

1. Ciuperca R. Dezvoltarea modelului aerodinamic al rotorului eolian elicoidal cu ax vertical (REEV)/Meridian Ingineresc nr. 4/2008: Publicatie tehnico-stiintifica si aplicativa– Ch.: Ed. U.T.M., 2008.– p. 62-67. – ISSN 1683–853X.
2. Gorlov A.M. Limits of the Turbine Efficiency / A. M., Gorlov, A. N. Gorban', V. M. Silantyev // Journal of Energy Resources Technology. – December 2001, Vol. 123, pp.311–317.
3. Bostan I. Theoretical aerodynamic analyses of airfoils for use on small wind turbines and selection of optimal profiles for wing of helical wind turbine functional model (Part I, II) / I. Bostan, V. Dulgheru, R. Ciuperca // International Scientific Conference Modern Technologies, Quality, Restructuring, TCMR–2006, Jassy [LII vol.]. – P. 1281–1288.
4. Абрамовський Є. Р. Аеродинаміка вітродвигунів (Aerodynamic theory of wind turbines) / Є. Р. Абрамовський. – Д.: Наука і освіта, 2008. – 162 с.

Надійшла до редколегії 12.04.2013

УДК 533.6:621.548

Е. Р. Абрамовский*, С. В. Тарасов**, И. Ю. Костюков**, Н. Н. Лычагин*

**Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

***Институт транспортных систем и технологий «Трансмаг» НАН Украины*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ РАЗНОГО ТИПА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Проведено порівняльний аналіз характеристик кількох типів вертикально-осьових вітродвигунів, пристосованих до використання на забудованій міській території. Кожен із вітродвигунів, який буде встановлено на покрівлі будівель, передбачається використовувати як локальне джерело енергії. Показано, що при низьких швидкостях вітру, які характерні для забудованої міської території, двоярусний ротор Савоніуса і Н-ротор Дар'є мають певні переваги перед іншими типами вітродвигунів.

Ключові слова: вітродвигун, ротори Савоніуса і Дар'є, гелікоїдальний ротор, міська територія.

Предлагается сравнительный анализ характеристик нескольких типов вертикально-осевых ветродвигателей, приспособленных для использования в застроенной

зоне городов. Каждый из ветродвигателей, установленный на крыше здания, предполагается использовать как локальный источник энергии. Отмечается, что при низких скоростях ветра, которые характерны для застроенной городской территории, двухъярусный ротор Савониуса и Н-ротор Дарье имеют определенные преимущества перед другими типами ветродвигателей.

Ключевые слова: ветродвигатель, роторы Савониуса и Дарье, геликоидальный ротор, городская территория.

The comparative analysis of several vertical axis wind turbines, applicable to the use in the built urban area, is performed. It is supposed that each of the turbine will be mounted on the top of the building and will serve as a local source of energy. It is shown that for a low wind speeds, which are observed in the built area, the two-stage Savonius rotor and Darrieus H-rotor will have a proper advantages over other types of wind turbines.

Keywords: wind turbine, rotor of Savonius and Darrieus, helicoidal rotor, urban territory.

В последние несколько лет были открыты несколько новых возможностей в дальнейшем развитии ветроэнергетики. Речь идет о строительстве крупных ветростанций, расположенных на мелководных оффшорных территориях, а также о размещении ветродвигателей в застроенной зоне больших городов [1, 2, 3]. О возможности развития данных направлений в Украине говорится в работах [4, 5].

В частности, в работе [4] были рассмотрены основные проблемы и условия, которые необходимо выполнить в случае использования ветряных двигателей на городской территории. Было отмечено, что в случаях их монтажа на крыше зданий и сооружений следует отдать предпочтение вертикально-осевым агрегатам небольших мощностей. В этом случае, как показывает зарубежный опыт, можно устранить или существенно уменьшить влияние таких негативных факторов, как вибрация, шум, турбулизация потока, создание помех для электроприборов и т.п.

Понятно, что локальные источники энергии, которые используются, в основном, для бытовых нужд, не обязательно должны иметь большую мощность. В данной работе предлагается рассмотреть с точки зрения энергоотдачи и удобства использования три типа вертикально-осевых ветродвигателей: ротор Савониуса (иногда его называют S-ротором), Н-ротор Дарье и ротор с геликоидальными (винтовыми) лопастями, которые мы в дальнейшем будем называть G-ротором. При этом рассматриваются двухъярусные варианты роторов Савониуса и Дарье с целью обеспечения более плавного изменения крутящего момента в процессе одного оборота. Такое конструктивное решение должно привести к уменьшению вибраций и звуковых колебаний. В верхнем ярусе каждого из названных роторов рабочие элементы (лопасти) смещены на угол $\Delta\mu$ по отношению к нижнему ярусу. При этом для ротора Савониуса $\Delta\mu = 90^\circ$, а для Н-ротора угловое смещение зависит от количества лопастей ℓ . При $\ell = 3$ $\Delta\mu = 60^\circ$. На границе стыка обоих ярусов помещена разделительная плоская шайба с диаметром, равным диаметру ротора, а их подвижные рабочие элементы закреплены на одном валу.

Следует заметить, что случаи применения двухъярусного Н-ротора Дарье в условиях городской застройки до настоящего времени авторам неизвестны, хотя, как показано далее, их применение может быть успешным.

Рассмотрим сначала функциональные характеристики каждого ротора, т.е. зависимость коэффициента мощности C_p от коэффициента быстроходности λ . При этом следует учесть, что $C_p = P/P_0$, где P – мощность, реализуемая на вращаемом валу ветродвигателя, а $P_0 = 0,5\rho V_0^3 S_1$ (Ватт) – мощность набегающего со скоростью V_0 (м/с) ветрового потока; S_1 (м²) – ометаемая площадь, ρ (кг/м³) – плотность воздуха. Кроме того, здесь обозначено: $\lambda = \omega R/V_0$, где ω (1/с) – угловая скорость ротора, а R (м) – экваториальный радиус. Эмпирическая зависимость $C_p(\lambda)$ для ротора Савониуса была предложена авторами на основе обработки экспериментальных данных, полученных с помощью аэродинамической трубы Т-5 в Днепропетровском национальном университете, а также расчетов и экспериментальных данных, прилученных другими авторами:

$$C_p = C_{pm} \left[2,5 \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^{1,5} - 1,5 \left(\frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^{2,5} \right], \quad (1)$$

$$C_p = C_{pm} \left[1 - \left(\frac{\lambda - \lambda_m}{\lambda_k - \lambda_m} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) применяются соответственно для расчета $C_p(\lambda)$ на восходящем и нисходящем участках графической зависимости (см. рис. 1).

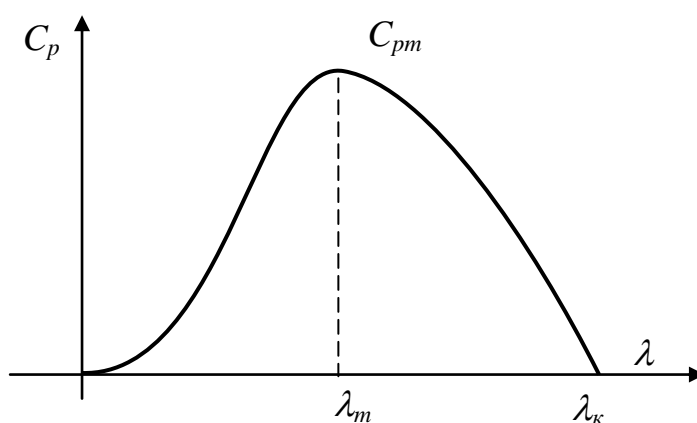


Рис. 1. Типовая зависимость $C_p(\lambda)$

В выражении (2) используется значение $\lambda = \lambda_k$, которое соответствует режиму авторотации, т.е. когда $C_p = 0$, а также λ_m , т.е. значение λ , при котором

реализуется максимальное значение C_{pm} . Величины λ_m и λ_k зависят от геометрических параметров ротора Савониуса.

В работе [6] показано, что оптимальная геометрия ротора соответствует таким показателям: отношение высоты к диаметру, т.е. $H/D = 1,5$, а смещение полуцилиндров по отношению друг к другу $e = D/6$. Для названного оптимального ротора установлено, что $\lambda_m = 0,94$, $C_{pm} = 0,3$, $\lambda_k = 1,7$. Соответствующие графики, иллюстрирующие зависимости $C_p(\lambda)$ и $q(\lambda)$ для такого ротора, представлены на рис. 2. Здесь $q(\lambda)$ – коэффициент момента ротора.

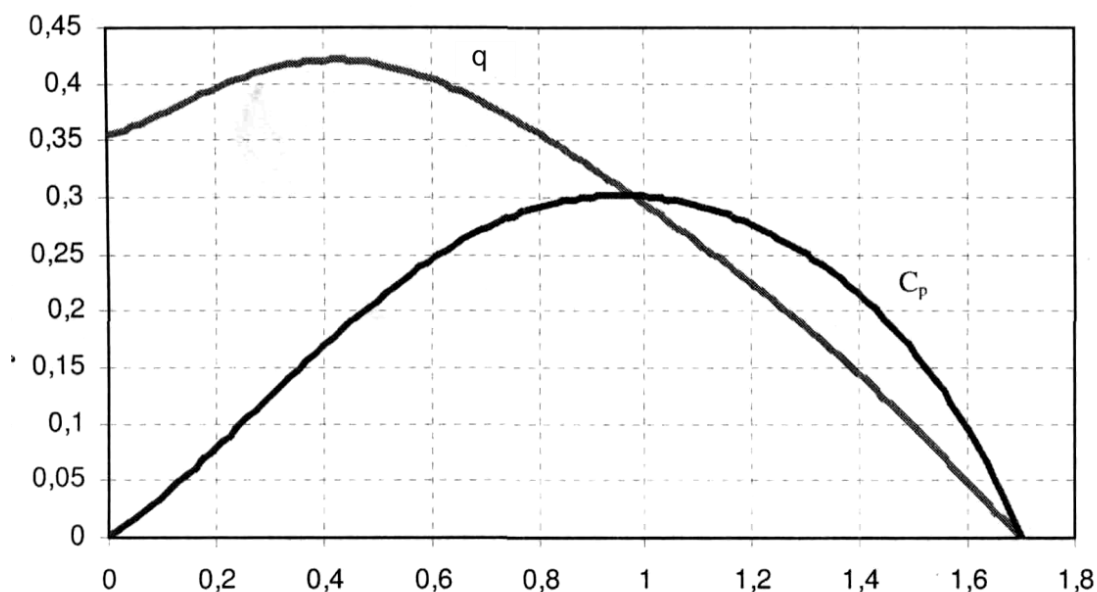


Рис. 2. Зависимости $C_p(\lambda)$ и $q(\lambda)$ для оптимального ротора Савониуса

Зависимость $C_p(\lambda)$ для Н-ротора Дарье получим на основе использования импульсной модели с одной трубкой тока [7]. Отметим при этом, что в Н-роторе угол δ (угол наклона лопасти к вертикали) равен нулю, а радиальное расстояние r от оси вращения до вертикально подвешенной лопасти не изменяется по высоте (т.е. $r = R$).

Предположим, что верхний ярус Н-ротора Дарье геометрически отличается от нижнего только смещением на соответствующий меридиональный угол $\Delta\mu$. В этом случае зависимость $C_p(\lambda)$ для двухъярусного ротора будет такой же, как и для одноярусного, но с удвоенной высотой. Воспользуемся при этом формулами, приведенными в [5]:

$$C_p(\lambda) = \frac{\sigma \bar{V}_1^2 \lambda}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_t \frac{\bar{W}^2}{\bar{V}_1^2} d\mu. \quad (3)$$

Здесь:

$$\sigma = \frac{\ell b}{D}, \quad (4)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{1}{1+G}, \quad (5)$$

$$G = \frac{\sigma}{8\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{W}^2}{\bar{V}_1^2} (C_n \sin \mu - C_t \cos \mu) d\mu, \quad (6)$$

$$\frac{\bar{W}^2}{\bar{V}_1^2} = \sin^2 \mu + \left(\frac{\lambda}{\bar{V}_1^2} + \cos \mu \right)^2, \quad (7)$$

$$C_t = C_y \sin \alpha - C_x \cos \alpha, \quad (8)$$

$$C_n = C_y \cos \alpha + C_x \sin \alpha, \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\bar{V}_1 \sin \mu}{\lambda + \bar{V}_1 \cos \mu}. \quad (10)$$

В формулах (3) – (10) приняты такие обозначения: σ – коэффициент заполнения ометаемой площади $S_1 = DH$; ℓ – число лопастей ротора; b – хорда профиля; $D = 2R$ – диаметр ротора; H – суммарная высота двухъярусного ротора (Савониуса или Дарье), или же высота одноярусного геликоидального ротора; $\bar{W} = \frac{W}{V_0}$ – относительная суммарная скорость потока перед профилем лопасти; V_0 – скорость набегающего ветрового потока; $\bar{V}_1 = \frac{V_1}{V_0}$ – относительная скорость в активном сечении ротора; α – угол атаки, т.е. угол между вектором скорости W и хордой профиля b , μ – азимутальный угол поворота ротора; C_x и C_y – коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы профиля лопасти соответственно. Они выбираются на основе экспериментальных данных.

Согласно методике, разработанной авторами ранее и предложенной в работе [9], расчет коэффициента мощности C_p геликоидального ротора может быть произведен по формуле:

$$C_p = -\lambda \ell \frac{(RH / S_1)}{2\pi} \int_0^1 \frac{\bar{r} \bar{b} \bar{V}_1^2}{\cos \gamma} d\bar{z} \cdot \int_0^{\theta+2\pi} \left(\frac{W_\infty}{V_1} \right)^2 C_{F_\mu} d\mu. \quad (11)$$

Основными конструктивными параметрами ротора, участвующими в формуле (11), являются: характерный радиус R (например, радиус R_0 окружно-

сти вращения в нижнем горизонтальном сечении), высота H , ометаемая площадь S_1 и количество лопастей ℓ .

Интегрирование локальных величин для каждого элемента лопасти производится в выражении (11) по азимутальной координате μ ($\theta \leq \mu \leq \theta + 2\pi$), для каждого вертикального сечения ротора с безразмерной координатой $\bar{z} = \bar{z}_0 + (\theta - \theta_0)/(\theta_1 - \theta_0)$ в указанных пределах. Они учитывают угловое смещение профиля лопасти геликоидальной формы при изменении высоты сечения. Величины θ_0, θ_1 – это азимутальные координаты, определяющие угловые положения нижнего и верхнего сечений лопасти, соответственно.

В выражении (11) используются переменные величины, которые можно собрать в три основные группы. Первая из них связана с кинематикой движения лопасти. К ней относятся упомянутые выше величины $\lambda, \bar{V}_1, \bar{W}/\bar{V}_1$, из которых последняя рассчитывается по формуле:

$$\frac{\bar{W}}{\bar{V}_1} = \frac{\sin \mu}{\cos \alpha} A + \frac{\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}}{\cos \alpha} A_{\delta}, \quad \text{где } \lambda_1 = \omega R / V_1, \bar{r} = r / R. \quad (12)$$

Величина угла атаки α связана с параметром λ_1 и азимутальным углом текущего положения профиля лопасти μ . Она определяется как

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{A_{\beta} \sin \mu + (\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}) A_{\beta \delta}}{A \sin \mu + (\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}) A_{\delta}}. \quad (13)$$

Вторая группа расчетных соотношений связана с определением аэродинамических сил. Коэффициент аэродинамической силы $C_{F_{\mu}}$, действующей вдоль азимутальной координаты, рассчитывается в выражении (11) по формуле:

$$C_{F_{\mu}} = -C_h A_{\delta} + C_N A_{\beta \delta}, \quad (14)$$

в которой используются коэффициенты продольной C_h и поперечной C_N сил профиля НАСА 0018. Для их определения можно воспользоваться экспериментальными зависимостями коэффициентов сил лобового сопротивления $C_x(\alpha)$ и подъемной силы $C_y(\alpha)$:

$$C_h(\alpha) = C_x(\alpha) \cos \alpha - C_y(\alpha) \sin \alpha, \quad C_N(\alpha) = C_x(\alpha) \sin \alpha + C_y(\alpha) \cos \alpha. \quad (15)$$

Наконец, третья группа формул связана с внутренней геометрией лопасти геликоидальной формы. Они представлены здесь величинами, обозначенными как $A, A_{\delta}, A_{\beta}, A_{\beta \delta}$. Эти величины определяются с использованием параметрического уравнения оси лопасти в цилиндрической системе координат (r, z, θ) .

Пример расчета по формуле (11) приведен на рис. 3 для трехлопастного геликоидального ротора с коэффициентом заполнения, равным 0,15 при нулевом значении установочного угла атаки. Расчеты проведены в случае, когда геометрическая ось лопастей представляла собой отрезок винтовой линии с постоянным радиусом $R = 2$ м, высотой $H = 5$ м. Угол азимутальной закрутки лопастей $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$ варьировался.

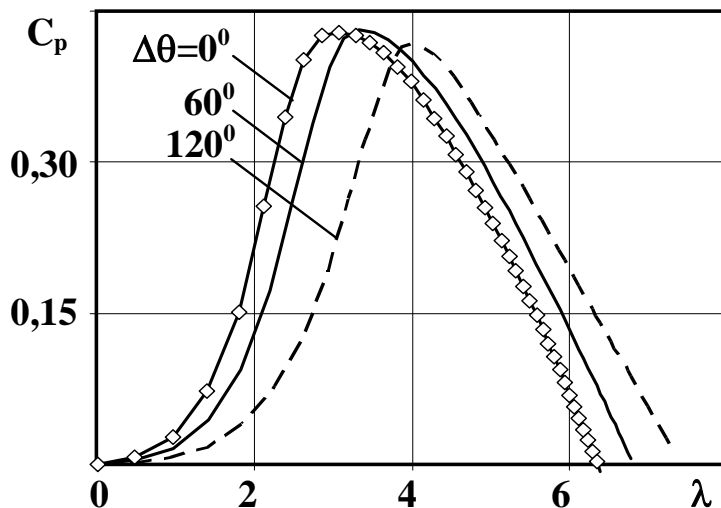


Рис. 3. Коэффициент мощности G-ротора в зависимости от коэффициента быстроходности λ при различной закрутке лопасти $\Delta\theta$; (зависимость $C_p(\lambda)$ при $\Delta\theta=0^\circ$ соответствует H-ротору Дарье)

Для корректности сравнения геометрические размеры ротора всех трех ветродвигателей были одни и те же, т. е. диаметр $D = 2R = 4$ м, высота $H = 5$ м, коэффициент заполнения — $\sigma = 0,15$. Профиль лопасти H-ротора и G-ротора — NASA 0018. Естественно, что ометаемые площади каждого ротора $S_1 = D \cdot H = 20$ кв. м будут также одинаковыми. Следует заметить, что зависимость $C_p(\lambda)$ для H-ротора Дарье будет определена, если угол азимутальной закрутки геликоидального ротора $\Delta\mu$ будет равен нулю. График $C_p(\lambda)$ для ротора Савониуса при $C_{pm} = 0,27$, $\lambda_m = 0,92$, $\lambda_k = 1,65$, $D = 4$ м, $H = 5$ м, показан на рис. 4. Отметим, что при одинаковых геометрических размерах верхнего и нижнего ярусов H-ротора и S-ротора можем записать $H = H_H + H_B$ (индексы “H” и “B” обозначают верхний и нижний ярусы).

Годовую энергетическую отдачу в киловатт-часах на единицу ометаемой площади \bar{E} будем определять из выражения, приведенного в [5]:

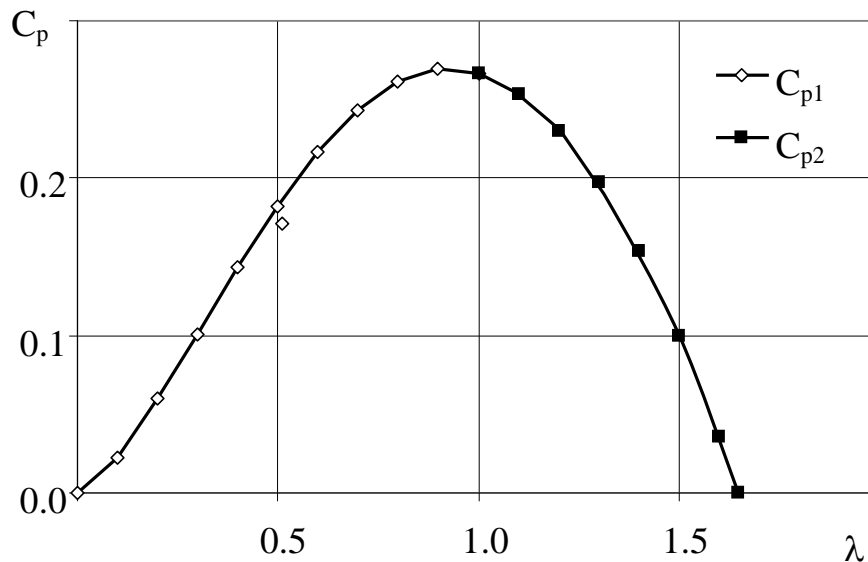


Рис. 4. Зависимость $C_p(\lambda)$ для ротора Савониуса

$$\bar{E} = \frac{\rho T}{2000} \int_{V_s}^{V_n} V^3 C_p(V) f(V) dV + \frac{P_n T}{S_1} \int_{V_n}^{V_k} f(V) dV. \quad (16)$$

Здесь $T = 8760$ часов – годовое время, V_s , V_n – стартовая и номинальная скорости ветродвигателя соответственно; $f(V)$ – функция распределения скоростей в месте установки ветродвигателя; P_n – номинальная мощность и V_k – скорость бурового отключения ВД.

В работе [5] показано, что максимальную величину \bar{E} (при фиксированном значении P_n) можно получить, если найти оптимальное значение номинальной скорости V_n . Ее величина будет зависеть от характеристик ротора, т.е. от $C_p(V)$ и от функции $f(V)$, которая, в свою очередь, определяется локальными ветровыми условиями. При такой постановке ометаемая площадь S_1 будет также зависеть от варьируемого параметра, т.е. от V_n . В данном случае мы принимаем, что $S_1 = \mathbf{const}$, и поэтому значение номинальной скорости V_n будет определяться несколько другим путем. Воспользуемся для этой цели функцией распределения скоростей $f(V)$, типовой график которой представлен на рис. 5.

Физический смысл этой функции состоит в том, что ее значения определяют вероятность пребывания скорости ветра в определенном диапазоне ΔV_i (например, 4...5 м/с) в течение года. Другими словами, можно считать, что при значении $f(V)=0,2$ (с/м) время пребывания в этом диапазоне равно $t_i = 0,2 \cdot T$, где T – обозначенное ранее годовое время (8760 часов). Такое толкование можно использовать для расчета энергии ветра, генерируемой в течение года в данном диапазоне скоростей. Мощность ветра \bar{P}_{0i} (на единицу площади) равна $0,5 \rho V_i^3$, а энергия $\bar{E}_{0i} = \bar{P}_{0i} \cdot t_i = 0,5 \rho V_i^3 \cdot t_i$ (для каждого диапазона ΔV_i). Зная зависи-

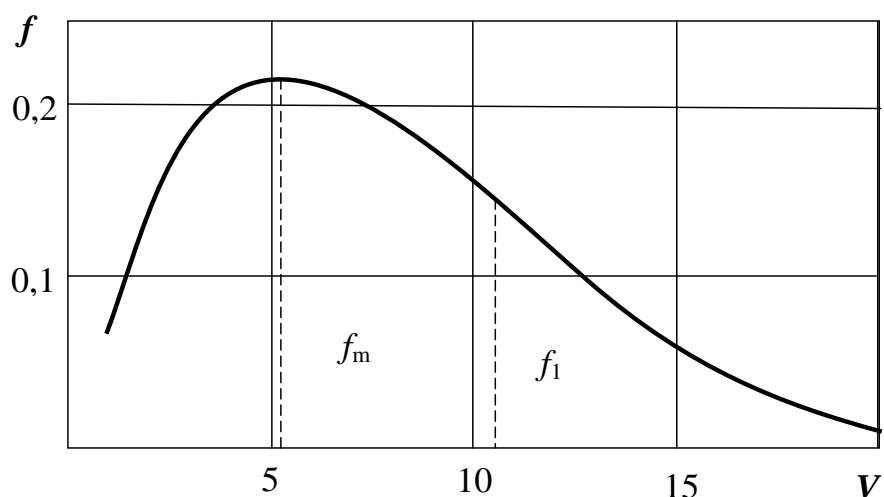


Рис. 5. Общий вид функции распределения скоростей $f(V)$

мость $t_i(V)$, т.е. фактически $f(V) \cdot T$, можно построить зависимость $\overline{E_0}(V)$ и найти ее максимум, который будет примерно соответствовать $V=V_i$. Для этого необходимо знать функцию $f(V)$, вид которой зависит от локальных ветровых условий. Известны несколько способов аналитического представления $f(V)$, а именно: формулы Вейсбулла, Релея и другие. В данной работе предлагается новое соотношение, которое получено на основе обработки экспериментальных данных Поморцева для различных среднегодовых скоростей ветра (см., например, [7]). Экспериментальные данные приведены на рис. 6.

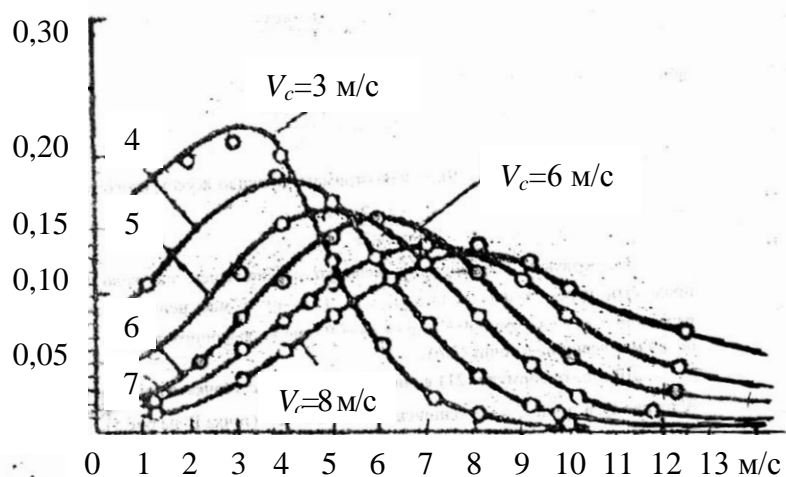


Рис. 6. Экспериментальные зависимости для $f(V)$, полученные на основе метеорологических данных при разных значениях V_c

$$f(V) = f_m(V) [\exp(-A(V - V_m)^2)], \quad (17)$$

$$A = -\frac{\ln(f_1 / f_m)}{(V_1 - V_m)^2}. \quad (18)$$

Если положить $V_1 = 2V_m$ и учесть, что V_m примерно соответствует среднегодовой скорости V_c , тогда

$$A = -\frac{\ln(f_1 / f_m)}{V_c^2}. \quad (19)$$

Известно, что средняя скорость ветра на городской территории существенно ниже, чем на открытой местности. В связи с этим, в качестве примера рассмотрим случай, когда $V_c = V_m = 4$ м/с. В соответствии с данным графиком на рис. 6 будем иметь $f_m = 0,175$ с/м, $f_m = 0,02$ с/м, $A = 0,1356$. Тогда

$$f(V) = 0,175[\exp(-0,1356(V - 4)^2)]. \quad (20)$$

В таблице 1 представлены расчетные значения $f(V)$ и $t(V)$ для средней скорости $V_c = 4$ м/с.

Таблица 1

Расчетные значения $f(V)$ и $t(V)$ для средней скорости $V_c = 4$ м/с

$V, \text{ м/с}$	1,0	2,5	3,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
$f(V), \text{ с/м}$	0,105	0,150	0,175	0,180	0,165	0,130	0,09	0,04	0,015	0,01	0,008

Зная $f(V)$ и рассчитав значение $\overline{E_0}(V)$, можно определить, что максимум энергоотдачи ветра на единицу площади наблюдается при $V = 8$ м/с. Тогда номинальная скорость ветра V_n для ветродвигателя в данной местности должна быть близка к этому значению.

На основе проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При низких среднегодовых скоростях (до 4 м/с), которые характерны для городской застройки, подходящим вариантом можно считать двухъярусный ротор Савониуса. Он имеет низкую стартовую скорость (2 м/с), высокий пусковой момент и не требует отключения при достижении буревой скорости ветра (25 м/с).

2. Двухъярусный Н-ротор Дарье может обеспечить более высокую номинальную мощность при той же ометаемой площади, что и ротор Савониуса. Его можно применять вместо геликоидального ротора, поскольку он имеет аналогичные с ним характеристики, но значительно проще в изготовлении и эксплуатации.

Следует заметить, что аналогичные результаты, полученные экспериментальным и расчетным путем, приведены в работе [10].

Библиографические ссылки

1. Eric Hau. Wind Nurdines/ Fundamentals, Nachnologies, Application, Economics.2-nd edition/Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006. – 783 p.
2. Wei Nong. Wind Power Generation and Wind Turbine Disign, WITpress, Southamton, Boston, 2006. – 21p.
3. Iha A. R. Wind turbine technology/ A. R. Iha// CRS Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2010. – 261 p.
4. Абрамовский Е. Р. Расчетный анализ параметров ветродвигателей, предназначенных для использования в застроенной зоне городов / Е. Р. Абрамовский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков / Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць.* – Д.: Пороги, 2012. – Т. XIII.– С.3–15.
5. Тарасов С. В. Расчетный анализ аэродинамических и энергетических характеристик ветродвигателей мегаваттного класса, предназначенных для размещения на мелководных территориях Украины / С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков, Е. Р. Абрамовский, Н. Н. Лычагин / Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць.* – Д.: Пороги, 2012. – Т. XIV. – С. 97–108.
6. Jean-Luc Menet, Nachita Baurabaa. Increase in the Savonius rotor efficiency, via parametric investigation. – Le Mont Houy. Universite de Valencianes, 2004.
7. Абрамовский Е. Р. Аэродинамика ветродвигателей / Е. Р. Абрамовский, С. В. Городько, Н. В. Свиридов. – Д.: ДГУ, 1987. – 220 с.
8. Абрамовський Є. Р. Аеродинаміка вітродвигунів (Aerodynamic theory of wind turbines) / Є. Р. Абрамовський. – Д.: Наука і освіта, 2008. – 162 с.
9. Тарасов С. В. Методики расчета характеристик ортогонального ветродвигателя с геликоидальными лопастями / С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков, Н. Н. Лычагин / Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць.* – Д.: Пороги, 2012. – Т. XIII.– С. 110–126.
10. Castelli M. R., Benini E. / Comparison between Lift and Drag–Driven VAWT Concepts on Low–Wind Site AEO, Word Academy of Science, Engineering and Technology, 2011. – P. 1677–1682.

Надійшла до редколегії 12.04.2013