

УДК 629.7.035.55

И.Д. Краснокутский МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЗДУШНОГО ВИНТА АЭРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье излагаются методика проектного и эксплуатационного расчёта воздушного винта аэроэлектростанции. Методика базируется на известных соотношениях между геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами крыла бесконечного удлинения. Использована идея метода плоских сечений. Методика применима для воздушных винтов с малыми значениями коэффициента дискового отношения и коэффициента быстроходности.

Ключевые слова: ветер, воздушный винт, теория крыла, метод плоских сечений, стационарный процесс, математическое моделирование, оптимизация.

Воздушный винт (ВВ), работающий в турбинном режиме, при взаимодействии с потоком воздуха преобразует часть его кинетической энергии в механическую энергию, передаваемую через вал и редуктор на генератор. Генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Кинетическая энергия частицы воздуха массой $\Delta m = \rho \Delta S \Delta L$:

$$\Delta E_K = (\Delta m V_B^2 / 2), \quad (1)$$

где V_B – скорость ветра в диске ВВ.

Мощность потока воздуха с массовым расходом $(\Delta m / \Delta t)$:

$$\Delta W = (\Delta E_K / \Delta t) = (\rho \Delta S \Delta L V_B^2) / (2 \Delta t), \quad (2)$$

где $\Delta Q = (\Delta S \Delta L / \Delta t) = \Delta S V_B$ – объемный расход воздуха через площадку ΔS диска ВВ.

Известно [1, 2], что скорость ветра вблизи поверхности Земли зависит от многих факторов (район, время года, метеоусловия, шероховатость поверхности, высота над поверхностью). Для характеристики ветрового режима используется скорость ветра на высоте $z = 10$ м (V_{10}). Зависимость скорости ветра от высоты [2]:

$$V(z) = V_{10} (z / 10)^{2\alpha}, \quad (3)$$

где α – показатель степени, определяемый экспериментально.

На высоте 100 м скорость ветра в 2 раза больше, чем на высоте 10 м, а на высоте 300 м – в 3 раза [2, табл. 2]. Распределение скорости ветра на больших высотах определяется стратификацией атмосферы. Скорость ветра большую часть времени года не превосходит 20 м/с (число Маха $M = 20/330 < 0,1$). При этом условии изменение давления в потоке (на удалении от лопасти винта больше хорды) пренебрежимо мало и плотность можно считать неизменной ($\rho = \text{const}$).

Мощность потока воздуха набегающего на диск ВВ радиусом R равна сумме элементарных мощностей:

$$W = (\rho \pi r^2 V_B^3) / 2, \quad (4)$$

где $Q = \rho \pi r^2$ – массовый расход воздуха через диск ВВ.

Из формулы (4) и отмеченной выше зависимости скорости ветра от высоты следует, что размещение ВВ на высоте 300 м позволит увеличить мощность в 27 раз по сравнению с ВВ, расположенным на высоте 10 м.

Рассмотрим взаимодействие с потоком воздуха элемента лопасти винта, ограниченного цилиндрическими поверхностями с радиусами (r) и $(r + \Delta r)$ в системе координат связанной с ВВ (рис. 1). Плоскость OZ_0Y_0 совпадает с диском ВВ, ось OX_0 направлена по оси ВВ.

Вектор скорости потока воздуха относительно элемента лопасти определяется суммой векторов (см. рис. 2):

$$V_0 = V_B - V_\tau, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \gamma_r = V_\tau / V_B, \quad (6)$$

где $V_\tau = \omega r$ – окружная скорость элемента лопасти.

Угол γ_r определяет положение поточной системы координат $O_r X_r Y_r$ рассматриваемого элемента лопасти относительно связанной с ВВ системы координат $O X_0 Y_0$.

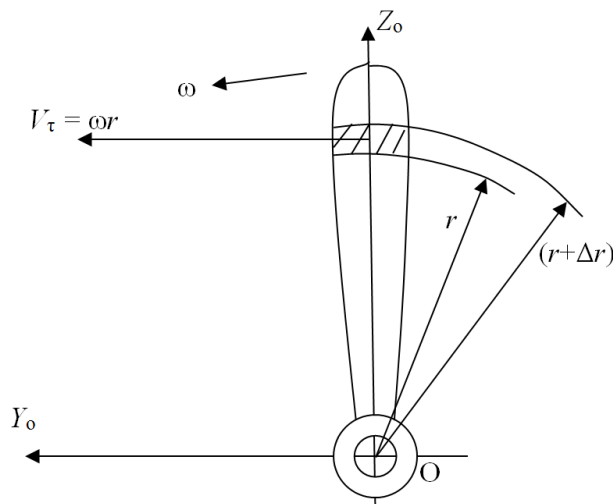


Рис. 1. Расчётная схема лопасти ВВ

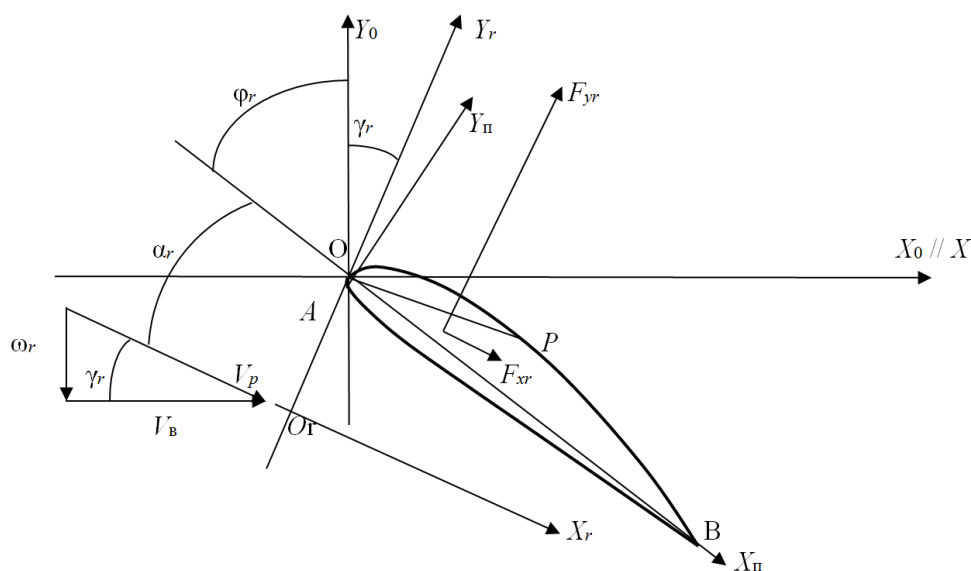


Рис. 2. Системы координат для описания элемента лопасти ВВ

На рис. 2 показаны три системы координат необходимые для расчёта аэродинамики ВВ и поверхности лопасти: $O X_0 Y_0 Z_0$ – система координат связанная с ВВ; $A X_n Y_n$ – система координат связанная с развёрнутым на плоскость элементом лопасти; $O_r X_r Y_r$ – поточная система координат развёрнутого на плоскость элемента лопасти. В системе координат $A X_n Y_n$ задан профиль лопасти через безразмерные координаты - функция $(y_n/b) = f(x_n/b)$, где $b = AB$ – хорда профиля. Шаговый угол ϕ_r (между хордой AB и плоскостью диска винта) определяет шаг элемента лопасти H_r на радиусе r (рис. 3).

Если по всей длине лопасти шаг одинаков ($H_r = H = \text{const}$), то шаговый угол на радиусе r определяется соотношением

$$\varphi_r = \text{arctg} (H_r / 2\pi r), \tag{7}$$

где $R_{\text{ст}} \leq r \leq R$; $R_{\text{ст}}$ – радиус ступицы.

Для лопасти ВВ, работающего в режиме турбины, необходима форма, обеспечивающая наибольшую мощность на валу (полезную мощность):

$$W_{\text{пол}} = \omega M. \tag{8}$$

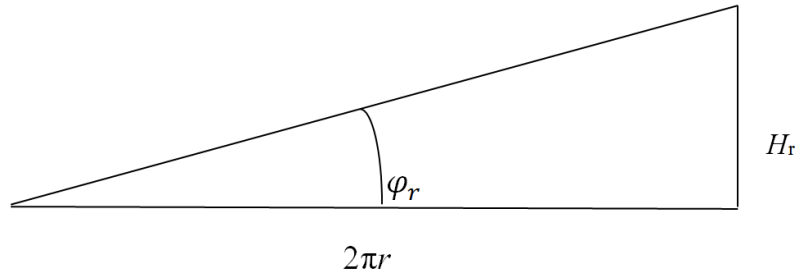


Рис. 3. Шаговый треугольник

Следовательно, при заданной скорости ветра и фиксированной скорости вращения форма лопасти должна обеспечить наибольший момент M . Для удовлетворения этому требованию применяют винты с переменным по длине лопасти шагом (шаг H_r и шаговый угол φ_r зависит от радиуса r). В случае изменения скорости ветра по сравнению с расчётным значением не все участки лопасти будут обтекаться с оптимальным углом атаки и КПД упадёт. Для уменьшения снижения КПД применяют ВВ регулируемого шага, обеспечивающие поворот всей лопасти относительно оси Z_0 на угол β . В этом случае шаговый угол элемента лопасти будет равен сумме $\varphi_r + \beta$.

При вращении винта с угловой скоростью $\omega = 2\pi n$, где n – частота вращения, угол атаки элемента лопасти α_r [рад/с] будет равен (рис.2)

$$\alpha_r = \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi_r + \beta) - \gamma_r \right] = \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi_r + \beta) - \text{arctg} \left(\frac{\omega r}{V_B} \right) \right]. \tag{9}$$

В формуле (9) мы не учитываем вызванные скорости, обусловленные закручиванием и торможением потока воздуха при взаимодействии ВВ. Это допустимо для ВВ с небольшими значениями коэффициента дискового отношения θ и коэффициента быстроходности K_B (величина обратная относительной поступи винта):

$$\theta = (kA) / (\pi R^2) < 0,1, \tag{10}$$

где k – число лопастей ВВ; A – площадь спрямлённого контура лопасти ВВ.

$$K_B = (n2R) / V_B < 1. \tag{11}$$

Определение момента аэродинамических сил взаимодействия лопасти с потоком воздуха выполним на основе метода плоских сечений, широко применяемого в аэро- и гидромеханике для тел с большим удлинением. Подъемную силу на элементе лопасти, создающую момент относительно оси винта, будем считать равной подъемной силе на равновеликом элементе цилиндрического крыла с бесконечным удлинением. Для выделения элемента вращающейся лопасти ВВ применим сечения круглыми цилиндрическими поверхностями с радиусами r и $r + \Delta r$ (рис. 1). Из теории крыла известно, что проекции аэродинамической силы на оси скоростной (поточной) системе координат могут быть определены в виде [3].

$$\Delta F_{yr} = C_y \frac{V_0^2}{2} \Delta S; \Delta F_{xr} = C_x \frac{V_0^2}{2} \Delta S, \tag{12}$$

где $\Delta S = b\Delta z$ – площадь элемента крыла; $b = AB$ – хорда профиля; C_x, C_y – коэффициенты подъемной силы и силы лобового сопротивления, зависящие от формы профиля и угла атаки α_r ; Δz – длина элемента крыла с бесконечным размахом.

Зависимости $C_x(\alpha_r)$ и $C_y(\alpha_r)$ для большинства типов профилей есть в открытых публикациях [4]. Характерный вид зависимости аэродинамических коэффициентов для профиля приведен на рис. 4.

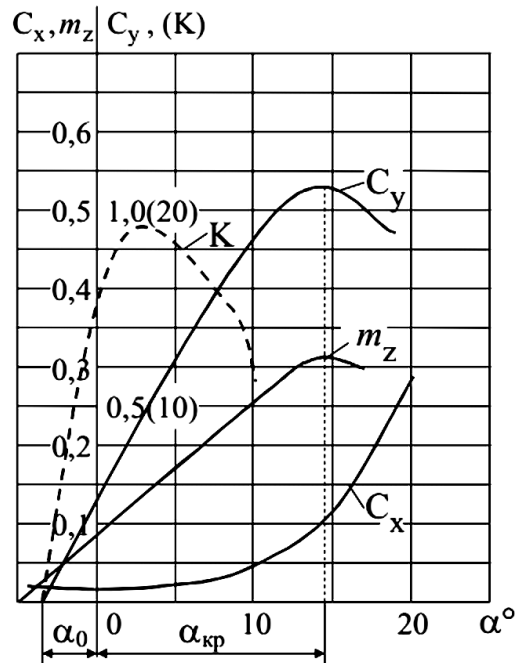


Рис. 4. Аэродинамические характеристики профиля

Для получения наибольшего момента на валу винта целесообразно обеспечить рабочий диапазон углов атаки

$$k\alpha_{кр} \leq \alpha_r \leq \alpha_{кр}, \tag{13}$$

где $0,8 < k \leq 1$, (чем k ближе к единице, тем эффективнее работает элемент лопасти)

Выбирая конкретный профиль мы получаем зависимость $C_y(\alpha)$ и значение $\alpha_{кр}$. Выбирая форму спрямлённого контура получаем зависимость длины хорды элемента лопасти от радиуса: $b(r)$.

Приравняв $\alpha_{кр} = \alpha_r$ получаем из соотношения (9) уравнение относительно φ_r и ω при заданной скорости ветра V_B :

$$\varphi_r = \frac{\pi}{2} - (\alpha_{кр} + \beta) - \arctg\left(\frac{\omega r}{V_B}\right) \tag{14}$$

Выбирая или задавая значение ω в первом приближении из соображений обеспечения требуемой частоты вращения вала генератора ($\omega = i_{ред} 2\pi n_{ген}$) из уравнения (14) находим распределение шагового угла по длине лопасти.

Выбор типа профиля, радиуса BB , зависимостей $b(r)$ и $\varphi_r(r)$ однозначно определяют геометрию поверхности лопасти. Описание поверхности лопасти BB выполним в связанной с BB системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ (ось $O_0 Z_0$ совпадает с передней кромкой лопасти). Координаты произвольной точки P поверхности лопасти найдём задавая радиус r секущего цилиндра, спрямлённый контур лопасти $b = f(r)$ и профиль сечения лопасти развёрнутый на плоскость $x_{п} = b(x_{п}/b)$ и $y_{п} = b(x_{п}/b)$. В этом случае координаты произвольной точки P (см. рис. 2) в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ определяются соотношениями:

$$\begin{cases} x_0 = (x_n^2 + y_n^2)^{0,5} \cos \delta \\ y_0 = r \sin\{[(x_n^2 + y_n^2)^{0,5} \sin \delta]/r\} \\ z_0 = r \cos\{[(x_n^2 + y_n^2)^{0,5} \sin \delta]/r\} \end{cases} \quad (15)$$

где $\delta = [\pi/2 - \varphi_r - \arctg(y_n/x_n)]$ – угол между вектором AP и лучом AX ($AX//OX_0$).

При $k=1$ момент, создаваемый j -м элементом лопасти, определяется выражением (рис. 2)

$$\Delta M_j = r_j [\Delta F_{yj} \cos \gamma_r - \Delta F_{xj} \sin \gamma_r] = r_j \frac{\rho V_{0j}^2}{2} \Delta r [c_{yj} \cos \gamma_r - c_{xj} \sin \gamma_r] \quad (16)$$

Момент M_m , создаваемый m -й лопастью, будет равен сумме моментов, создаваемых элементами:

$$\begin{cases} M_m = \sum_{j=1}^N M_j; \\ M = \sum_{m=1}^L M_m, \end{cases} \quad (17)$$

где M – момент аэродинамических сил на вале ВВ; N – количество элементов разбиения лопасти по длине; L – количество лопастей.

Из формулы (17), полученной при сделанных выше допущениях, можно сделать ошибочный вывод о целесообразности применения винта с большим количеством лопастей. В действительности работа винта влияет на поле скоростей потока (закручивает и тормозит), что приводит к появлению вызванных скоростей (V_a – аксиальной, т.е. вдоль оси винта, V_r – радиальной и V_t – тангенциальной) и концевых вихрей. В пределе при $L = \infty$ поток не пройдет через диск винта и не совершит полезной работы. Для открытых (без направляющей насадки или без конфузора) ВВ чаще всего число лопастей ВВ не более четырёх [5].

Вычислив $W_{\text{пол}}$ и W , определим КПД ВВ:

$$\eta = \frac{W_{\text{пол}}}{W} \quad (18)$$

Для ВВ по приведённым выше соотношениям можно определить зависимость КПД от скорости вращения при постоянной скорости ветра $\eta(\omega)$. Очевидно, что эта зависимость имеет экстремум (max) – наибольший возможный КПД для заданной скорости ветра. Соответствующая ему скорость вращения будет оптимальной для заданной скорости ветра и выбранной геометрии ВВ. Значение этой скорости определяется из уравнения (8) для выбранных значений φ_r , β и α_r .

Для поддержания определённых, таким образом, оборотов ВВ в заданных метеоусловиях должно выполняться условие равенства момента аэродинамических сил и момента сопротивления системы «электрогенератор-редуктор»:

$$M = M_{\text{ред}} \quad (19)$$

По приведенным зависимостям проведены вычисления с использованием электронных таблиц. Ниже приведены результаты расчёта геометрических, динамических и энергетических характеристик четырёхлопастного ВВ фиксированного шага ($\beta = 0$), диаметром 2 м при расчётной скорости ветра 10 м/с. Принятая форма спрямлённого контура приведена на рис. 5. Коэффициент дискового отношения $\theta = 0,0409$. Для всех сечений лопасти использован профиль 35А, его геометрические и аэродинамические характеристики [4]. В диапазоне рабочих углов атаки ($16 \div 22^\circ$) зависимость $C_y(\alpha)$ аппроксимирована тригонометрической функцией «косинус», зависимость $C_x(\alpha)$ аппроксимирована степенной функцией (рис. 6). Из уравнения (14) при обеспечении условий (10), (11) и (13) определён

шаговый угол для всех сечений лопасти (рис. 7). Полученные результаты однозначно определяют геометрию наружной поверхности лопасти в системе координат $X_0Y_0Z_0$.

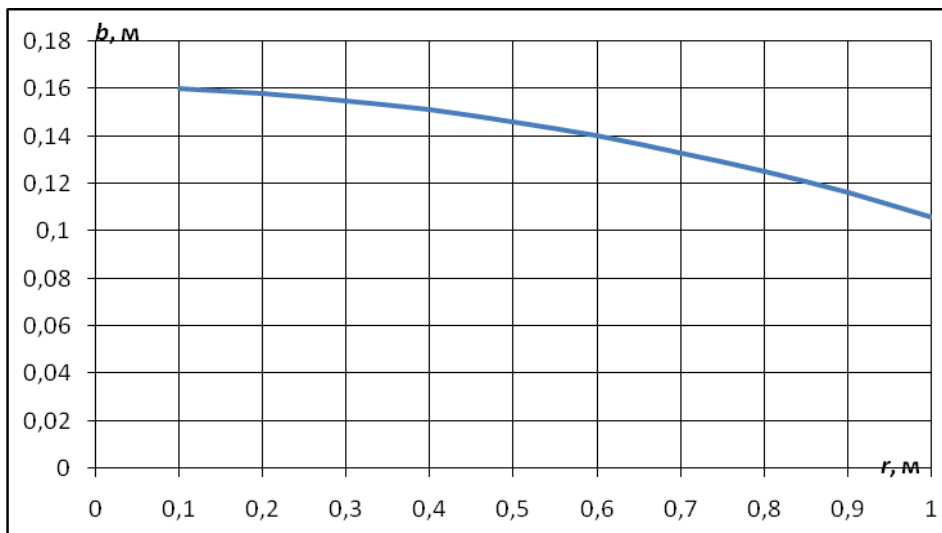


Рис. 5. Спряmlённый контур лопасти

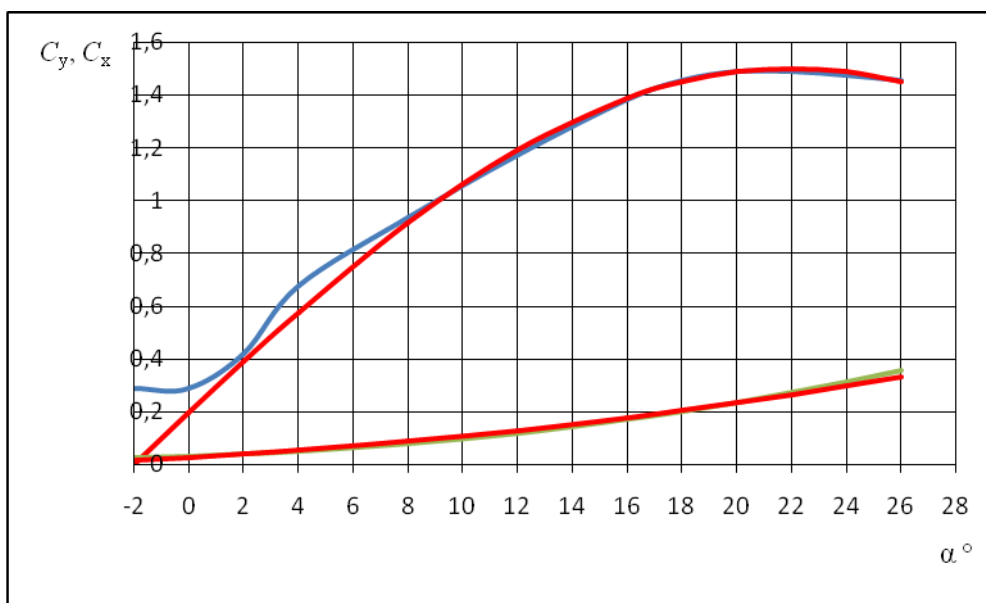


Рис. 6. Аэродинамические коэффициенты профиля 35А и их аппроксимация

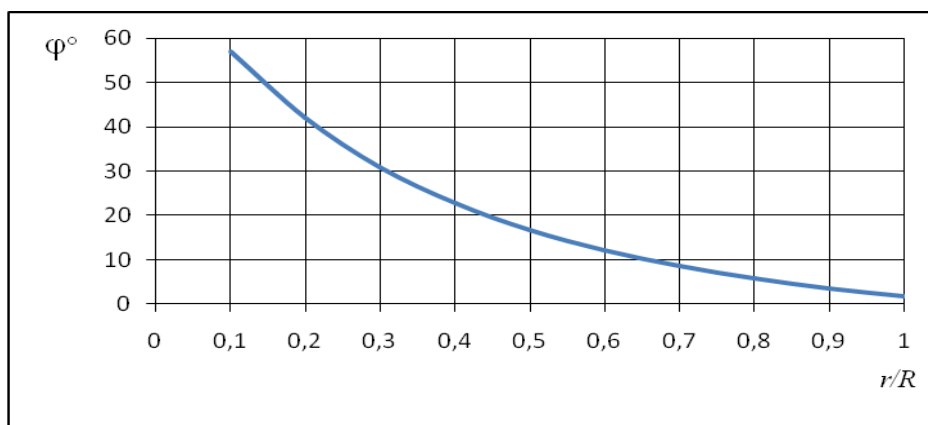


Рис. 7. Распределение шагового угла по длине лопасти

Для ВВ с определённой выше геометрией выполнен расчёт полезной мощности и КПД при изменении скорости ветра и скорости вращения. Полученные результаты позволили определить зависимость оптимальной скорости вращения ВВ фиксированного шага от скорости ветра (табл. 1), действующий при этом момент на валу и достижимый КПД. Данные табл. 1 могут быть использованы для выбора генератора и передаточного отношения редуктора.

Расчёт ВВ с большим дисковым отношением требует учёта вызванных скоростей и индуцированных вихрей. Изложенная выше методика не применима для расчёта ВВ с большими значениями дискового отношения и коэффициента быстроходности.

Таблица 1
Результаты расчёта оптимальных скоростей вращения

Скорость ветра, V_B , м/с	5	10	15	20	25	30
Оптимальная скорость вращения ВВ, n , об/с	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
КПД	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Момент на валу, M , Н·м	4,6	18,4	41	73,5	115	165
Полезная мощность, $W_{пол}$, кВт	0,073	0,577	1,95	4,6	9,0	15,5

Расчёт ВВ с большим дисковым отношением требует учёта вызванных скоростей и индуцированных вихрей. Изложенная выше методика не применима для расчёта ВВ с большими значениями дискового отношения и коэффициента быстроходности.

Библиографический список

1. Ветер и волны в океанах и морях: Справ. Данные. Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
2. Руководство по расчёту зданий и сооружений на действие ветра. – М.: Стройиздат, ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР, 1978. – 217с.
3. Войткунский, Я.И. Гидромеханика [Текст] / Я.И. Войткунский, Ю.И. Фаддеев, К.К. Федяевский. – Л.: Судостроение. 1982. – 456 с.
4. Справочник авиационных профилей [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf (Дата обращения 01.06.2017).
5. РусГидро. История ветроэнергетики [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.rushydro.ru/industry/res/windpower/history> (Дата обращения 01.06.2017).
6. Дейч, М.Е. Гидрогазодинамика [Текст] / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин, – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.