

УДК 621.548

Р.К. Манатбаев, А.К. Тулепбергенов, Е.Е. Сандыбаев, Н.Б. Каласов,  
С. А. Бергалиева, Д.С. Отегенов

Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОТУРБИНЫ ДАРЬЕ

**Аннотация.** Ветер - экологически чистый источник энергии! Во всех экономически развитых странах мира ветер, как источник энергии, начинает играть заметную роль в их энергетическом балансе. Непрерывно расширяется производство и проектирование эффективных ветроустановок [1-6]. Территория Республики Казахстан имеет огромный ветроэнергетический потенциал, что, естественно, предполагает большое будущее для применения ветроэнергетических аппаратов в нашей стране.

Экономичность современных ветротурбин определяется величиной коэффициента использования энергии ветра от единичной площади ометаемой поверхности ветроколеса в воздушном потоке. Поэтому их конструирование относится к разряду наиболее наукоемкого производства.

В работе рассматривается математическая модель нестационарной работы вертикально-осевой ветротурбины Дарье, которая вращается за счет действия подъемной силы на крыловой профиль рабочей лопасти. В статье приведены разработанная математическая постановка задачи и методика расчета угловой скорости ветроэнергетического устройства Дарье при воздействии на него набегающего потока, также полученные результаты численного расчета. По проведенным расчетам, ниже разработанной методикой, получены достоверные результаты, которые хорошо описывают физику явления. Разработанная математическая модель, ее численная реализация и полученные результаты могут быть полезными для дальнейшего усовершенствования математического описания проблемы и при проектировании конструкции вертикально-осевых ветротурбин.

**Ключевые слова:** вертикально-осевая ветротурбина Дарье, стационарный поток, подъемная сила, сила аэродинамического сопротивления

### Введение

Наибольшее применение и развитие получили современные ветроагрегаты, работающие за счет подъемной силы крыла. Они имеют сравнительно высокий коэффициент использования энергии ветра  $\xi_{\max}=0,45$ . Их делят на два типа по расположению вращающихся валов и рабочих лопастей: а) горизонтально-осевые (тип пропеллерный); б) вертикально-осевые (—Дарье).

Основные два преимущества вертикально-осевых ветроагрегатов относительно горизонтально-осевых: а) направление ветра не имеет значения; б) электрогенератор, и другие главные компоненты агрегата расположены на уровне земли, что снижает требования, предъявляемые к башне, и облегчает техническое обслуживание и ремонт.

Целью данного исследования является рассмотрение теоретического 2D моделирования работы ветротурбины карусельного типа, что в последствии даст возможность определить оптимальные параметры турбины (см. Рис. 1 и 2). Для этого рассмотрим математическую модель для исследования взаимодействия ветротурбины карусельного типа —Дарье со стационарным воздушным потоком [3-7].

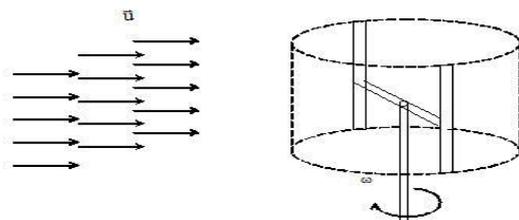


Рисунок 1. - Схематический общий вид взаимодействия.

Экономичность современных ветротурбин определяется величиной коэффициента использования энергии ветра от единичной площади ометаемой поверхности ветроколеса в воздушном потоке. Поэтому их конструирование относится к разряду наиболее наукоемкого производства, опирающегося на современные знания аэродинамики, теории машин, материаловедения и др.

Обычное ветроэнергетическое устройство (ВЭУ) Дарье, изобретенное французским инженером Дарье в 1904 году, состоит из лопастей типа самолетных крыльев с симметричным относительно хорды профилем (махом), связывающим вертикальный вал вращения с рабочими крыльями (также симметричного профиля), расположенными параллельно оси вращения. Плоскость крыльев размаха (маха) горизонтальна и лежит в плоскости их вращения. Основное отличительное свойство ВЭУ Дарье – это способность работать, не реагируя на изменение направление ветра.

**Постановка Задачи**

При действии потока ветра на лопасти появляются подъемная сила и силы аэродинамического сопротивления. Подъемная сила действует на лопасти положительно, раскручивая ротор. А сила сопротивления – отрицательно. Для работы агрегата эффективные значения этих сил зависят от параметра Z, называемого «быстроходностью агрегата».

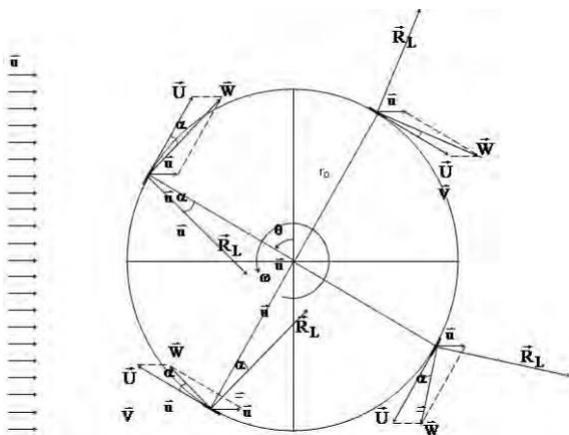


Рисунок 2. – Схема взаимодействия турбины со стационарным потоком.

Параметр быстроходности ветроколеса определяется следующим образом:

$$Z = \frac{W_*}{u_\infty} \quad (1),$$

где  $u_\infty$  – скорость потока,  $W_* = \omega r_0$  – линейная скорость лопасти,  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $r_0$  – радиус, расстояние от центра вращения вала до лопасти.

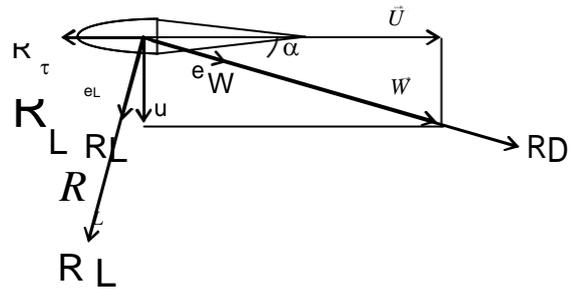


Рисунок 3. – Схема воздействия аэродинамических сил на профиль лопасти.

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 Rx, Ry и входят в правую часть уравнений движения.

Для определения этих массовых сил сначала определяется угол атаки  $\alpha$  и скорость атаки W, а коэффициенты подъемной силы и сил сопротивления зависят только от угла атаки (см. Рис. 2).

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

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u \sin \theta - v \cos \theta}{r_0 \omega + u \cos \theta + v \sin \theta}.$$

(2) Вводя локальное число

$$Z = \frac{r_0 \omega}{U_\infty},$$

быстроходности  $\infty$ , получим,

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

Для определения аэродинамических сил введем единичные векторы, как показано на рисунке 3:  $e_w$  – единичный вектор сопротивления, направленный вдоль

вектора относительной скорости и  $e_L$  – единичный вектор подъемной силы направленный перпендикулярно ему.

Элементарные составляющие аэродинамических сил:

а) подъемная сила профиля:

$$R_L = C_L(\alpha) \rho \frac{W^2}{2} h_{eL}$$

(4),

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

б) сила сопротивления

$$R_D = C_D(\alpha) \rho \frac{W^2}{2} h_{eW} \quad (5),$$

где  $C_D(\alpha)$  – коэффициент силы сопротивления. Затем вычисляются  $R_x$ ,  $R_y$

$$R_x = \text{пр}_{Ox}(R_L) + \text{пр}_{Ox}(R_D)$$

$$R_y = \text{пр}_{Oy}(R_L) + \text{пр}_{Oy}(R_D) \quad (6)$$

Коэффициенты  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  как формулы угла атаки, являются результатами продувок используемого профиля для значений  $\alpha$  в интервале  $00 - 3600$ . В работе [6] для определения этих коэффициентов предлагается использовать результаты эксперимента, проведенного в лаборатории LMAL–NASA (США) для трех симметричных профилей, которые приведены в таблице 1 приложения 1 (NASA-0006, NASA-0012, NASA-0021).

Для проведения расчетов нами на основании аэродинамических характеристик крылового профиля NASA-0021 была проведена обработка и получены эмпирические формулы зависимости коэффициентов подъемной силы ( $C_L$ ) и силы сопротивления ( $C_D$ ) от угла атаки. Результаты обработки данных коэффициентов подъемной силы ( $C_L$ ) и силы сопротивления ( $C_D$ ) для крылового профиля NASA-0021 приведены на рисунке 4.

На рисунке 7 сплошные линии построены по приближенным формулам, которые имеют вид:

$$C_L = -0,00011 \cdot \alpha^3 + 0,0023 \cdot \alpha^2 + 0,0633 \cdot \alpha \quad (7)$$

$$C_D = 0,0005 \cdot \alpha^2 - 0,002 \cdot \alpha + 0,0129 \quad (8)$$

Ромб, квадрат – экспериментальные данные, взятые из [6,7] для профиля NASA-0021.

Как видно, из рисунка 7 экспериментальные данные NASA достаточно хорошо согласуются формулами (7) и (8).

Были проведены расчеты распределения индуктивной скорости на наветренной стороне турбины. Затем рассчитано поле скорости перед взаимодействием воздушного потока с турбиной в подветренной стороне. Для этого рассчитаны поле скорости после прохождения наветренной стороны турбины. Используя эти данные было рассчитано распределение индуктивной скорости на подветренной стороне.

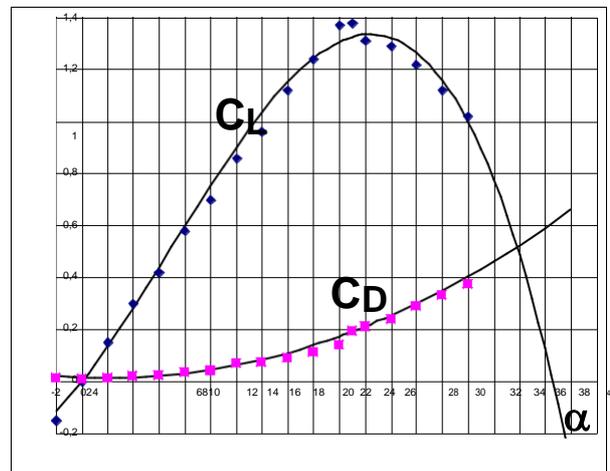


Рисунок 4. – Коэффициенты подъемной силы  $C_L$  и силы сопротивления  $C_D$  для симметричного профиля NASA-0021.

Для определения угловой скорости вращения ротора Дарье, при воздействии ветрового потока применяем теорему об изменении кинетического момента механической системы [6]. Эта выражения в конечной форме имеют вид

$$\frac{dL_z}{dt} = M_{\text{турб}} + \sum_i M_i \quad (9),$$

где  $L_z$  – кинетический момент ветротурбины, состоящий 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:

$$I = \frac{2}{3} r_0^2 m_l + r_0^2 m_a + r_a^2 m_a \quad (10),$$

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

Разобьем рабочую лопасть на элементарные площадки  $dx$ , соответственно, угол  $d\theta$  под которым видна эта площадка, очевидно, будет равна

$$dx = r \sin \theta d\theta; \quad d\theta = - \frac{dx}{r \sin \theta} \quad (11),$$

где  $d\theta$  - это элементарный угол поворота вокруг оси  $Oz$ , покрываемый лопастью при перемещении в промежутке от  $x$  до  $(x+dx)$

Доля времени, затрачиваемая на один оборот при прохождении элемента  $dx dz$  равна

$$rd\theta = Vd\tau = \frac{2\pi}{T} r d\tau \quad d\theta = \frac{2\pi}{T} \frac{d\tau}{T} = \frac{d\theta}{2\pi} \quad (12)$$

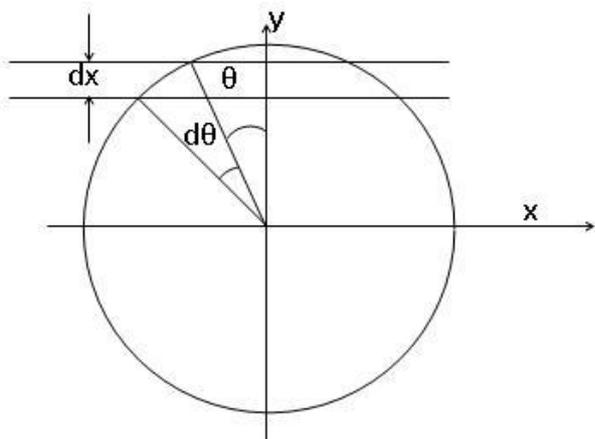


Рисунок 5. - Схематический вид прохождения трубки тока через элементарную площадку, ометаемой поверхности турбины.

Разность времени выразим

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{d\theta}{dt} \quad (13),$$

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

Отсюда следует:

$$dt = \frac{T}{2\pi} d\theta = \frac{1}{\omega} d\theta \quad (14)$$

В формулу (9) подставив (14) получим

$$\omega \frac{dL}{d\theta} = M_{турб} + \sum M_i \quad (15)$$

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

$$l\omega \frac{d\omega}{d\theta} = M_{турб} + \sum M_i \quad (16)$$

Полученные результаты численного расчета

Формулу (16) запишем в разностном виде

$$l\omega \frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\theta_{n+1} - \theta^n} = M_{турб} + \sum M_i \quad (17)$$

$$\text{где } M_{турб} = (R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0 \omega^{n+1} = \omega^n + \frac{(R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0 + \sum M_i}{I \omega^n}$$

$$* \theta_{n+1} - \theta^n \quad (18),$$

где  $\omega^{n+1}$  и  $\omega^n$  - соответственно, угловые скорости турбины в момент времени  $t_{n+1}$  и  $t_n$ .

Таким образом, определение угловой скорости  $\omega$  будет продолжаться, пока не достигнет своего единственного значения.

Результаты этих расчетов приведены на рисунках 6-8 приложения 1 (для  $l=0,5$ ).

### Список литературы

1 Турян К. Дж., Стриклэнд 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 Paraschivoiu J., Desy Ph. Aerodynamics of Small – Scale Vertical – Axis Wind Turbines //J. Propulsion. – 1986. – Vol. 2, № 3. – P. 282-288.

5 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.

6 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К. Основы теории ветротурбины Дарье. – Алматы, 2001. – 104 с.

7 Иванов И. И., Иванова Г.А, Перфилов О. Л.. Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций. Сборник научных трудов гидропроекта. – М., 1988. – С. 106 -113.

**Приложение**

Таблица 1. Значение коэффициентов  $CL(\alpha)$ ,  $CD(\alpha)$ , полученные в ходе проведенного эксперимента в лаборатории LMAL–NACA (США) для трех симметричных профилей (NACA-0006, NACA-0012, NACA-0021).

Крыло с профилем NACA-0006			Крыло с профилем NACA-0012			Крыло с профилем NACA-0021		
$\alpha^0$	$Cy$	$Cx$	$\alpha^0$	$Cy$	$Cx$	$\alpha^0$	$Cy$	$Cx$
-2	-0,15	0,007	-8	-0,60	0,033	-2	-0,15	0,012
0	0,00	0,0064	-4	-0,30	0,015	0	0,00	0,010
2	0,16	0,007	-2	-0,15	0,009	2	0,15	0,012
4	0,32	0,014	0	0,00	0,007	4	0,30	0,019
6	0,47	0,021	2	0,15	0,009	6	0,42	0,024
8	0,61	0,038	4	0,30	0,0155	8	0,58	0,032
10	0,72	0,070	6	0,445	0,0205	10	0,70	0,042
12	0,81	0,140	8	0,60	0,033	12	0,86	0,068
14	0,86	0,2	10	0,745	0,041	14	0,96	0,072
16	0,86	0,250	12	0,90	0,059	16	1,12	0,092
18	0,87	0,295	14	1,045	0,075	18	1,24	0,110
20	0,86	0,350	16	1,2	0,096	20	1,37	0,140
22	0,835	0,360	18	1,32	0,119	22,2	1,38	0,192
24	0,83	0,396	20	1,46	0,142	22,2	1,31	0,210
26	0,825	-	22,1	1,55	0,173	24	1,29	0,240
28	0,822	-	22,1	1,20	0,262	26	1,22	0,290
30	0,818	-	24	1,09	0,322	28	1,12	0,330
			26	0,92	0,410	30	1,02	0,372
			30	0,89	0,430			

Результаты этих расчетов приведены на рисунках 6-8 (для  $l=0,5$ ).

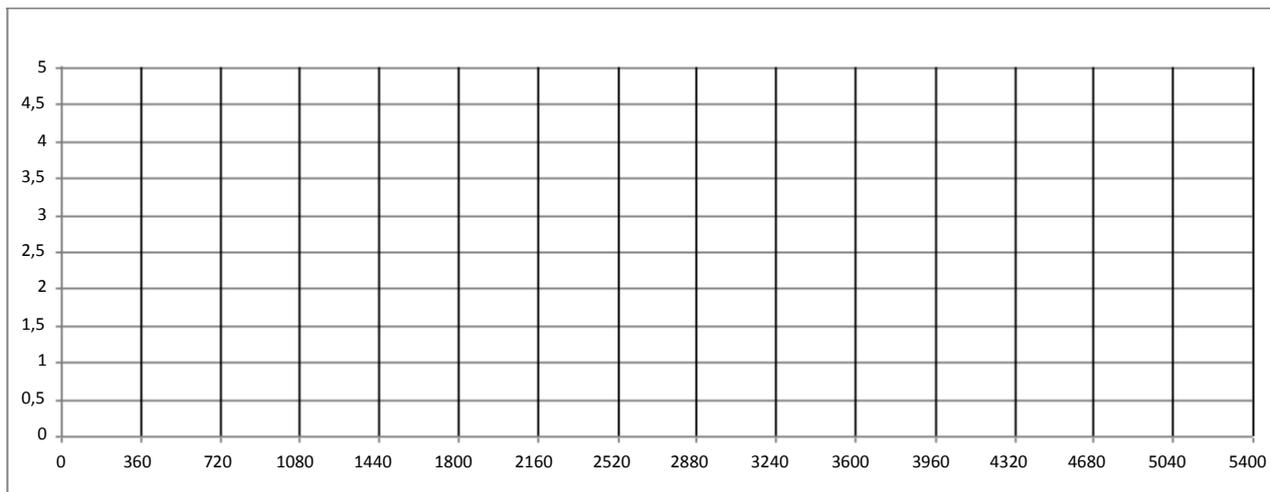


Рисунок 6. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при относительно малой величине  $l=0,5$  и без учета сопротивления на турбину.

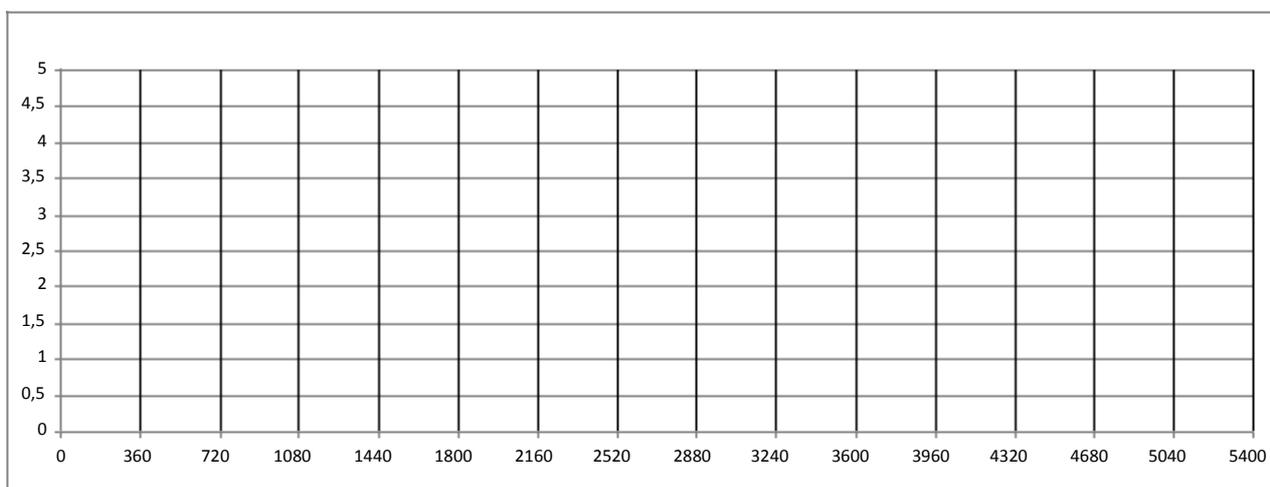


Рисунок 7. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $l=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину 0,5%.

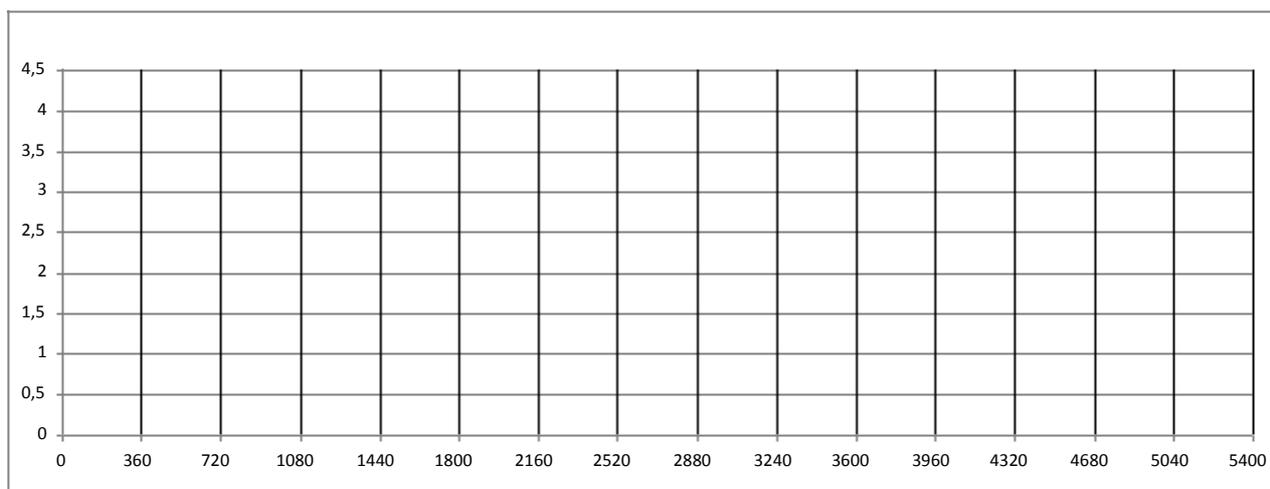


Рисунок 8. – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при  $l=0,5$  и с учетом сопротивления на турбину 5%.

**Р.К. Манатбаев, А.К. Тулепбергенов, Е.Е. Сандыбаев, Н.Б. Каласов,  
С. А. Бергалиева, Д.С. Отегенов**

Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОТУРБИНЫ ДАРЬЕ**

**Аннотация.** Ветер - экологически чистый источник энергии! Во всех экономически развитых странах мира ветер, как источник энергии, начинает играть заметную роль в их энергетическом балансе. Непрерывно расширяется производство и проектирование эффективных ветроустановок [1-6]. Территория Республики Казахстан имеет огромный ветроэнергетический потенциал, что, естественно, предполагает большое будущее для применения ветроэнергетических аппаратов в нашей стране.

Экономичность современных ветротурбин определяется величиной коэффициента использования энергии ветра от единичной площади ометаемой поверхности ветроколеса в воздушном потоке. Поэтому их конструирование относится к разряду наиболее наукоемкого производства.

В работе рассматривается математическая модель нестационарной работы вертикально-осевой ветротурбины Дарье, которая вращается за счет действия подъемной силы на крыловой профиль рабочей лопасти. В статье приведены разработанная математическая постановка задачи и методика расчета угловой скорости ветроэнергетического устройства Дарье при воздействии на него набегающего потока, также полученные результаты численного расчета. По проведенным расчетам, ниже разработанной методикой, получены достоверные результаты, которые хорошо описывают физику явления. Разработанная математическая модель, ее численная реализация и полученные результаты могут быть полезными для дальнейшего совершенствования математического описания проблемы и при проектировании конструкции вертикально-осевых ветротурбин.

**Ключевые слова:** вертикально-осевая ветротурбина Дарье, стационарный поток, подъемная сила, сила аэродинамического сопротивления

**R.K. Manatbayev, A.K. Tulepbergenov, Y.Y. Sandybayev, N.B. Kalassov, S.A. Bergaliyeva,  
D.S. Otegenov**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

[sandybaev\\_1990@mail.ru](mailto:sandybaev_1990@mail.ru)

## **STUDY THE NONSTATIONARY DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A ROTATING WIND TURBINE DARRIEUS**

**Abstract:** Wind - an environmental friendly source of energy! In all developed countries of the world the wind, as an energy source, begins to play a significant role in their energy balance. Production and design of efficient wind turbines is expanding continuously. The territory of the Republic of Kazakhstan has a huge wind energy potential, it suggests a great future for the use of wind machines in our country.

Cost-effectiveness of modern wind turbines is determined by the utilization of wind energy by swept unit area in air flow. Therefore, their design refers to the category of the most high-tech industry.

A mathematical model of vertical axis wind turbine Darrieus non-stationary operation, which rotates by the lift action on the airfoil blades, is viewed in the paper. The mathematical formulation of the problem and the Darrieus wind turbine angular velocity calculation method during oncoming flow are developed. The results of numerical calculation are obtained. Reliable results were obtained according to the calculations by the developed technique, which well describe the physics

of the phenomenon. The developed mathematical model, its numerical implementation and the obtained results may be useful for the further improvement of the problem's mathematical description and vertical-axis wind turbines design.

**Keywords:** Darrieus vertical-axis wind turbine, steady flow, the lift force, air resistance force

**Манатбаев Р.К., Тулепбергенов А.К., Сандыбаев Е.Е., Қаласов Н.Б., Бергалиева С.А.,  
Әтегенов Д.С.**

әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан  
[sandybaev\\_1990@mail.ru](mailto:sandybaev_1990@mail.ru)

## **АЙНАЛЫП ТІРҒАН ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ОРНЫҚСЫЗ ДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Жел – экологиялық таза энергия кәзі! Жел энергия кәзі ретінде әлемнің дамыған елдерінің барлығында дерлік, олардың энергетикалық балансына орасан зор әсер етуде. Энерготімді жел қондырғыларын жобалау мен жасау үздіксіз дамуда. Қазақстан Республикасының территориясының жел-энергетикалық потенциалы зор, сондықтан да елімізде жел қондырғыларын пайдаланудың болашағы жарқын болмақ.

Қазіргі жел қондырғыларының энерготімділігі ауа ағынында жел қондырғысының орағытатын бетінің бірлік ауданынан жел энергиясын пайдалану коэффициентімен анықталады. Сол себепті де оларды жобалау кәп ғылыми еңбек сіңіруді қажетсінетін сала болып табылады.

Бұл мақалада жұмысшы қалақшасының қанатша профиліне әсер ететін кәтеруші күш есебінен айналатын вертикаль-ості Дарье жел турбинасының стационар емес жұмысының математикалық моделі қарастырылған. Жел ағыны әсер еткен кездегі Дарье жел қондырғысының бұрыштық жылдамдығын есептеу әдістемесі жасалынып, сандық есептеу нәтижелері алынды. Тәменде жасалынған әдістеме бойынша жасалған есептеулер кәмегімен құбылыстың физикасын жақсы сипаттайтын нәтижелер алынды. Жасалынған математикалық модель, оның сандық реализациясы мен алынған нәтижелер құбылысты математикалық сипаттауды одан әрі жетілдірумен қатар, вертикаль-ості жел турбинасының конструкциясын жобалауда да тиімді болуы мүмкін.

**Маңызды сәздер:** вертикаль - әсті Дарье жел турбинасы, стационар ағын, кәтеруші күш, аэродинамикалық кедергі күштер