

КОМПЬЮТЕРНОЕ 2D МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ВЕТРОТУРБИНЫ КАРУСЕЛЬНОГО ТИПА

Целью данной работы является рассмотрение теоретического 2D моделирования работы ветротурбины карусельного типа, что дает возможность определить оптимальные параметры турбины (см. рис. 1). Рассматриваем разработку математической модели для исследования взаимодействия ветротурбины карусельного типа "Дарье" со стационарным воздушным потоком /1-3/.

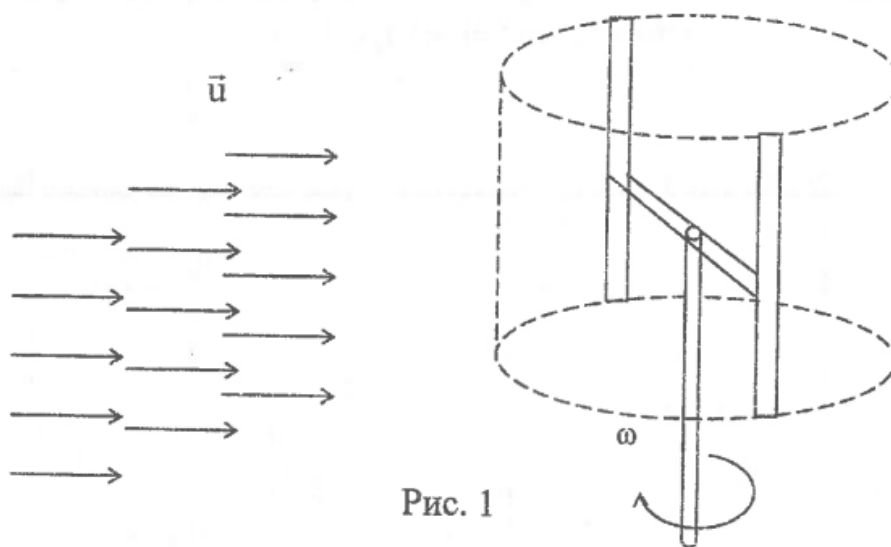


Рис. 1

Математическая модель воздействия стационарного воздушного потока со скоростью "u" на вращающуюся ветротурбину «Дарье» (радиусом r_0) с угловой скоростью ω (эта показана на рис.2 – принципиальная схема) описывается стационарными уравнениями Навье-Стокса и неразрывности и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} R_x, \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} R_y, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

С граничными условиями

$$\begin{aligned} u(x,0)=u(x,1)=u(0,y)=u_\infty, \quad \frac{\partial u(1,y)}{\partial x} &= 0; \\ v(x,0)=v(x,1)=v(0,y)=0, \quad \frac{\partial v(1,y)}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (1')$$

В качестве аэродинамических сил сопротивления ветровому потоку берутся проекции осредненных сил сопротивления и подъемной силы лопасти (в обратном направлении) на оси Ox и Oy в виде сосредоточенных источников R_x , R_y и входят в правую часть уравнений движения /2-5/.

Для определения этих массовых сил сначала определяются угол атаки α и скорость атаки $\vec{W}$, а коэффициенты подъемной силы и сил сопротивления зависят только от угла атаки.

$$|\vec{W}| = \sqrt{(u \sin \theta + v \cos \theta)^2 + (r_0 \omega + u \cos \theta + v \sin \theta)^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u \sin \theta + v \cos \theta}{r_0 \omega + u \cos \theta + v \sin \theta}. \quad (2)$$

Вводя локальное число быстроходности $Z = r_0 \omega / u_\infty$, получим

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{u \sin \theta + v \cos \theta}{Z + u \cos \theta + v \sin \theta} \right). \quad (3)$$

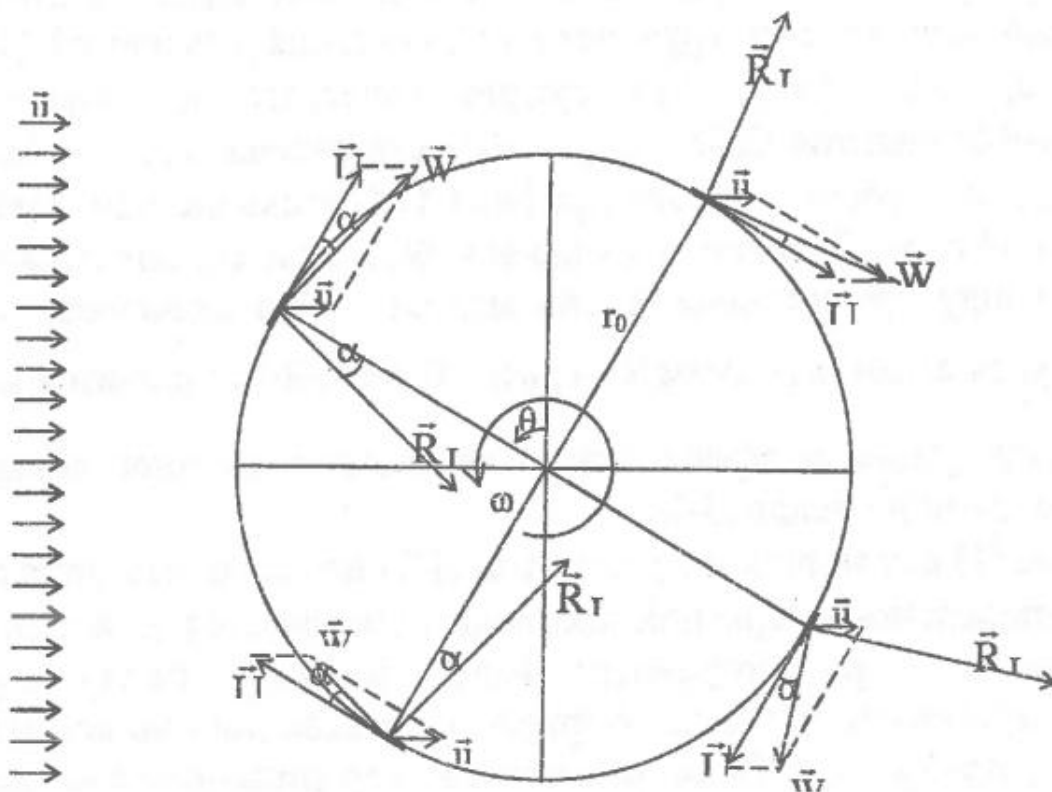


Рис. 2

Для определения аэродинамических сил введем единичные векторы, как показано на рис.3: $\vec{e}_w$ – единичный вектор сопротивления, направленный вдоль вектора относительной скорости и $\vec{e}_L$ – единичный вектор подъемной силы, направленный перпендикулярно ему.

Элементарные составляющие аэродинамических сил:

а) подъемная сила профиля:

$$\vec{R}_L = C_L(\alpha) \rho \frac{W^2}{2} h \vec{e}_L, \quad (4)$$

где $C_L(\alpha)$ – коэффициент подъемной силы, h – длина хорды профиля,

б) сила сопротивления

$$\vec{R}_D = C_D(\alpha) \rho \frac{W^2}{2} h \vec{e}_W. \quad (5)$$

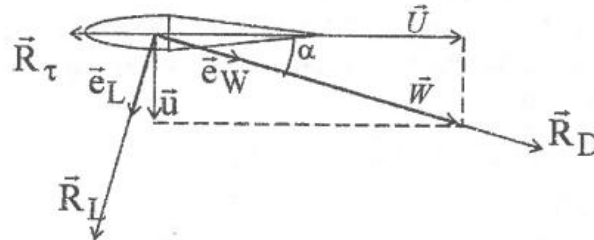


Рис. 3

Коэффициенты $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$ как формулы угла атаки являются результатами продувок используемого профиля для значений α в интервале $0-360^\circ$. Но данный подход дает трудности для решения уравнений (1) в виде переменных (ψ , ω), потому что трудно извлекать из дифференциала переменных коэффициентов $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$. Лопасть рассматривается как тонкая пластинка, тогда из теории тонкого профиля $C_L(\alpha) = 2\pi \sin \alpha$ при $13 \leq \alpha \leq 13^\circ$ /6/. Вектор подъемной силы $\vec{R}$ перпендикулярен к $\vec{W}$, а силу сопротивления можно не учитывать ввиду сравнительно еще малости. При значениях параметра $Z = r_0 \omega / u_\infty = U / u_\infty > 5$ угол атаки α во всем интервале $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ становится менее 13° , что отвечает уже условиям эффективного действия подъемной силы во всей ометаемой лопастями площади, 5-7/.

Уравнение (1) с граничными условиями (1') сначала приводится к виду Ψ - ω и методом продольно-поперечной прогонки определяется ω , а затем u . Для проведения расчетов рассмотренным выше методом была разработана компьютерная программа на языке Фортран и реализована на компьютере. С помощью этой программы были рассчитаны аэродинамические параметры ветротурбины. На рис. 4 показан график поля скоростей взаимодействия ветротурбины со стационарным воздушным потоком.

Запишем выражения для вращающего момента турбины

$$M = \frac{nhr_o H}{\pi} \int_0^\pi \rho \frac{W^2}{2} (C_L(\alpha) \sin \alpha - C_D(\alpha) \cos \alpha) d\theta, \quad (6)$$

где n – число лопастей ротора, H – длина рабочей лопасти.

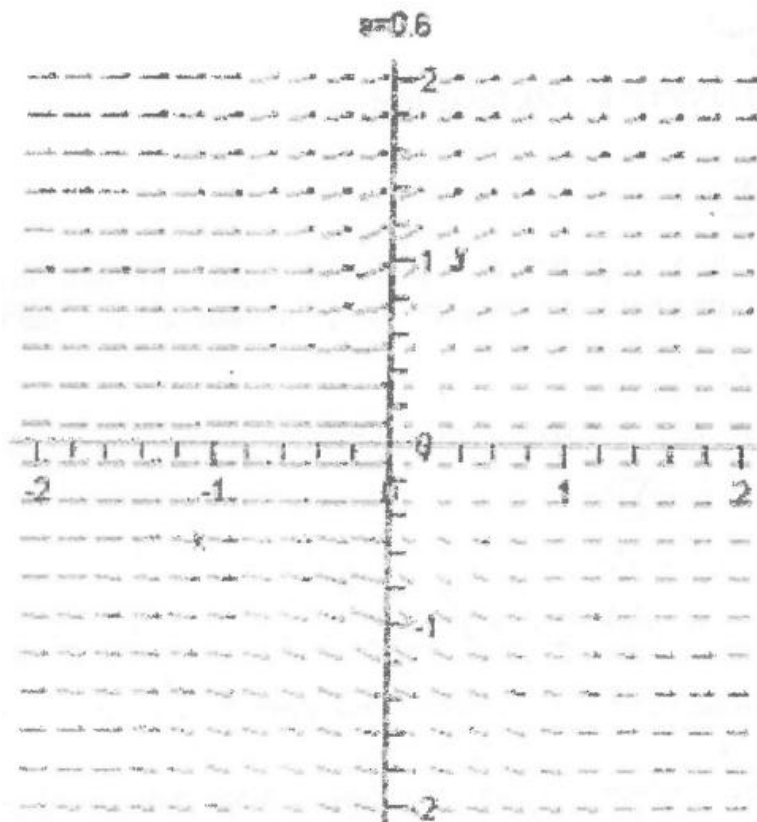


Рис. 4

Для определения угловой скорости вращения ротора Дарье при воздействии ветрового потока применяем теорему об изменении кинетического момента механической системы.

$$\frac{dL_z}{dt} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (7)$$

где L_z - кинетический момент ветротурбины, состоящей в данном случае из вала, маха и рабочей лопасти относительно оси z , $M_{\text{турб}}$ - вращательный момент, создаваемый рабочими лопастями турбины, который определялся во втором разделе данной работы, M_i - момент различных сил сопротивления.

Для турбины Дарье с двумя прямыми лопастями имеем

$$I = \frac{2}{3} r_0^2 m_m + r_0^2 m_l + r_a^2 m_a, \quad (8)$$

где r_0 - расстояние от оси вращения до лопастей (оно практически равно длине маховиков), r_a - радиус вала, передающего вращение генератору электрического тока, m_m, m_l, m_a - соответственно массы маховиков, лопастей, вала вращения.

Разность времени выразим

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{d\theta}{dt}, \quad (9)$$

где $d\theta$ соответствует углу поворота рабочей лопасти относительно оси z за промежуток времени dt ; T - затраченное время за один оборот турбины.

Отсюда следует написать:

$$dt = \frac{T}{2\pi} d\theta = \frac{I}{\omega} d\theta, \quad (10)$$

В формулу (7) подставив (9), получим

$$\omega \frac{dL_z}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (11)$$

Угловая скорость вращения турбины при воздействии жидкости, поступающей из гидронасоса и меняющейся в зависимости от работы дросселя,

$$I\omega \frac{d\omega}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i. \quad (12)$$

Формулу (12) напомним в разностном виде

$$I\omega \frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\theta^{n+1} - \theta^n} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (13)$$

где $M_{\text{турб}} = (R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_o$

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \frac{(R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_o + \sum M_i}{I\omega^n} (\theta^{n+1} - \theta^n), \quad (14)$$

где ω^{n+1} и ω^n – соответственно, угловые скорости турбины в момент времени t^{n+1} и t^n .

Таким образом, определение угловой скорости ω будет решаться совместно уравнениями (1) и (14) вышесказанным методом.

Далее будет разработана полная математическая 2D модель нестационарной работы ветротурбины карусельного типа. Проанализировав результаты численного расчета, возможно определить оптимальные параметры турбины /8-11/.

Полученные результаты будут полезны инженерам и проектировщикам при проектировании и изготовлении ВЭУ с высокими технико-экономическими показателями.

Список литературы

1. Турян К. Дж., Стрикленд Дж. Х., Бэрг Д.Э. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения //Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 8. – С. 105-121.
2. Migliore P.G., Wolfe W.P., Fanucci J.B. Flow Curvature Effects on Darrieus Turbine Blade Aerodynamics //J. Energy. – 1980. – Vol. 4, № 2. – P. 49-55.
3. Mei-Kao Liu, Mark A.Yocke, and Tomas C. Myers. Mathematical Model For the Analysis of Wind – Turbine Wakes //J. Energy. – 1983. – Vol. 7, № 1. – P.73-78.

4. Ganesh Rajagopalan R. and Jerome B. Fanucci Finite Difference Model for Vertical Axis Wind Turbines //J. Propulsion. – 1985. – Vol. 1, № 6. – P. 432-436.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. 1987. – 840 с.
6. Jon Paraschivoiu and Philippe Desy. Aerodynamics of Small – Scale Vertical – Axis Wind Turbines //J. Propulsion. – 1986. – Vol. 2, № 3. – P. 282-288.
7. Brochier G., P. Fraunie, and Bequier C. Water Channel Experiments of Dynamic Stall on Darrieus Wind Turbine Blades //J. Propulsion. – 1986. – Vol. 2, №5. – P. 445-449.
8. Сатымбеков А.М., Тулепбергенов А.К., Уалиев Ж.Р. // Численный расчет угловой скорости вращения ротора Дарье III Всероссийская научная конференция. РФ, г. Якутск, 2012. – С167.
9. Yershina A.K., Manatbayev R.K., Tulepbergenov A.K. Development and prospects of use renewed energy sources (RES) in Kazakhstan // V World Congress of the engineering and Technologies – WCET-2012. – Kazakhstan, Almaty, 2012. – p.169-170.
10. Satymbekov A.M., Tulepbergenov A.K., Ualiev Zh.R. Numerical modeling of modern wind turbines (carousel type) //V World Congress Engineering and Technology – WCET-2012, Kazakhstan, Almaty. 2012. – p.294-296.
11. Tulepbergenov A.K., Sherniazov K.E. The Vortex Model of the Windturbine Darrie // IV Congress of the Turkic World Mathematical Society. – Azerbaijan, Baku, 2011. – p.475.