

**Ветроэнергетические установки-
экологически чистые источники энергии.**

Д-р Ю.Б. Соколовский

НТА «Экологический императив»

Введение. Энергия ветра в течении длительного времени рассматривается в качестве экологически чистого и неисчерпаемого источника энергии. Эта энергия, которая поступает от Солнца и преобразуется в кинетическую энергию воздушных потоков (ВП) на Земле, соответствует, по оценкам специалистов, суммарной мощности свыше 10^{11} ГВт.

Использование энергии ВП для производства электрической энергии имеет много преимуществ. По сравнению с традиционными энергоресурсами, энергия ветра бесконечна и бесплатна. При ее использовании не вырабатываются экологически вредные газы, оказывающие влияние на климат. .

Принципы преобразования энергии ВП. Для преобразования энергии ВП в механическую энергию вращения могут применяться ряд физических принципов: например - *принцип подъемной силы* , - *принцип лобового сопротивления* .

Принцип подъемной силы основан на применении фундаментального эффекта, который используется для преобразования кинетической энергии ВП в механическую. Подъемная сила вызывается перепадами давлений, которые создаются при течении ВП по поверхностям. На рис. 1 показано, что асимметричный профиль вызывает различные длины направлений потоков. Следовательно, различные скорости течения ВП приводят к разности давлений, которая создает в конечном итоге подъемную силу.



Рис.1. Принцип подъемной силы R на примере аэродинамического профиля

$$R = \frac{C_y \rho V^2 S}{2} \quad (1)$$

где ρ - массовая плотность воздуха, V - скорость движения крыла относительно воздуха, S - площадь крыла, C_y - коэффициент подъемной силы крыла.

Принцип лобового сопротивления основан на возможности получать энергию из ВП только путем перемещения тела в ВП. (Ри.2) Если пластина неподвижна и перпендикулярна ВП, то на нее действует сила

$$F = C_x \frac{\rho S}{2} V_B^2 \quad (2)$$

здесь F - сила давления ВП (Н), C_x - коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы тела, ρ - плотность воздуха, V_B - скорость воздуха на пластине (м/с), S (m^2) - площадь профиля (поперечное сечение)

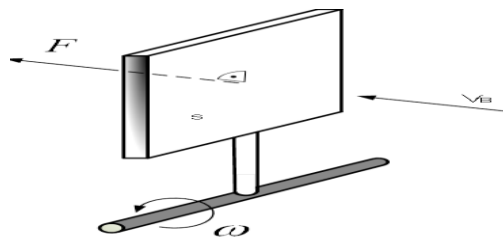


Рис. 2. Устройство использования принципа лобового сопротивления

Когда пластина движется - сила напора ВП будет равна

$$F = C_x \frac{\rho S}{2} (V_B - V_{\Pi})^2 \quad (3)$$

Для использования энергии ВП разработано большое количество типов ветровых энергетических установок (ВЭУ) в зависимости от ориентации оси вращения по отношению к направлению ВП они могут быть классифицированы следующим образом:

- с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ВП;
- с вертикальной осью вращения, перпендикулярной направлению ВП.

Сегодня ВЭУ с горизонтальной осью вращения составляют более 90% действующих ветроустановок. Согласно теории (Жуковского) для таких ВЭУ теоретический коэффициент использования энергии ветра равен 0,593. Реально, на практике у лучших быстроходных колес максимальное значение коэффициента использования энергии ветра доходит до 0,46, а у тихоходных — не более 0,36-0,38. Эффективно и целесообразно применять ВЭУ с горизонтальной осью (ВЭУГО) в тех случаях, когда ВЭУ имеет стабильные режимы – горизонтальный и постоянный, как по направлению, так и по величине, а это, в среднем, от 9 до 18 метров в секунду. Недостатком данной конструкции является малая поверхность лопасти, а как следствие этого - начальный крутящий момент близок к нулю и поэтому пуск таких ВЭУГО затруднен. Наибольшая эффективность их достижима только при условии обеспечения постоянной коллинеарности оси ветроколеса и направления ВП. Необходимость ориентации на ветер требует наличия в конструкции ВЭУГО механизмов и систем ориентации на ветер для непрерывного слежения за ветровой обстановкой. Основная часть разработчиков, стремясь под-

нять мощность ВЭУГО, пошла по пути увеличения размеров традиционных пропеллерных установок (их последние модели, оснащенные многотонным трехлопастным ротором диаметром 66 м, дают мощность до 2 МВт). Из рисунка 3 видно, как установленная мощность $P_{уст}$, развиваемая ветроколесом с горизонтальной осью вращения, зависит от его размеров.

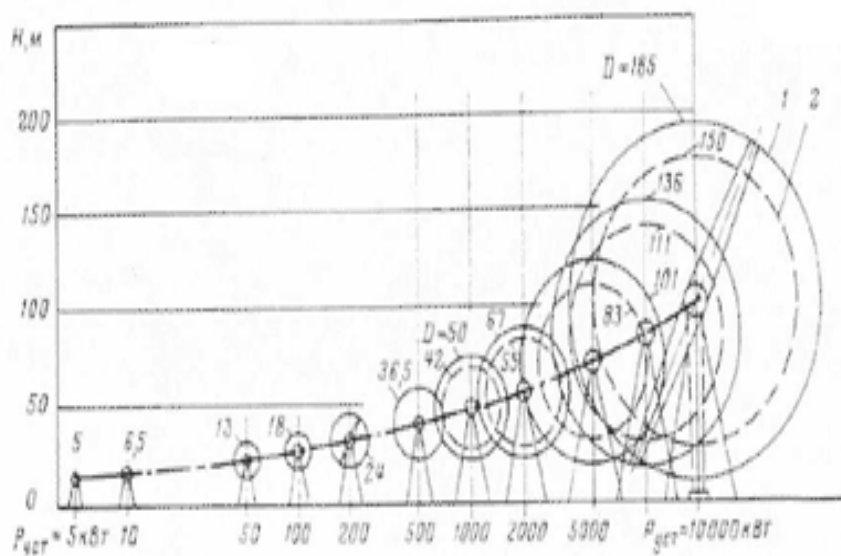


Рис.3

В качестве примера рассмотрим Горизонтально-осевые ветрогенераторы «Condor Air» 10-60 кВт компании



Рис.4 Ветрогенераторы серии «Condor Air» - это установки разработанные специалистами компании «Энергия Дисижн». Ветроустановки выпускаются в диапазоне мощности 10-60 кВт в Омске..

К этому типу ветроустановок относится разработанная Цилиндрическая ветротурбина. Патент №2563558.(Опубликовано: 20.09.2015г Бюл.№26.) В процессе ее разработки удалось ликвидировать ряд недостатков классических пропеллерных ВЭУГО и существенно улучшить экологию в зоне применения- жилым фонде. Основным узлом рассматриваемой ВЭУГО является цилиндрическая ветротурбина (ЦВ), установленная на ее горизонтальном валу(Рис.5). Поверхность цилиндра примыкает к переднему и заднему колесам на горизонтальном валу-2(Рис.6). Отметим, что колеса имеют по $N > 2$ расположенных симметрично штанг, а положение штанг заднего колеса сдвинуто относительно штанг переднего на угол β , который задает угол атаки α для всех лопастей и фиксируется ступицей заднего колеса. Особенностью конструкции ЦВ является постоянное (субоптимальное) положение каждого крыла относительно вектора входного ВП - т.е. его угла атаки ..

1. В разработанной ВЭУГО обеспечена автоматическая ориентация горизонтального вала цилиндра параллельно ВП. Для этого ось вращения механизма ориентировки на ВП помещают перед входным колесом цилиндра(конический редуктор-5). При любом отклонении цилиндра от направления ВП на внешнюю боковую поверхность цилиндра с соответствующей стороны будет автоматически действовать сила пропорциональная площади его сечения.

2. Снижаются требования к прочности материалов, используемых в конструкции, так как крыло жестко закреплено на штангах колес и цилиндра. Это существенно повышает надежность в работе ВЭУГО при всех ее режимах и минимизирует вибрации - Источник помех).

3. Установка на переднем колесе дополнительной ячеистой сетки защищает крылья от мусора и летающей живности.

4. Фактором, повышающим к.п.д., является эффект разницы скоростей между ВП, движущимся по внешней поверхности цилиндра и на его выходе..

5. Достоинством является эффективная работа в зоне небольших скоростей ВП за счет значительной площади ее крыльев (ориентировочная площадь одного крыла $\equiv RL$, а общая - $\equiv NRL$), что на порядок увеличивает подъемную силу крыльев по сравнению с классическими ВЭУГО

6. В описанной ВЭУГО используется механизм настройки (наладки) на оптимальный угол атаки крыльев α относительно ВП, который выбирается в номинальном режиме (номинальная скорость ВП, номинальные обороты цилиндра и номинальная нагрузка)

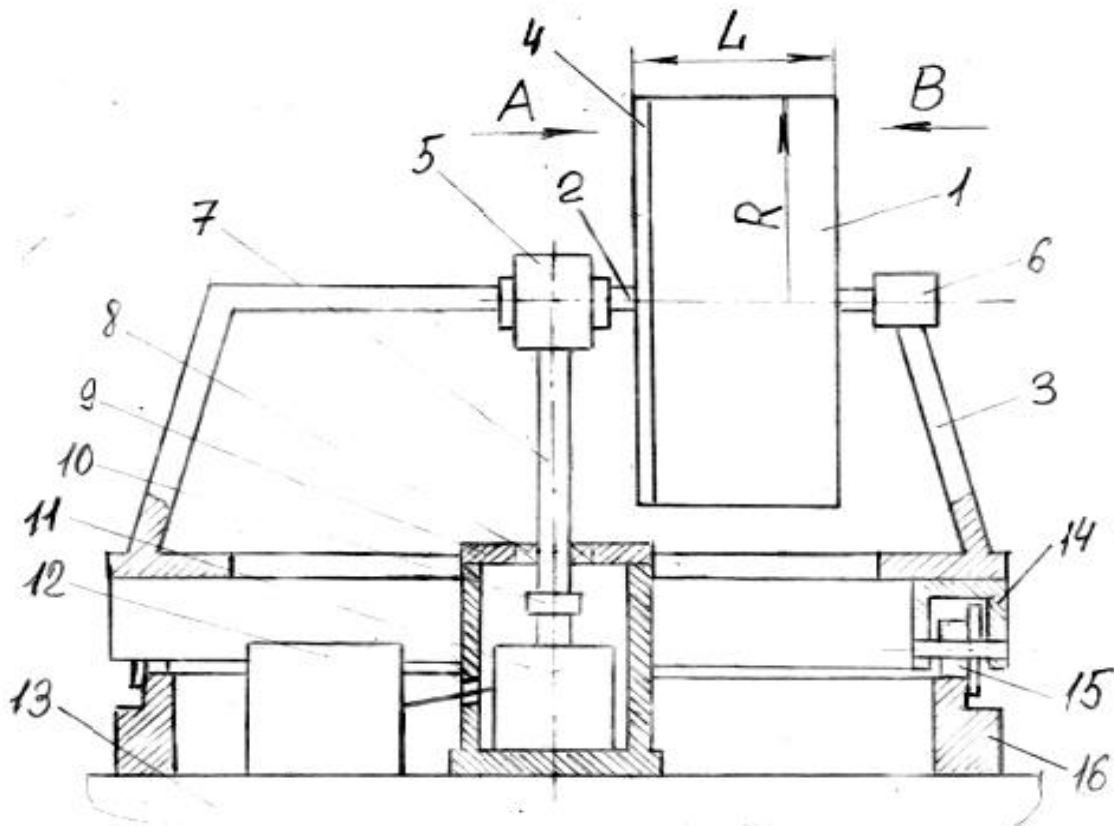


Рис.5 Общий вид

1-ЦТ,2- горизонтальный вал,3-опорная конструкция,4-защитная сетка,5- конический редуктор, 6-втулка с подшипником, 7-рабочий вертикальный вал,8- радиальный подшипник,9- опора подшипника,10-соединительная муфта,11- блок генератора с регулированием оборотов,12- преобразователь электроэнергии, 13- крыша здания, 14-колесо,15- ограничитель колеса,16- кольцевая опора

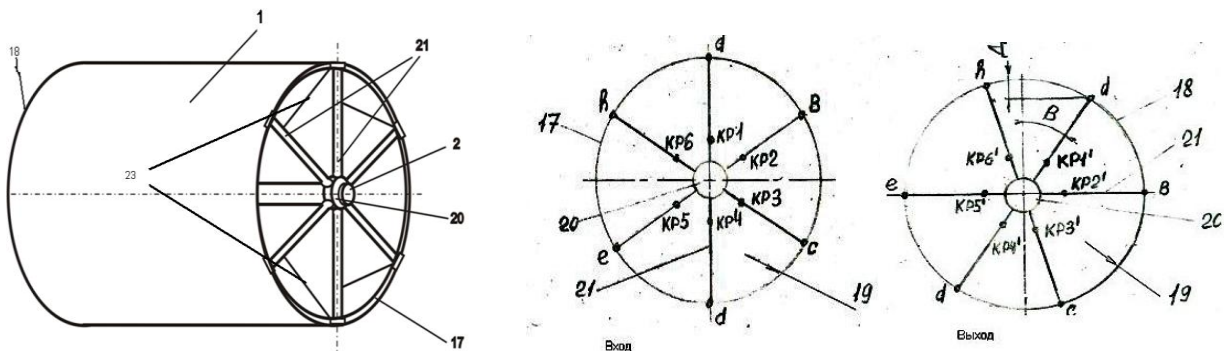


Рис.6 Цилиндрическая ветротурбина

1 - цилиндр, 2 - горизонтальный вал, 17 - входное колесо, 18 - выходное колесо, 19 - ободья колес, 20 - ступица, 21 - штанги (спицы) - а,б,с,д,е,г, 23 - лопасти

Ветрогенераторные станции на базе ВЭУГО. Большие ветрогенераторные станции являются сегодня весьма актуальными проектами масштабного электроснабжения, поскольку решения, направленные на развитие возобновляемых источников энергии, сегодня приоритетны для большинства развитых стран. По некоторым оценкам, в странах, где ветроэнергетика активно развивается, она уже сейчас может конкурировать с тепловыми энергоисточниками по себестоимости энергии за киловатт/час.

Ветрофермы (ВФ) — это комплексы ветроэлектрических установок (Рис.7), часто установленных рядами, которые перпендикулярны господствующему направлению ВП. Мощные ВФ способны решать проблемы энергоснабжения как крупных населенных пунктов так и небольших поселений.



Рис.7 Ветропарк в штате Калифорния , США.

Если два ВЭУГО работают в одном направлении ВП, вторая турбина будет получать уменьшенную скорость ВП и работать не оптимально из-за поступающей турбулентности ветра, вызванной первой турбиной. Вызванное распространение кильватерного потока называется wake-эффектом и оказывает наиболее значительное воздействие на соседние ВЭУГО, что влияет на производство электрической энергии.

Для ВФ на базе ВЭУГО разработан Способ ориентации установок сгоризонтально-осевыми пропеллерными турбинами. Заявка РФ 2014117781, Дата поступления 30.04.2014г. На палубе плавающей платформы (ПП) устанавливают симметрично относительно ее средней геометрической линии (СГЛ), рядами с разной высотой башни(Рис.8,9), на верхних площадках последних размещают пропеллеры ВЭУГО и генераторы (обычно на общем валу или через вариатор) с ориентацией общего вала всех ВЭУГО параллельно СГЛ (Рис.8). ПП под воздействием ВП за счет натянутой цепи

носового якоря и кормового паруса, расположенных в плоскости СГЛ, автоматически ориентируется по направлению ВП.

Отметим ряд достоинств предлагаемого способа.

1. Вместо вертикальной оси, вокруг которой вращаются в классическом случае гондола ВЭУГО при ориентации на направление ВП, в предложенном способе используется виртуальная вертикальная ось, проходящая через точку шарнирного крепления якоря. Это позволяет централизованно сориентировать все ВЭУГО ПП без механизмов ориентации классической конструкции (следящая система, гондола с кольцом поворота или вращающийся трансформатор) за счет большого плеча от якоря до кормового паруса.

2. В предлагаемом способе ориентации нескольких ВЭУГО функцию флюгера выполняет корпус ПП с кормовым парусом

4. Размещение ВФ не требует использования участков местности с минимальным ветровым сопротивлением или земельных участков с неприемлемой экологией. Снижается уровень помех из-за удаления от приемных устройств.

5. При скорости ВП, превышающей номинальное значение, можно с помощью кормового паруса повернуть ПП относительно плоскости СГЛ, снижая энергию ВП. Возможно при установке флюгера, анемометра, привода паруса и его системы управления повышать точность ориентации ПП на вектор ВП и изменять положение ПП, защищая его при больших скоростях ВП.

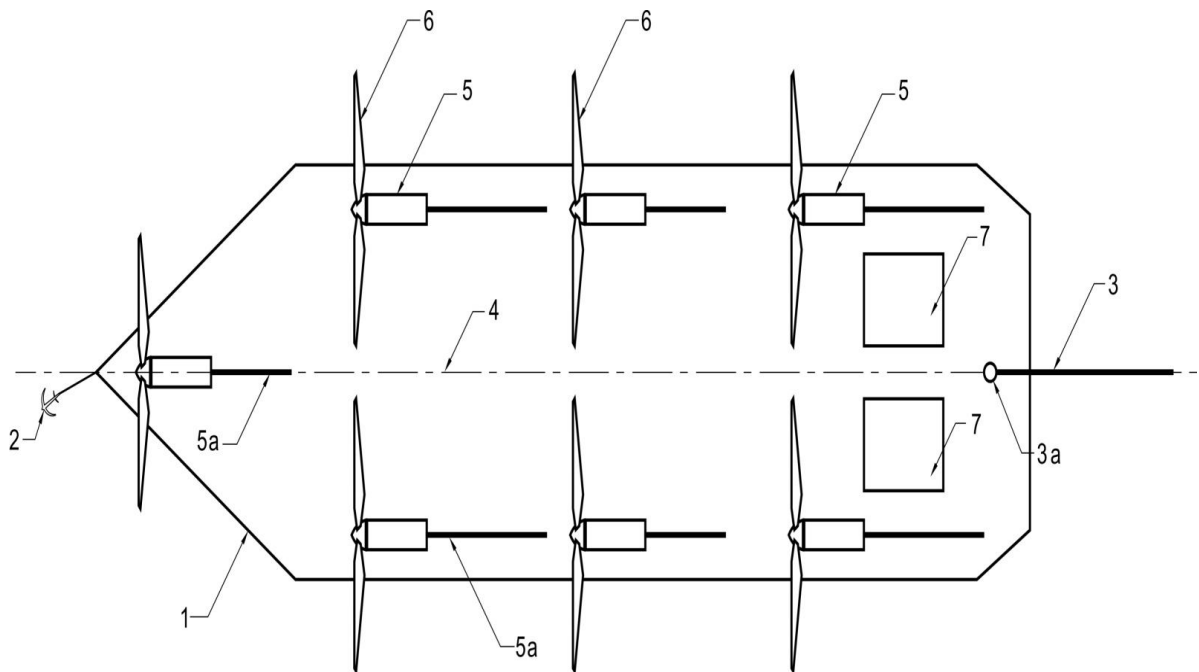


Рис.8 Плавающая платформа с ВЭУГО -вид сверху

1-ПП,2,2а-якорь и якорная цепь,3,3а-мачта с кормовым парусом,4-вариатор,генератор,5,5а-башня и ее упор,6-пропеллерыВЭУГО,7-энергетический блок

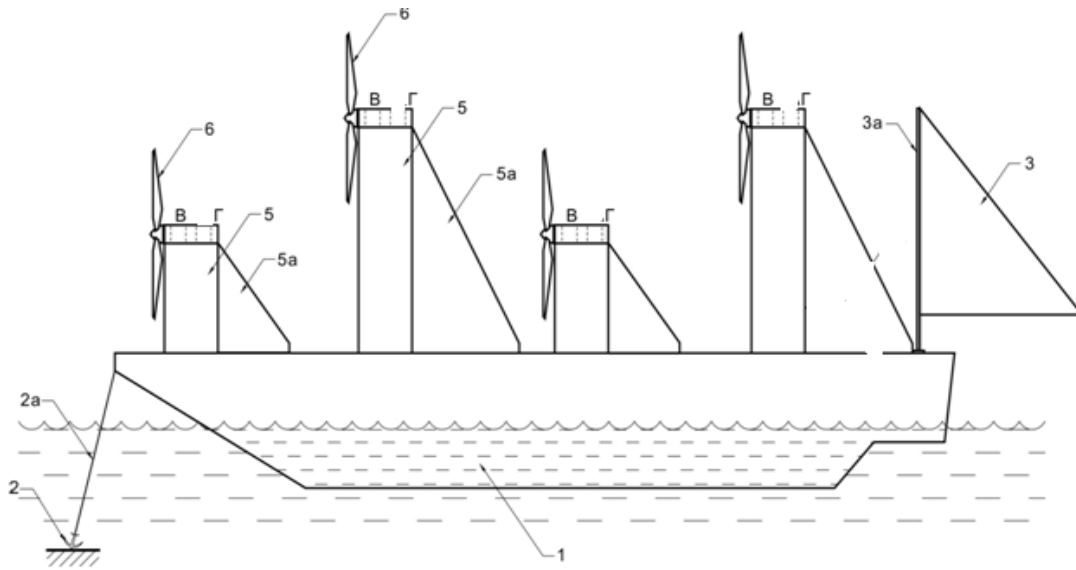


Рис. 9. Плавающая платформа с ВЭУГО-вид сбоку
 1-ПП,2,2а-якорь и якорная цепь,3,3а-мачта с кормовым парусом,4-вариатор,генератор,5,5а-башня и ее упор,6-пропеллерыВЭУГО,7-энергетический блок

ВЭУ с вертикальной осью вращения. Мощность ВЭУ с вертикальной осью вращения (ВЭУВО) -типа ротора Дарье- может достигать, по оценкам экспертов, 10 - 30МВт(Рис.10). Можно отметить ряд преимуществ таких ВЭУ: независимость функционирования от направления ВП, возможность замены консольного крепления оси двухопорным, возможность размещения потребителя энергии (генератора) в основании ВЭУВО, упрощение конструкции лопастей и снижение их материалоемкости, уменьшение шумности и площади земельного участка для ее размещения и др.

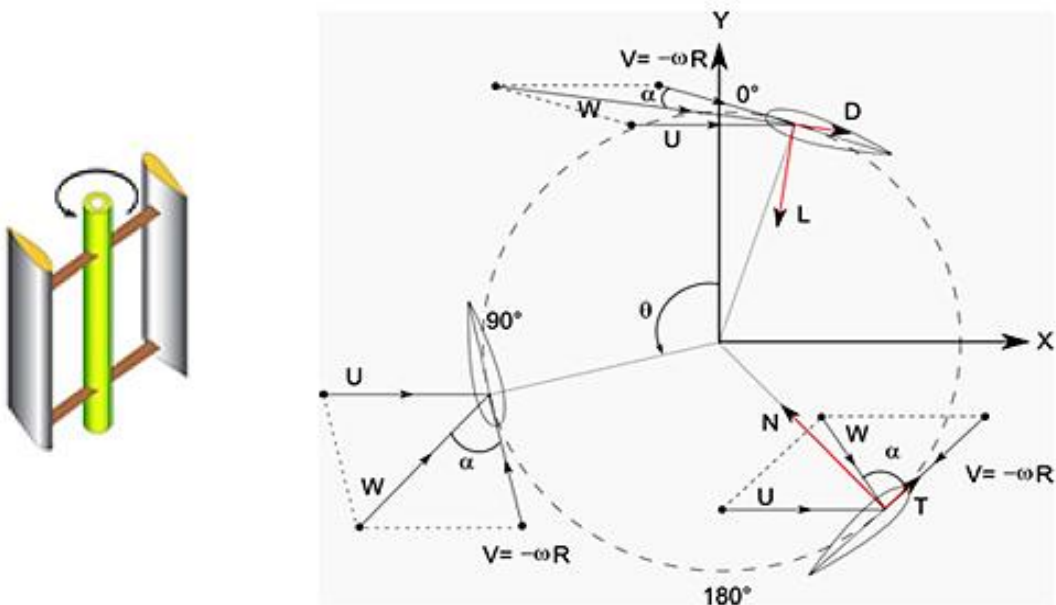


Рис. 10: Работа конструкции ветроротора типа Дарье, использующей подъемную силу крыла

где: U – скорость ветра, V – тангенциальная скорость перемещения лопасти; W – суммарная («кажущаяся») скорость воздушного потока, взаимодействующего с лопастью; α – угол атаки; T – сила, создающая крутящий момент; N – сила, приложенная к траверсе, соединяющей лопасть с валом установки; L – подъемная сила лопасти ; D – сила лобового сопротивления лопасти.

Применение в конструкции ВЭУВО механизма управления положением лопастей позволяет поворачивать лопасти относительно траверс так, что величина и направление действия результирующей аэродинамической силы на лопастях позволяют осуществить самозапуск ВЭУВО даже при скоростях ВП 3 - 4 м/с. Кроме того, управление положением лопастей дает возможность значительно улучшить его рабочие характеристики.

Разработан Способ преобразования кинетической энергии потока во вращательном движении крыла и установка для осуществления этого способа. (Заявка РФ 2014146593. Дата поступления 19.11.2014г.) Технический результат предлагаемой разработки (Рис.11) заключается в существенном повышении эффективности преобразования кинетической энергии ВП. Под воздействием ВП на каждое крыло ВЭУВО, при движении его по круговой орбите, формируется постоянная максимально возможная подъемная сила крыла R . Ось каждого крыла(7) проходит через узел положения оси крыла (УПОК) (Рис.14). Крыло трехслойное (Рис.12). . Основу его составляет базовые листы (БЛ), к которым по переднему и заднему краям на шарнирах крепится двусторонняя подвижная фигурная аэродинамическая обшивка(АО), причем аэродинамическая форма крыла изменяется скачком симметрично относительно БЛ при движении каждого крыла по круговой орбите в зоне изменения знака момента, формируемого крылом(см. Рис.15). Рабочий момент, формируемый крылом, осуществляет давление на свою ось рабочим краем УПОК (Рис.14) . относительно результирующего вектора ВП(РВВП). На рабочем краю УПОК закреплен датчик давления Д (30). При этом осуществляется автоматическая подстройка угла атаки α относительно РВВП на максимальный сигнал датчика давления Д под воздействием экстремального регулятора (ЭР) на базе контроллера. и через ось(24) и планку(23) вращает закрывок с помощью серводвигателя, обеспечивая максимальное давление на ось крыла(Рис.13).

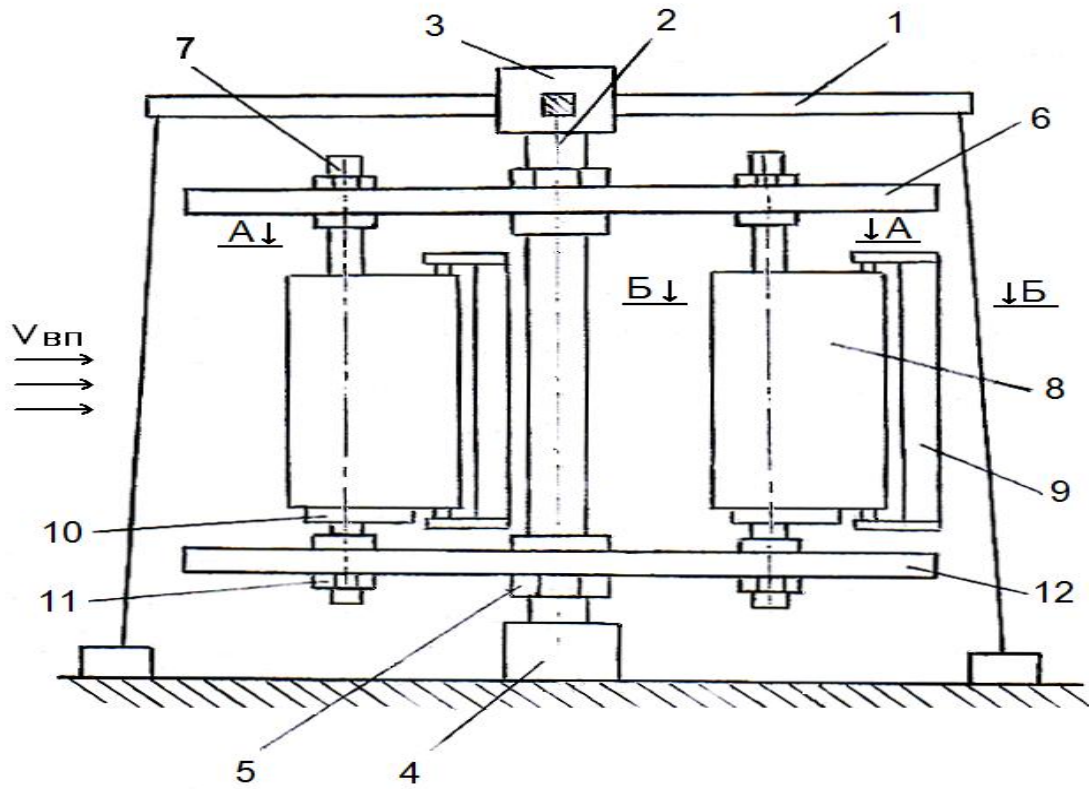


Рис.11 Общий вид

1-каркас,2-вал,3,4-опоры вала,
5-гайки вала,6-диски,7-оси крыльев

Б - Б

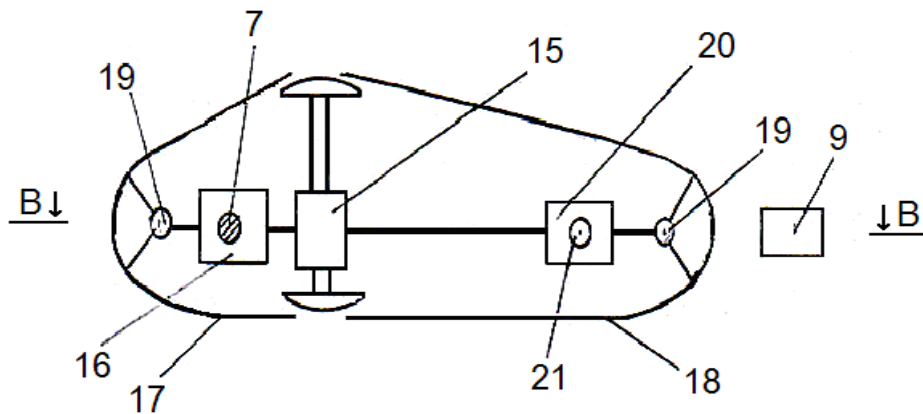


Рис.12 Разрез крыла по вертикали

16-УПОК,17-передняя ОК,18-задняя ОК,
19-оси ОК, 20-узел УЗ,21-ось закрывка

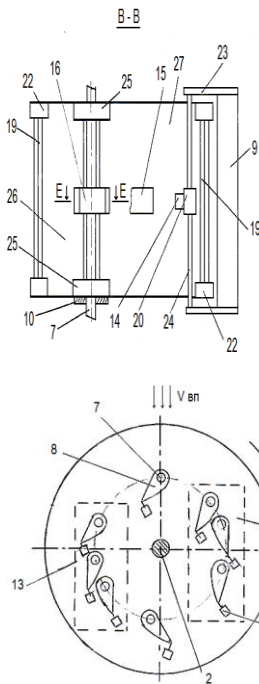


Рис.13 Разрез вдоль крыла

9-закрылок,10-опора крыла, крыла,

15-эл. триггер, 19-оси А.О.

зона из

20- УУЗ, 14-крепеж,

крыла.

22-опора осей,23-планка закрылка,24-ось закрылка,25-опора крыла, 26-передн.Б.Л,27-задн.Б.Л.

Максимальная эффективность преобразования энергии ВП достигается тем, что в предлагаемом способе (устройстве) в результате действия ВП на крыло при движении его по круговой орбите формируется постоянная максимальная подъемная сила практически по всей круговой орбите(выпадают из работы зоны переключения формы крыла). ВЭУВО может состоять из одного такого комплекта-яруса и более. При движении крыла по круговой траектории в зонах 180° и 360° относительно РВВП формируется тормозной момент, (Δ - зона изменения формы крыла при возникновении тормозного момента), противодействующий рабочему направлению движения ВЭУВО. Крыло смещается относительно своей оси(7) в УПОК вплоть до его тормозного края, на котором находится электрический конечный выключатель реверса (ЭКВР-32) и ВЭУВО кратковременно переходит в режим торможения. Форма крыла автоматически изменяется скачком в Δ - зонах тормозного момента. По команде от ЭКВР срабатывает электромеханический триггер(15), изменяя аэро-

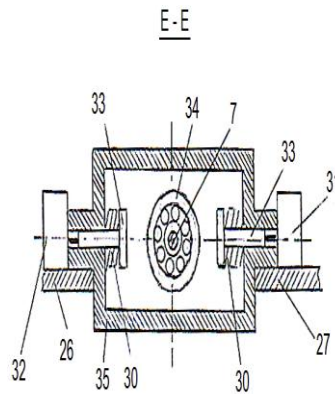


Рис.14 УПОК

7-ось крыла,26-передн.Б.Л.

27-задн.Б.Л, 30-пружина,

31-датчик Д,32-ЭКВР,

33-толкатель,34-подшипник,

35-корпус УПОК

Рис. 15 Траек-

тория

2-вал,7-ось

изменения момента

динамическую форму крыла на симметричную, относительно базовых листов(26,27). Для защиты элементов ВЭУВО сигнал с датчика давления D ограничивают номинальным значением U_n . При дальнейшем увеличении сигнала с датчика давления D вместо ЭР включается регулятор слежения (РС) за номинальным сигналом U_n , который воздействуя на привод закрылка изменяет угол атаки крыла α , уменьшая его вплоть до отрицательных значений. Для повышения экологических характеристик по внешней окружности опорных дисков крепится ячеистая сетка (защищающая ВЭУВО от птиц, мусора, града и т.п).

Другая популярная разновидность ВЭУ- вертикально - осевые (ВЭУВО), использующие принцип лобового сопротивления. С использованием этого принципа разработана. Ветровая энергетическая установка. Патент №2484296. (Дата публикации заявки 10.02.2013г Бюл. №4, Опубликовано: 10.06.2013г. Бюл. №16) Фактически это ветронасос (рис.16). На верхнюю часть вала в качестве устройства закреплено ветроколесо, а ниже на вал симметрично насажена прямоугольная (2+к) - сторонняя призма, к каждой боковой плоскости которой прикреплен силовой узел, выполненный в виде подвижной мембраны и насоса. Это устройство может использоваться в сельском хозяйстве для перекачки жидкостей и газов, подъема жидкости на высоту (например, для заполнения водонапорной башни), закачки воздуха под давлением в ресиверы и дальнейшего использования в пневматических инструментах и механизмах. Даже при небольшой скорости ВП может быть получено большое давление в напорной магистрали -10 за счет соотношения площадей мембраны и поршня насоса. В случае необходимости получения электроэнергии потенциальная энергия жидкости из напорной башни преобразуется в электрическую энергию. путем направления этой жидкости по напорному трубопроводу 15 на вращающиеся лопасти турбогенератора 12, вырабатывающего электроэнергию, и далее сброс жидкости в источник 13.

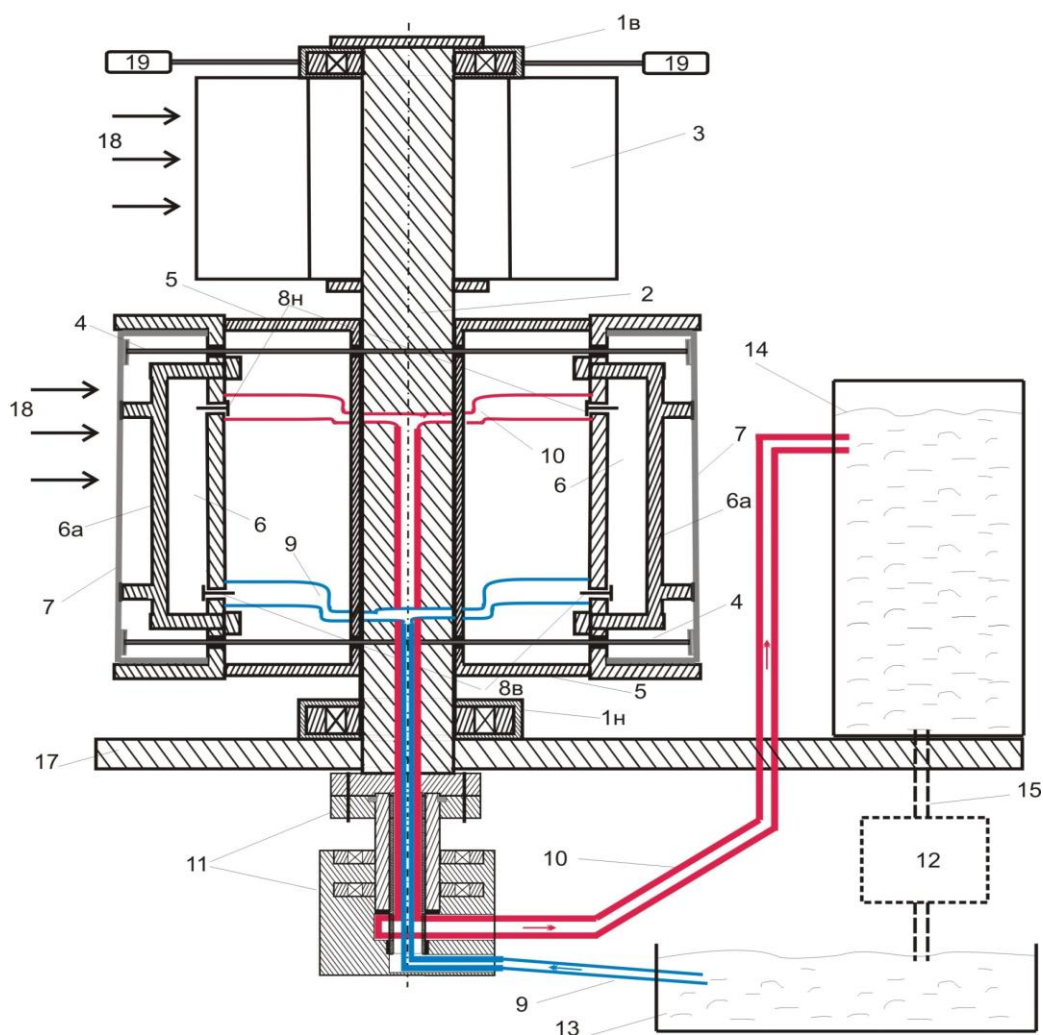


Рис.16. Ветровая энергетическая установка

1н и 1в - нижний и верхний опорные стаканы, 2 - основной вал, 3 - вспомогательное ветроколесо, 4 - стержни, 6 - камера насоса, 6а – поршень, 7 - мембрана, 9 - питающая магистраль, 10 - напорная магистраль, 11- ротационные соединители, 12 - турбогенератор, 13 - источник жидкости, 14 - башня, 15 - напорный трубопровод, 17 - опора всей ВЭУ, 18 - направление ВП, 19 - узел для поддержания вертикального положения вала 2.

Заманчиво его использование, например, на прогулочной яхте-катамаране при установке на консоли за кормой для закачки морской воды с последующим выбросом ее под давлением через рулящее реактивное сопло на корме (принцип водометного движителя) при поднятом винте, или работа на электродвигатель винта от аккумулятора, заряженного ранее, например, ночью во время стоянки.

Принцип лобового сопротивления используется в ВЭУВО Карусельное ветроколесо. Патент №2498109. (Дата публикации заявки 20.01.2013г Бюл. №2, Опубликовано: 10.11..2013г.. Бюл. №31), которое содержит на вертикальной оси несколько ярусов рамочных Г-образных махов, несколько лопастей, шарнирно закрепленных на каждом махе. Для равномерности вращения махи каждого яруса смещены относительно махов ближайшего

яруса на угол $\alpha = 2\pi/kn$ (где k -количество махов на ярусе, n -количество ярусов). Для повышения мощности и надежности конструкции, каждый комплект Г-образных махов зажат между двумя разделительными плоскостями, конструктивно образующими один ярус. В рабочем режиме лопасти прижимаются к соответствующей упорной рамке, закрепленной параллельно плоскости каждого маха, во флюгерном режиме лопасти вращаются в диапазоне от 0 до 180 градусов по направлению ВП. На Рис.16 показан вид сверху одного из ярусов без разделительной плоскости. Это ВЭУВО работает в 3-х квадрантах и эффективно использует ометаемую площадь за счет разделительных плоскостей, препятствующих срыву ВП с верхних и нижних кромок лопастей. .

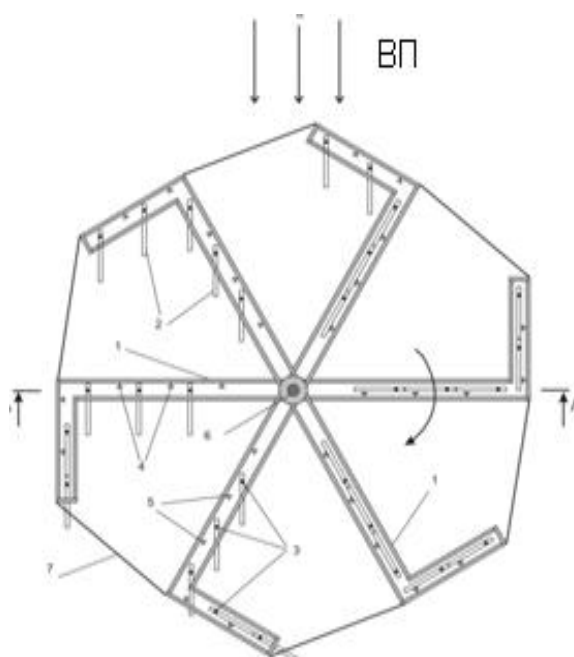


Рис.16 Карусельное ветроколесо

1-махи,2-лопасти.3-оси лопастей,4,5-упорные рамки,6-вертикальная ось,7-разделительная плоскость

Разработан СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЛОПАСТИ И РЕАЛИЗУЮЩАЯ ЕГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА (Заявка РФ). Предлагаемый способ обеспечивает очень высокую энергоэффективность разработанного карусельного ветроколеса (КВ.) по Рис.17.

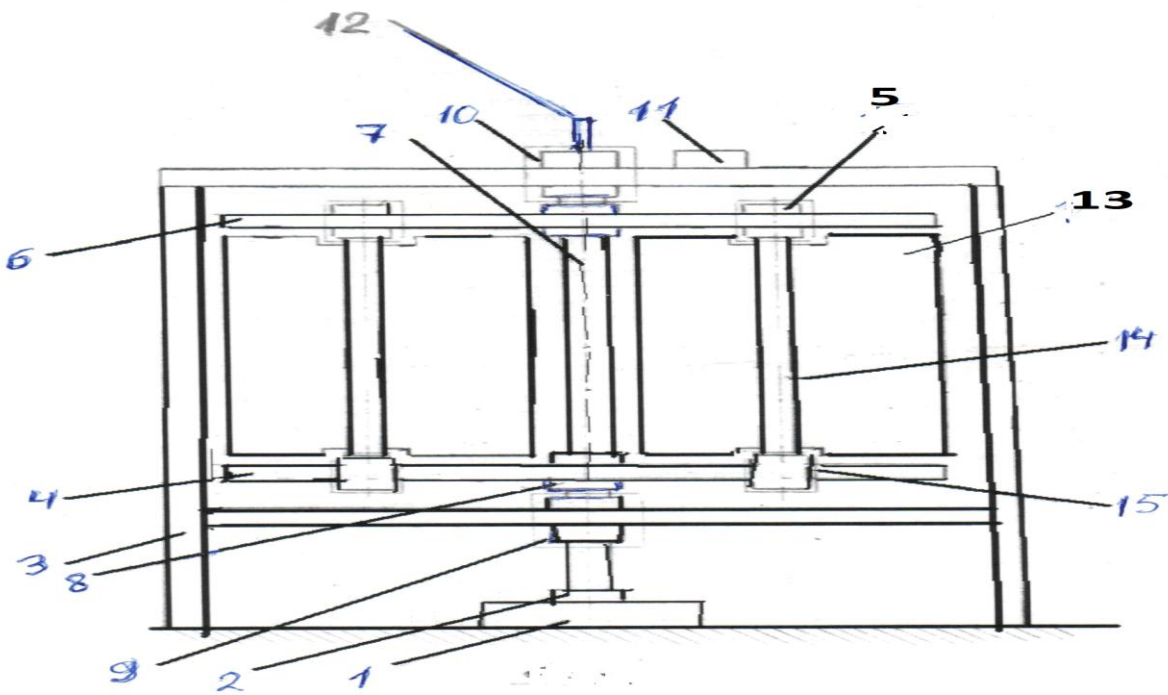


Рис.17 Карусельное ветроколесо

1-блок ЭП, 2-датчик оборотов вала, 3- рама, 4, 6-диски, 5-опоры осей, 7-вал, 8-гайки, 9-нижняя опора рамы, 10-датчик положения вала, 11- датчик скорости ВП, 12- флюгер, 13- плоская лопасть, 14-ось лопасти, 15-контроллер с приводом и датчиком положения оси лопасти.

На Рис. 18 проиллюстрирована методика получения максимального момента $M = F \cdot h$ – (где F -сила создаваемая ВП на лопасти, h - плечо этой силы относительно вала).

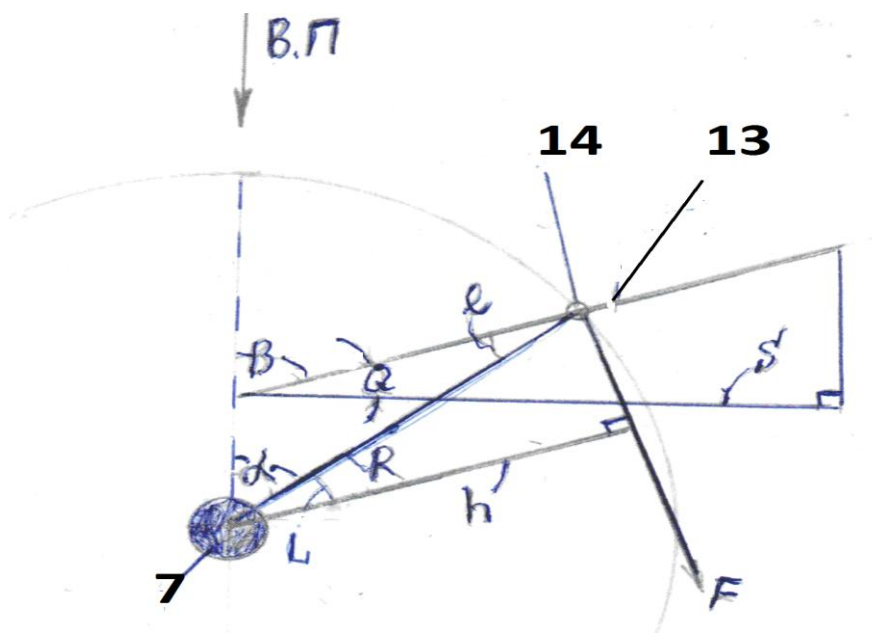


Рис.18 Методика получения максимального момента

7-вал, 13- лопасть, 14-ось лопасти

Найдена зависимость между углом поворота α вала-7 относительно вектора ВП и углом плоскости лопасти-16- β относительно вектора ВП. Проекция лопасти на плоскость перпендикулярную вектору ВП находится под углом Q и равна

$$S=S_0*\text{Cos}Q = S_0*\text{Sin}\beta \text{ м}^2 \quad (4)$$

При оптимизации скорости вращения КВ при скорости осей лопастей $V_{\text{П}} = 1/3V_{\text{ВП}}$, сила давления на лопасть по (3) равна

$$F=C_x*\rho* S_0*\text{Sin}\beta *4 V^2_{\text{В}} | 18 =2|9 * C_x*\rho* S_0* \text{Sin}\beta * V^2_{\text{В}} \quad (5)$$

Определим момент, который развивает сила по (6) относительно вала КВ.

$$M_{\text{Л}}= F*h=2|9* C_x*\rho* S_0*\text{Sin}\beta * V^2_{\text{В}} * R * \text{Cos}(\beta -\alpha) \quad (6)$$

Найдем максимальное значение момента для каждого угла α , которое очевидно зависит от угла β , определяющего положение лопасти относительно вектора ВП.. Берем производную от момента $M_{\text{Л}}$ по β .

$$\begin{aligned} M'_{\text{Л}\beta} &= \frac{2}{9} C_x \rho S_0 R V_{\text{В}}^2 [\cos\beta \cos(\beta - \alpha) - \sin\beta \sin(\beta - \alpha)] = \\ &= \frac{2}{9} C_x \rho S_0 R V_{\text{В}}^2 \cos(2\beta - \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Поэтому $\text{Cos}(2\beta - \alpha) = 0$, $2\beta - \alpha = 90^*$, и мы получаем основное аналитическое выражение для разработанной КВ -

$$\beta = \alpha/2 + 45^* . \quad (8)$$

Выполнение соотношения между углами β и α по (12) в КВ обеспечивает максимальное значение момента в любой точке траектории движения лопасти. После ряда преобразований для 1-й лопасти

$$\text{Э}_{\text{Л}} = 2/9 * C_x * \rho * S_0 * R * V_{\text{В}}^2 * \pi \quad (9)$$

Заключение. Учитывая возрастающий интерес и экономическую целесообразность применения ветроэнергетики, следует считать, что предлагаемые к использованию разработки могут найти широкое применение в народном хозяйстве и энергосистемах различного назначения (промышленных, бытовых и др).

**) Доклад предназначен для Международной конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ», прошедшей в Иерусалиме 19 октября 2015 года.*

Тезисы доклада опубликованы в материалах конференции