

Бипланная коробка – экономически выгодный эквивалент лопасти ветряка

Сегодня ветроэнергетика копирует авиационные технологии. Суть подхода производителей крупных ветрогенераторов – как можно больше электроэнергии с квадратного метра лопасти. И как следствие, абсолютно совершенный внешний вид. Но аэродинамическое совершенство ещё не значит, что стоимость киловатта минимальна.

Как можно больше электроэнергии с вложенного рубля – принцип, которым необходимо руководствоваться в серьёзных проектах. Иначе любой проект для экономики станет убыточным - ветроэнергетика в частности.

Поэтому, при проектировании ветроустановок надо уделить внимание следующим пунктам

- Уменьшать удельную массу конструкции.
- Увеличивать общие размеры – диаметр ротора 200м и более. То есть при номинальном ветре 10 м/с мощность будет более 10 МВт.
- Располагать станции только в зонах стабильного ветра (издержки от строительства линий электропередач предпочтительней издержек от простоя).
- Надёжный потребитель – только единая энергосистема.

Газотурбинные и даже угольно-паровые электростанции дешевле монопланых ветряков, а значит, сегодня ветроэнергетика в её немецко-американском виде экономического смысла не имеет.

Стоимость конструкции ветроустановки – функция её массы. Масса обусловлена необходимостью создать заданную прочность. Масса зависит не только от прочности материалов, но и от способа конструкции. Покажем, как может быть снижена стоимость (масса) самой дорогой детали ветроэлектростанции – её лопасти.

Доказательство

1. Предлагается следующий ход рассуждений (Рис. 1): предположим, что у нас есть ротор с предельно нагруженными лопастями. Поэтому, произвольное сечение лопасти выполняется сплошным из высокопрочного материала, с высоким модулем упругости. Другими словами, хорошие лопасти – тяжелые и дорогие. Таким образом, мы достигаем предельно большого удлинения (отношения радиуса к хорде) на лопастях при их необходимой прочности и жесткости. В результате получаем высокое аэродинамическое совершенство, другими словами Качество. То есть отношение подъемной силы Y к лобовому сопротивлению X или $K = Y / X$.

2. На произвольном участке лопасти от силы Y действует изгибающий момент M_x . Качество $K > 50$, а значит напряжениями от момента M_u и другими силами мы пренебрегаем ввиду их малости.

3. Рисуем «стандартный 15% профиль» с хордой $b=1$ и высотой $h=0,15$.

4. Заменяем его для наглядности прямоугольником той же прочности со сторонами $b=0,7$ и $h=0,14$ с площадью сечения $S=b \cdot h=0,1$; момент сопротивления сечения относительно оси «ох» $W_x = b \cdot h^2 / 6 = 0,0023$.

5. Заменяем аэродинамический профиль $b=1$ эквивалентной бипланной схемой $b=0,5$ – площадь аэродинамической поверхности остаётся неизменной.

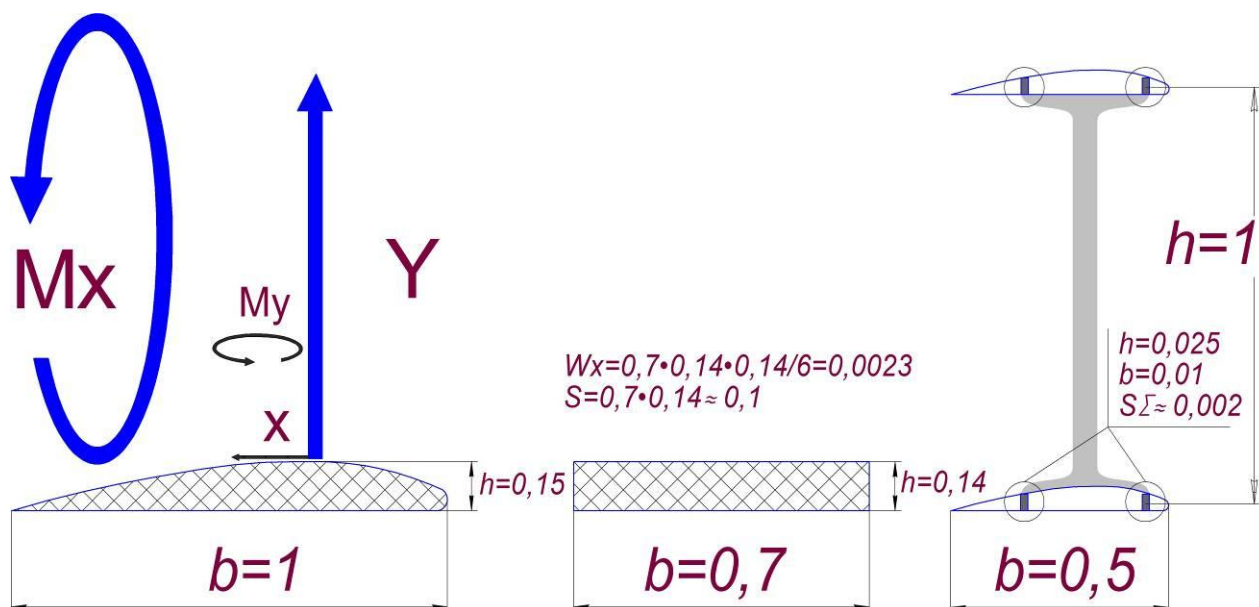


Рис. 1 Преобразование монокрыла в бипланную коробку (БК)

6. На все 3 схемы действует одинаковый M_x , в трёх силовых схемах предельные напряжения совпадают, т.о. момент сопротивления W_x указанных сечений одинаков.

7. Разделив $W_x=0,0023$ на строительную высоту **бипланной коробки (БК)** $h=1$, принимаем суммарную площадь сечения лонжеронов (БК) $S_{\Sigma}=0,002$. Их сечения обведены кружками и обозначены с точностью до одного знака. Точность в данном случае не нужна, так как отличие площади исходного профиля от площади сечения лонжеронов БК на два порядка!

Немного о законе квадрата-куба.

Землеройка похожа на слона, но слон на два порядка больше по габаритам. При этом кости слона по отношению к его габаритам толще на порядок, или увеличение площади их сечения пропорционально росту размеров животного.

В технике при увеличении размеров изделий приходится уменьшать запас прочности или изменять способ конструкции. Получается, что чем изделие меньше, тем большую нагрузку (относительно собственной массы) оно может воспринять и при этом будет изящнее.

С точки зрения закона квадрата-куба невыгодно делать большие ветряки.

- Масса (стоимость) растёт в кубе, а мощность только в квадрате, так как она снимается с ометаемой площади.

Сравнение ВЭУ-015 «Пчела» от ООО «Энергетика и климат» и 5М компании REpower Systems AG

марка	Производитель	Расчётная скорость ветра	Номинальная мощность	Диаметр ротора	Масса конструкции	Удельная мощность кВт/кг	Приведенная к 13 м/с удельная мощность
ВЭУ-015 «Пчела»	ООО «Энергетика и климат»	8 м/с	150 Вт	1,2 м	9 кг	0,017	0,73 кВт/кг
5М	REpower Systems AG	13м/с	5 МВт	126 м	Более 1 250 000 кг	0,004	0,004 кВт/кг

Вывод: при равной скорости ветра, один килограмм ВЭУ-015 может дать энергии почти в 180 раз больше, чем 5М! Это предостережение от гигантомании.

Аргументы в пользу увеличения размеров ветрогенераторов.

1. В приземном воздушном слое (до высоты 50 м) ветер имеет суточные колебания скорости, кроме того, его скорость возрастает с высотой. Увеличение скорости с 8 м/с до 10 м/с даёт почти двукратный прирост мощности. Чем установка больше, тем она выше и может обладать большей относительной энергоотдачей за счёт прироста скорости ветра. Как деревья в лесу тянутся к свету, так ветроустановки стремятся захватить стабильные и быстрые слои атмосферы. В борьбе за доступ к энергии размеры побеждают.
2. Большие ветряки при заданной выработке электроэнергии занимают меньше земной площади.
3. Чем электростанция больше, тем легче налаживается вокруг неё инфраструктура и упрощается возможность обслуживания.
4. С точки зрения государственного подхода к энергетике (в вольной трактовке А.Б. Чубайса) электростанции больше 100 МВт являются серьёзными. Для ветрогенератора такая мощность означает диаметр ротора более 600 метров!

Вывод: БК (как и конструкции из углепластика) «отодвигает» действие закона квадрата-куба, побеждает Мх, выставляя задачу Эйлера по устойчивости пролётов и стоек на первый план. Современные материалы, прежде всего углеволокно, обладая высоким удельным модулем упругости, позволят создать гораздо более изящные БК, по сравнению с теми, что были в начале прошлого века. Кроме того, 100 лет назад конструкторы не могли полностью численно рассчитывать многостоечные БК (их схема статически не определима) и при их создании полагались на статистический опыт и интуицию, что ставило бипланы в уязвимое положение перед простой расчетной схемой монопланов (и их несложными прочностными испытаниями). На современном уровне имеет смысл написать компьютерные программы, которые позволят достичь максимального эффекта от внедрения БК как в ветроэнергетику, так и в авиацию. Предварительные расчёты показывают, что стоимость ротора на основе БК может быть в 5-6 раз ниже стоимости классического ротора при диаметре 100 м и более.

Сколько будет стоить бипланный эквивалент 5М

На создание ветротурбины 5М компанией REpower было затрачено €12,5 миллионов (относительно этой суммы есть сомнения, 5М должна стоить значительно дороже – как ни как, авиационные технологии). Таким образом, 1 кВт обошелся в 2.5 тысячи евро. Для сравнения киловатт тепловой станции (самой выгодной в энергетике) примерно в 2-3 раза дешевле. «Бипланная технология» то есть увеличение «строительных высот», как способа борьбы с доминирующими силами в конструкции от изгибающих моментов позволит уменьшить массу 5М примерно в 6 раз. То есть ко всей конструкции должен быть применён совершенно иной подход. При сохранении технологического уровня, в 6 раз уменьшится и стоимость киловатта. Получается, что бипланный *киловатт может стоить меньше €500*. При таких низких строительных издержках, ветряки вполне способны конкурировать с тепловой электрогенерацией. Работать они должны в условиях стабильного и сильного ветра. Но ветер в любом случае ненадёжен. Только единая энергосистема может нивелировать изменчивость погодных условий.

Насколько важна сила ветра

Люди строят города в тех местах, где есть хорошие условия для жизни. Хорошие погодные условия – это ветер до 5 м/с. Но посмотрите на график (Рис.2), построенный по материалам сайта компании REpower Systems AG. Мощность при таком ветре ничтожно мала. В идеале она не больше 1 МВт. Но и в этом случае срок окупаемости становится очень долгим. В балтийском море ветер усиливается. Ветрогенераторы следуют за ним.

Мощность воздушного потока по скорости растёт в кубе, а мощность ветрогенератора по своему закону, предписанному системой регулирования. В средней области мощностей электроника отслеживает «идеальную» кубическую параболу с КПД 40%. При 11 м/с максимальная мощность 5М достигает 4 МВт (80% от номинала), а мощность воздушного потока через окружность равную диаметру ротора – 10 МВт. Далее электроника по соображениям прочности и долговечности ограничивает мощность, достигая номинала 5 МВт при 13 м/с. Ограничение приводит к резкому уменьшению КПД, но, к счастью, ветер в море совершенно бесплатный.

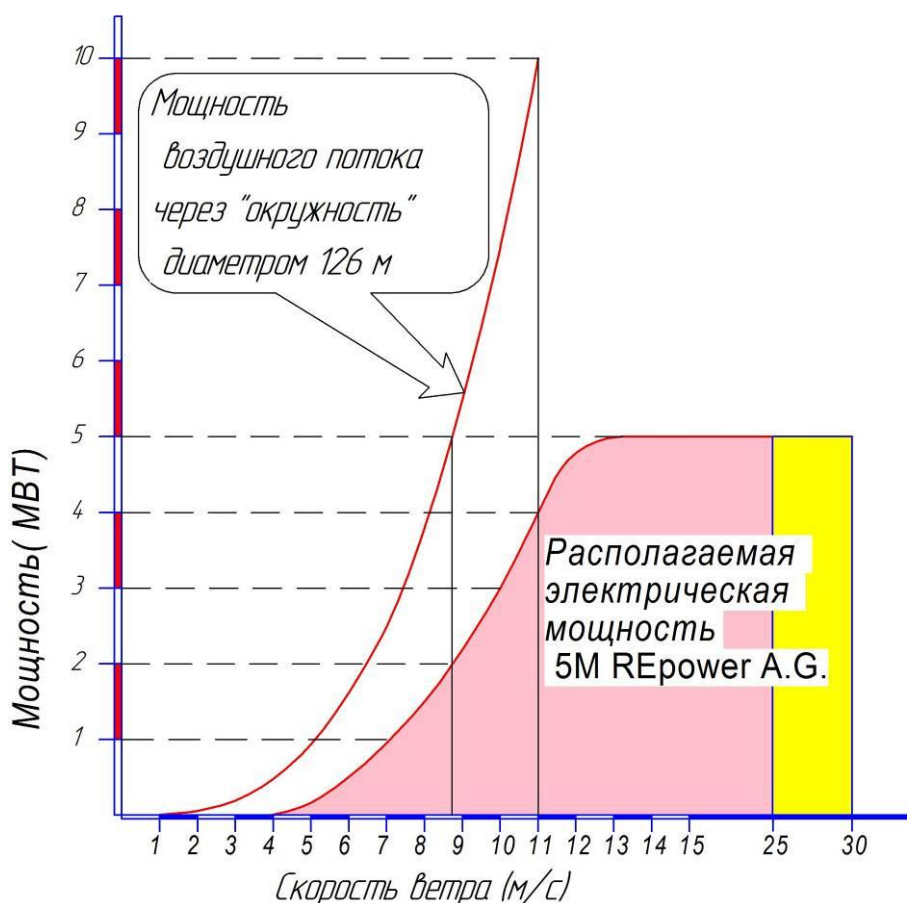


Рис.2 Зависимость мощности от скорости ветра

Перевести скорость ветра на человеческий язык помогает шкала Бофорта

Баллы	Скорость ветра, м/с	Название ветра
0	0...0,5	Штиль
1	0,6...1,7	Тихий
2	1,8...3,3	Легкий
3	3,4...5,2	Слабый
4	5,3...7,4	Умеренный
5	7,5...9,8	Свежий
6	9,9...12,4	Сильный
7	12,5...15,2	Крепкий
8	15,3...18,2	Очень крепкий
9	18,3...21,5	Шторм
10	21,6...25,1	Сильный шторм
11	25,2...29,0	Жестокий шторм
12	Более 29,0	Ураган

С началом жестокого шторма ротор 5М может быть остановлен, а при урагане ветряная электростанция должна быть, безусловно, выключена. Но главным врагом на море является штиль, а не ураган. Именно по этой причине парусники были побеждены пароходами, а на суше ветряные мельницы были вытеснены паровыми машинами.

Почему БК не нуждаются в поворотной ступице

Исторически сложилось так, что авиация для многих поколений стала символом прогресса. В свою очередь воздушный винт – символ авиации. Если хотите, квинтэссенция совершенства. Но всё это иллюзии: и авиация сверхконсервативна, и воздушный винт по ряду причин не может быть совершенным.

- Начнём с того, что максимального КПД винт достигает при установочном угле лопасти 45°, но при этом лопасть не плоская, она должна иметь аэродинамическую крутку. В результате оптимальный угол может быть лишь на определённом радиусе.
- Теория говорит: чем меньше лопастей, тем выше КПД; но чем их больше, тем большую мощность можно передать винту.
- Чем уже лопасти, тем выше их качество, но меньше жесткость и возможно разрушение.

Конечно, возможен баланс противоречий, но он будет свой не только для каждого режима полета, но и для каждого аэропорта (имеются в виду ограничения по шуму).

Стоит ли говорить о том, что на ветряных установках винт не только работает наоборот (не забирает, а генерирует мощность), но к условиям авиации не имеет никакого отношения! Задача получить максимальный КПД вообще не стоит. Тем не менее, роторы ветряных электростанций практически полная копия авиационных воздушных винтов. Просто авиационных инженеров некому научить «правильным» мельничным крыльям. Сколько было попыток привнести авиационные идеи в морское дело, где они? Может и есть, но их не видно.

Поворот лопастей воздушного винта вызван необходимостью на взлёте получить максимальную тягу (углы малы), а в крейсерском полете максимальный КПД (угол 45°). Поворотная ступица значительно повышает стоимость винта, прежде всего потому, что возрастает масса этого агрегата.

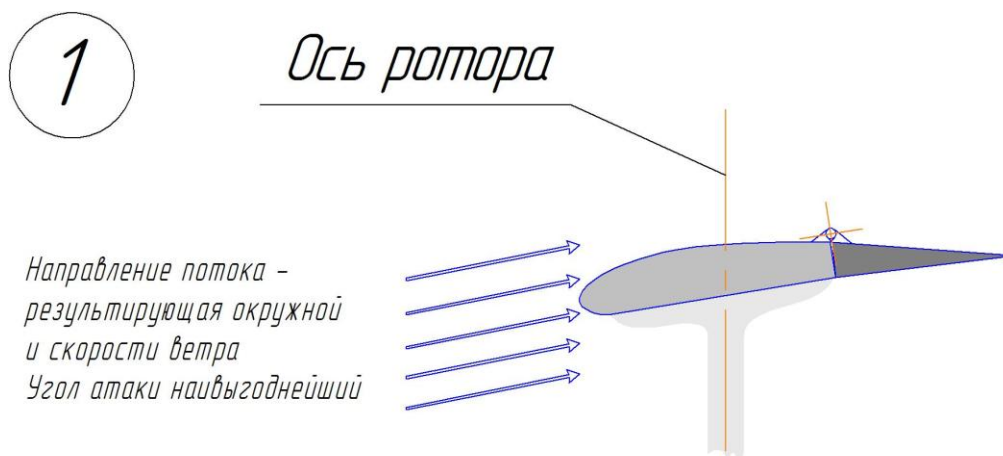
На ветряных мельницах не было поворотных ступиц, иначе затраты на их строительство не окупились бы. Но тогда при усилении ветра крылья мельниц должны идти в разнос. С этой неприятностью боролись с помощью тормозов. При очень сильном ветре мельницу останавливали торможением вала.

Крылья – это не лопасти. Зачем поворачивать огромное крыло целиком, когда есть механизация: элероны, закрылки и предкрылки. По сравнению с крылом их масса ничтожна, тоже можно сказать и про цену. Поворачивать крыло целиком можно и на самолётах, но только вместо полезного груза придётся возить поворотный узел.

Напрашивается вывод – тормозить ротор закрылками (Рис. 3). Только в отличие от самолётных, они должны отклоняться в сторону большей кривизны профиля.

На скоростях ветра до номинальной включительно закрылок не отклонён (режим 1). При увеличении скорости ветра стоит задача уменьшить кривизну профиля, снизить КПД, увеличить установочный угол. Решение достигается отклонением закрылка (режим 2). При остановке ротора профиль крыла вырождается в воздушный тормоз (режим 3). Кроме цены у закрылков есть и другие преимущества.

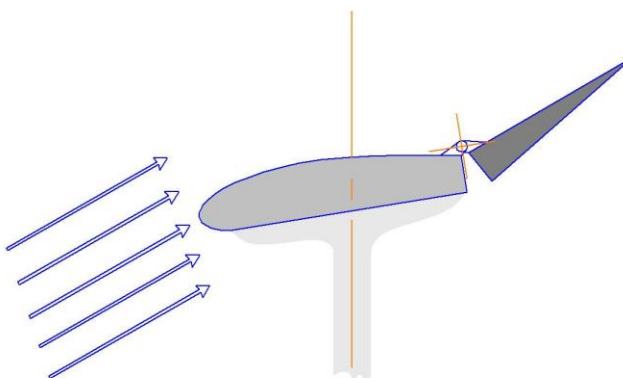
- Разукрупнение крыла по хорде, что очень важно при больших размерах.
- Лёгкая замена наиболее хрупкой части профиля (толстый материал находится к носке и центру).
- Малая инерция – их можно быстро отклонять.
- Закрылки могут состоять из множества секций, отрабатывая в реальном времени неоднородность воздушного потока, и выставлять плоскость ротора в нужном направлении. Разгружается поворотный узел башни, который при этом можно сделать меньшей массы (дешевле).



Закрылок в режиме максимальной угловой скорости

2

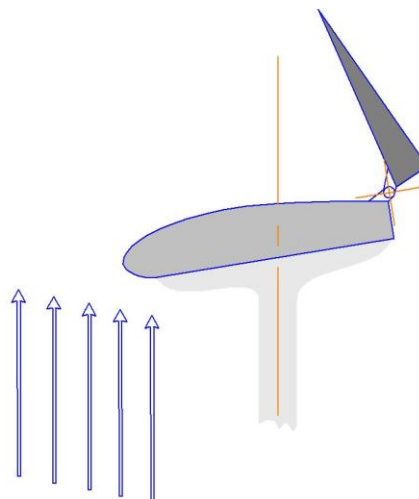
*Направление потока –
Угол атаки увеличен*



Закрылок в режиме пониженной угловой скорости

3

*Направление потока
совпадает со скоростью ветра –
Режим срыва –
Полный останов ротора*



Закрылок в режиме нулевой угловой скорости

Рис. 3 Три режима работы закрылков БК

Интересно сравнить силу от ветра на концах лопастей на режиме 3, с подъемной силой на номинале (режим 1). Воспользуемся данными компании REpower Systems AG. При скорости ветра 13 м/с угловая скорость вращения ротора 12,1 (1/мин) или $1,27 \text{ с}^{-1}$. Тогда окружная скорость конца лопасти $V = 63 \text{ м} \cdot 1,27 \text{ с}^{-1} = 79,8 \text{ м/с}$. Радиус ротора мы умножили на угловую скорость в радианах. Результирующая скорость воздушного потока есть векторная сумма окружной и скорости ветра $V_p^2 = V^2 + V_v^2$; $V_p = 81 \text{ м/с}$. Подъемная сила пропорциональна $C_y \cdot V_p^2$. На номинальном режиме коэффициент подъемной силы $C_y = 0,5$. При остановленном роторе в условиях урагана $V_{ур} = 40 \text{ м/с}$; $C_y = 1$. Сила режима срыва пропорциональна $C_y \cdot V_{ур}^2$. Отношение сил $0,5 \cdot 81^2 / 40^2 = 2$. Расчет конечно очень грубый, но позволяет сделать вывод, что для остановленного бипланного ротора без поворотной ступицы ураган не страшен.

Что общего между дирижаблями будущего и бипланными ветрогенераторами.

Главная проблема крупных дирижаблей – устойчивость их каркаса. В древности она решалась ажурностью конструкции. На современном уровне создать устойчивую «элементарную невесомую балку» можно с помощью газонаполненной высокопрочной оболочки. Для дирижабля материалом будет газонепроницаемая ткань, для элементов каркаса ветрогенератора автомобильный листовой прокат. Но в каждой такой балке должно быть сердце – автомат постоянного перепада давлений. Другими словами, каждая силовая деталь должна быть «живой»: со своим энергообеспечением, процессором, датчиками, исполнительными механизмами. В прошлом веке все эти атрибуты безумно подняли бы цену всей конструкции. В наше время такой подход позволяет делать предельно дешёвые крупногабаритные изделия любой отрасли машиностроения. Возможно, так же изменится вид высоковольтных опор. Если по этой технологии делать опоры высотой 150 метров, то и просеки в тайге не нужны, и монтаж можно вести крупнотоннажными дирижаблями. На которых газ и нефть перевозить выгодней, чем гнать по трубе или даже по морю.

Российские перспективы бипланных ветрогенераторов.

Почему мы гордимся Дмитрием Ивановичем Менделеевым. Проще говоря, порядок он навёл в Российской науке (и мировую прихватил). И от нефтяников ему спасибо, дал понять, что нефть и ассигнации – одно и то же. А нефтяники у нас где? На Севере! И ветры сильные на Севере. Так вот, десятимегаваттные бипланные ветрогенераторы нужны, чтобы не топить ассигнациями. Понятно, что максимальная прибыль за период эксплуатации нефтегазового месторождения будет получена, если все запасы продать. Безумные фонтаны и факелы не что иное, как упущенная прибыль.

31.01.2010 Конструктор транспортных средств П.Г. Антипов

Литература

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов – М.: Наука. 1979.
2. Петров К.П. Аэродинамика элементов летательных аппаратов. – М.: Машиностроение.1985.
3. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение.1990.
4. www.repower.de
5. www.powerinfo.ru/wind-generator.php
6. www.airvan.co.cc