

*Ш.А. Акчалов, Р.Р. Рыскулов У.Ш. Шукуров, Ш.К. Толукбаев,
У.Б.Аскарбеков. tolukbaev@bk.ru
Институт автоматизиции и информационных технологий НАН КР
Бишкек, Кыргызстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЛОПАСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ

Рассмотрены силы, действующие на ветротурбину. Показано, что улучшением обтекаемости лопастей и состояния поверхности можно значительно уменьшить силы сопротивления и трения.

Ключевые слова: ветровой поток, обтекаемость, подъемная сила, ветротурбина, угол заклинения, частота вращения.

Введение. Ветровой поток, набега на лопасти ветротурбины (ВТ), приводит их во вращение. ВТ преобразует кинетическую энергию ветра в кинетическую энергию вращения. При этом в зависимости от пространственного положения вала, вращающей силой может быть или сила сопротивления, или подъемная сила. Последняя характеризуется большим коэффициентом мощности, в связи с чем в настоящее время применяются ветроустановки, использующие подъемную силу.

Сила сопротивления, или лобовое сопротивление ВТ, направлена вдоль оси ветрового потока и зависит от силы трения воздуха о поверхность лопасти, от разности давления передней и задней поверхностей лопасти, а также от обтекаемости последней. Поэтому для достижения поставленной цели, т.е. улучшения обтекаемости и уменьшения силы трения о поверхность лопасти, необходимо изучить силы, действующие на лопасти ВТ.

Силы, действующие на лопасти ветротурбины. При обтекании лопасти ветровым потоком слои воздуха в непосредственной близости от поверхности лопасти (пограничный слой) вследствие вязкости затормаживаются, т.е. частицы воздуха прилипают к поверхности лопасти. При этом нарушается ламинарность ветрового потока, и в нем образуются вихри. Это характерно для шероховатой поверхности. Таким образом, величина силы сопротивления зависит от состояния поверхности (гладкая или шероховатая) и обтекаемости лопасти.

Для решения практических задач аэродинамики ветроколеса воспользуемся критерием подобия аэродинамических коэффициентов (лобового сопротивления c_x , подъемной силы c_y), которые зависят не только от формы и углов ориентировки лопасти на ветер, но и от других факторов. При этом достаточно соблюдения приближенного подобия.

В ветроэнергетике ввиду сравнительно небольших скоростей набегающего на ВТ ветра (до 40 м/с) таким критерием является число Рейнольдса (Re), оценивающее вязкость среды

$$Re = \frac{v\iota}{\nu}, \quad (1)$$

где v – скорость ветра, м/с ;

ι – линейные размеры тела, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды (воздуха), м²/с.

Проведенные опыты показали [1], что при обтекании лопасти ламинарность ветрового потока может сохраняться до достижения критического числа Re , выше

которого поток переходит в турбулентный. Коэффициент лобового сопротивления c_x у лопасти, имеющей турбулентный пограничный слой, значительно выше, чем у лопасти с ламинарным пограничным слоем, т.е. силы трения в первом случае больше, чем во втором.

Лопасть ВТ имеет форму половины разрезанного вдоль цилиндра, имеет выпуклую и вогнутую поверхности (рис.1), и устанавливается вогнутой стороной на ветер.



Рис.1. Форма лопасти.

При обтекании лопасти ветровым потоком скорость потока над лопастью больше, чем под лопастью, т.е. над лопастью пониженное давление, а под лопастью – повышенное. Подъемная сила, действующая на лопасти, образуется за счет сил давления (Y_p) и импульса ($Y_{и}$) [1]

$$Y = Y_p + Y_{и}. \quad (2)$$

Сила давления Y_p определяется уравнением

$$Y_p = \frac{\rho l v \Gamma}{2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

l – длина лопасти, м;

Γ – циркуляция скорости, м/с.

Сила импульса $Y_{и}$ определяется формулой

$$Y_{и} = \frac{\rho l v \Gamma}{2}. \quad (4)$$

Подставив формулы (3) и (4) в формулу (2), получаем

$$Y = \frac{\rho l v \Gamma}{2} + \frac{\rho l v \Gamma}{2} = \rho l v \Gamma. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что половина подъемной силы обеспечена за счет давления, а половина - за счет импульса.

Подъемная сила Y направлена перпендикулярно ветровому потоку и выполняет полезную работу. Поэтому при конструировании лопастей необходимо, чтобы при работе лопасти давали возможно большую подъемную силу Y и минимальную силу сопротивления X . При работе ветроустановки на лопасти набегают ветровой поток не со скоростью v , с которой дует ветер, а с относительной скоростью W , состоящей из скорости ветра v и окружной (линейной) скорости элемента лопасти ωr .

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + v^2},$$

где ω – угловая скорость, $\frac{1}{с}$;

r – расстояние элемента лопасти от оси вращения, м.

Относительная скорость W набегающего ветрового потока с ростом r возрастает и на конце лопасти имеет максимальное значение, т.е. ВТ работает за счет косоугольного удара ветрового потока при движении лопастей перпендикулярно направлению скорости этого потока. Лопасти ВТ закреплены на оси так, что образуют с плоскостью вращения некоторый угол φ , (угол заклинивания).

Теоретически установлено и опытным путем подтверждено, что подъемная сила имеет максимальную величину при углах атаки от 2° до 6° в зависимости от профиля лопасти. Для того, чтобы выдерживать наиболее выгодное значение угла атаки по всей длине лопасти, необходимо уменьшить угол заклинивания φ каждого сечения лопасти по мере удаления его от оси вращения. Лопасть, изготовленная с переменным углом заклинивания φ , приобретает винтообразную форму [2]. Как показал расчет, угол заклинивания φ по мере удаления от оси вращения уменьшается с 14° до $3,5^\circ$.

Мощность, развиваемая миниветроэнергетической установкой. Вследствие асимметричной формы и наклонного расположения лопастей (под углом заклинивания φ) относительно ветра, создается подъемная сила значительной величины, и ВТ вращается с большей частотой, развивая большую мощность [3].

Ветровой поток с поперечным сечением S обладает кинетической энергией E

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (6)$$

где m – масса воздуха, протекающего через поперечное сечение S за одну секунду со скоростью v , т.е.

$$m = \rho Sv, \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 .

Мощность ветрового потока

$$P = \frac{\rho Sv^3}{2}, \quad (8)$$

а мощность P_k , отобранная ветроколесом, определяется отношением произведенной работы к времени, в течение которого совершена работа

$$P_k = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv, \quad (9)$$

где A – работа, Дж;

s – перемещение, м;

t – время, сек.

F – сила, Н.

Отношение P_k к P дает коэффициент мощности ветроколеса c_p

$$c_p = \frac{P_k}{P}, \quad (10)$$

или коэффициент использования энергии ветра ξ . Теоретически максимальное значение коэффициента c_p (или ξ) может достигать 0,593. В реальности ветроустановки не достигают этого значения. Современные ветроустановки имеют коэффициент c_p (или ξ) примерно 0,46–0,5.

Как видно из уравнения (5), мощность ветрового потока прямо пропорциональна кубу скорости, а скорость возрастает с ростом высоты над земной поверхностью,

поэтому на скорость ветра оказывают очень большое влияние различные препятствия и рельеф местности. Если препятствия имеют хорошо обтекаемую форму, то при прохождении над препятствиями скорость ветра значительно повышается. Поэтому ВЭУ устанавливаются на такой высоте, где возмущение воздушного потока значительно ослаблено.

Однако, при выборе высоты мачты необходимо учитывать технико-экономические соображения, условия эксплуатации и другие факторы.

Высота мачты ВЭУ рассчитывается по формуле

$$H=h+c+r_b, \quad (11)$$

где h – высота препятствий вблизи ВЭУ, м;

c – расстояние от вершины препятствия до нижней точки поверхности, ометаемой . ВТ, м (принимается $1,5 \div 2$ м)

r_b – радиус ветроколеса, м

Мощность ВЭУ в функции скорости определяется по формуле

$$N=N_0\left(\frac{v}{v_0}\right)^3, \quad (12)$$

а в функции высоты мачты

$$N=N_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,6}, \quad (13)$$

где N_0 – мощность ВЭУ на высоте H_0 , Вт,

N – мощность ВЭУ на высоте H , Вт.

Скорость ветра на высоте H

$$v = v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,2}. \quad (14)$$

Проведенные расчеты показывают, что при скорости ветра $v_0=3$ м/с на высоте $H_0=2$ м на высоте $H=8$ м, согласно уравнению (10), скорость ветра будет равна

$$v = v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,2} = 3\left(\frac{8}{2}\right)^{0,2} = 3 * 1,32 \approx 4 \text{ м/с},$$

а мощность ВЭУ при этом

$$N = N_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,6} = N_0\left(\frac{8}{2}\right)^{0,6} = N_0 2,3,$$

т.е. мощность ВЭУ увеличивается как минимум в два с лишним раза.

Такой же результат получаем по уравнению (8)

$$N=N_0\left(\frac{v}{v_0}\right)^3=N_0\left(\frac{4}{3}\right)^3 = N_0 2,3.$$

Как было отмечено выше, ВЭУ с горизонтальной осью вращения работает за счет косога удара ветрового потока при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветрового потока. При этом ветровой поток с относительной скоростью W действует на лопасть с силой F под углом атаки α . Величина подъемной силы F зависит от угла заклинения φ лопасти.

Для изучения влияния угла заклинения на частоту вращения ВТ была определена зависимость частоты вращения ВТ от угла заклинения φ лопасти (рис 2). Проведенные измерения показали, что при установке лопастей под углом 0° (прямая 1) относительно плоскости вращения и при скорости ветра 2 м/с частота вращения составляет 0,12 об/с, а при установке под углом 14° (прямая 2) относительно плоскости вращения – 0,21 об/с. Это доказывает, что правильный выбор угла заклинения при постоянном угле атаки ветрового потока позволяет получать большие обороты и значительно большую мощность ветрогенератора.

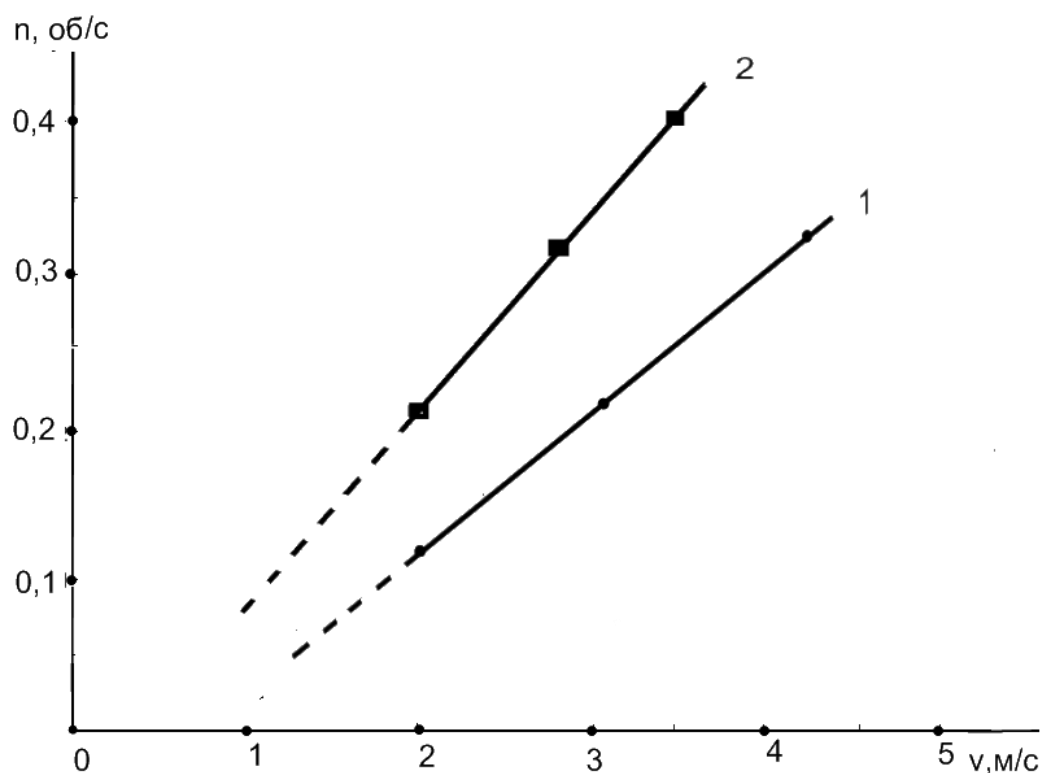


Рис.2. Зависимость частоты вращения ВТ от скорости ветра и угла заклинения.

Таким образом, улучшением обтекаемости лопасти можно добиться значительного уменьшения силы сопротивления, а уменьшением шероховатости поверхности лопастей добиться уменьшения силы трения.

Заключение. Изучение сил, действующих на лопасти, показало, что сила сопротивления, или лобовое сопротивление, ВТ зависит от сил трения воздуха о поверхность лопасти, от обтекаемости лопасти и других факторов. Поэтому лопасти должны иметь обтекаемую каплевидную форму и незначительную шероховатость, в результате чего уменьшается лобовое сопротивление, и ВТ развивает значительно большую мощность.

Литература

1. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. – М.: Сельхоз. изд.–1957.– 536 с.
2. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Рысмендеева А.Р. Влияние профиля лопастей ветротурбины на вращающий момент ветроустановки // Проблемы автоматизации и управления.– 2014.– №1(26). – С.169–173.
3. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Толукбаев Ш.К. Динамическая характеристика ветротурбины, работающей при малых скоростях ветра // Проблемы автоматизации и управления.– 2015.– №2(29). – С.90–95.