

УДК 539.6: 621.548

Е.Р. Абрамовский*, В.С. Божко*, Н.Н. Лычагин*, С.В. Тарасов****Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара**** Институт транспортных систем и технологий НАН Украины*

ИНЖЕНЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОРТОГОНАЛЬНОГО ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМИ ЛОПАСТЯМИ

Рассмотрен двухэтапный метод оптимизации характеристик ветродвигателя с геликоидальными лопастями. В качестве целевой функции на первом этапе исследован коэффициент мощности, который необходимо максимизировать. На втором этапе целевой функцией является максимальная годовая энергоотдача ветродвигателя, приходящаяся на единицу ометаемой площади ротора в предположении, что его характеристики оптимально приспособлены к локальным ветровым условиям.

Ключевые слова: геликоидальный ветродвигатель, оптимизация, коэффициент мощности, энергоотдача.

Розглянуто двохетапний метод оптимізації характеристик вітродвигуна з гелікоїдальними лопатями. Як цільову функцію на першому етапі досліджено коефіцієнт потужності, який необхідно максимізувати. На другому етапі цільовою функцією є максимальна річна енерговіддача вітродвигуна, що припадає на одиницю ометаємої площі ротора в припущенні, що його характеристики оптимально пристосовані до локальних вітрових умов.

Ключові слова: гелікоїдальний вітродвигун, оптимізація, коефіцієнт потужності, енерговіддача.

The two – stage optimization technique applicable to helical wind turbine characteristics is considered. As an objective function at the first stage is selected the wind turbine power coefficient which should be maximized. The maximal value of wind energy production per unit of rotor swept area is taken as an objective function at the second stage, when it is supposed, that wind turbine characteristics is optimally adapted to local wind conditions.

Key words: helical wind turbine, optimization, power coefficient, local wind conditions, energy output.

Введение. Геликоидальный ротор является одним из типов вертикально-осевого ветродвигателя, в котором продольная ось каждой из лопастей изогнута по винтовой линии (рис.1). В зарубежной литературе его называют иногда «ротор Горлова», по имени автора, который предложил и запатентовал данную конструктивную схему.



Рис.1 Конструкция геликоидального ротора

Геометрические и кинематические параметры сложного потока в окрестности профиля лопасти подробно описаны в работах [1 – 9] и др. Там же приведены расчётные соотношения для определения его аэродинамических и энергетических характеристик. Приближённая инженерная методика оптимизации вертикально-осевых ветродвигателей, приспособленных к локальным ветровым условиям, приведена в работе [2]. Оптимизация проектных параметров геликоидального ротора на основе этого же принципа имеет свои характерные особенности. Изложению этих особенностей и рассмотрению конкретных примеров получения оптимальных характеристик ветроустановок, установленных в определенном географическом пункте, и посвящена данная работа.

Постановка задачі. Вопросам оптимізації ветродвигателів в настоящее время посвящено значительное число работ [10 – 17]. В большей части из них предложены методики получения оптимальных проектных параметров для горизонтально-осевых ветродвигателей [10 – 14] или ветродвигателей типа Дарье [16]. Основные принципы инженерной оптимізації представлены в работах [11 – 13;16] и некоторых других. Мы будем опираться на изложенные в этих работах теоретические основы выбора оптимальных параметров сложных инженерных систем. В частности, речь идет о решении задачи, при которой последовательно выполняются такие процедуры, как: выбор определенных переменных для создаваемого объекта, задание целевой функции, задание дисциплинирующих условий, определение экстремума целевой функции (максимума или минимума), анализ полученных результатов. Будем предполагать, что оптимізация сложных инженерных объектов может быть многостадийной, когда необходимо определить оптимальные характеристики отдельных составных элементов, а затем найти глобальный оптимум. В нашем случае на первом этапе мы определили оптимальные характеристики ротора, когда целевой функцией, подлежащей максимізації, является функция $C_p(\lambda)$, где $C_p = P_1/P_0$ – коэффициент мощности ветродвигателя; P_0 – мощность набегающего ветрового потока; P_1 – мощность на валу ротора ветроустановки; $\lambda = \omega R/V_0$ – коэффициент быстроходности; ω – угловая скорость ротора; R – радиус ротора в миделевом сечении; V_0 – скорость набегающей невозмущенной ветровой струи. Дисциплинирующим условием на этом этапе являются геометрические параметры ротора, такие как: внешняя форма фигуры вращения ротора, коэффициент заполнения ометаемой площади $\sigma = b\ell/\pi R$ (b – хорда профиля лопасти, ℓ – число лопастей), угол закрутки лопасти и др.

На втором этапе целевой функцией является функция $\bar{E}(V_n)$, где \bar{E} есть годовая энергоотдача ветродвигателя на единицу ометаемой площади, зависящая от локальных характеристик ветра. Дисциплинирующие условия включают заданные значения номинальной мощности P_n , стартовой скорости V_s , скорости бурового отключения V_k ; функцию повторения скоростей в заданном географическом пункте. Кроме того, к дисциплинирующим условиям применяют значения параметров ротора, полученные на первом этапе оптимізації – $C_p(\lambda)$ и $C_p(V)$, а также значения этих параметров в т.н. «пиковой зоне», т.е. $C_p = C_{pm}$ и $\lambda = \lambda_m$.

В работе [1] представлена зависимость для определения коэффициента мощности C_p ротора с геликоидальными лопастями. В случае равномерного по высоте профиля скорости свободного ветра V_0 она имеет вид

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

В выражении (1) использованы следующие величины: H – высота ротора; V_1 – скорость ветрового потока в рабочей плоскости ветроколеса на текущей безразмерной высоте $\bar{z} = (z - z_0)/H$, $0 \leq \bar{z} \leq 1$; $\bar{b} = b/R$ – безразмерная хорда текущего профиля лопасти, а γ – угол его наклона к горизонтальной плоскости; S_1 – ометаемая площадь ротора; ℓ – количество лопастей.

Метод решения. Величину безразмерной скорости $\bar{V}_1 = V_1/V_0$ для заданной координаты \bar{z} определяем из уравнения

$$\frac{1-\bar{V}_1}{\bar{V}_1} = \frac{\ell\bar{b}}{16\pi\bar{r}\cos\gamma} \cdot \int_{\theta}^{\theta+2\pi} \left(\frac{W_{\infty}}{V_1}\right)^2 C_{F_x} d\mu, \quad (2)$$

где

$$\frac{W_{\infty}}{V_1} = \frac{\sin\mu}{\cos\alpha} A + \frac{\cos\mu + \lambda_1\bar{r}}{\cos\alpha} A_{\delta}. \quad (3)$$

В выражении (3) α – угол атаки, $\lambda_1 = \omega R/V_1$, $\bar{r} = r/R$ – безразмерный радиус вращения текущего профиля лопасти, а μ – азимутальный угол его положения. Величина указанного угла изменяется в пределах от значения θ до значения $\theta + 2\pi$ за один оборот ротора. Угол θ участвует в параметрическом представлении формы оси лопасти $\vec{r} = x(\theta)\vec{i} + y(\theta)\vec{j} + z(\theta)\vec{k}$,

$$\text{где } x = -r(z)\sin\theta, \theta_0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad y = r(z)\cos\theta, z = z_0 + H(\theta - \theta_0)/(\theta_1 - \theta_0). \quad (4)$$

В уравнении (2) коэффициент силы сопротивления C_{F_x} , действующей на лопасть в направлении скорости ветра V_1 , выражен через коэффициенты C_N , C_h нормальной и продольной сил в связанной системе координат

$$C_{F_x} = C_h a - C_N a_{\beta}. \quad (5)$$

В соотношении (5) обозначено

$$a = A\sin\mu + A_{\delta}\cos\mu, \quad a_{\beta} = A_{\beta}\sin\mu + A_{\beta\delta}\cos\mu. \quad (6)$$

Аналогичным образом выражен коэффициент $C_{F_{\mu}}$ окружной силы, используемый в формуле (1)

$$C_{F_{\mu}} = -C_h A_{\delta} + C_N A_{\beta\delta}. \quad (7)$$

Коэффициенты C_x и C_y выражены как

$$C_h(\alpha) = C_x(\alpha)\cos\alpha - C_y(\alpha)\sin\alpha, \quad C_N(\alpha) = C_x(\alpha)\sin\alpha + C_y(\alpha)\cos\alpha, \quad (8)$$

где C_x и C_y – коэффициенты лобового сопротивления и подъёмной силы профиля соответственно.

Угол атаки α рассчитаем с использованием равенства

$$\operatorname{tg}\alpha = -W_{1n}/W_{1h}, \quad (9)$$

где

$$W_{1h}/V_1 = -A\sin\mu - (\cos\mu + \lambda_1\bar{r})A_{\delta}, \quad (10)$$

$$W_{1n} / V_1 = -A_{\beta} \sin \mu - (\cos \mu + \lambda_1 \bar{r}) A_{\beta \delta}. \quad (11)$$

В соотношениях (3)–(11) использованы величины $A, A_{\delta}, A_{\beta}, A_{\beta \delta}$, определяемые уравнением оси (4) лопасти и углом установки профиля φ .

$$A = \cos \gamma \sin \delta \cos \beta + \cos \delta \sin \beta, \quad (12)$$

$$A_{\delta} = \partial A / \partial \delta = \cos \gamma \cos \delta \cos \beta - \sin \delta \sin \beta, \quad (13)$$

$$A_{\beta} = \partial A / \partial \beta = -\cos \gamma \sin \delta \sin \beta + \cos \delta \cos \beta, \quad (14)$$

$$A_{\beta \delta} = \partial A_{\beta} / \partial \delta = -\cos \gamma \cos \delta \sin \beta - \sin \delta \cos \beta, \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg}(\varphi - \delta) \cos \gamma. \quad (16)$$

Выражения (12)–(16) содержат угол δ , под которым горизонтальная проекция оси лопасти пересекает окружности вращения.

Уравнение (2) позволяет определить скорость \bar{V}_1 при заданном значении коэффициента λ_1 . Коэффициент быстроходности $\lambda = \omega R / V_0$ в таком случае можно определить из равенства

$$\lambda = \lambda_1 \bar{V}_1. \quad (17)$$

В прямой задаче, когда известно значение коэффициента быстроходности λ необходимо разрешить уравнение (2) относительно указанной скорости \bar{V}_1 . В обоих случаях появляется возможность рассчитать коэффициент мощности C_p по формуле (1).

Для определения хорды b лопасти, доставляющей максимальное значение для коэффициента $C_{p \max}$ воспользуемся следующими рассуждениями, аналогичными работе [2]. Значение $C_{p \max}$ для всей лопасти можно обеспечить, если максимальное значение C_p будет достигнуто в каждой элементарной струе на текущей высоте z . Таким образом, следует искать максимум коэффициента мощности dC_p для элемента лопасти с безразмерной высотой $d\bar{z}$

$$dC_p = -\lambda \ell \frac{(RH / S_1) \bar{r} \bar{b} \bar{V}_1^2}{2\pi \cos \gamma} \cdot \int_{\theta}^{\theta+2\pi} \left(\frac{W_{\infty}}{V_1} \right)^2 C_{F_{\mu}} d\mu \cdot d\bar{z}. \quad (18)$$

Выразим величину \bar{b} из (2) в виде

$$\bar{b} = \frac{16\pi \bar{r}}{\ell} \frac{\bar{\chi}_1 - 1}{\Delta(\tilde{\lambda}_1)}, \quad (19)$$

где

$$\Delta(\tilde{\lambda}_1, \gamma, \delta, \varphi) = \frac{1}{\cos \gamma} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W_{\infty}}{V_1} \right)^2 C_{F_x} d\mu, \quad \bar{\chi}_1 = 1 / \bar{V}_1. \quad (20)$$

Коефіцієнт локальної быстроходности $\tilde{\lambda}_1$ определим как

$$\tilde{\lambda}_1 = \omega r / V_1 = \lambda_1 \bar{r}. \quad (21)$$

Подставим выражение (19) для \bar{b} в равенство (18). Получим

$$dC_p = \left[4(1 - \bar{V}_1) \bar{V}_1^2 \right] \frac{2RH}{S_1} \bar{r} \cdot Q(\tilde{\lambda}_1, \gamma, \delta, \varphi) \cdot d\bar{z}, \quad (22)$$

где

$$Q(\tilde{\lambda}_1, \gamma, \delta, \varphi) = -\frac{\tilde{\lambda}_1}{\Delta(\tilde{\lambda}_1) \cos \gamma} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W_\infty}{V_1} \right)^2 C_{F\mu} d\mu. \quad (23)$$

Максимальное значение первого множителя в (22), выделенного в квадратные скобки, известно из теории идеального ветродвигателя. Оно достигает значения 0,592 при $\bar{V}_{1m} = 2/3$. В таком случае из (19) получаем

$$\frac{b}{r} = \frac{8\pi}{\ell \Delta(\tilde{\lambda}_1)}. \quad (24)$$

Для функции $Q(\tilde{\lambda}_1, \gamma, \delta, \varphi)$ численным путем можно приближенно найти значения Q_{\max} и значения $\tilde{\lambda}_1^{\text{opt}}$, доставляющие эти максимумы, при различных значениях параметров $\cos \gamma, \delta, \varphi$. Расчеты различных вариантов геликоидальных роторов, представленные в работе [3], показывают, что наибольший интерес и геометрическую простоту имеет ротор с винтовыми лопастями, когда $r = \text{const}$, $\delta = 0$, $\varphi = 0$. В таком случае максимальное значение величины Q выражает отношение $C_{p\max} / C_{pm}^0$, где $C_{pm}^0 = \left[4(1 - \bar{V}_1) \bar{V}_1^2 \right]_{\bar{V}_1=2/3} = 16/27$ – известное значение в теории идеального диска.

Результаты расчетов. Величины $C_{p\max} / C_{pm}^0$ приведены в табл.1 для различных значений параметра $\cos \gamma$.

Таблица 1

$\cos \gamma$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$C_{p\max} / C_{pm}^0$	0,734	0,733	0,733	0,733	0,733	0,732	0,732	0,731	0,730	0,729
λ_{opt}	26,63	13,33	8,90	6,70	5,37	4,47	3,87	3,40	3,03	2,73
σ_{opt}	0,186	0,185	0,185	0,184	0,184	0,184	0,182	0,181	0,180	0,180

Данные получены с использованием эмпирических зависимостей для коэффициентов $C_x(\alpha)$, $C_y(\alpha)$ для симметричного профиля НАСА 0018.

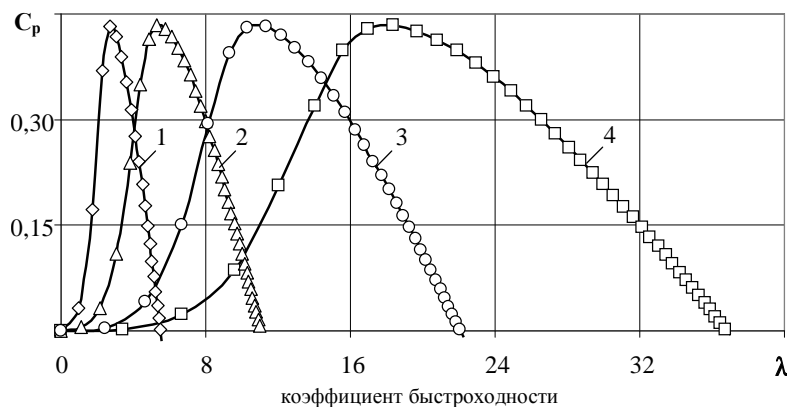
Из таблицы 1 видно, что максимальное значение коэффициента мощности рассматриваемого ротора практически не изменяется при увеличении угла γ . Однако

значения коэффициента быстроходности $\lambda_m = \lambda_{opt} = 2\tilde{\lambda}_1^{opt} / 3$, доставляющие указанные максимумы, значительно увеличиваются.

Оптимальное значение коэффициента заполнения σ_{opt} следует из (24):

$$\sigma_{opt} = \frac{lb}{2R \cos \gamma} = \frac{4\pi}{\cos \gamma \Delta(\lambda_{opt}, \cos \gamma)}. \quad (25)$$

Из таблицы 1 видим, что указанное значение практически постоянно. Полученные результаты можно использовать как метод инженерной оптимизации аэродинамических характеристик при проектировании ветродвигателя. Дальнейшая энергетическая оптимизация основана на использовании зависимостей $C_p(\lambda, \cos \gamma)$ при $\sigma = \sigma_{opt}$. Такие зависимости показаны на рис.2 при среднем значении коэффициента $\sigma_{opt} = 0,183$. Из графиков видно, что при увеличении отклонения оси геликоидальной лопасти от вертикали оптимальное значение коэффициента быстроходности значительно увеличивается. При этом имеет место увеличение диапазона значений коэффициента λ , в котором значения C_p близки к C_{pmax} .



**Рис.2. Зависимости $C_p(\lambda)$ для оптимального коэффициента заполнения σ_{opt} при различных значениях величины $\cos \gamma$:
1 – $\cos \gamma = 1$; ; 2 – $\cos \gamma = 0,5$; 3 – $\cos \gamma = 0,25$; 4 – $\cos \gamma = 0,15$**

На этапе энергетической оптимизации в качестве целевой функции выбираем значение годовой энергии $\bar{E} = E/S_1$ (кВт·час/м²), вырабатываемой единицей ометаемой площади ветродвигателя. Оптимальные значения проектных параметров и режима работы ветродвигателя определяем как значения, доставляющие максимум указанной величине (плотность годовой энергии).

Выражение для плотности годовой энергии \bar{E} в общем случае представим в виде

$$\bar{E} = \frac{\rho T}{2000} \int_{V_s}^{V_n} V^3 C_p(V) f(V) dV + \frac{P_n T}{S_1} \int_{V_n}^{V_k} f(V) dV. \quad (26)$$

В выражении (26) ρ (кг/м³) – плотность воздуха; V_s, V_n, V_k – стартовая, номинальная скорости и скорость буревого отключения соответственно (м/с); $f(V)$ – функция повторяемости скоростей в заданном географическом пункте; P_n – заданная номинальная мощность ветродвигателя; T – годовое время работы ветроустановки (принято $T=7944$).

Для выполнения расчетов по энергетической оптимизации удобнее воспользоваться плотностью мощности $\bar{p} = P/S_1$, т.е. мощностью, вырабатываемой единицей ометаемой площади ротора (тогда $\bar{E} = \bar{p} \cdot T$). При аэродинамически оптимальном режиме работы ветроустановки, в котором $\lambda = \lambda_{opt}$, эту величину \bar{p} можно представить в форме

$$\bar{p}(V, V_n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho V^3 C_p \left(\lambda_{opt} \cdot \frac{V_n}{V} \right), & \text{если } \bar{p} \leq \frac{1}{2} \rho V_n^3 C_{pmax}, \\ \frac{1}{2} \rho V_n^3 C_{pmax}, & \text{если } \bar{p} > \frac{1}{2} \rho V_n^3 C_{pmax} \end{cases} \quad (27)$$

Среднегодовое значение величины указанного параметра $\bar{p}_c(V_n)$ определим как

$$\bar{p}_c(V_n) = \int_{V_s}^{V_k} \bar{p}(V, V_n) f(V) dV. \quad (28)$$

Поиск максимального значения функции $\bar{p}_c(V_n)$ позволит определить оптимальное значение номинальной скорости V_n^{opt} и другие номинальные значения параметров ветродвигателя, наиболее приспособленного к местным ветровым условиям.

Применительно к ветроустановкам с геликоидальным ротором указанные параметры могут зависеть также от угла γ .

На рис.3 показана зависимость $f(V)$, построенная с использованием табличных данных по вероятности ветра возле г. Борисполь [18, табл.5].

Зависимости среднегодовой плотности мощности $\bar{p}_c(V_n)$ при различных значениях параметра $\cos\gamma$ показаны на рис.4, которые подтверждают как наличие выраженного максимума, так и слабое влияние величины угла γ .

Значение номинальной скорости V_n^{opt} остается неизменным и равным 7 м/с при среднегодовой скорости ветра в данной местности, равной 4,0 м/с. Значение \bar{p}_{cmax} мало отклоняется от среднего значения, равного 15 Вт/м². Основное влияние угла γ проявляется при определении номинального значения числа оборотов оптимального геликоидального ротора.

В качестве примера рассмотрен оптимальный геликоидальный ветродвигатель с номинальной мощностью 10 кВт. Для него получены значения $S_1 = 110 \text{ м}^2$, $R = 6,2 \text{ м}$, $E = 13 \text{ мВт}\cdot\text{ч}$. Номинальная частота вращения такого ротора в зависимости от угла γ показана на рис. 5, из которого следует, что при углах $\gamma > 45^\circ$ частота вращения значительно возрастает. Это свойство может быть использовано при подборе мультипликатора с подходящим передаточным числом без потери энергетической эффек-

тивності ветроустановки. В работе [3] представлены расчеты некоторых неоптимальных вариантов, которые показывают существенное снижение амплитуды колебания крутящего момента ротора за один его оборот при увеличении угла γ . Поэтому увеличение скорости вращения ротора значительно снизит переменную нагрузку на механическую передачу ветроустановки. Особенно привлекательным с этой точки зрения является однолопастной геликоидальный ротор с закруткой его лопасти на полный оборот. Крутящий момент такого ротора имеет постоянное значение.

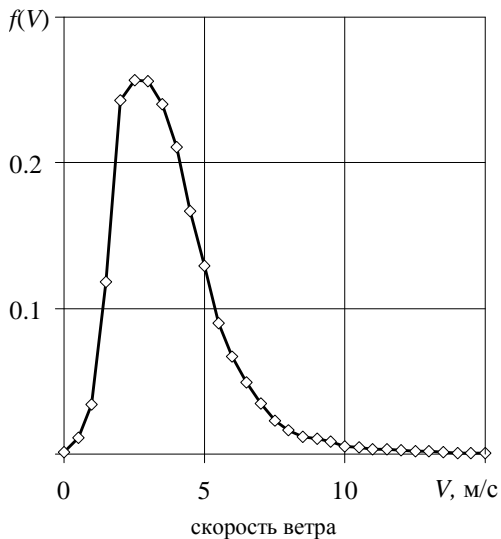


Рис.3. Вероятность скоростей ветра в заданной местности (Борисполь)

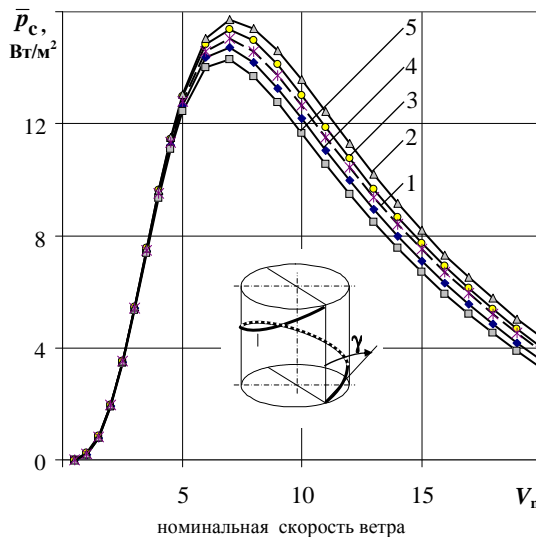


Рис.4. Зависимости $\bar{p}_c(V_n)$ при различных значениях величины $\cos\gamma$:
 1 – $\cos\gamma=1$; 2 – $\cos\gamma=0,75$; 3 – $\cos\gamma=0,5$;
 4 – $\cos\gamma=0,25$; 5 – $\cos\gamma=0,15$.

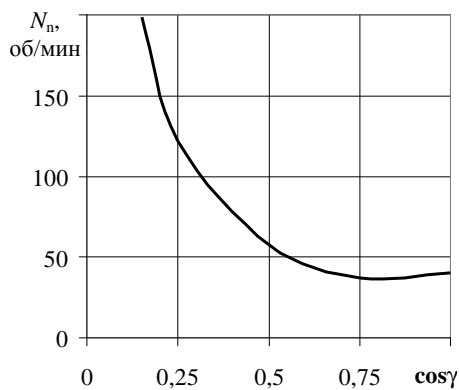


Рис.5. Зависимость частоты вращения ротора N_n от угла γ при $P_n=10\text{кВт}$

Рассмотрим также пример расчёта оптимальных параметров для других исходных данных: номинальная мощность P_n равна 100 кВт, а сам ветродвигатель установлен в оффшорной зоне на мелководном озере Сиваш, где среднегодовая скорость $V_c = 6$ м/с. Частота повторения скоростей, задаваемая функцией $f(V)$, в данном случае основана на экспериментальных данных Поморцева [19] для таких значений среднегодовой скорости (рис. 6).

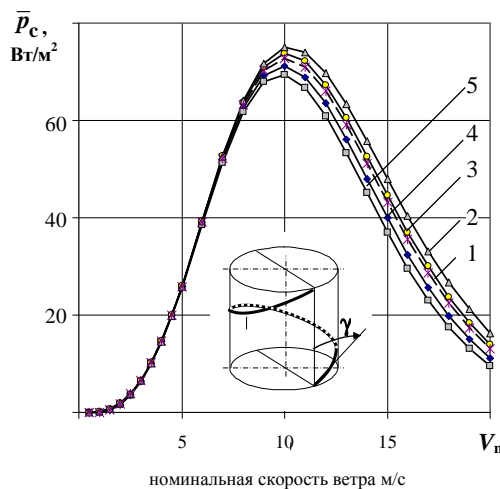
Здесь можно отметить важный фактор, который следует иметь в виду при многостадийной оптимизации. Известно, что на первой её стадии мы получили оптималь-

ные геометрические характеристики ротора, которые представлены в безразмерном виде. В случае если эти безразмерные геометрические параметры не изменяются, тогда можно, минуя первый этап, рассмотреть (уже на втором этапе) многочисленные оптимальные варианты при разных, уже размерных, исходных данных, таких

как номинальное значение мощности ветродвигателя P_n , скорости ветра V_n , угловой скорости ω_n и др. Расчетные зависимости (27), (28), полученные на втором этапе оптимизации при $P_n = 100$ кВт и $V_c = 6$ м/с, представлены на графике (рис. 7), откуда видно, что номинальная скорость V_n , обеспечивающая максимум энергоотдачи ветродвигателя, равна 10 м/с. Величина задействованной площади составила 380 м^2 , годовая выработка энергии – 226 мВт·час, а частота вращения N_n , такого ротора представлена в таблице 2.

Таблица 2

$\cos\gamma$	1.00	0.75	0.50	0.25	0.15
N_n , об/мин	22	28	44	94	153

Рис.6. Плотность вероятности скоростей ветра при $V_c = 6$ м/сРис.7. Зависимости $\bar{P}_c(V_n, \cos\gamma)$:
1 – $\cos\gamma = 1$; 2 – 0,75; 3 – 0,5; 4 – 0,25; 5 – 0,15.

Бібліографічні посилання

1. **Тарасов С.В.** Методика расчета характеристик ортогонального ветродвигателя с геликоидальными лопастями/ С.В. Тарасов, И.Ю., Костюков, Н.Н. Лычагин// Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. праць. – Д.: Пороги. – 2012–Т.13.– С.110 – 126.
2. **Костюков И.Ю.** Оптимальные лопасти ортогонального ветродвигателя/ И.Ю.Костюков, С.В. Тарасов, Н. Н Лычагин// Там само. - 2010, – Т.13. - С.110–126.
3. **Абрамовский Е.Р.** Расчет и сравнительный анализ характеристик функционирования ортогональных ветродвигателей с криволинейными лопастями / Е.Р. Абрамовский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков, Н.Н. Лычагин// Там само. - 2013–Т.15.– С.3 – 16.
4. **Paraschivoiu Ion.** Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines/Ion Paraschivoiu// J. Propul. and Power. – 1988, 4. - №4. – P. 370 – 377.
5. **Chattot J. J.** Wind Turbine Aerodynamics: Analysis and Design/ J. J. Chattot, Int. J. //Aerodynamics.– 2011, Vol.1, № ¾. - P. 404-444.
6. **Chattot J. J.** Wind Turbine Pitch Change Simulation with Helicoidal Vortex Model/ J. J. Chattot, M. E. Braaten// Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, June 11-15, 2012, Copenhagen, Denmark, Paper № GT2012-68294.
7. **Iha A.R.** Wind Turbine Technology / A.R. Iha // CRS Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton. – London; New York, 2010. – 261 p.

8. **Hau E.** Wind turbines / E. Hau // Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2006.
9. **Tong W.** Wind power generation and Wind Turbine design / W. Tong.– Boston: WIT press, 2010.
10. **Sanderson R.J.** Optimum propeller Wind turbines / R.J. Sanderson R.J., R.D Archer // J. Energy. – 1983, Vol.7, №6. – P. 695 – 701.
11. **Stewart H.J.** Dual optimum aerodynamic design for a conventional windmill / H.J. Stewart// AIAA J. – 1976, 14. – P. 1524 – 1527.
12. **Vermeer Ir.M.P.** Some Aspects of Optimising the Integration of Wind Farms into the Electricity Grid/ Ir.M.P Vermeer// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988. – 27. – P. 247 – 261.
13. **Westberg S.** A strategy for optimization of wind energy systems/ S. Westberg // Wind Eng. – 1983, Vol. 7, №7. – P. 104 – 114.
14. **Wilson R.E.** Performance-optimized Horizontal Axis Wind Turbines/ R.E.Wilson, S.N.Walker // Proc. Int. Symp. on Wind Energy Syst., Cambridge, 7 – 9 sept. – 1976.– P. B1 – B29.
15. **Wijnen M.** Multi-point optimization of wind turbine blades using helicoidal vortex model / M. Wijnen, J. Chattot// Springer-Verlag, Proceedings Sixth International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 12-16, 2010, St. Petersburg, Russia.
16. **Paraschivoiu Ion.** Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept / Ion Paraschivoiu //Polytechnic International Press, Canada, 2002. – 442pp.
17. **Spera D.A.** Wind Turbine Technology / D.A. Spera// ASME Press, New York, 1994.
18. Справочник по климату СССР. Выпуск 10. Украинская ССР. Часть 3. Ветер Ленинград: Гидрометеиздат, 1967.– 695с.
19. **Поморцев М.С.** О законе распределения скорости ветра / М.С. Поморцев // Записки по гидрографии.– С-П, 1894.– Т. 15.

Надійшла до редколегії 16.05.2014

УДК 614.84

В.В. Беляева

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОНАГРЕВАНИЯ НАСЫПИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Представлена численная модель для моделирования процесса самонагревания насыпи растительного сырья. Модель основана на использовании уравнения теплопроводности. Для численного интегрирования используется неявная разностная схема. Представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного на базе разработанной модели.

Ключевые слова: математическое моделирование, самовозгорание зерна, тепловой процесс.

Наведено числову модель для моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини. Модель заснована на використанні рівняння теплопровідності. Для чисельного інтегрування використовується неявна різницева схема. Представлені результати обчислювального експерименту, проведеного на базі розробленої моделі.

Ключові слова: математичне моделювання, самозаймання зерна, тепловий процес.

A numerical model to simulate the heat transfer in the grain heap heating was developed. This model is based on the 2-D equation of the heat transfer. The implicit scheme is used for the numerical simulation. The results of the numerical experiment are presented.

Key words: mathematical simulations, grain self-firing, heat transfer process.

© Беляева В.В., 2014