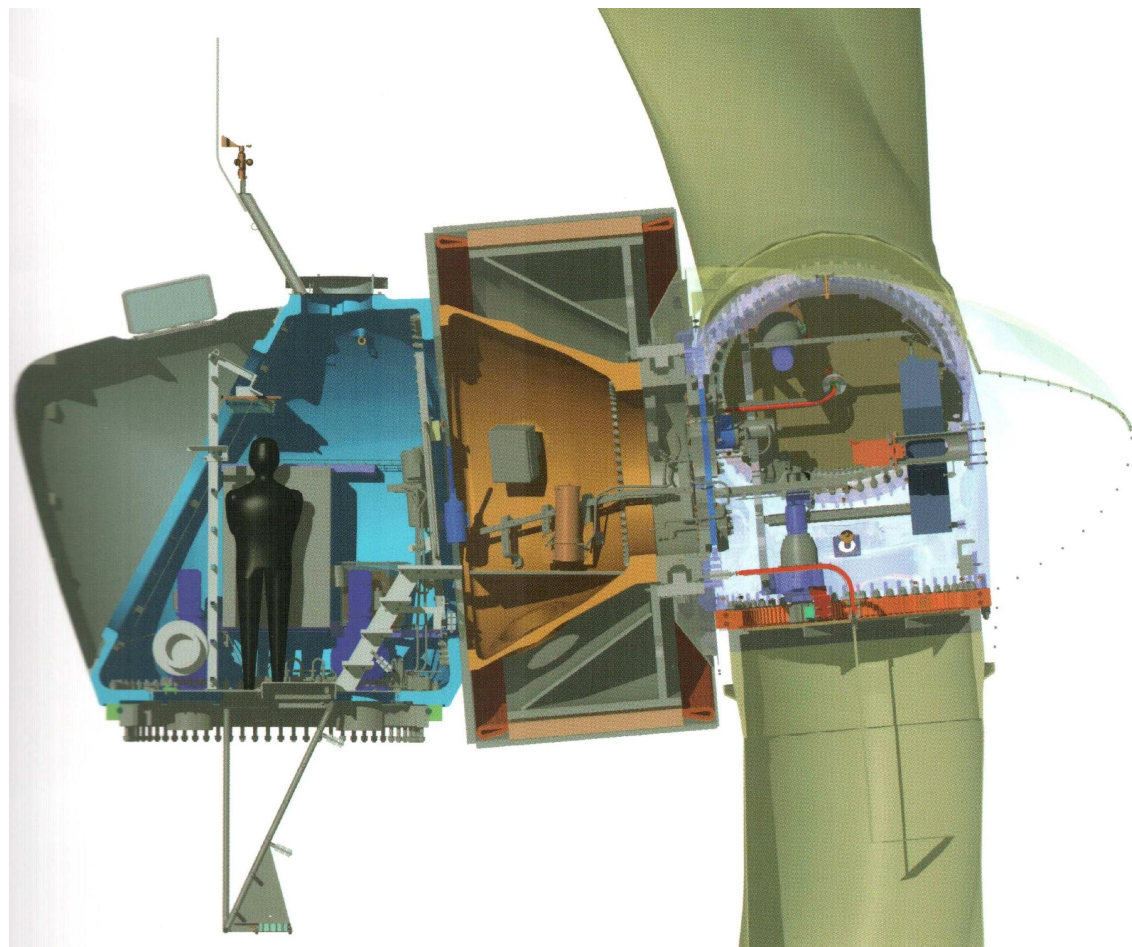
6. Размер отдельно транспортируемых агрегатов должен позволять осуществлять транспортировку агрегатов в российских условиях.

7. Конструкции агрегатов ВЭУ должны иметь минимально возможный вес для снижения требования грузоподъёмности (и соответственно цены) к строительномонтажной технике и обустройству строительной площадки, а также позволить минимизировать требования к квалификации работников при монтаже и наладке.

8. Требования к эксплуатации ВЭУ должны позволять минимизировать затраты на эксплуатацию и ремонт, а также снижать требования к квалификации эксплуатационного персонала.

9. Конструкция и эксплуатация ВЭУ должны быть приспособлены к суровым и разнообразным российским условиям.

# Наиболее полно соответствующая критериям и отвечающая принципам конструкция ВЭУ



## **Основные отличительные особенности этой ветроустановки:**

1. Наиболее просто адаптируется к климатическим и эксплуатационным условиям России.
2. Имеет наибольшее количество агрегатов, производство которых возможно сразу начать в России и, соответственно, минимальное количество агрегатов, которые на начальном этапе придётся закупать по импорту.  
На последующем этапе освоение недостающих в российском производстве комплектующих вызовет наименьшие затраты ресурсов на организацию их производства в России.
3. Оказывает минимальное вредное влияние на сеть.
4. Пригодна как в работе общей сетью, так и в локальной сети.
5. Позволяет осуществить транспортировку в российских условиях.
6. Имеет не слишком тяжёлые монтируемые краном агрегаты и, соответственно, монтаж ВЭУ выполняется самоходной мобильной грузоподъёмной техникой.
7. Имеет долгий безремонтный ресурс и наиболее простое обслуживание, т.к. имеет единственный ресурсно нагруженный узел – подшипник главного вала ВЭУ совмещённый с генератором, имеющим непосредственный привод от ветроколеса, т.е. механическому износу в основном подвергается этот подшипник, заведомо изготовленный с большим ресурсным запасом.
8. Обладает наиболее высоким коэффициентом полезного действия по выработке электроэнергии.
9. Наименьшее по затратам времени и средств обслуживание в эксплуатации, а также требования к квалификации персонала, обслуживающего ВЭУ согласно регламенту ТО.