

## 4 Микроветро двигатели ИГиЛ

### 4.1 Экспериментальные исследования многолопастного малогабаритного ветродвигателя

Аэродинамические трубы большого диаметра — громоздкие и дорогостоящие установки. В ИГиЛ для исследований характеристик ветротурбин применялся метод буксировки — перемещение ветродвигателя на электрокаре со скоростью 5 м/с в неподвижном воздухе закрытого цеха длиной 200 м. При этом обеспечивались не только однородность воздушного потока, но и точное измерение скорости перемещения ветродвигателя.

На валу ветротурбины радиуса  $R$  задавался тормозящий момент, поддерживаемый постоянным в течение каждого пробега электрокары вдоль цеха. Измерялся полный угол поворота ветротурбины и время ее движения  $\tau$  по участку пути перемещения электрокары (за вычитанием разгонного участка). Это позволило определить коэффициент использования энергии набегающего воздушного потока  $\xi$  в зависимости от быстроходности ветротурбины  $Z$ .

Существенно, что метод буксировки не требует большой стабильности величины мгновенной скорости воздушного потока  $V$  во время каждого пути электрокары, т.е. допустимо  $V = v(1 + \delta(t))$ , где  $v$  — скорость движения электрокары (скорость воздушного потока, набегающего на ветротурбину). Например, при  $\delta = 10\%$  погрешность в определении величины коэффициента  $\xi$  составляла 3%.

Постоянный тормозящий момент  $k$  на валу ветротурбины задавался заранее с точностью 1% специальным механическим ваттметром (тормозным динамометром), основанным на эффекте самостабилизации эйлеровой силы, при вариациях коэффициента трения гибкой нити о фрикционный барабан — отрицательная обратная связь.

Аэродинамические характеристики малогабаритной многолопастной ветротурбины, полученные методом буксировки, приведены на рис. 1.

На рис. 1 кривые  $\xi(z)$  имеют характерный колоколообразный вид. Максимальный коэффициент использования энергии ветра ветротурбиной был порядка 0,27, что является достаточно высоким показателем для класса тихоходных многолопастных ветротурбин. Согласно закону сохранения энергии и импульса расчетное предельно возможное значение коэффициента использования энергии ветра для ветротурбин

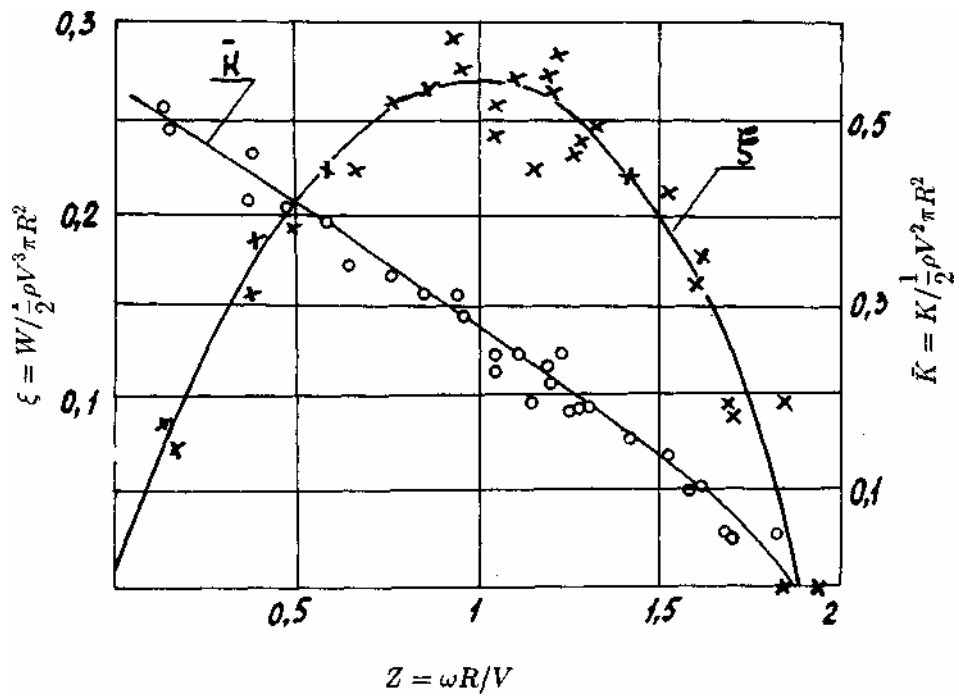


Рис. 1. Аэродинамические характеристики малогабаритной многолопастной ветротурбины, полученные методом буксировки.

любых конструкций  $\xi \cong 0,6$ . В действительности, вследствие потерь различной природы,  $\xi_m$  оказывается значительно ниже ( $\cong 0,25 \div 0,45$ ). Оптимальная быстроходность  $Z_{\text{опт}}$ , соответствующая максимуму  $\xi_m$  и определяемая коэффициентом заполнения ометаемой площади ветротурбины или, условно, числом лопастей, близка к единице ( $Z_{\text{опт}} \cong 1$ ). Использование более тихоходных и, следовательно, более высокомоментных ветротурбин нерационально, поскольку относительная величина потерь мощности, связанных с реактивным закручиванием уходящей воздушной струи, будет расти обратно квадратично с уменьшением быстроходности

$$\Delta \xi_m \frac{1}{Z_{\text{опт}}^2}, \quad (4.1)$$

В то же время при более высоких  $Z_{\text{опт}}$  растут требования к аэродинамическому качеству лопастей ветротурбины и элементам конструкции, предназначенным для крепления лопастей и передачи крутящего момента на вал.

Выбор рациональной величины  $Z_{\text{опт}} \cong 1$  связан с проблемой торможения ветротурбин при ураганах. При  $Z_{\text{опт}} \cong 1$  (анемометрическая быстроходность  $Z \cong 2$ ) ветротурбину не требуется тормозить и она может свободно вращаться в ураганном воздушном потоке без опасности разрушения, т.к. линейная скорость на ее периферии будет порядка нескольких десятков м/с, что вполне допустимо для большинства конструкционных материалов.

Многолопастная ветротурбина (фото. 1) с  $Z_{\text{опт}} \cong 1$  имеет высокую приемистость  $\cong 2$ , обеспечивающую возможность самостоятельной раскрутки под эксплуатационной нагрузкой.

## 4.2 Особенности микроветро двигателей ИГиЛ

Исследования в области ветроэнергетики, проводимые Институтом гидродинамики им. М.А.Лаврентьева Сибирского отделения Российской Академии наук, базируются на основных положениях механики сплошной среды и теории подобия [4, 6]. Теория подобия позволяет установить зависимость между диаметром ветротурбины и массой, приходящейся на единицу площади, ометаемой воздушным потоком. При геометрически подобном уменьшении размеров ветротурбины ее масса, определяющая стоимость ветродвигателя, снизится пропорционально  $D^3$ , где  $D$  - диаметр ветротурбины, а мощность, при той же скорости ветра, — пропорциональна  $D^2$ . Из анализа этих за-



Фото 1. Ветродвижитель ИГиЛ с многолопастной ветротурбиной,

висимостей следует целесообразность уменьшения размеров ветротурбин и переход к ветротурбинам малого диаметра микроветромодулям (рис. 2, 3).

Исследования показали, что в настоящее время рациональней будет не создание громадных ветродвижителей, а объединение ветродвижителей небольшого диаметра (микроветромодулей) в группы, суммируя их мощности гидравлически или с помощью пневматики, за счет накачки воздуха с малой степенью сжатия в общую сборную трубу и последующего преобразования пневмоэнергии в другие виды энергии. Пневматическое суммирование мощности отдельных микромодулей позволяет осуществить транспозицию энергии от ветродвижителей, установленных в ветренных районах, к потребителям в безветренной местности.

Анализ потерь энергии и стоимости пневматики показывает экономичность способа. Превращение механической энергии ветродвижителя в пневматическую позволяет регулировать работу компрессора, агрегатированного с ветродвижателем, и сгладить пульсации мощности, возникающие в силу неравномерности скорости ветра.

Размер ветротурбины микроветромодуля определяется с учетом затрат на дальнейшее суммирование мощности и технологичности из-

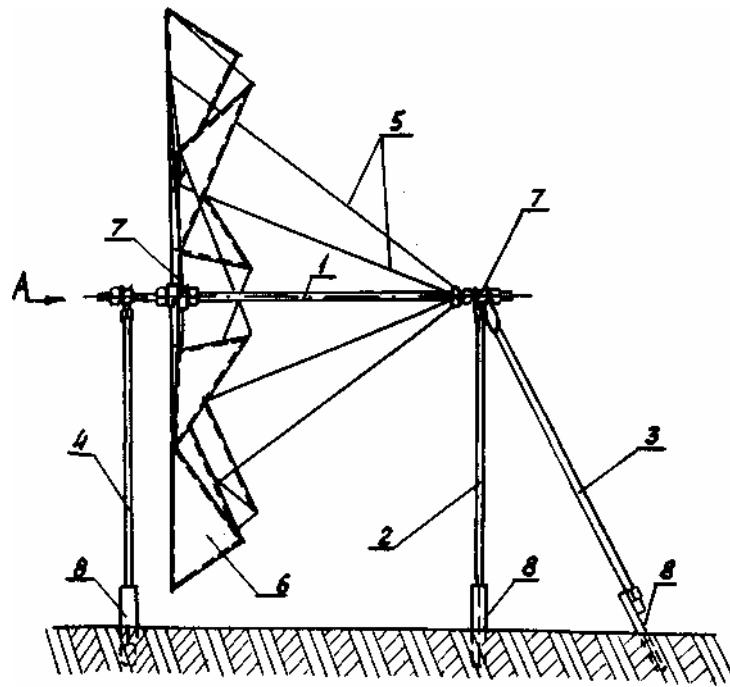


Рис. 2. Схема ветродвигателя ИГиЛ.

- 1 - вал ветротурбины;
- 2,3,4 - стержни опоры ветротурбины;
- 5 - стержни ветротурбины;
- 6 - лопасть ветротурбины;
- 7 - подшипник;
- 8 - крепления опоры в грунте.

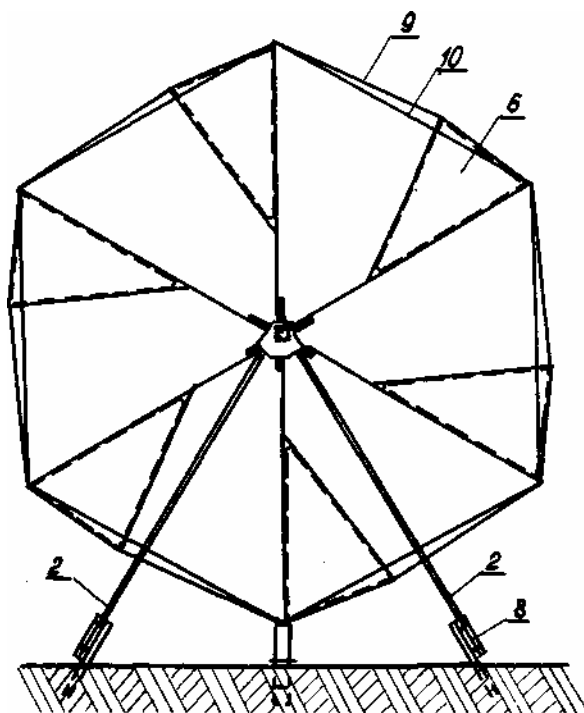


Рис. 3. Схема ветродвигателя ИГиЛ. Вид А (см. рис. 2) ,  
2 - стержни опоры ветротурбины;  
6 - лопасть ветротурбины;  
8 - крепления опоры в грунте;  
9,10 - стержни лопасти ветротурбин.

готовления микроветро модуля. Увеличивая число микроветро модулей, можно получить значительную суммарную мощность. При этом нет необходимости стремиться к созданию дорогостоящей конструкции с тщательно отполированными, обтекаемыми лопастями, обеспечивающими высокий коэффициент отбора мощности ветрового потока  $\xi$ . Следует иметь в виду, что определяющим показателем, влияющим на величину стоимости 1кВт установленной мощности, будет не только  $\xi$ , а, в основном, процент использования энергии ветра во времени, зависящий от того, сможет ли ветродвигатель реализовать энергию низкоскоростного ветра.

Основная масса микроветро двигателя ИГиЛ (рис. 2, 3) сосредоточена в ветротурбине, чем частично компенсируется неравномерность крутящего момента при сильных порывах ветра (фото. 2).



Фото 2. Микроветро модуль

Жесткий каркас многолопастной ветротурбины обеспечивает ее устойчивую работу в неоднородном воздушном потоке. В отличие от ветродвигателей пропеллерного типа, ветродвигатель ИГиЛ работает бесшумно, что весьма существенно для экологии местности. Вал ветротурбины также является ребром тетраэдрической фермы [7, 8].

Материалом для изготовления микроветро модуля может служить,

стик, ткань. В конструкции используется воздействие сил трения и почти полностью исключается механообработка деталей.

Микромодульные ветродвигатели монтируются у земли и реализуют энергию приземного ветра. Конструкцией не предусматривается разворот микроветро модуля при изменении направления ветра, поскольку исследования ИГиЛ показали, что введение дополнительных элементов, обеспечивающих разворот микроветро двигателя, улучшают его мощностные характеристики не более чем на 20%, а стоимость ветродвигателя значительно повышается.

Экономичность ветродвигателя определяется стоимостью  $1\text{ м}^2$  площади ветротурбины, ометаемой воздушным потоком. У экспериментальных ветродвигателей ИГиЛ стоимость  $1\text{ м}^2$  площади ветротурбины, ометаемой воздушным потоком, не более \$20, в то время как у лучших в мире ветродвигателей этот показатель превышает \$400 [9].

Проблема ураганоустойчивости полностью решается использованием бесконсольных тетраэдрических конструкций, где стержни ферм работают либо на растяжение, либо на сжатие.

Если стержни, образующие тетраэдрический корпус ветротурбины, развести на значительные расстояния, то вырастет плечо момента действующих сил и для устойчивости ветродвигателя при ураганах потребуются его надежное крепление к грунту Земли, которое смогут обеспечить анкеры, при условии выполнения равенства моментов статических сил  $F$  и  $R$ , где  $F$  сила ветра,  $R$  - реакция крепления ветродвигателя в грунте Земли,

Напряжения в стержнях тетраэдрических ферм ветродвигателя, которые можно рассматривать как балки на двух опорах с шарнирно закрепленными концами, при одной и той же скорости ветра, а, следовательно, одинаковой эпюре нагрузок, уменьшаются  $\sim$  в четыре раза, по сравнению с напряжениями в консольной балке.

Фактическое уменьшение напряжения будет еще большим, поскольку при переходе к балке на двух опорах можно уменьшить поперечное сечение балки, а это приведет к дополнительному снижению эпюры нагрузки и сократит напряжение в балках.

В действительности, закрепление балок (стержней) в конструкции микроветро двигателя можно считать промежуточным между шарнирным и жестким. Бесконсольность конструкции позволит достигнуть примерно десятикратного снижения веса ветродвигателя, по сравнению



с консольной конструкцией.

### 4.3 Прочность и аэродинамика микромодульных ветродвигателей ИГиЛ

Запас прочности микроветродвигателя определен расчетной скоростью ветра и скоростью ветра при ураганах. Для каждой конкретной

конструкции существенным будет показатель  $\lambda = \frac{v_1}{v_2}$ , где  $v_1$  -

скорость ветра при ураганах;  $v_2$  - среднекубическая скорость ветра. Учитывая квадратичную зависимость нагрузок от среднекубической скорости ветра в условиях сильнейшего урагана, который в данной местности может быть один раз в 20-30 лет, у микроветродвигателя ИГиЛ предусмотрен пятидесятикратный запас прочности.

Несмотря на стержневую конструкцию ветротурбин, аэродинамические потери мощности незначительны. Это объясняется тем, что у ветротурбины отношение диаметра стержней к средней величине расстояния между ними менее 0,01, а суммарная перекрываемая ими площадь не более 5% площади сечения ветротурбины, ометаемого воздушным потоком. Благодаря отсутствию консольных элементов стержни каркаса ветротурбины могут быть изготовлены из трубок малого диаметра, что незначительно снизит площадь сечения ветротурбины. Также следует иметь в виду, что в зоне расположения стержней скорость воздушного потока значительно ниже, чем на удалении от ветротурбины впереди нее.

Аэродинамическое сопротивление стержней, образующих каркас ветротурбин, рассчитано согласно [10], полагая, что сопротивление шара по величине близко к сопротивлению участка цилиндра, длина которого равна его диаметру. Расчеты показывают, что при числах Рейнольдса  $Re = 10^4$  и коэффициенте лобового сопротивления  $C_x = 0,5$  аэродинамическое сопротивление стержневой конструкции каркаса ветротурбины, изготовленного из труб малого диаметра, незначительно. Поскольку ветротурбиной воздушный поток затормаживается и его скорость уменьшается, то потери мощности на трубчатых стержнях не превысят 5% мощности ветродвигателя.

Оценить порядок относительных потерь мощности ветротурбины

$\frac{\Delta W}{W}$ , связанных с аэродинамическим сопротивлением, можно из

соотношения  $\frac{\Delta W}{W} \cong \frac{z}{k}$  где  $Z$  - быстроходность ветродвигателя;  $k$  -

аэродинамическое качество лопастей.

Оценочные расчеты, выполненные для ветротурбин различного диа-

метра, показали, что при скорости ветра 40м/с и отношении диаметра стержней каркаса ветротурбины, расположенных навстречу ветровому потоку, к диаметру ветротурбины  $\frac{1}{200} \div \frac{1}{100}$  напряжения в стержнях не будут превосходить предел текучести низкоуглеродистой стали. Это означает, что стержни силового каркаса ветротурбины практически не будут деформироваться и влиять на прохождение воздушного потока через ветротурбину. Жесткий каркас ветротурбины способствует устойчивой работе ветродвигателя в неоднородном воздушном потоке. Преимущества микромодульных ветродвигателей ИГиЛ:

- Ветродвигатель имеет широкий диапазон эксплуатационных скоростей ветра;
- Крутящий момент максимален вблизи нулевой угловой скорости ветротурбины и плавно снижается с ее увеличением, что позволяет ветротурбине многолопастного ветродвигателя при ветре со скоростью 1- 1,5м/с под нагрузкой, без предварительной раскрутки, начать вращаться и автоматически, за счет самой механики процесса, входить в рабочий режим при возобновлении ветра после штиля;
- Может работать в неоднородном воздушном потоке у поверхности Земли, используя энергию приземного ветра;
- Имеет пониженные требования к аэродинамическому качеству лопастей, что позволяет их выполнить по упрощенной технологии из дешевых материалов в виде парусов со стержневым каркасом;
- Может использовать энергию ветра двух взаимно противоположных направлений. Не требуется разворот ветродвигателя по направлению ветра;
- Имеет низкие центробежные нагрузки в креплениях лопастей, тем самым исключая необходимость торможения ветротурбины при сильном ветре;
- Является экологически чистым источником энергии, не создает вибраций и высокочастотных акустических шумов;
- Большое практическое значение имеет исключение "замораживания" капиталовложений на время строительства ветростанций, т.к. небольшие группы микроветродвигателей могут самостоятельно

включаться в пневмосеть и после завершения монтажа каждой группы эксплуатироваться, не ожидая окончания строительства всего ветропарка;

- Мощность, полученную за счет энергии ветра, в зависимости от потребителей энергии, можно повышать или уменьшать, изменяя количество ветродвигателей и суммируя их мощность;
- Вес ветротурбины, отнесенный к единице площади, ометаемой воздушным потоком, доведен до рекордно малой величины —  $3 \text{ кг/м}^2$ ;
- При уменьшении размеров ветротурбины и повышении ее угловой скорости для соединения с электрогенератором требуется редуктор с малым передаточным числом, что упрощает конструкцию, поскольку отпадает необходимость в сложном автоматическом узле сцепления генератора и ветротурбины;
- Мощность, снимаемая с вала единичного микроветродривателя, без использования дорогостоящих редукторов с большим передаточным числом и меди в электрогенераторе, может непосредственно передаваться гидронасосу или компрессору;
- Суммирование мощностей отдельных микромодульных ветродвигателей и их транспозиция к преобразователям энергии позволяет получить большие мощности. Рациональным будет гидравлическое или пневматическое суммирование мощности с малой степенью сжатия воздуха;
- При пневматическом суммировании мощности отдельных микроветродривателей, с выходом ее на мощный электрогенератор, уменьшаются затраты средств, поскольку электрогенераторы малой мощности имеют высокую стоимость;
- Микромодульность позволяет с малыми затратами средств корректировать элементы конструкции ветродвигателя, осуществлять модернизацию и переходить к новым поколениям ветродвигателей.