



# Оценка эффективности использования различных аэродинамических профилей для современной малой ВЭУ

Рецензия эксперта на статью получена  
19.03.019 [Expert review on the article  
received on Mart 19, 2019].

Значительные трудности при использовании ветровой энергии создаёт неравномерность и колебания параметров ветрового потока. Основной характеристикой потока как носителя энергии является скорость ветра. Даже в небольшой промежуток времени от пяти до десяти минут колебания значения скорости ветра могут происходить в диапазоне от 50 до 150% от среднего значения. Поэтому лопасть ветроэнергетической установки должна эффективно работать в весьма широком диапазоне скоростей  $v_{cp} \approx 4,5-20$  м/с.

В этом диапазоне скоростей турбина ветроэнергетической установки должна обеспечивать максимально возможную выработку электроэнергии и иметь минимальное аэродинамическое сопротивление, чтобы не перегружать элементы конструкции.

Определяющую роль в создании нужных аэродинамических свойств турбины ветроэнергетической установки играет правильный выбор профиля поперечного сечения ветрового колеса [1, 2]. Представленная статья рассматривает аэродинамические характеристики трёх

различных аэродинамических профилей, которые могут быть использованы при разработке турбины малой ветроэнергетической установки. В качестве профилей применяемых при конструировании лопасти турбины ветроэнергетической установки рассмотрим два профиля часто используемых в зарубежных ветроустановках NACA63-425 и DU91-W2-250 [3-5], а также профиль «Эсперо», часто используемый в России в отечественных конструкциях [1, 2, 6].

Как правило, для малых ветроэнергетических установок используются двояковыпуклые симметричные и несимметричные аэродинамические профили, а также могут применять плоско-выпуклые.

**Скорость ветра очень нестабильна и за сравнительно небольшой промежуток времени (5–10 минут) может меняться от 50 до 150% от среднего значения. Лопасть ВЭУ должна эффективно работать в диапазоне скоростей от 4,5 до 20 м/с**

УДК 621.311.24. Научная специальность: 05.14.08.

## Предварительная оценка эффективности использования различных аэродинамических профилей для современной малой ветроэнергетической установки

**Александр Е. Усачов**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник; **Сергей А. Сустин**, к.т.н., и.о. заместителя начальника отделения, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ (НИМК ЦАГИ); **Сергей А. Исаев**, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации (СПбГУГА)

В статье рассматриваются вопросы выбора аэродинамического профиля на начальном этапе проектирования малой ветроэнергетической установки. В качестве первого приближения сравниваются три аэродинамических профиля используемых в ветроэнергетических установках. В качестве профилей применяемых при конструировании лопасти турбины ветроэнергетической установки рассматривались два профиля часто используемых в зарубежных ветроустановках NACA63-425 и DU91-W2-250, а также профиль «Эсперо», часто используемый в отечественных конструкциях. Первичная оценка аэродинамических качеств выбранных профилей проводилась по графикам кривых соотношения величины коэффициента подъемной силы и аэродинамического качества профиля. Основным условием выбора формы аэродинамического профиля в работе был выбран максимум величины аэродинамического качества.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроустановка, аэродинамический профиль.

UDC 621.311.24. The number of scientific specialty: 05.14.08.

## Preliminary assessment of the efficiency of using different aerodynamic profiles for a modern small wind power plant

**Alexander E. Usachov**, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researchers; **Sergey A. Susten**, PhD, acting deputy Head of Department, The Scientific and Research Moscow complex of the Central Aerohydrodynamic Institute (Tsagi Moskovskiy Kompleks); **Sergey A. Isaev**, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPbGUGA)

The article deals with the selection of the aerodynamic profile at the initial stage of designing a small wind power plant. As a first approximation, three aerodynamic profiles used in wind power plants are compared. Two profiles often used in foreign wind turbines NACA63-425 and DU91-W2-250, as well as the "Espero" profile, often used in domestic designs, were considered as profiles used in the design of the turbine blade of the wind power plant. The initial assessment of aerodynamic qualities of the selected profiles was carried out according to the graphs of the curves of the ratio of the lift coefficient and aerodynamic quality of the profile. The main condition for choosing the shape of the aerodynamic profile in the paper was the maximum value of aerodynamic quality.

**Key words:** wind power, wind turbine, aerodynamic profile.

Профили вогнуто-выпуклые применяются мало, так как усложняют конструкцию лопасти. Аэродинамические свойства крыловых профилей определяются их геометрическими параметрами и формой. Перечислим важные геометрические характеристики профилей, которые принимаются в расчёт при проектировании лопастей ветроколеса:

- относительная толщина аэродинамического профиля  $\bar{c}$ ;
- форма средней линии;
- распределение толщины вдоль хорды;
- радиусы носика и хвостика.

Форма средней линии аэродинамического профиля определяется относительной вогнутостью  $\bar{f}$  и положением макси-

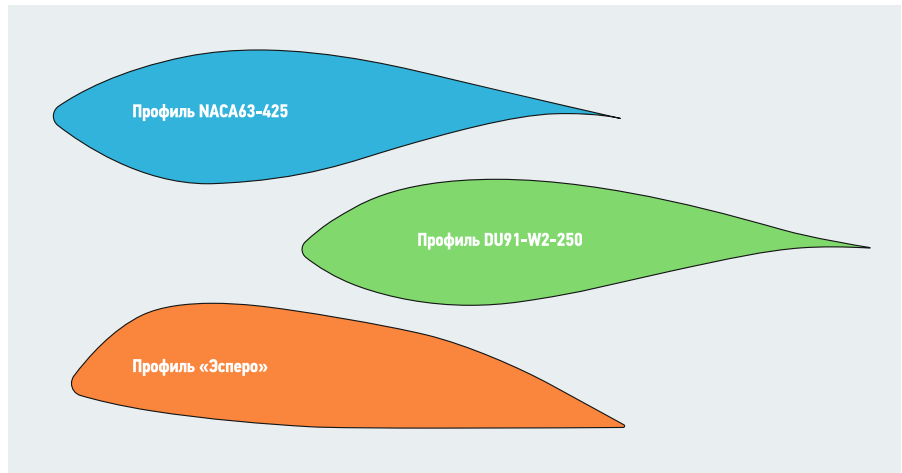


Рис. 1. Аэродинамические профили NACA63-425, DU91-W2-250 и «Эсперо»

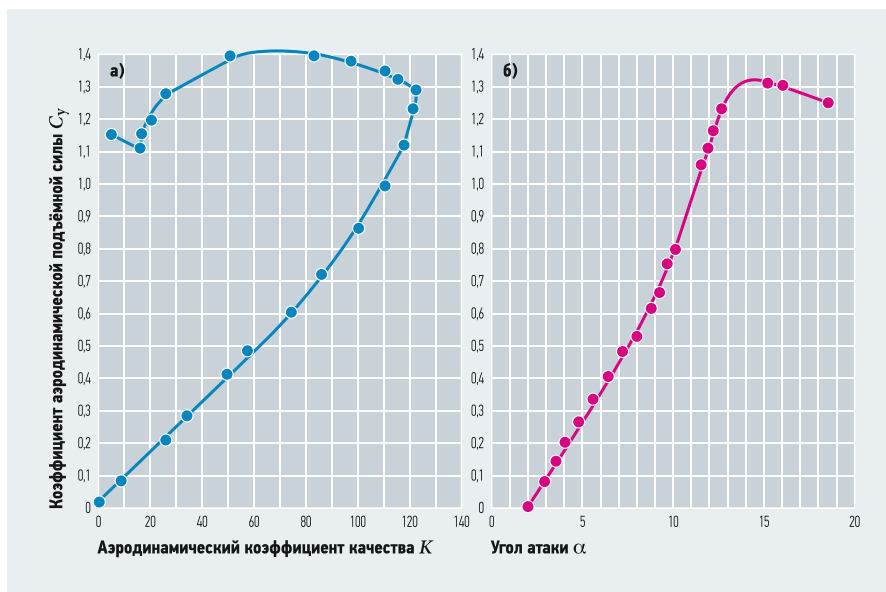


Рис. 2. График соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и величины аэродинамического коэффициента качества  $K$ , а также зависимость величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  для аэродинамического профиля NACA63-425

мальной вогнутости относительно носика профиля  $\bar{x}_f$ . Изменение формы средней линии или характера распределения толщины профиля вызывает изменения в распределении давления и скорости потока вдоль хорды, а также изменения в структуре пограничного слоя, связанные с процессами перехода ламинарного обтекания в турбулентное и возможным отрывом пограничного слоя с поверхности профиля.

Все эти факторы приводят к значительному изменению аэродинамических свойств профиля.

При профилировании лопастей ветровых колёс обычно применяются аэродинамические профили с относительной толщиной  $\bar{c} = 0,1-0,25$ , величина относительной вогнутости изменяется в пределах  $\bar{f} = 0-0,1$  [1]. Для симметричных аэродинамических профилей величина относительной вогнутости равна  $\bar{f} = 0$ .

Применять аэродинамические профили с большей относительной вогнутостью в ветроэнергетических установках может оказаться невыгодным, так как с ростом величины максимальной величины безразмерного коэффициента аэродинамической подъемной силы  $C_{y\max}$ , как правило, увеличивается коэффициент безразмерного лобового  $C_x$ . Здесь:

$$C_y = \frac{Y}{\rho \frac{v^2}{2} b}, \quad C_x = \frac{X}{\rho \frac{v^2}{2} b},$$

где  $Y$  — величина аэродинамической подъемной силы;  $X$  — величина аэродинамической силы сопротивления;  $\rho$  — плотность воздуха;  $v$  — скорость набегающего потока;  $b$  — длина хорды.

Рассмотрим выбранные аэродинамические профили, а именно — NACA63-425, DU91-W2-250 и «Эсперо», — с относительной толщиной  $\bar{c} = 0,14$  при числе Рейнольдса  $Re = 3,0 \times 10^6$  (рис. 1).

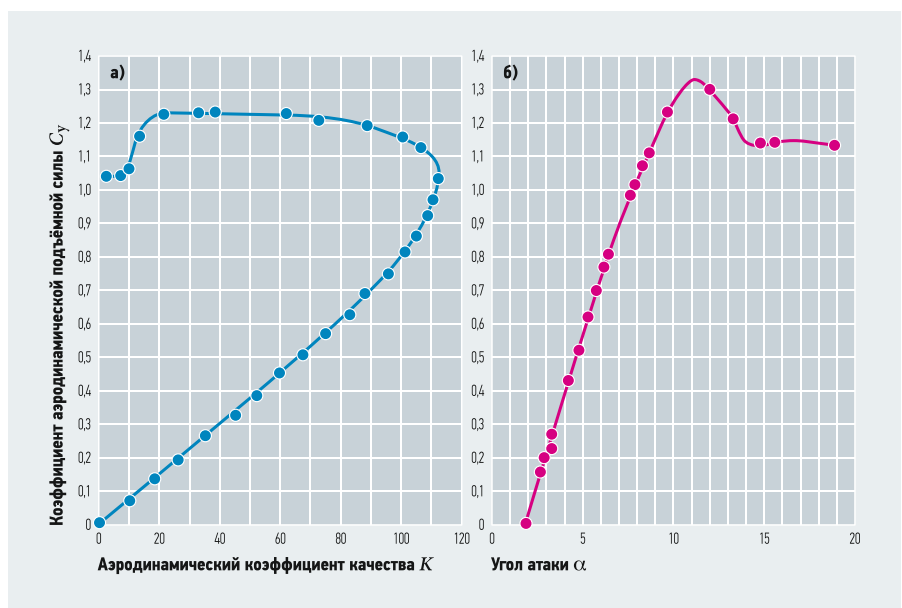


Рис. 3. График соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и величины аэродинамического коэффициента качества  $K$ , а также зависимость величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  для аэродинамического профиля DU91-W2-25

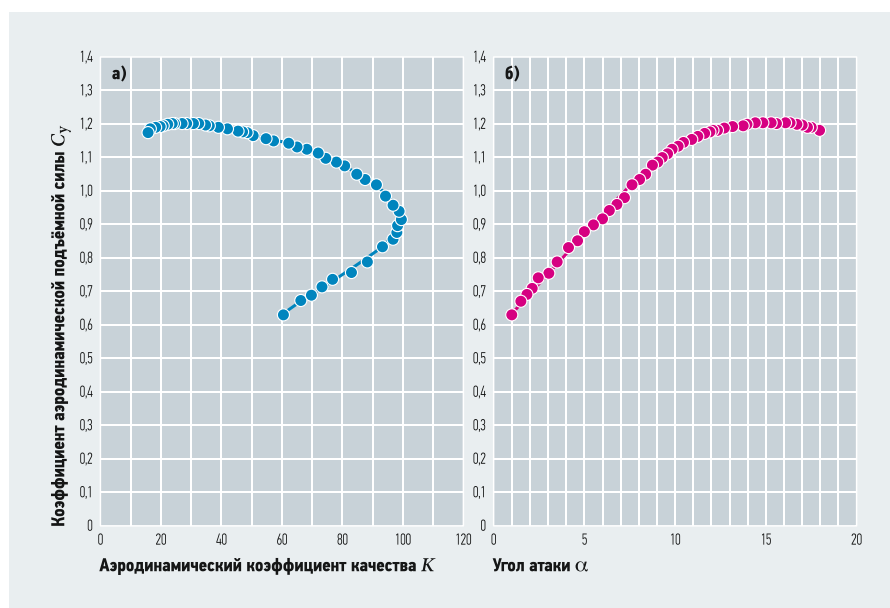


Рис. 4. График соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и величины аэродинамического коэффициента качества  $K$ , а также зависимости величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  для аэродинамического профиля «Эсперо»

Выполним первичную оценку аэродинамических качеств выбранных профилей по графикам кривых соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и аэродинамического качества профиля  $K = C_y/C_x$ . Основным условием выбора формы аэродинамического профиля в данной работе является максимум величины  $K$ . Из этого условия по графику зависимости коэффициента подъемной силы  $C_y$  от угла атаки  $\alpha$  определяется величина угла установки профиля в данном сечении ветрового колеса (расчетный аэродинамический коэффициент подъемной силы  $C_y$ ). В ветротехнике за расчетный аэродинамический коэффициент подъемной силы  $C_y$  принимают его значение при  $K_{\max}$  [1].

График соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и величины аэродинамического коэффициента качества  $K$  (рис. 2а), а также зависимости величины коэффициента подъемной силы от угла атаки  $\alpha$  (рис. 2б) для аэродинамического профиля NASA63-425 даны

**Максимальная величина аэродинамического качества для аэродинамического профиля NASA63-425 составляет примерно 124. При этом величина расчетного аэродинамического коэффициента подъемной силы 1,2 при угле атаки потока, набегающего на профиль, 12°**

на рис. 2. Максимальная величина аэродинамического качества для аэродинамического профиля NASA63-425 составляет примерно  $K \approx 124$ .

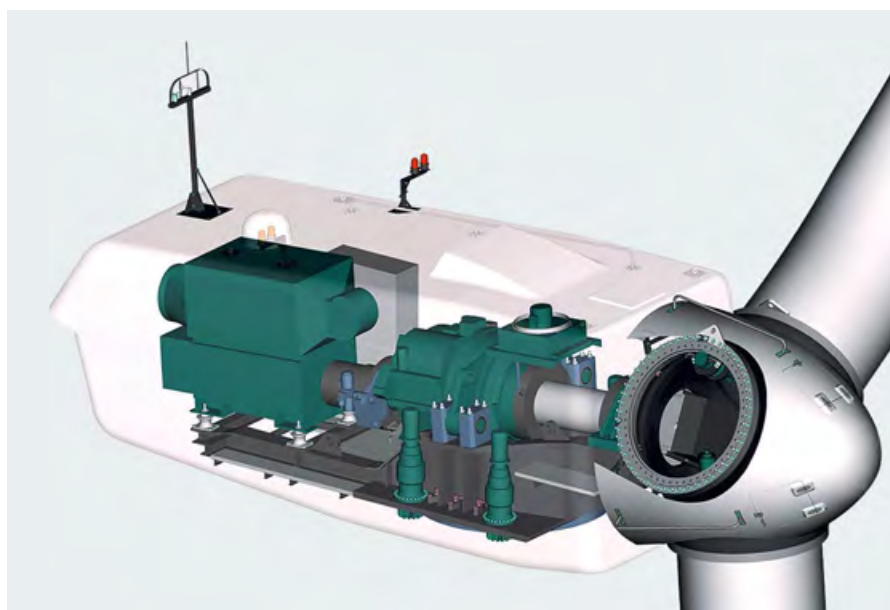
При этом величина расчетного аэродинамического коэффициента подъемной силы  $C_y \approx 1,2$  при угле атаки потока, набегающего на профиль,  $\alpha \approx 12^\circ$ .

На рис. 3 показан график соотношения величины коэффициента подъемной силы  $C_y$  и величины аэродинамического коэффициента качества  $K$ , а также зависимости величины коэффициента подъемной силы от угла атаки  $\alpha$  для аэродинамического профиля DU91-W2-250. Максимальная величина аэродинамического качества для аэродинамического профиля DU91-W2-250 составляет примерно  $K \approx 115,4$ . При этом величина расчетного аэродинамического коэффициента подъемной силы  $C_y \approx 1,06$  и при угле атаки потока, набегающего на профиль,  $\alpha \approx 8,23^\circ$ .

Рассмотрим основные аэродинамические характеристики аэродинамического профиля «Эсперо», разработанного в ЦАГИ Б.В. Коростелевым. На рис. 4 представлены графики соотношения величины коэффициента подъемной силы и величины аэродинамического коэффициента качества  $C_y$ , а также зависимости величины коэффициента подъемной силы от угла атаки  $\alpha$  для этого профиля.

Максимальная величина аэродинамического качества для аэродинамического профиля «Эсперо» составляет  $K \approx 83,7$ . При этом величина расчетного аэродинамического коэффициента подъемной силы  $C_y \approx 0,92$  и при угле атаки потока, набегающего на профиль,  $\alpha \approx 4,18^\circ$ .

На основе приведенных выше данных можно сделать предварительный вывод о том, что по своим аэродинамическим качествам предпочтение можно отдать аэродинамическому профилю NASA63-425. ●



1. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. — М.: ОГИЗ, 1948. 544 с.
2. Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. Ветроэлектрические станции. — М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1960. 320 с.
3. Mulugeta Biadgo, Gerawork Aynekulu. Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine blades. FME Transactions. 2017. No. 45. Pp. 647–660.
4. Li J.-Y., Li R., Gao Y., Huang J. Aerodynamic optimization of wind turbine airfoils using response surface techniques. Power and Energy. 2010. Vol. 224. Issue 6. Pp. 828–837.
5. Zafar S., Gadalla M., Hashemi M. An investigation into a small wind turbine blade design. In progress in Sustainable Energy Technologies: Generating Renewable Energy. Edited by I. Dincer, A. Midilli and H. Kucuk. Springer International Publishing Switzerland. 2014. Chap. 29. Pp. 483–497.
6. Грахов Ю.В., Матвеев О.В., Соломин Е.В. Инженерный метод и математическое моделирование в проектировании ветроэнергетических установок // Вестник ЮУрГУ, 2010. №9. С. 45–52.

References — see page 94.

**Preliminary assessment of the efficiency of using different aerodynamic profiles for a modern small wind power plant. Pp. 81–83.**

**Alexander E. Usachov**, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researchers; **Sergey A. Susten**, PhD, acting deputy Head of Department, The Scientific and Research Moscow complex of the Central Aerohydrodynamic Institute (Tsagi Moskovskiy Kompleks); **Sergey A. Isaev**, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPbGUGA)

1. Fateev E.M. *Vetrodvigateli i vetroustanovki* [Wind turbines and wind turbines]. Moscow. OGIZ [The Association of state book and magazine Publishing Houses under the People's Commissariat of Education of the USSR]. 1948. 544 p. [In Russian]
2. Andrianov V.N., Bystrickim D.N., Vashkevich K.P., Sektorov V.R. *Vetrojelektricheskie stancii* [Wind power stations]. Moscow-Leningrad. Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo [State Energy Publishing House]. 1960. 320 p. [In Russian]
3. Mulugeta Biadgo, Gerawork Aynekulu. Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine blades. FME Transactions. 2017. No. 45. Pp. 647–660.
4. Li J.-Y., Li R., Gao Y., Huang J. Aerodynamic optimization of wind turbine airfoils using response surface techniques. Power and Energy. 2010. Vol. 224. Issue 6. Pp. 828–837.
5. Zafar S., Gadalla M., Hashemi M. An investigation into a small wind turbine blade design. In progress in Sustainable Energy Technologies: Generating Renewable Energy. Springer International Publishing Switzerland. 2014. Chap. 29. Pp. 483–497.
6. Grahov Ju.V., Matveenko O.V., Solomin E.B. *Inzhenernyj metod i matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii vetrojenergeticheskikh ustanovok* [Engineering method and mathematical modeling in the design of wind power plants]. *Vestnik JuUrGU* [Bulletin of South Ural State University]. 2010. No. 9. Pp. 45–52. [In Russian]