

## Лабораторная работа № 4

### ПОДЪЕМНАЯ СИЛА ЛОПАСТИ ВЕТРОКОЛЕСА

Цель работы – определить подъемную силу лопасти ветроколеса в зависимости от скорости набегающего ветрового потока и угла установки лопасти.

**Введение.** В лопастных ветроэнергетических установках энергия ветра преобразуется в механическую энергию их рабочих органов. Первичным и основным рабочим органом ВЭУ, непосредственно принимающим на себя энергию ветра и, как правило, преобразующим ее в кинетическую энергию своего вращения, является ветроколесо.

Крыльчатые ветроколеса работают за счет косо́го удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра (рис. 1). На горизонтальном валу закреплены крылья, число которых у современных ветродвигателей бывает от двух и больше. Крыло ветроколеса состоит из маха *1* и лопасти *2*, закрепляемой на махе так, что она образует с плоскостью вращения некоторый угол  $\varphi$ . Этот угол называют углом установки лопасти. При этом на ее элементы набегают воздушный поток с относительной скоростью  $w$  под углом  $\alpha$ , который называют углом атаки, и действует с силой  $F$ . Для неподвижной лопасти  $\varphi + \alpha = 90^\circ$ . Углы  $\varphi$  и  $\alpha$  в значительной мере определяют эффективность крыльев. Силу  $F$  можно разложить на две составляющие: вдоль скорости набегающего потока, называемую силой лобового сопротивления  $F_x$ , и в направлении, перпендикулярном скорости набегающего потока, называемую подъемной силой  $F_y$ . Сила  $F_y$  действует в плоскости вращения ветроколеса и создают крутящий момент.

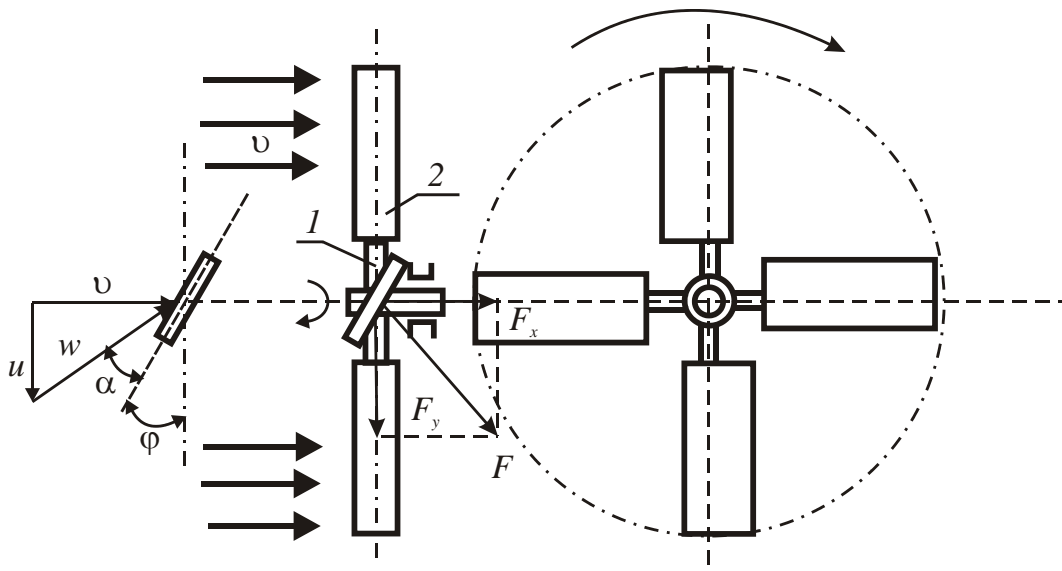


Рис. 1. Схема действия сил воздушного потока на элемент лопасти крыльчатого ветроколеса и план скоростей потока и лопасти

Подъемную силу лопасти можно выразить равенством, применяемым в аэродинамике:

$$F_y = (C_y \rho_v S v^2 \sin(90 - \alpha)) / 2, \quad (1)$$

где  $C_y$  – безразмерный коэффициент подъемной силы, зависящий, в общем случае, от формы лопасти и ее ориентации в потоке воздуха;  $\rho_v$  – плотность ветрового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь лопасти, м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость набегающего на лопасть ветрового потока, м/с.

Значение  $C_y$  определяют теоретическим расчетом или экспериментально. Так, согласно теории Жуковского, для лопасти в плоскопараллельном потоке при небольших углах атаки:

$$C_y = \frac{0,935}{1 + 2S / h^2} (\alpha_0 - \alpha), \quad (2)$$

где  $h$  – максимальная толщина лопасти, м;  $\alpha_0$  – угол атаки при котором подъемная сила равна нулю.

Максимальные силы, приводящие колесо во вращение, получаются при некотором значении угла атаки  $\alpha$ , т. е. угла наклона относительного потока к поверхности лопасти. Ввиду того, что окружная скорость по длине крыла не одинакова, а возрастает по мере удаления его элементов от оси вращения ветроколеса, относительная скорость  $w$  набегающего потока на лопасть также возрастает. Вместе с этим убывает угол атаки  $\alpha$ , и при некоторой окружной скорости  $u = R\omega$ , где  $\omega$  – угловая скорость, этот угол станет отрицательным (рис. 1). Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъемную силу. Если мы будем уменьшать угол  $\alpha$  каждого элемента лопасти по мере удаления его от оси вращения так, чтобы оптимальный угол атаки  $\alpha$  примерно сохранялся постоянным, то мы получим условие, при котором приблизительно все элементы лопасти будут работать со своей максимальной подъемной силой.

**Описание установки.** Лабораторная установка (рис.2) состоит из осевого вентилятора 1, с помощью которого создается направленное напорное движение воздушного потока по трубопроводу 2. Частота вращения вентилятора и, соответственно, мощность потока может изменяться с помощью трансформатора напряжения 3. Для измерения скорости воздушного потока в трубопровод помещена трубка Пито-Прандтля 4, подсоединенная к дифференциальному манометру 5. На выходе из трубопровода расположено элемент лопасти 6 ветроколеса, присоединенный к специальному устройству 7 изменяющему положение в пространстве. Специальное устройство закреплено на рабочей площадке тензометрических весов 8. Для пуска и выключения вентилятора предусмотрен пускатель 9.

Параметры лопасти: хорда  $b = 0,145$  м, максимальная толщина лопасти  $h = 0,025$  м, площадь лопасти  $S = 0,0154$  м<sup>2</sup>.

Подготовка установки к эксперименту. Перед началом работы необходимо ознакомиться с лабораторной установкой, последовательностью проведения опытов и перечнем величин, которые необходимо измерить.

После разрешения преподавателя приступить к проведению эксперимента.

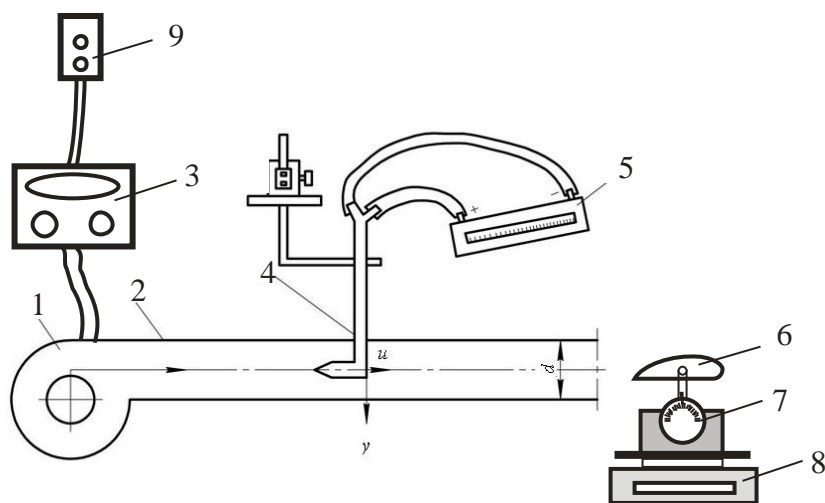


Рис. 2. Схема лабораторной установки

**Измерения и их обработка.** Измерения осуществляются в следующей последовательности:

1. включить электронный весы 8 и установить на дисплее показания 0,00;
2. с помощью светлой кнопки пускателя 9 включить осевой вентилятор 1;
3. установить регулятором на трансформаторе 3 заданное в таблице 1 значение напряжения;
4. с помощью дифманометра 5 определить жидкостный скоростной напор  $h_{ск}$ ;
5. с помощью специального устройства 7 установить угол атаки  $\alpha$  заданный в таблице 1;
6. измерить показания  $m$  весов 8 и занести его в таблицу 1;
7. повторить измерения для всех заданных в таблице 1 углов атаки  $\alpha$ ;
8. повторить пункты 3-7 для всех заданных в таблице 1 значений напряжения.
9. выключить вентилятор нажав красную кнопки пускателя 9.

Обработка результатов измерений осуществляется в следующей последовательности:

1. вычисляют скорость набегающего на лопасть ветрового потока

$$v = \sqrt{2gh_{ск}\rho_{ж} / \rho_{в}},$$

где  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{в} = 1,27 \text{ кг/м}^3$  – плотность жидкости и ветрового потока,  $\text{кг/м}^3$ ;

2. опытное значение подъемной силы определяют по формуле

$$F_y^{оп} = mg.$$

3. теоретическое значение коэффициента подъемной силы определяют из формулы (1);

4. все полученные данные заносят в таблицу 1.

Угол атаки, $\alpha$ , °	Напряже- ние транс- форматора $U$ , В	Скорост- ной напор, $h_{ск}$ , мм. вод. ст	Ско- рость потока, $v$ , м/с	Пока- зания весов, $m$ , кг	Подъ- емная сила, Н	Коэффициент подъ- емной силы	
						опытный	средний
+8	35						
	40						
	45						
	50						
	55						
	60						
+4	35						
	40						
	45						
	50						
	55						
	60						
0	35						
	40						
	45						
	50						
	55						
	60						
-4	35						
	40						
	45						
	50						
	55						
	60						
-8	35						
	40						
	45						
	50						
	55						
	60						

**Анализ результатов.** На основании проведенных измерений и расчетов построить опытные и теоретические зависимости  $C_y = f(\alpha)$ .