

Б. Т. ЕЛУБАЕВА, Р. К. МАНАТБАЕВ, А. К. ТУЛЕПБЕРГЕНОВ, Ж. Р. УАЛИЕВ

(Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан)

О НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВЕТРОТУРБИНЫ ДАРЬЕ

Аннотация. Ветроэнергетика рассматривается не только как экологически «чистый» источник энергии. Ветроэнергетика также поддерживает социально-экономическое развитие, энергетическую безопасность и снижает зависимость электроэнергетики от цен на топливо. Республика Казахстан по своему географическому положению находится в ветровом поясе северного полушария и на значительной части территории Казахстана наблюдаются достаточно сильные воздушные течения, преимущественно Северо-восточного, Юго-западного направлений. В ряде районов Казахстана среднегодовая скорость ветра составляет более 6 м/с, что делает эти районы привлекательными для развития ветроэнергетики. В этой связи Казахстан рассматривается как одна из наиболее подходящих стран мира для использования ветроэнергетики. Энергию ветра с помощью ветроэнергетических установок преобразуют в электрическую, тепловую и т.д. (подъем воды, мол зерна). В этой работе рассматривается разработка математической модели ветротурбины карусельного типа и ее численная реализация. В конце статьи приведены некоторые результаты полученного из численного расчета, которые хорошо описывают физику явления.

Ключевые слова: ветротурбина, карусельный тип, угол атаки, скорость атаки, угловая скорость, аэродинамические силы, момент, инерция.

Тірек сөздер: жел турбина, карусель типтес, ұру бұрышы, ұру жылдамдығы, бұрыштық жылдамдық, аэродинамикалық күштер, момент, инерция.

Keywords: wind turbine, carusel type, angle of attack, velocity of attack, angular velocity, the aerodynamic forces, momeht, inertia.

Республика Казахстан обладает огромными ветровыми ресурсами. По своему географическому положению Казахстан находится в ветровом поясе северного полушария и на значительной части территории наблюдаются достаточно сильные воздушные течения, преимущественно Северо-восточного, Юго-западного направлений. Почти на 50% процентах территории Казахстана среднегодовая скорость ветра достигает 4-5 м/с метров, что, учитывая размеры страны (более 2,72 млн км²), предопределяет наличие огромного ветроэнергетического потенциала. В ряде районов Казахстана среднегодовая скорость ветра достигает 6м/с и выше, что делает эти районы перспективными для использования ветроэнергетики. Экономический потенциал использования ветроэнергетики будет определяться соотношением стоимости электроэнергии ветростанций и традиционных источников энергии с учетом транспортной составляющей, а также учета экологического эффекта от сокращения загрязнения окружающей среды при замещении мощностей угольных электростанций. По ряду проведенных расчетов установленная мощность ветроэлектростанций может составить порядка 2000 МВт к 2024 г.

В этой статье рассматриваем взаимодействия ветротурбины Дарье со стационарным воздушным потоком [1-4]. На рисунке 1 схематически показано четыре наиболее важных положения рабочей лопасти при вращении с постоянной угловой скоростью ω .

Угол $\theta \in [0, 2\pi]$ отсчитывается от координаты x как от нулевого положения маха. Таким образом, угол θ определяет положение рабочей лопасти и действующие на нее силы вдоль окружности описываемой рабочими лопастями при вращении турбины.

Как видно из рисунка 1 в точках А и С угол атаки (α) равен нулю ввиду параллельности вектора скорости ветра \vec{V} и вектора линейной скорости вращения турбины \vec{U} . По мере продвижения рабочей лопасти от точки А до точки В возрастает угол атаки до максимального своего значения. Соответственно, изменяется величина и направления скорости атаки воздушной среды при движении в ней рабочей лопасти. Затем при перемещении лопасти от точки В к точке С угол атаки и скорость атаки убывает и величина подъемной силы \vec{R}_L равняется нулю в точке С. Аналогичная

ситуация имеет место при продвижении рабочей лопасти по нижней части окружности с максимальными значениями угла и скорости атаки в точке Д.

Вектор скорости атаки запишется в виде суммы вектора индуктивной скорости ветра \vec{V} и вектора линейной скорости движения рабочей лопасти \vec{U} с обратным знаком

$$\vec{W} = V \sin \theta \vec{e}_1 + (\omega r_0 + V \cos \theta) \vec{e}_e, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения турбины, r – длина маха Н-ротора, V – индуктивная скорость ветра. Ниже будет показана как определяется ее величина.

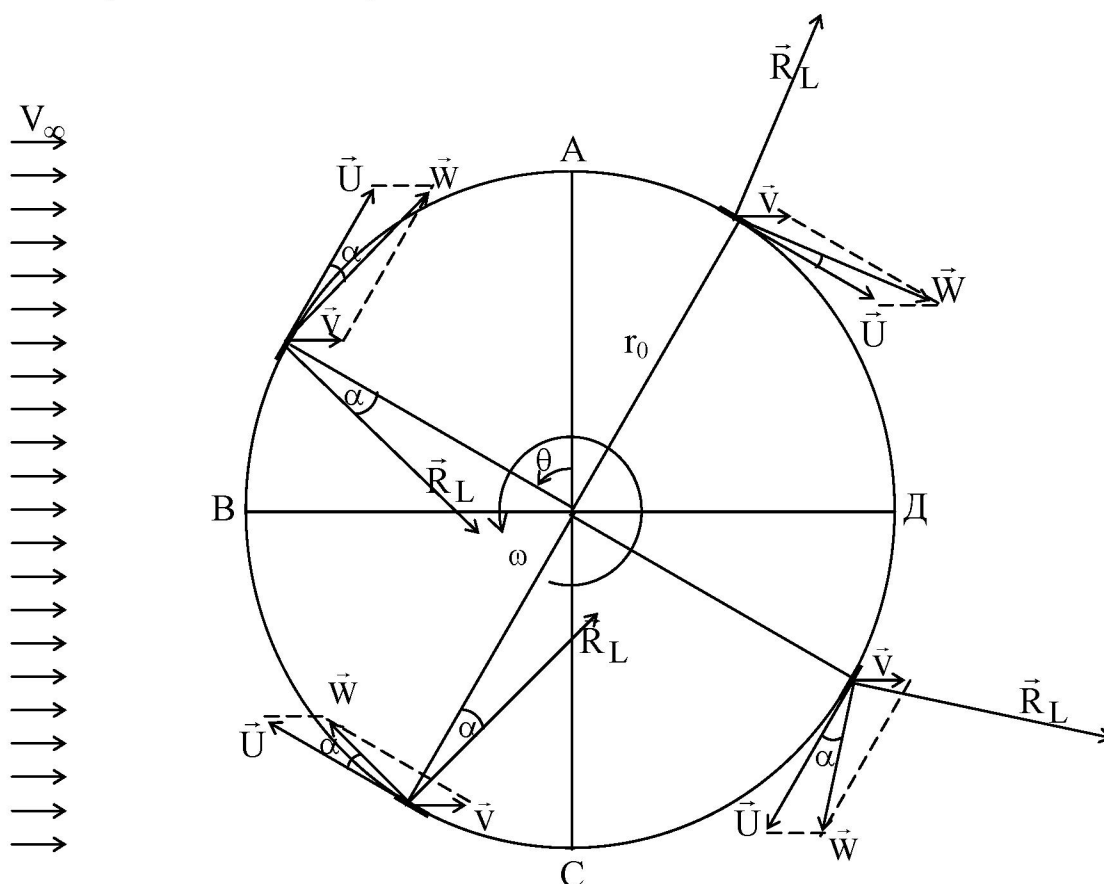


Рисунок 1 – Схема вращающейся против часовой стрелки одной из рабочих лопастей ветротурбины

Угол атаки выражается следующей формулой

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(\vec{W}, \vec{e}_1)}{(\vec{W}, \vec{e}_e)} = \frac{V \sin \theta}{V \cos \theta + r_0 \omega} \quad \text{или} \quad \alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{V \sin \theta}{V \cos \theta + r_0 \omega} \right) \quad (2)$$

Вводя параметра быстроходности $Z = \frac{r_0 \omega}{V}$, получим

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

Характер поведения угла атаки различен при $Z > 1$.

а) подъемная сила профиля рабочей лопасти

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

где $C_L(\alpha)$ – коэффициент подъемной силы, h – длина хорды профиля, dz – элемент лопасти по высоте, \vec{e}_L – единичный вектор по направлению подъемной силы крыла,

б) сила сопротивления

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

где коэффициент $C_D(\alpha)$ известная функция от угла атаки, \vec{e}_w – единичный вектор силы сопротивления.

Коэффициенты $C_D(\alpha)$, $C_L(\alpha)$ могут быть представлены формулами связанными с углом атаки и определяются экспериментально.

Запишем элементарный момент аэродинамических сил, действующий на элемент лопасти dz при изменении $\theta \in [0, 2\pi]$ равен

$$dM = r_o \left[(\vec{R}_D, \vec{e}_\theta) + (\vec{R}_L, \vec{e}_\theta) \right] = \rho \frac{W^2}{2} h dz r_o \left[C_D \cos(\alpha) + C_L \sin(\alpha) \right], \quad (6)$$

где z – третья ось ортогональной декартовой системы координат. Рабочие лопасти Н-ротора расположены параллельно третьей оси z .

Значение W^2 получим, используя формулу (2)

$$W^2 = (\vec{W})^2 = V^2 \sin^2 \theta + (\omega r_o + V \cos \theta)^2 \quad (7)$$

Осредненное значение силы $\vec{R}_x(\theta)$, действующий на элемент, равна

$$\vec{R}_x(\theta) = R'(\theta) dx \quad \text{здесь } dx = r_o \sin \theta d\theta; \quad (8)$$

где определяется по формуле (9'), или более подробно

$$R_x = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \vec{R}_x d\theta \quad (9)$$

$$R_x = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \vec{R}_x d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \rho \frac{W^2}{2} \frac{h B(\theta)}{r_o \sin(\theta)} d\theta = \frac{\rho h}{4\pi r_o} \int_0^{2\pi} \frac{W^2 B(\theta)}{\sin(\theta)} d\theta \quad (10)$$

здесь выражение (8) используется для R_x и $B(\theta) = C_L \sin(\theta - \alpha) - C_D \cos(\theta - \alpha)$.

Воспользовавшись определением коэффициента C_P из (2'), справедливы для $0 < \theta < \pi$, можно записать

$$C_P = \frac{R_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} = \frac{h}{2\pi r_o} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V} \right)^2 \frac{B(\theta)}{\sin(\theta)} d\theta \quad (11)$$

Выберем в ветровом потоке трубку тока, взаимодействующую с движущейся по окружности АВСД (рисунок 1) рабочей лопасти. Естественно, величина трубки тока в этом случае связана с положением лопасти в пространстве при круговом ее движении или, иначе говоря, установим связь индуктивной скорости с параметром C_P

$$\frac{V}{V_\infty} = \frac{1}{1 + \frac{C_P}{4}}. \quad (12)$$

Учитывая формулу (11) после простых преобразований из (12) найдем выражение для индуктивной скорости через аэродинамические характеристики ветроагрегата

$$\frac{V}{V_\infty} = \frac{1}{1 + \frac{h}{8\pi r_o} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V} \right)^2 \frac{B(\theta)}{\sin(\theta)} d\theta}. \quad (12')$$

Формула (12') в сочетании с (1) и (2) дает итерационный алгоритм для определения индуктивной скорости V в наветренной части ротора Дарье, в рассматриваемом случае, когда турбина в целом обхватывается одной трубкой, т.е. однотрубчатая модель.

Для проведения расчетов рассмотренным выше методом была разработана итерационная программа на языке Фортран и реализована на компьютере. При этом, как нам представляется в

процесс итерации лучше включить зависимости коэффициентов подъемной силы (C_L) и силы сопротивления (C_D) от непосредственного угла атаки записанных в виде формул. Результаты обработки данных коэффициентов подъемной силы (C_L) и силы сопротивления (C_D) для крылового профиля NASA-0021 приведены на рисунке 2. На рисунке 2 сплошные линии построены по приближенным формулам, которые имеют вид

$$C_L = -0,00011 \cdot \alpha^3 + 0,0023 \cdot \alpha^2 + 0,0633 \cdot \alpha \quad (13)$$

$$C_D = 0,0005 \cdot \alpha^2 - 0,002 \cdot \alpha + 0,0129 \quad (14)$$

Ромб, квадрат – экспериментальные данные, взятые из [2] для профиля NASA-0021

Как видно, из рисунка 2 экспериментальные данные NASA достаточно хорошо согласуются формулами (13) и (14).

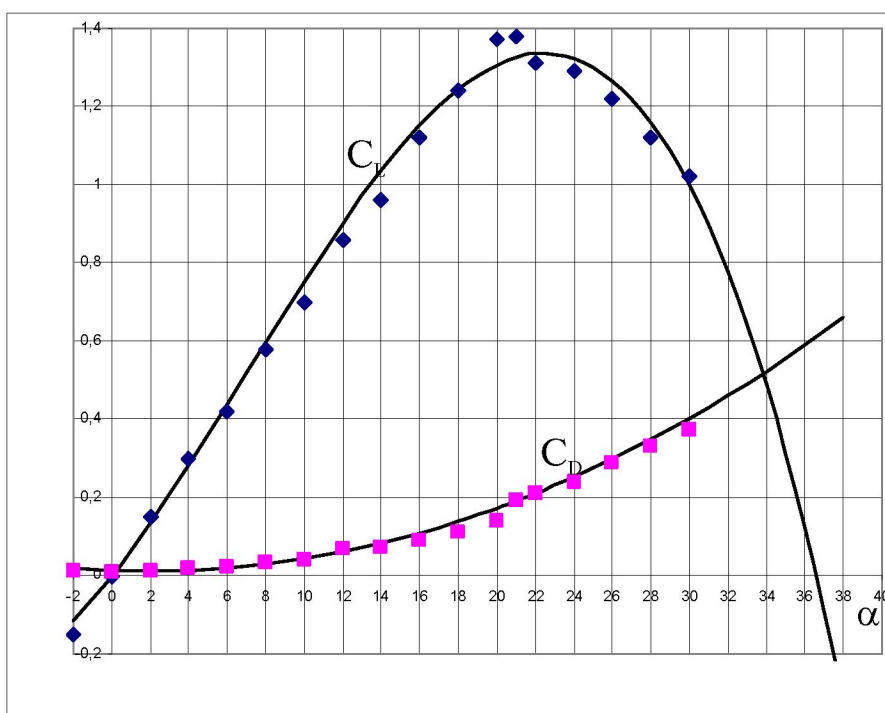


Рисунок 2 – Коэффициенты подъемной силы C_L и силы сопротивления C_D для симметричного профиля NASA-0021

Запишем выражения для вращающего момента турбины для наветренную часть ветроколеса при $\theta \in [0, \pi]$ случая

$$M_1 = \frac{nh r_o H}{\pi} \int_0^{\pi} \rho \frac{W^2}{2} (C_L(\alpha) \sin \alpha - C_D(\alpha) \cos \alpha) d\theta, \quad (15)$$

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

Аналогично и в подветренной стороне при изменении $\theta \in [\pi, 2\pi]$, выражения для вращающего момента турбины запишется в виде

$$M_2 = \frac{Nhr_o H}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} \rho \frac{W'^2}{2} (C_L(\alpha') \sin \alpha' - C_D(\alpha') \cos \alpha') d\theta \quad (16)$$

где W' – скорость атаки на профиле рабочей лопасти в подветренной части ветротурбины.

Запишем выражения для вращающего момента

$$M = \frac{Nhr_o H}{\pi} \int_0^{2\pi} \rho \frac{W^2}{2} (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) d\theta. \quad (17)$$

В формуле (17) N – число лопастей ротора, H – высота ротора.

В теоретических подходах к расчёту аэродинамики ветротурбин наибольшее развитие получили представления о взаимодействии трубки тока с вращающимся ветроколесом как активным проницаемым диском. Здесь получены все основные результаты: крутящий момент, связь мощности машины с энергией ветра, коэффициент использования энергии ветра и другие характеристики.

Для определения угловой скорости вращения ротора Дарье, при воздействии ветрового потока применяем теорему об изменении кинетического момента механической системы [2,5,6]. Эта выражения в конечной форме имеет вид

$$\frac{dL_z}{dt} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (18)$$

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

$$I = \frac{2}{3} r_0^2 m_m + r_0^2 m_l + r_b^2 m_b, \quad (19)$$

где r_0 – расстояние от оси вращения до лопастей (оно практически равно длине махов), r_b – радиус вала, передающего вращение генератору электрического тока, m_m , m_l , m_b – соответственно массы махов, лопастей, вала вращения.

Разность времени выразим

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{d\theta}{dt}, \quad (20)$$

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

$$dt = \frac{T}{2\pi} d\theta = \frac{1}{\omega} d\theta, \quad (21)$$

В формулу (18) подставив (20) получим

$$\omega \frac{dL_z}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (22)$$

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

$$I\omega \frac{d\omega}{d\theta} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (22')$$

Формулу (22') напишем в разностном виде

$$I\omega \frac{\omega^{n+1} - \omega^n}{\theta^{n+1} - \theta^n} = M_{\text{турб}} + \sum M_i, \quad (23)$$

где $M_{\text{турб}} = (R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0$

$$\omega^{n+1} = \omega^n + \frac{(R_L \sin \alpha - R_D \cos \alpha) r_0 + \sum M_i (\theta^{n+1} - \theta^n)}{I\omega^n}, \quad (23')$$

где ω^{n+1} и ω^n – соответственно, угловые скорости турбины в момент времени t^{n+1} и t^n . Таким образом, определения угловой скорости ω будет продолжаться, пока не сойдется к своему единственному значению (см. рисунки 3, 4).

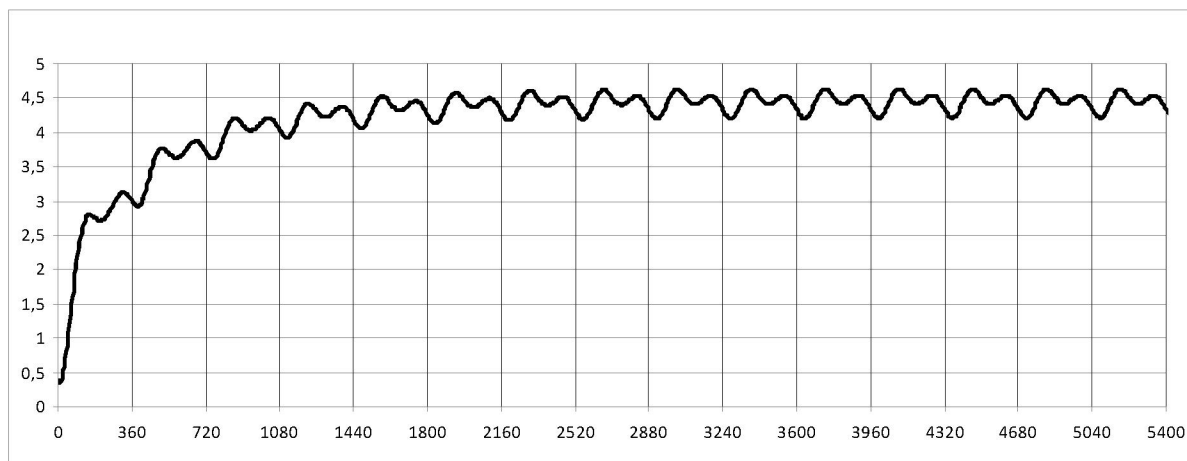


Рисунок 3 – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при относительно малой величине $I = 0,5$ и без учета сопротивления на турбину

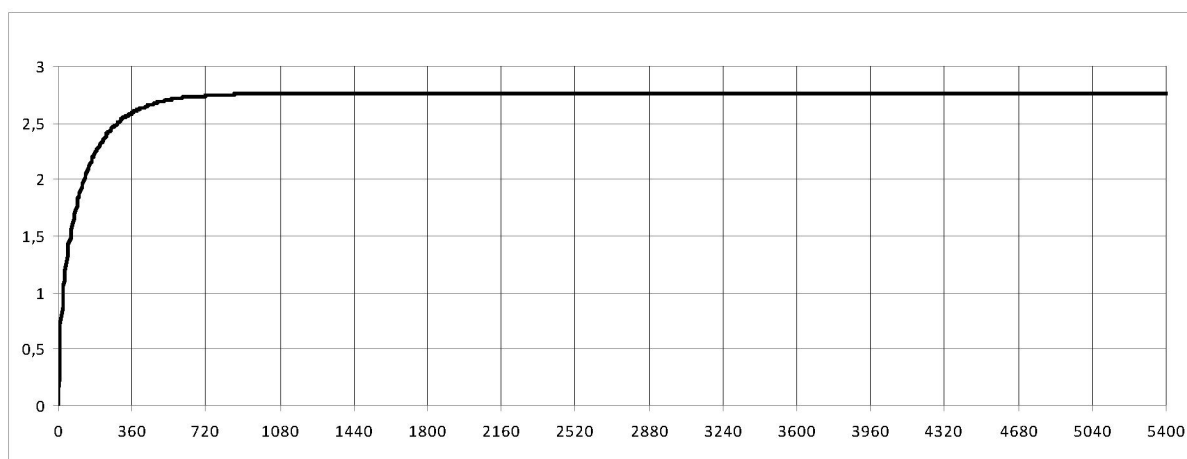


Рисунок 4 – График зависимости угловой скорости от положения движущейся рабочей лопасти при $I = 0,5$ и с учетом сопротивления на турбину 10%

ЛИТЕРАТУРА

- 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 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К. Основы теории ветротурбины Дарье. – Алматы, 2001. – 104 с.
- 3 Ершин Ш.А., Тулепбергенов А.К. Об одной нелинейной задаче ветротурбины карусельного типа" // Материалы Международной конференций: Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент. – Караганда, 1997. – С. 86–92.
- 4 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Гуль В.И., Тулепбергенов А.К. Экспериментальное исследование поле течения стационарного воздушного потока при работе четырехлопастной турбины "Дарье". //Известия МН-АН РК: Серия физико-математическая. – 2000. – № 3(211). – С. 72-78.
- 5 Тулепбергенов А.К. Об одной нестационарной задаче ветротурбины «Дарье» // Вычислительные технологии, Региональный вестник Востока (совместный выпуск). – Новосибирск-Алматы-Усть-Каменогорск, 2003. – Т.8 – Ч.3, №3(19). – С.187-191.
- 6 Shahbaz Yerшін, Ainakul Yerşhina, Manatbayev Rustem, Asylbek Tulepbergenov. Bi-Darrie windturbine // ASME-ATI-UIT 2010: Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems. – Sorrento, Italy, 2010. – P. 615-619.

REFERENCES

- 1 Twryan K. Dj., Stri"kle'nd Dj., H., Be'rg D.E'. Moshnost# vetroe'lektri"cheski" h agregatov s verti"kal#noy os#yu vrashheni"ya //Ae'rokosmi"cheskaya tehni"ka – 1988. – № 8. – S. 105-121.
- 2 Ershi"na A.K., Ershi"n Sh.A., Japbasbaev W.K. Osnovi' teori"i" vetrotwrbi"ni' Dar#e. – Almati', 2001. – 104 s.
- 3 Ershi"n Sh.A., Twlepbergenov A.K. Ob odnoy neli"neynoy zadache vetrotwrbi"ni' karwsel#nogo ti"pa" //Materi"ali' Mejdwnarodnoy konferenci"y: Haos i" strwktwri' v neli"neyni'h si"stemah. Teori"ya i" e'ksperi"ment. – Karaganda, 1997. – S. 86–92.

4 Ershi"na A.K., Ershi"n Sh.A., Gwl# V.I.", Twlepbergenov A.K. E'ksperi"mental#noe i"ssledovani"e pole techeni"ya staci"onarnogo vozdwshnogo potoka pri" rabote cheti'rehlopastnoy twrbi"ni' "Dar#e". //I"zvesti"ya MN-AN RK: Seri"ya fi"zi"ko-matemati"cheskaya. – 2000. – № 3(211). – S. 72-78.

5 Twlepbergenov A.K. Ob odnoy nestaci"onarnoy zadache vetrtwrbi"ni' «Dar#e» // Vi'chi"slit"el#ni'e tehnologi"i", Regi"onal#ni'y vestni"k Vostoka (sovmestni'y vi'pwsk). – Novosi"bi"rsk-Almati'-Wst#-Kamenogorsk, 2003. – T.8 – Ch.3, №3(19). – S.187-191.

6 Shahbaz Yershin, Ainakul Yershina, Manatbayev Rustem, Asylbek Tulepbergenov. Vi-Darrie windturbine //ASME-ATI-UIT 2010: Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems. – Sorrento, Italw, 2010. – P. 615-619.

Резюме

Б. Т. Елубаева, Р. К. Манатбаев, А. К. Төлепбергенов, Ж. П. Уәлиев

(Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан)

ДАРЬЕ ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ОРНЫҚСЫЗ ЖҰМЫС РЕЖИМІ ТУРАЛЫ

Жел энергетикасына тек қана экологиялық «таза» энергия көзі ретінде ғана көзқараспен қарамау керек. Жел энергетикасы сонымен қатар әлеуметтік-экономикалық дамуға, энергетикалық қауіпсіздікке және электр энергиясының жанармай бағасына тәуелділігін төмендетуге әсері зор. Қазақстан Республикасы өзінің географиялық орналасуына қарай солтүстік жарты шардың жел өтінде болып табылады, сондықтан Қазақстан территориясында аса күшті ауа ағындары байқалады, соның ішінде Солтүстік-шығыс, Оңтүстік-батыс бағыттары басым. Қазақстанның бірнеше аймақтарында желдің орташа жылдамдығы 6м/с асады, бұл осы аймақтарда жел энергетикасын дамытуға үлкен мүмкіндіктер бар екенін білдіреді. Осыған байланысты Қазақстан әлемдегі жел энергетикасын пайдалануға қолайлы елдердің қатарында екенін білуге болады. Жел энергиясын жел энергетикалық қондырғылар көмегімен электр, жылу және т.б. (су шығаруға, ұн диірмендерінде) пайдалы энергияға айналдыруға болады. Бұл жұмыста карусель типтес жел турбинаның математикалық үлгісін құру және оны сандық шешу қарастырылады. Мақаланың соңында сандық есептеуден алынған кейбір нәтижелері келтірілген, олар мәселенің физикалық құбылысына сәйкес келеді.

Тірек сөздер: жел турбина, карусель типтес, ұру бұрышы, ұру жылдамдығы, бұрыштық жылдамдық, аэродинамикалық күштер, момент, инерция.

Summary

B. T. Elubayeva, R. K. Manatbayev, A. K. Tulepbergenov, Zh. P. Ualiev

(Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

ABOUT THE NON-STATIONARY OPERATING MODE OF THE WIND TURBINE OF DARRIEUS

Wind power is considered not only as ecologically "pure" power source. Wind power also keeps social and economic development, energy security and reduces dependence of the electric power on fuel prices. The Republic of Kazakhstan on the geographical position is in a wind area of the northern hemisphere and on considerable part of the territory of Kazakhstan rather strong air currents, mainly North-east, South-west directions are observed. In a number of the regions of Kazakhstan the average annual speed of a wind makes more 6M/s, that do these areas attractive to wind power development. In this regard Kazakhstan is considered as one of the most suitable countries of the world for wind power use. Wind power by means of wind power installations will transform in electric, thermal, etc. (rising of water, a grain pier). In this work development of mathematical model of the wind turbine of rotary type and its numerical realization is considered. At the end of article some results received of numerical calculation which well describes physics of the phenomenon are given.

Keywords: wind turbine, carusel type, angle of attack, velocity of attack, angular velocity, the aerodynamic forces, momeht, inertia.