

УДК 533.6.

Е.Р. Абрамовский\*, И.Г. Варшавская\*, В.И. Кукушкин\*\*

\*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

\*\*НПО «Южный машиностроительный завод имени А.М. Макарова»

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЧАТОЙ ЛОПАСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ

Розглядається можливість заміни суцільної лопаті горизонтально-осьового вітродвигуна (ГОВД) з прямолінійними окрайками на лопать, що складається з кількох окремих елементів. Кожен з них має фіксовані значення хорди, кута установки лопаті і відносної товщини аеродинамічного профілю. Передбачається, що запропонована форма лопаті може мати значні технологічні переваги, які можна використовувати у процесі виготовлення і виконання монтажних робіт у пункті установки вітродвигуна.

*Ключові слова:* горизонтально-осьовий вітродвигун, форма лопаті, кут установки.

Рассматривается возможность замены сплошной лопасти горизонтально-осевого ветродвигателя (ГОВД) с прямолинейной кромкой на лопасть, которая состоит из нескольких отдельных элементов. Каждый из них имеет фиксированное значение угла установки лопасти и относительной толщины аэродинамического профиля. Предполагается, что предложенная лопасть может иметь значительные технологические преимущества, которые можно использовать в процессе изготовления и проведения монтажных работ в пункте установки ветродвигателя.

*Ключевые слова:* горизонтально-осевой ветродвигатель, форма лопасти, угол установки.

The replacement of traditional solid blade of horizontal-axis wind turbine (HAWT), having the straight-lined edges, by the blade consisting of several and separate parts, is considered. Every such part has fixed values of chord, pitch angle and relative thickness of aerofoil sections. It is supposed that suggested shape of blade can have important technological advantages, which can be used in the process of manufacturing of wind turbine and installing it at the selected site.

*Key words:* horizontal-axis wind turbine, blade, pitch angle.

**Введение.** Известно, что производство и эксплуатация ветряных двигателей во многих странах мира в последние десятилетия развивается довольно быстрыми темпами. Лидирующую роль в этом развитии играют такие страны как Германия, Испания, США, Индия, Дания и другие. В соответствии с планами Европейской Ассоциации по Ветроэнергетике (European Wind Energy Association) уже к 2020 году предполагается, что страны, члены Ассоциации, достигнут 10-процентной доли ветровой энергии в общеэнергетическом балансе.

В Украине к настоящему времени на 6 ветростанциях работают несколько более 1000 ветроагрегатов с общей установленной мощностью около 90 мегаватт (в Германии, например, этот показатель превышает 20 тысяч мегаватт).

С целью увеличения объема производимой ветровой энергии в нашей стране необходимо решить ряд важных проблем. Прежде всего, необходимо приспособить проектные параметры применяемых у нас ветродвигателей к локальным ветровым условиям. Кроме того, следует существенно усовершенствовать технологию изготовления ветроагрегатов с целью упрощения и удешевления себестоимости процесса их производства.

Одним из наиболее сложных в изготовлении и дорогостоящих элементов горизонтально-осевого ветродвигателя, являются лопасти ротора. Сложности непрерывно нарастают по мере увеличения мощности каждого ветроагрегата (что соответствует современной тенденции). Так, агрегат мегаваттной мощности должен иметь лопасть длиной около 30 м. При ее изготовлении необходимо обеспечить пе-

ременное по длине значение установочного угла  $\varphi$  (угла крутки), переменные значения хорды  $b$  и относительной толщины профиля лопасти  $\bar{\delta} = \delta/b$ . Типовая форма лопасти ветроагрегата с мощностью  $P_H = 600$  кВт представлена на рис. 1.

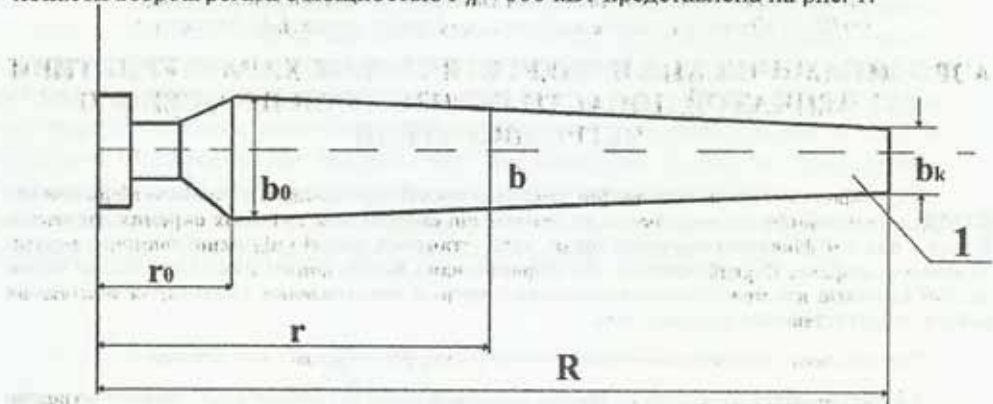


Рис. 1. Типовая форма лопасти ГОВД

Угол наклона хорды  $b_0$  к плоскости вращения ротора на расстоянии  $r_0$  от оси вращения составляет  $\varphi_0 = 19,17^\circ$ , а на конце лопасти  $\varphi_k = 0^\circ$ . При этом  $\bar{b}_0 = 0,09$ ,  $\bar{b}_k = 0,021$ ,  $R = 24$  м,  $\bar{\delta}_0 = 0,4$ ,  $\bar{\delta}_k = 0,15$ , ( $\bar{b} = b/R$ ).

В исходной и в измененных лопастях применяется профиль типа «Espero» с известными аэродинамическими характеристиками.

Изучению возможных вариантов упрощения технологии лопасти путем разбиения ее на отдельные отрезки и анализу влияния этой процедуры на энергетические и аэродинамические характеристики ротора и посвящена данная работа.

**Геометрия предлагаемой лопасти.** Предлагается два способа построения лопасти при разбиении ее на три и четыре отдельных элемента (рис. 2).

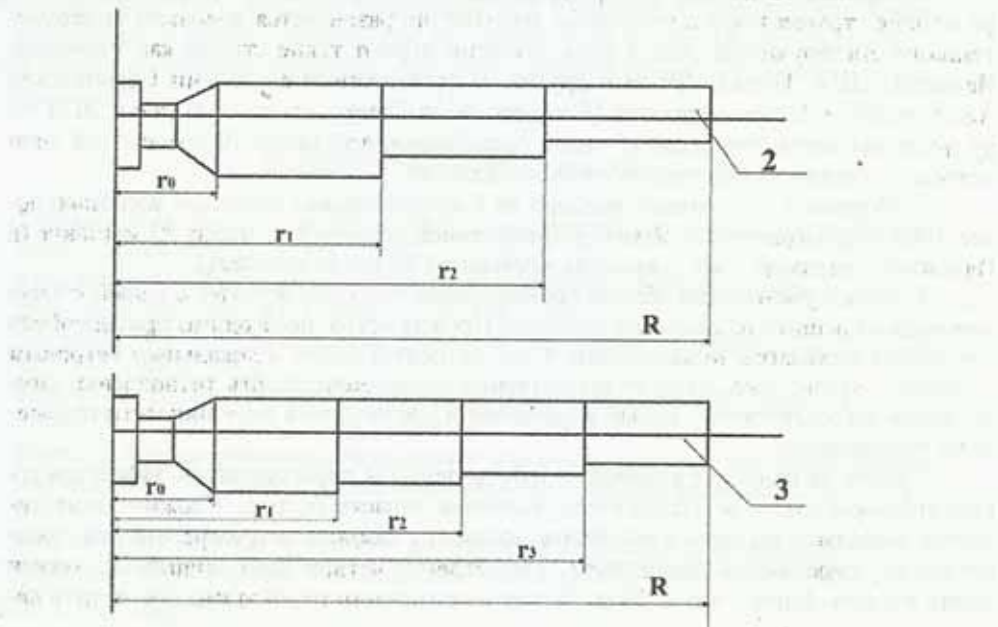


Рис. 2. Варианты построения ступенчатых лопастей



Разбиение с целью сравнения осуществляется с учетом геометрии сплошной лопасти № 1, которая представлена на рис. 1. При этом, на каждом участке соблюдается постоянство хорды  $b$ , угла крутки  $\varphi$  и относительной толщины профиля  $\bar{\delta}$ .

Таблица 1

Геометрия лопасти № 2

Участок	$r_0 + r_1$	$r_1 + r_2$	$r_2 + r_3$
Хорда	$\bar{b}_1 = 0,08$	$\bar{b}_2 = 0,058$	$\bar{b}_3 = 0,031$
Угол крутки	$\varphi_1 = 15,48$	$\varphi_2 = 5,36$	$\varphi_3 = 1,45$
Оптимальная толщина	$\bar{\delta}_1 = 0,35$	$\bar{\delta}_2 = 0,22$	$\bar{\delta}_3 = 0,13$

Для лопасти № 3 данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрия лопасти № 3

Участок	$r_0 + r_1$	$r_1 + r_2$	$r_2 + r_3$	$r_3 + r_4$
Хорда	$\bar{b}_1 = 0,08$	$\bar{b}_2 = 0,062$	$\bar{b}_3 = 0,045$	$\bar{b}_4 = 0,028$
Угол крутки	$\varphi_1 = 15,48$	$\varphi_2 = 6,018$	$\varphi_3 = 3,31$	$\varphi_4 = 1,031$
Оптимальная толщина	$\bar{\delta}_1 = 0,35$	$\bar{\delta}_2 = 0,23$	$\bar{\delta}_3 = 0,16$	$\bar{\delta}_4 = 0,13$

В связи с тем, что в местах соединения участков имеется разрыв конструктивных размеров, здесь предлагается ставить поперечные пластины (шайбы) во избежание перетекания и дополнительных возмущений в потоке. На рис. 3 пунктиром показана возможная форма пластины, отделяющей соседние части.

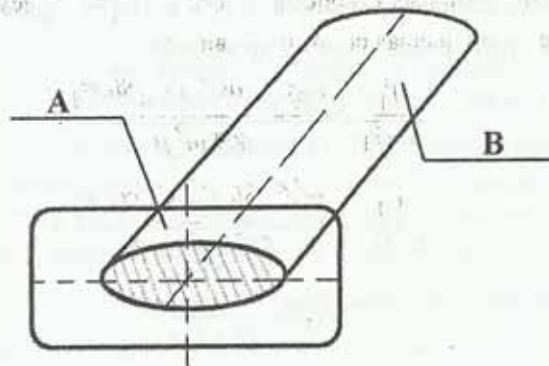


Рис. 3. Поперечная разделяющая пластина А на участке В

Каждый из элементов лопасти изготавливается отдельно по упрощенной технологии, поскольку во всех сечениях участка геометрические параметры неизменны. Соединения отдельных частей в единое целое можно осуществить с помощью установки продольных элементов крепления (их конструкция должна быть разработана дополнительно).

**Основные расчетные соотношения.** Основным соотношением, определяющим функциональные характеристики ветродвигателя, является зависимость коэффициента мощности  $C_p$  от коэффициента быстроходности  $\lambda$ . При этом

$$C_p = \frac{P}{P_0}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0}, \quad (2)$$

Здесь  $P$  – мощность, реализуемая на вращаемом валу ротора,  $P_0$  – мощность набегающего ветрового потока на ометаемой площади  $S$  (для ГОВД  $S = \pi R^2$ ). Скорость набегающего потока обозначим  $V_0$  (м/с), угловую скорость ротора –  $\omega$  (1/с). Зависимость  $C_p(\lambda)$  для сплошной лопасти получаем из выражения [1]:

$$C_p = 8\lambda \int_{\bar{r}_0}^1 (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (3)$$

Для лопастей, состоящих из 3-х и 4-х участков, получим соответственно:

$$C_p = 8\lambda \left( \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}_1} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} + \int_{\bar{r}_1}^{\bar{r}_2} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} + \int_{\bar{r}_2}^{\bar{r}_3} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} \right), \quad (4)$$

$$C_p = 8\lambda \left( \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}_1} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} + \int_{\bar{r}_1}^{\bar{r}_2} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} + \int_{\bar{r}_2}^{\bar{r}_3} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} + \int_{\bar{r}_3}^{\bar{r}_4} (1 - \bar{V}_1) \cdot \bar{U}_1^2 \bar{r}^2 d\bar{r} \right). \quad (5)$$

Значения индуктивных скоростей  $\bar{V}_1(\bar{r})$  и  $\bar{U}_1(\bar{r})$  будем определять по методу элементарных струй, решая систему уравнений

$$\frac{\bar{V}_1}{1 - \bar{V}_1} = \frac{\sigma(C_y \cos \beta + C_x \sin \beta)}{8\bar{r} \sin^2 \beta}, \quad (6)$$

$$\frac{\bar{U}_1}{1 - \bar{U}_1} = \frac{\sigma(C_y \sin \beta - C_x \cos \beta)}{8\bar{r} \sin \beta \cos \beta}, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1 - \bar{V}_1}{\lambda \bar{r} + \bar{U}_1}, \quad (8)$$

$$\alpha = \beta - \phi, \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{b \cdot l}{\pi \cdot R}. \quad (10)$$

Здесь  $\beta$  – угол притекания, определяемый соотношением (8);  $\phi$  – угол крутки (он задается, как функция  $\bar{r}$ );  $\alpha$  – угол атаки набегающего потока в заданном сечении;  $l$  – число лопастей;  $C_x$ ,  $C_y$  – аэродинамические характеристики профиля, зависящие от угла  $\alpha$ .

Для всех трех лопастей были построены зависимости  $C_p(\lambda)$ , которые представлены на графике рис. 4.

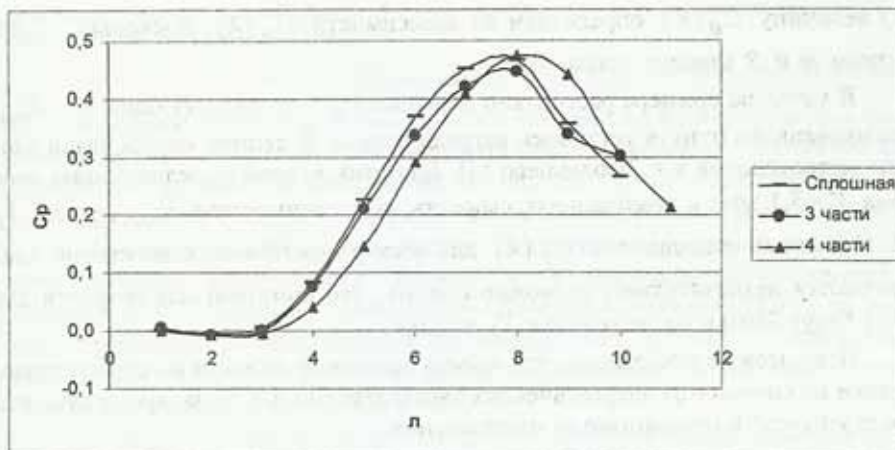


Рис. 4. Зависимость  $C_p(\lambda)$  для лопастей № 1, 2, 3

Определение зависимости  $C_p(\lambda)$  и поиск оптимального варианта этой зависимости является начальным этапом проектных расчетов ГОВД. Следующим этапом является определение оптимальных значений номинальной скорости ветра  $V_H$  и номинальной угловой скорости ротора  $\omega_H$ , которые обеспечивают максимальную годовую энергоотдачу на единицу ометаемой площади  $\bar{E} = E/S$  (кВт час/м<sup>2</sup>) в заданном месте установки ветродвигателя. При этом

$$\bar{E} = \frac{E}{S} = \frac{\rho \eta T}{2000} \int_{V_S}^{V_H} V^3 C_p(V) f(V) dV + \frac{P_H T}{S} \int_{V_K}^{V_S} f(V) dV. \quad (11)$$

Здесь  $T = 8760$  часов – годовое время;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\eta$  – коэффициент потери энергии в механической системе и на генераторе ( $\eta = 0,8+0,85$ );  $V_S$  и  $V_K$  стартовая скорость и скорость бурового отключения ГОВД соответственно;  $f(V)$  – функция, определяющая частоту повторения скорости ветра в заданной местности.

При проведении второго этапа проектных расчетов учитывается, что геометрия лопасти уже определена, известна зависимость  $C_p(\lambda)$ , и в частности, значение  $C_{pm}$  и соответствующее ему значение  $\lambda_m$ . Заданными являются номинальная мощность  $P_H$  и функция  $f(V)$ . Варьируемым параметром является  $V_H$ . Далее воспользуемся соотношениями [2]:

$$\lambda = \frac{\omega_0 R}{V_0}, \quad (12)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_{pm} \eta \pi \lambda_m^2 \frac{V_0^5}{\omega_0^2}, \quad (13)$$

Задавая различные значения  $V_0 = V_H$ , из выражения (13) находим  $\omega_0 = \omega_H$  при известном  $P = P_H$ . Далее из (12) находим  $R$  и площадь  $S = \pi R^2$ . В выражении



(11) величину  $C_p(V)$  определяем из зависимости  $C_p(\lambda)$ , поскольку  $\lambda$  при известном  $\omega$  и  $R$  зависит только от  $V$ .

В качестве примера рассчитано значение  $V_H$ , соответствующее  $\bar{E} = \bar{E}_{max}$  для фиксированного пункта установки ветродвигателя. В данном случае были рассмотрены метеоусловия в г. Дебальцево [3]. Для этих условий среднегодовая скорость равна  $V_c = 5,1$  м/с, а номинальная скорость, обеспечивающая  $\bar{E}_{max}$ , равна  $V_H = 10$  м/с. Поскольку зависимости  $C_p(\lambda)$  для всех рассмотренных вариантов лопастей отличаются незначительно, то можно считать, что номинальные скорости для них также будут близки по значению к  $V_H = 10$  м/с.

Итак, можно утверждать, что замена сплошной лопасти на ступенчатую фактически не снижает ее энергетических характеристик и в то же время существенно может упростить технологию ее изготовления.

### Библиографические ссылки

1. Абрамовский Е. Р. Аэродинамика ветродвигателей : учеб. пособие / Е. Р. Абрамовский, С. В. Городько, Н. В. Свиридов. – Д., 1987. – 220 с.
2. Abramovsky Yev. R. Aerodynamic theory of wind turbines : study guide / Yev. R. Abramovsky. – Dnipropetrovsk, 2008. – 242 p.
3. Справочник по климату СССР // Украинская ССР, Гидрометеорология. Вып. 10, ч. 3. – С. 235–300.

Надійшла до редколегії 11.03.11

УДК 539.386:622.647.2

Р.В. Кирия

*Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова НАН Украины*

### ИСТЕЧЕНИЕ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ ИЗ БУНКЕРА С РАЗЛИЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВЫПУСКНОГО ОТВЕРСТИЯ

На підставі аналізу структурно-механічного стану сипкого середовища одержано математичні моделі його витікання з бункера з різним розташуванням і формою випускного отвору. Встановлено залежність витрати сипкого середовища від параметрів випускного отвору і властивостей сипкого середовища.

*Ключові слова: сипке середовище, витікання, бункер, випускний отвір, динамічне склепіння, структурно-механічний стан.*

На основании анализа структурно-механического состояния сыпучей среды получены математические модели его истечения из бункера с различным расположением и формой выпускного отверстия. Установлены зависимости расхода сыпучей среды от параметров выпускного отверстия и свойств сыпучей среды.

*Ключевые слова: сыпучая среда, истечение, бункер, выпускное отверстие, динамический свод, структурно-механическое состояние.*

In the work on the basis of analysis of the structural-mechanical state of friable environment the mathematical models of his expiration from a bunker with a different location and form of tap-

© Р.В. Кирия, 2011