

## ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАСТИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ЕЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*В.М. Коваленко, проф.; Л.Г. Рожкова, ст. науч. сотр.*

Эффективность работы ветроэнергетической установки (ВЭУ) зависит, прежде всего, от совершенства ее аэродинамических форм. Усилия аэродинамиков, их научный поиск направлены на улучшение аэродинамических характеристик вращающихся элементов ВЭУ (лопасти, подвески-траверсы).

Известно, что аэродинамические характеристики ротора вертикально-осевой ВЭУ определяются рядом факторов: числом лопастей, их удлинением, формой профиля лопастей, начальными углами установки лопастей или их отдельных элементов и другими факторами. Представляется очевидным, что аэродинамические характеристики ротора будут определяться, кроме того, также состоянием обтекаемой поверхности, то есть шероховатостью лопастей и других вращающихся деталей.

В качестве обшивки для профилированных лопастей ВЭУ могут быть использованы различные материалы: металлические листы (стальные или дюралевые), дерево, фанера, перкаль (или другие тканевые материалы), стеклопластик (или стекловолокно), специальный сорт полипропилена и некоторые другие, целесообразность применения которых требует дополнительной проверки (например, металлопластик). Каждому материалу присуща определенная шероховатость, возникающая при его изготовлении и обработке. Имеет смысл учитывать также и шероховатость, появляющуюся при воздействии атмосферных осадков (коррозия), естественной среды (запыленность воздуха, насыщенность песком), от резких перепадов температур и др. причин.

Кроме шероховатости, то есть наличия на единице площади обтекаемой поверхности сравнительно большого количества микронеровностей, могут быть также и отдельные неровности в виде передних и задних ступенек, заклепок, сварных швов и др. И шероховатость, и отдельные неровности на обтекаемой поверхности могут проявляться по-разному. Во-первых, они могут быть причиной преждевременной турбулизации пограничного слоя, если до того он находился в ламинарном состоянии. Во-вторых, они могут быть источником дополнительного сопротивления трения, если пограничный слой находился уже в турбулентном состоянии. И, в-третьих, шероховатость может способствовать задержке отрыва пограничного слоя, то есть в этом случае ее воздействие может оказаться положительным.

Для ответа на вопрос, как именно отразится шероховатость обтекаемой поверхности ротора на характеристики ВЭУ, надо рассмотреть конкретный пример. Пусть мы имеем ВЭУ мощностью 10 кВт. При эксплуатации такой ВЭУ в центральных и восточных областях Украины, где среднегодовая скорость ветра составляет 4- 4,5 м/с, а номинальная мощность определяется при скорости ветра в 1,5 раза большей, необходимо производить расчет, исходя из средней скорости ветра  $U$ , равной примерно 7 м/с. Обтекаемая площадь ротора вычисляется по формуле

$$S = \frac{W}{0.5 \cdot C_p \rho U^3},$$

где  $W$ — мощность, Вт;

$C_p$ — коэффициент использования энергии ветра, принят равным 0,3;

$\rho=1,25 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха.

Площадь  $S=154 \text{ м}^2$ . Если принять равными диаметр ротора  $D$  и высоту лопасти  $H$ , то  $H=D=12,4 \text{ м}$ . При экспериментально обоснованном удлинении лопасти  $H/b=6-8$  [1] длина хорды лопасти может составлять  $b = 12,4/(6-8) \approx 2,1-1,6 \text{ м}$ . Пусть в среднем хорда  $b=2 \text{ м}$ .

На каком режиме происходит обтекание лопасти? Или, другими словами, какой пограничный слой образуется на лопастях? При вращении ротора лопасть поочередно находится в различных условиях обтекания. Наименьшая и наибольшая скорости обтекания наступают соответственно при движении лопасти по ветру и навстречу ветру. Пусть для определенности коэффициент

быстроходности  $\Theta = \frac{U_{f \delta}}{U_{\infty}} = 2$ . Тогда  $U_{min}=7 \text{ м/с}$ ,  $U_{max}=21 \text{ м/с}$ . Для условий нашего примера число

Рейнольдса  $Re = \frac{U \cdot b}{\nu}$ , где  $\nu=14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  — кинематический коэффициент вязкости, составляет

$Re_{min}=10^6$ , а  $Re_{max}=3 \cdot 10^6$ . Исходя из условия, что критическое число  $Re_{кр}=0,35 \cdot 10^6$ , можно полагать, что ламинарный пограничный слой на гладкой поверхности лопасти может составить от 1/3 (при движении по потоку) до 1/9 длины хорды. Наличие шероховатости со значительной высотой бугорков, эквивалентной песочной шероховатости  $h_s$ , может привести только к уменьшению длины

участка ламинарного пограничного слоя. Пусть, для упрощения расчетов, вдоль всей хорды лопасти пограничный слой находится в турбулентном состоянии.

Определим величину допустимой шероховатости  $h_{\delta}$ , то есть ту высоту бугорков эквивалентной песочной шероховатости, которая практически еще не приведет к увеличению сопротивления трения. Расчет  $h_{\delta}$  необходимо производить при наибольшей скорости обтекания лопасти, когда последняя движется навстречу ветру. В этом случае толщина пограничного слоя будет наименьшей при данной хорде и, следовательно, будет наименьшей величина  $h_{\delta}$ . Исходя из

условия  $\frac{U \cdot h_{\delta}}{\nu} = 100$  [2], находим  $h_{\delta} = 0,067$  мм — при движении навстречу ветру и соответственно

$h_{\delta} = 0,2$  мм - при движении лопасти по ветру. Отметим попутно, что увеличение размеров установки (прежде всего, хорды) и, следовательно, числа  $Re$  приводит к увеличению  $h_{\delta}$  и наоборот.

Если реальная шероховатость превышает 70 мкм, то сопротивление трения при движении лопасти навстречу потоку будет возрастать. Реальная шероховатость, по-видимому, будет несколько больше допустимой. Величина прироста коэффициента сопротивления трения  $\Delta C_F$  определится, исходя из конкретных условий. Так, например, пусть  $h_s = 1$  мм. Тогда для рассматриваемой установки  $L/h_s = 2 \cdot 10^6$ , и коэффициент сопротивления трения  $C_F$  увеличится примерно в 1,5 раза [2].

Поскольку сопротивление трения является определяющим в лобовом сопротивлении лопасти, то увеличение коэффициента  $C_F$  в полтора раза приведет к существенному снижению аэродинамического качества ротора.

Выше мы уже столкнулись с необходимостью учитывать нестационарный характер обтекания лопасти. И угол атаки, и вектор суммарной скорости набегающего на лопасть потока, равный сумме скорости ветра и окружной скорости с обратным знаком, циклически изменяются при каждом обороте ротора. Учесть этот фактор с приемлемой точностью, по-видимому, было бы затруднительно, хотя, в принципе, и возможно. Для практических целей, по-видимому, достаточно ограничиться средней для данных условий величиной скорости потока вдоль хорды, даже если осредненная сумма двух крайних значений скорости заметно отличается от этих осредненных величин.

Какова величина шероховатости для материалов, которые могут использоваться в качестве обшивки лопастей ВЭУ? Известно, что для металлопроката среднеарифметическая высота микронеровностей не превышает 0,08 мм [3]. Поверхности деревянной, стеклопластиковой и тканевой обшивки могут быть грубее. Если же учесть воздействие атмосферных осадков, условия эксплуатации (коррозия и пр.), то шероховатость окажется выше изначальных величин. Необходимо принимать меры для уменьшения шероховатости вращающихся элементов при изготовлении ВЭУ и не допускать ее увеличения в процессе эксплуатации.

Что касается влияния шероховатости на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный, то в рассматриваемом случае это обстоятельство не является определяющим, так как мы заранее предположили, что пограничный слой по всей поверхности уже находится в турбулентном состоянии. В общем случае, однако, такое влияние существует. Определить  $h_{кр}$  можно, исходя из конкретных условий, используя данные работы [2].

Рассмотрим, наконец, как шероховатость поверхности лопасти отразится на положении зоны отрыва потока. Известно [2], что шероховатость обеспечивает безотрывное обтекание на большей длине хорды, чем это возможно на гладкой поверхности. Это связано с более прочным "сцеплением" пограничного слоя с шероховатой поверхностью, чем с гладкой. Кроме того, на положение зоны отрыва потока влияет градиент давления вдоль хорды. Так, увеличение скорости обтекания, что имеет место при движении навстречу ветру, создает (или увеличивает) отрицательный градиент давления, и протяженность зоны отрыва может сократиться, а при движении по потоку, наоборот, зона отрыва может возрасти. Отрицательный градиент способствует смещению отрыва к задней кромке и, таким образом, увеличивает подъемную силу лопасти. Другими словами, шероховатость поверхности (в определенных ее пределах) не приводит к снижению тянущей силы лопасти. Но этот фактор не является определяющим.

Влияние отдельных неровностей (типа сварных швов, заклепок, ступенек) можно оценить таким же путем, как и влияние микронеровностей, если для поверхности с отдельными неровностями можно установить высоту бугорков эквивалентной песочной шероховатости. Некоторые данные по этому вопросу имеются в [2].

Общий вывод состоит в следующем. Оценка влияния шероховатости должна производиться в каждом конкретном случае. Первый фактор — влияние шероховатости на трение — согласно оценкам является доминирующим.

Составляя требования к отделке поверхности вращающихся элементов ВЭУ, следует помнить, что достижение гладкости стоит дополнительных финансовых затрат. Следовательно, надо быть уверенным, что затраченные средства окупятся выигрышем в аэродинамических характеристиках и, в конечном счете, — в эффективности ветроэнергетической установки.

## **SUMMARY**

*The article in question deals with the aerodynamic characteristics of the orthogonal wind unit, namely the influence of the rotor moving elements manufacture trimming on these characteristics. This influence is traced both in the increase of the blade frontal resistance and in the modification of the transition zone and the estrangement zone of the border coat location. This article illustrates the permissible surface trimming calculation for the wind unit in terms of 10 kW power.*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов И.И., Иванова Г.А., Перфилов О.Л. Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций / Сб. научных трудов Гидропроекта, вып. 129. - М., 1988.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Изд-во "Наука", 1969.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя, т.1. - Москва: Машиностроение, 1980.