

А. И. Яковлев, М. А. Затучная

**АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЕТРОТУРБИН
ПРОПЕЛЛЕРНОГО ТИПА**

2001

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н. Е. ЖУКОВСКОГО**

«Харьковский авиационный институт»

А. И. Яковлев, М. А. Затучная

**АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
ВЕТРОТУРБИН ПРОПЕЛЛЕРНОГО ТИПА**

Учебное пособие по курсовому проектированию

ХАРЬКОВ «ХАИ» 2001

УДК 621.311.24

Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа/ А. И. Яковлев, М. А. Затучная. — Учеб.пособие по курсовому проектированию. — Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2001. — 78 С.

На основании модифицированной струйной теории ветродвигателей с горизонтальной осью вращения разработана методика построения численным методом аэродинамических характеристик ветротурбин пропеллерного типа с заданными геометрическими параметрами профиля лопасти. Приведен алгоритм построения ветроколеса, создающего аэродинамические параметры рабочей точки характеристики и отвечающего заданным номинальной мощности и скорости ветра. Показан путь получения регулировочных характеристик ветроколес. На примере расчета ветроколеса с выбранным типом профиля лопасти проиллюстрирована последовательность расчета по предлагаемой методике.

Для студентов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», обучающихся по специальности «Нетрадиционные источники энергии».

Ил. 7. Табл. 20. Библиогр.: 8 назв.

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. Ю. А. Крашаницы

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. Г. Данько,
д-р техн. наук, проф. В. В. Кузьмин

© Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», 2001 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Принятые обозначения	9
1. МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЕТРОКО-	
ЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ	11
1.1. Исходные данные расчета	14
1.2. Методика расчета геометрии лопасти	17
1.2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока	17
1.2.2. Методика расчета относительных параметров геометрии	
лопасти	19
1.3. Методика построения характеристик ветроколеса	21
1.3.1. Определение массива значений, следующих через равный	
шаг, независимого переменного — угла атаки $\alpha_{\text{цикл}}$	21
1.3.2. Определение массивов $C_{u_{a\text{цикл}}}$ и $\mu_{a\text{цикл}}$, соответствующ-	
щих массиву $\alpha_{\text{цикл}}$	23
1.3.3. Углы притекания сечения при вариации угла атаки	24
1.3.4. Число относительных модулей каждого сечения	24
1.3.5. Определение коэффициента торможения из первого уравне-	
ния связи	24
1.3.6. Приведенный элементарный относительный крутящий	
момент	28
1.3.7. Коэффициент быстроходности конца лопасти, создаваемый	
элементарными лопастями, расположенными на радиусах r_k при различных	
углах атаки	29
1.3.8. Итог построения трех матриц	29
1.3.9. Построение одномерного массива коэффициентов быстроход-	
ности Z_h конца лопасти	29
1.3.10. Построение моментной характеристики	31
1.3.11. Построение мощностной характеристики	33
1.3.12. Итог построения моментной и мощностной характеристик	33
1.3.13. Выбор рабочей точки характеристик $C_m(Z)$ и $C_p(Z)$	33
1.3.14. Коэффициент силы лобового давления при расчетной ско-	
рости ветра	34
1.3.15. Коэффициент силы лобового давления при порыве ветра	35
1.3.16. Коэффициент перегрузки	36
1.4. Расчет размерных параметров ветроколеса	37
1.4.1. Исходные данные расчета размерных параметров	37
1.4.2. Расчетные параметры ветроколеса	37
1.5. Построение регулировочных характеристик ветроколеса	38

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ И ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ В СООТВЕТСТ- ВИИ С ТАБЛ. 1.1 — 1.3	38
2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока	38
2.1.1. Коэффициент торможения потока	38
2.1.2. Коэффициент идеальной мощности	38
2.1.3. Коэффициент концевых потерь	39
2.1.4. Коэффициент профильных потерь	40
2.1.5. Коэффициент потерь на кручение струи	40
2.1.6. Предварительный коэффициент мощности	41
2.1.7. Значения параметров, зависящих от коэффициента тормо- жения e	41
2.1.8. Выбор максимального значения $C_{P_{предв}}$ и определение соответствующего ему значения e — $e_{опт}$	42
2.2. Расчет относительных параметров геометрии лопасти	42
2.2.1. Относительный радиус расположения сечения лопасти	43
2.2.2. Коэффициент быстроходности сечения лопасти	43
2.2.3. Число относительных модулей сечения лопасти	43
2.2.4. Коэффициент суммарной нагруженности лопастей, нахо- дящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи	43
2.2.5. Значения параметров для пяти сечений лопасти	43
2.2.6. Коэффициент подъемной силы периферийного сечения	44
2.2.7. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения	44
2.2.8. Коэффициент подъемной силы корневого сечения	44
2.2.9. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения	44
2.2.10. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) промежуточного сечения	45
2.2.11. Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения	45
2.2.12. Номер i_k элемента на восходящей ветви исходных значе- ний C_{y_a} , ближайшего по величине к $C_{y_a k}$ и большего его	46
2.2.13. Угол атаки промежуточного сечения	46
2.2.14. Угол притекания сечения лопасти	47
2.2.15. Угол заклинения (установки) сечения лопасти	47
2.2.16. Итог расчета относительных параметров геометрии лопасти ..	47
2.3. Построение характеристик ветроколеса	48
2.3.1. Определение массива углов атаки $\alpha_{цикл}$, следующих через равный шаг	48

2.3.2. Определение массивов $C_{y_a \text{ цикл}}$ и $\mu_{a \text{ цикл}}$, соответствующих массиву $\alpha_{\text{цикл}}$	50
2.3.3. Построение элементарного момента в зависимости от коэффициента быстроходности для каждого сечения лопасти	51
2.3.4. Построение коэффициентов быстроходности конца лопасти, создаваемых элементарными лопастями, расположенными на радиусах r_k	57
2.3.5. Построение одномерного массива коэффициентов быстроходности Z_h	58
2.3.6. Построение моментной характеристики	59
2.3.7. Построение мощностной характеристики	62
2.4. Коэффициент силы лобового давления на колесо	63
2.4.1. Коэффициент силы лобового давления B при расчетной скорости ветра	63
2.4.2. Коэффициент силы лобового давления $B_{\text{пор}}$ при порыве ветра	64
2.4.3. Сравнение B и $B_{\text{пор}}$, определение коэффициента перегрузки	66
2.5. Графическое представление расчетных характеристик ветроколеса	66
2.6. Выбор рабочей точки характеристики	68
2.7. Расчет размерных параметров ветроколеса	68
2.7.1. Исходные данные расчета размерных параметров	68
2.7.2. Расчетные параметры ветроколеса	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
ПРИЛОЖЕНИЕ. Коэффициенты профильного сопротивления и подъемной силы двадцатипроцентного профиля «Эсперо» в диапазоне углов атаки от -10 до 20 градусов по данным работы [8]	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ни у кого уже нет сомнений в том, что использование солнечной, ветровой и других видов энергии будет непрерывно возрастать. В связи с этим подготовка специалистов в области возобновляемых нетрадиционных источников энергии становится важнейшим государственным делом. Однако нужно признать, что такая подготовка сопряжена с определенными трудностями, в числе которых следовало бы назвать недостаток опыта и отсутствие учебно-методической литературы.

Цель настоящего пособия — сделать первый шаг к устранению этих трудностей и предоставить студентам возможность ознакомиться с одним из упрощенных инженерных методов аэродинамического расчета современных ветроагрегатов. Теория ветродвигателей, развивающаяся несколько десятилетий, еще далека от своего завершения. Более того, можно сказать, что не существует достаточно точных и надежных методов аэродинамического расчета ветроагрегатов.

Следует отметить, что темпы развития ветроэнергетики далеко не соответствуют возможностям, достигнутым в области современного машиностроения, и, самое главное, далеки от удовлетворения запросов потребителей. Это обусловлено несколькими причинами. Среди причин технического характера на первое место можно поставить общий недостаток всех ветроустановок: низкий запас кинетической энергии, приходящейся на единицу объема рабочего тела, т.е. атмосферного воздуха. Построение единичных ветроагрегатов большой мощности представляет собой сложную инженерную задачу. Более того, стоимость 1 кВт·ч энергии, производимого ветродвигателем, существенно выше стоимости энергии, получаемой за счет сжигания жидкого топлива и энергии атомных электростанций.

Следующим отрицательным фактором в системе использования ветровой энергии является неравномерность ее поступления, обусловленная наличием периодов затишья. Есть и другие моменты негативного характера. Вместе с тем применение энергии ветра имеет много преимуществ. И прежде всего ее потенциальные запасы соизмеримы, а теоретически превосходят суммарную мощность всех работающих электростанций.

Для иллюстрации сказанного можно привести данные, касающиеся возможностей использования энергии ветра на территории Германии [1]. Исходя из того, что ветроэнергетические ресурсы составляют 1,5 ... 2,5 % солнечной энергии, поступающей на Землю, на территории $2,5 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ это соответствует примерно $1,5 \cdot 10^4 \text{ ТВт} \cdot \text{ч/г}$. И хотя из этого количества практически можно извлечь только около 220 ТВт·ч/г, уже этого было бы достаточно для того, чтобы удовлетворить до 65% потребностей страны в электроэнергии.

Энергия ветра относится к числу возобновляемых. Источник данной энергии неисчерпаем до тех пор, пока существуют солнечная радиация и атмосфера.

Важным достоинством ветроагрегатов является то, что они относятся к числу наиболее чистых с экологической точки зрения источников энергии.

Современные ветродвигатели довольно просты в обслуживании. Они могут быть установлены в любых отдаленных районах, куда трудно доставить топливо или другие источники энергии. Все перечисленные выше факторы могут стать решающими в определении перспектив энергетики будущего. Дальнейшее развитие ветроэнергетики невозможно без широкого развития научных исследований в данном направлении.

Вплоть до конца XIX века исследования Д. Бернулли, Л. Эйлера, д'Аламбера и других известных ученых не выходили за рамки общего рассмотрения течения воздуха в окрестности ветроколеса. Первые попытки аналитического описания течения, близкого по характеру к тому, которое реализуется при обтекании лопасти ветроколеса, были связаны с исследованиями гребного винта.

В начале XX века бурно развивавшиеся кораблестроение и воздухоплавание потребовали совершенных и надежных теоретических и экспериментальных данных от аэрогидродинамиков. Основным аэродинамическим элементом ветродвигателя является, как известно, лопасть с характерным поперечным сечением (профилем). В связи с этим развитие теории профиля крыла, начало которому было положено в работах Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина, помогло создать прочную основу современной аэродинамики ветродвигателей.

В 1912 году вышла из печати работа Н. Е. Жуковского «Вихревая теория гребных винтов». Это была одна из первых основополагающих работ, построенных на прочной теоретической базе. В дальнейшем теория гребного винта в приложении к расчету ветродвигателей была изложена в основополагающих работах Н. Е. Жуковского (1919 г.), Г. Х. Сабина (1923 г.), А. Бетца (1927 г.). Труды этих выдающихся ученых была создана теория так называемой идеальной модели ветроколеса, опирающаяся на общие законы механики.

В дальнейшем исследования были сосредоточены на поиске способов учета очень сложных реальных явлений, связанных с процессами обтекания ветроколеса, таких как трение, концевые эффекты и т.п. В послевоенное время активное развитие вертолетостроения способствовало расширению знаний в теории винта.

В последней четверти двадцатого столетия вопросы аэродинамики ветродвигателей были обобщены и изложены в ряде публикаций [2, 3]. Развитие теоретических исследований способствуют регулярно проводимые конференции по возобновляемым источникам энергии.

Можно считать, что к настоящему времени классическая теория ветродвигателя близка к своему завершению. Ее использование позволило решить ряд новых задач, включая отдельные вопросы оптимального проектирования. Тем не менее классическая теория идеального и реального ветродвигателя может рассматриваться только первым приближением в изучении сложной физической картины течения газа в окрестности рабочих элементов ветроагрегата. Она не применима для исследования ортогональных ветродвигателей.

Наиболее эффективным путем дальнейшего изучения проблемы является применение численных методов решения и анализа системы исходных дифференциальных уравнений и соответствующих начально-краевых задач, отражающих нестационарный характер течения газа и его взаимодействия с основными рабочими органами. При этом, зачастую, уже нельзя ограничиваться предположениями о том, что поток является потенциальным, невязким и т.п.

В данном учебном пособии описана приближенная инженерная методика аэродинамического расчета ветротурбины пропеллерного типа, которая в ветроустановке с горизонтальной осью вращения (см. рис. 1) преобразует энергию ветра в механическую и электрическую энергию.

Ветротурбина содержит рабочие лопасти, имеющие в сечениях соответствующий аэродинамический профиль крыла самолета. Следуя струйной теории идеального винта [4], разработан метод расчета, в основе которого лежит решение нелинейных уравнений и определенных интегралов численными методами. В результате расчета при заданных мощности и скорости ветра находятся основные размеры ветротурбины, включая геометрические параметры лопастей — углы установки профилей и координаты узловых точек их контуров.

В пособии также изложен метод автоматизированного определения энергетических характеристик ветротурбин при различных углах установки лопастей.

Приведен пример расчета.

Пособие дает возможность студенту спроектировать ветротурбину для ветроэлектрической установки мощностью 0,5 ... 100 кВт.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

D — внешний диаметр колеса (рис. 1), м;

R — внешний радиус колеса (рис.1), м;

r — радиус расположения промежуточного сечения лопасти (рис. 1), м;

dr — приращение радиуса (рис. 1), м;

r_0 — радиус расположения начального (корневого) сечения лопасти (рис.1), м;

$\vec{V} = V \cdot \vec{V}^0$ — скорость ветра, м/с;

\vec{V}^0 — единичный вектор в направлении \vec{V} ;

$\vec{u} = u \cdot \vec{u}^0 = \omega r \cdot \vec{u}^0$ — окружная скорость, м/с;

\vec{u}^0 — единичный вектор в направлении \vec{u} ;

ω — угловая скорость ветроколеса, 1/с;

\vec{W} — относительная скорость, м/с;

$z = \frac{u}{V} = \frac{\omega r}{V}$ — коэффициент быстроходности на промежуточном радиусе;

$z_R = \frac{U}{V} = \frac{\omega R}{V}$ — коэффициент быстроходности на конце лопасти;

$z_u = ctg\beta = \frac{u + u_1}{V - v_1}$ — число относительных модулей (рис. 2);

v_1 — уменьшение (потеря) осевой скорости потока (рис.2), м/с;

u_1 — окружная скорость кольцевой струи в плоскости ветроколеса (рис.2), м/с;

β — угол притекания, т.е. угол относительной скорости \vec{W} с плоскостью вращения колеса (рис.2), град.;

α — угол атаки (рис. 2), град.;

φ — угол заклинения (установки) лопасти (рис.2), град.;

b — хорда лопасти (рис. 3), мм;

c — максимальная толщина профиля (рис.3), мм;

\vec{R} — аэродинамическая сила воздействия на лопасть (рис. 2), Н;

\vec{X}_a, \vec{Y}_a — проекции силы \vec{R} на оси скоростной системы координат $X_a O Y_a$ (рис. 2), Н;

$\vec{Q}_{oc}, \vec{R}_{окр}$ — проекции силы \vec{R} соответственно на ось колеса и на окружное направление (рис. 2), Н;

$C_{y1} = \frac{2Q_{oc}}{S\rho V^2}$ — коэффициент осевой составляющей силы \vec{R} (рис. 2);

$C_{x_a} = \frac{2X_a}{S\rho V^2}$ — коэффициент профильного сопротивления;

$C_{y_a} = \frac{2Y_a}{S\rho V^2}$ — коэффициент подъемной силы;

$S = b \cdot l$ — площадь лопасти в плане, м²;

l — длина лопасти (рис. 1), м;

ρ — плотность воздуха, кг/м³;

$\mu_a = \frac{C_{x_a}}{C_{y_a}}$ — коэффициент обратного аэродинамического качества;

$e = \frac{v_1}{V}$ — коэффициент торможения потока;

$S_{эл} = b \cdot dr$ — площадь элементарной лопасти в плане, м²;

n — частота вращения колеса, об/мин;

N — мощность ветроколеса, Вт;

M — крутящий момент, Н·м;

C_p — коэффициент мощности;

C_m — коэффициент момента;

P — сила лобового давления на колесо, Н;

$B = \frac{8P}{\rho V^2 \pi D^2}$ — коэффициент лобового давления;

i_l — число лопастей;

$ЦСП$ — центр совмещения профилей (рис. 3);

$ЦТ$ — центр тяжести профиля (рис. 3);

$\bar{r} = \frac{r}{R}$ — относительный радиус расположения сечения;

$\bar{r}_0 = \frac{r_0}{R}$ — относительный радиус расположения корневого сечения лопа-

сти;

$\bar{d}_0 = \bar{r}_0 = \frac{d_0}{D}$ — относительный диаметр расположения корневых сечений

лопасти;

d_0 — диаметр расположения корневых сечений лопастей, м;

$\bar{b} = \frac{b}{R}$ — относительная в долях радиуса хорда профиля;

$C_{нагр} = i_l \bar{b} C_{y_a}$ — коэффициент суммарной нагруженности сечений

лопастей, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи.

1. МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Физическая картина возмущенного течения в окрестности ветроколеса довольно сложная. При прохождении через плоскость вращения воздушный поток получает значительные возмущения. При этом появляется окружная скорость U , которая равна нулю в набегающем потоке, а продольная скорость V уменьшается. Вообще говоря, можно выделить и другие режимы работы ветроколеса или винта, например режим пропеллера. В этом случае, наоборот, продольная скорость в возмущенном течении за винтом будет больше за счет подвода к потоку механической энергии. Свои особенности имеет поле течения около винта вертолета. Мы же фактически будем иметь дело только с такими режимами, когда винт или ветроколесо получает энергию от набегающего потока. При этом давление изменяется скачкообразно при переходе через плоскость вращения ветроколеса, что связано с потерей механической энергии потока и передачей ее винту. На большом удалении вверх и вниз по потоку давление совпадает с атмосферным. Элементарными вычислениями можно показать, что подводимая к ветроколесу энергия в единицу времени пропорциональна кубу скорости набегающего потока:

$$N_0 = \frac{\rho V_0^3}{2} F_1,$$

где V_0 – скорость набегающего потока; F_1 – площадь, ометаемая винтом.

За колесом образуется сложная вихревая система. В этой системе можно выделить, по крайней мере, три ярко выраженные группы вихрей: присоединенные вихри на лопастях, свободный геликоидный вихрь, образующийся при перетекании потока через концы лопастей, и осевой вихрь, возникающий за счет закрутки течения на ветроколесе. В реальном течении вся возмущенная область заполнена вихрями, что представляет значительные трудности при физическом анализе и математическом расчете течения.

Первые теоретические разработки в области исследования ветродвигателей базировались на так называемой импульсной теории, так как определение сил и моментов, действующих на ротор, основывалось на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Понятно, что такая теория не могла дать информацию о геометрических параметрах ветроколеса, его конструкции и режимах работы, однако с ее помощью была получена оценка КПД ветроколеса и скорости потока.

В дальнейшем была создана теория элементарных струй, представившая собой объединение результатов импульсной теории идеального ветроколеса и достаточно развитой в настоящее время теории крыла [4]. На этой основе удастся значительно расширить изучение и описание физических процессов обтекания ветроколеса. Для этого, с одной стороны, силы, действующие на ветроколесо, определяются путем изучения течения в следе на базе импульс-

ной теории идеального ветродвигателя, а с другой – эти же силы определяются из соотношений для профиля каждой лопасти. Выражения для этих сил содержат неизвестные индуктивные скорости. Приравнение соотношений для сил, полученных обоими методами, приводит к замкнутой системе уравнений относительно индуктивных скоростей.

Зная индуктивные скорости u_1 и v_1 в потоке, вычисляются:

- коэффициент осевой силы

$$C_{y_a} = 8 \int_{\bar{r}_k}^1 (1 - \bar{v}_1) \bar{v}_1 \bar{r} d\bar{r},$$

- коэффициент движущего момента

$$C_M = 8 \int_{\bar{r}_k}^1 (1 - \bar{v}_1) \bar{u}_1 \bar{r}^2 d\bar{r},$$

- коэффициент мощности ветроколеса

$$C_P = 8z_R \int_{\bar{r}_k}^1 (1 - \bar{v}_1) \bar{u}_1 \bar{r}^2 d\bar{r},$$

где $\bar{v}_1 = \frac{v_1}{V}$; $\bar{u}_1 = \frac{u_1}{V}$,

что позволяет проектировать ветродвигатели с необходимыми параметрами.

Таким образом, теория элементарных струй учитывает неравномерное распределение скоростей протекания воздушного потока через ветроколесо, связь этих скоростей с геометрическими параметрами лопастей и их аэродинамическими характеристиками.

В настоящем пособии предлагается метод расчета, основанный на двух уравнениях связи, описанных в работах [5, 6] и вытекающий из схематично описанного выше метода элементарных струй. Первое уравнение связи вытекает из того, что осевая составляющая силы реакции потока на элементарные лопасти, находящиеся в зоне действия элементарной кольцевой струи (рис. 1), равна силе от воздействия разности давлений перед и за колесом на площадь сечения элементарной кольцевой струи плоскостью вращения колеса. Следствием этой связи является уравнение

$$i_l \bar{b} C_{y_a} = \frac{8\pi \bar{r} e}{(1+e)(1-e)^2 (z_u + \mu_a) \sqrt{1+z_u^2}}. \quad (1)$$

Второе уравнение связи отражает теорему об изменении момента количества движения, которая в применении к ветроколесу формулируется сле-

дующим образом: момент относительно оси ветряка аэродинамических сил, действующих на элементарные лопасти (рис. 1, 2), равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, получаемого элементарной кольцевой струей, увлеченной ветряным колесом. Следствием второго уравнения связи является

$$z = z_u(1 - e) - \frac{e}{1 + e} \cdot \frac{1 - \mu_a z_u}{z_u + \mu_a}. \quad (2)$$

Уравнения связи (1) и (2) — основа для аэродинамического расчета ветроколеса.

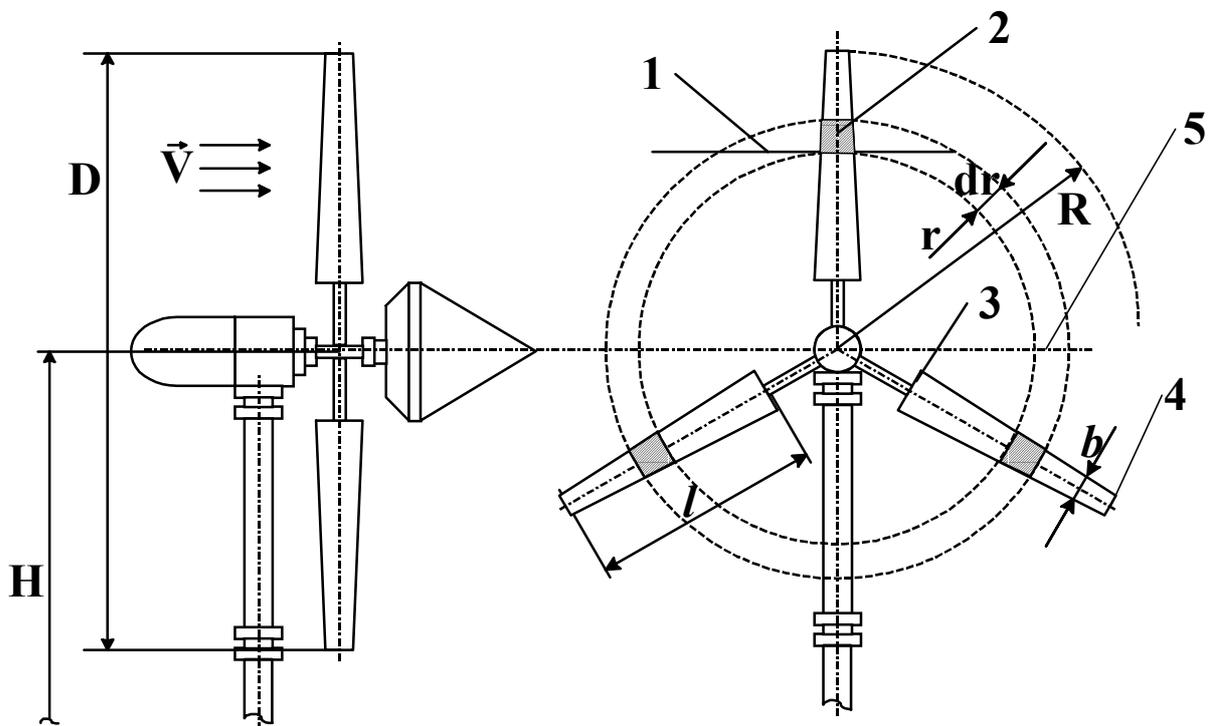


Рис. 1. Ветроколесо пропеллерного типа:
 1 — промежуточное сечение;
 2 — элементарная лопасть;
 3 — корневое сечение;
 4 — периферийное сечение;
 5 — элементарная кольцевая струя

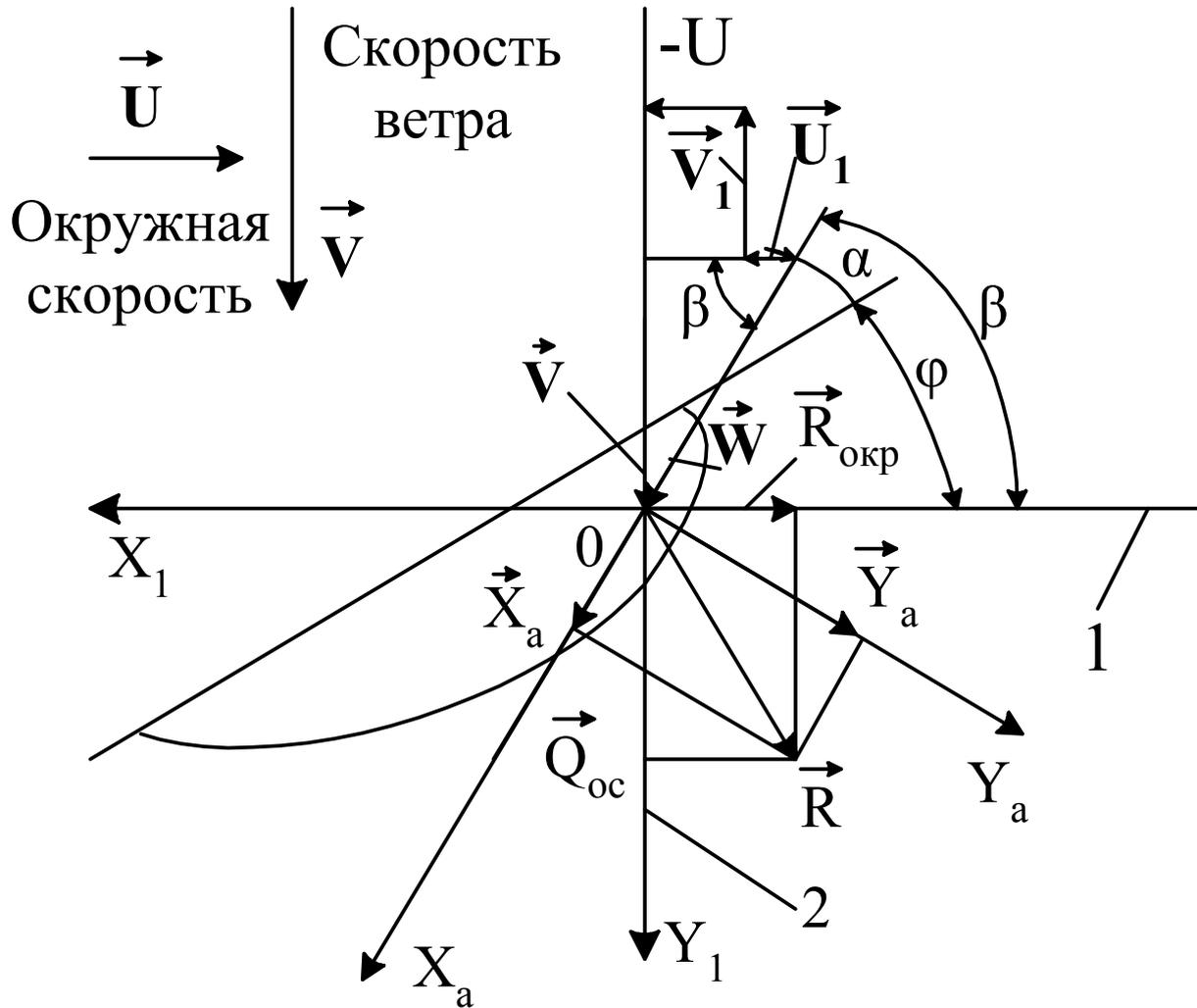


Рис. 2. Профиль лопасти, план скоростей и силы реакции:
 1 – плоскость вращения;
 2 – ось колеса

1.1. Исходные данные расчета

К исходным данным расчета относятся задаваемые ниже параметры (табл.1), а также координаты выбранного профиля (рис. 3) и его аэродинамические характеристики. В качестве примера был выбран профиль типа «Эс-перо» пятнадцатипроцентной толщины, его аэродинамические и геометрические параметры приведены в табл. 1 и 2.

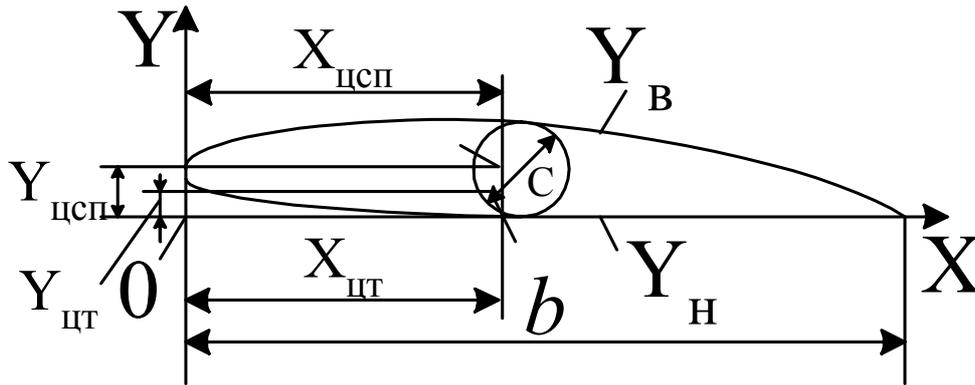


Рис. 3. Геометрические параметры профиля лопасти

Таблица 1

Условные обозначения исходных данных расчета
и их величины для конкретного примера

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Величина
Номинальная мощность	N	Вт	1000
Расчетная скорость ветра	V	м/с	7,5
Скорость ветра при порыве	$V_{пор.}$	м/с	25
Количество лопастей	i_l	о.е.	3
КПД электрический	$\eta_{эл}$	о.е.	0,6
КПД механический	$\eta_{мех}$	о.е.	0,9
Плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях	ρ	кг/м ³	1,2
Предварительно заданный коэффициент быстроходности на конце лопасти в рабочей точке характеристики ветроколеса	z_R	о.е.	6,5
Относительный радиус расположения корневого сечения лопасти	\bar{r}_0	о.е.	0,2
Число сечений лопасти	n	о.е.	5
Число точек деления задаваемого интервала коэффициента торможения для выбора его оптимального значения	n_e	о.е.	6
Точность при решении первого уравнения связи	ε	о.е.	0,1

Таблица 2

**Аэродинамические характеристики профиля типа «Эсперо»
пятнадцатипроцентной толщины (по данным Г. Х. Сабинина [7])**

Наименование параметров	Угол атаки	Коэффициент подъемной силы	Коэффициент обратного аэродинамического качества	
Обозначение	α	C_{y_a}	μ_a	
Единицы измерения	град.	о.е.	о.е.	
Номера точек характеристик	1	- 6°	0,10	0,1250
	2	- 4°	0,30	0,0417
	3	- 2°	0,50	0,0250
	4	0°	0,65	0,0192
	5	1°	0,76	0,0197
	6	2°	0,85	0,0182
	7	4°	1,03	0,0194
	8	6°	1,12	0,0268
	9	8°	1,16	0,0410
	10	10°	1,18	0,0593
	11	12°	1,16	0,0862
	12	14°	1,13	0,1217
	13	16°	1,10	0,1568
	14	18°	1,05	0,2071
	15	20°	0,99	0,2626

Таблица 3

Безразмерные координата профиля типа "Эсперо"

Номера точек	$\bar{x} = (x/b) \cdot 100\%$	$\bar{y}_в = (y_в/c) \cdot 100\%$	$\bar{y}_н = (y_н/c) \cdot 100\%$
1	0	41,7	41,7
2	1,25	53,8	27,9
3	2,5	60,6	22,9
4	5	69,4	16,6
5	10	82,2	11,1
6	20	96,0	5,5
7	30	100,6	2,3
8	40	100	0
9	50	94,5	0
10	60	83,2	0
11	70	69,4	0
12	80	51,0	0
13	90	30,7	0
14	97,5	11,6	0
15	100	2,3	0

Координаты центра тяжести (*ЦТ*):

$$\begin{cases} x_{ЦТ} = 0,352b; \\ y_{ЦТ} = 0,4c; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (x_{ЦТ}/b) \cdot 100\% = 35,2\%; \\ (y_{ЦТ}/c) \cdot 100\% = 40\%. \end{cases}$$

Координаты центра совмещения профилей (*ЦСП*):

$$\begin{cases} x_{ЦСП} = 0,352b; \\ y_{ЦСП} = 0,5c; \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (x_{ЦСП}/b) \cdot 100\% = 35,2\%; \\ (y_{ЦСП}/c) \cdot 100\% = 50\%. \end{cases}$$

Для выбранного профиля «Эсперо» пятнадцатипроцентной толщины величина $c = 0,15b$.

1.2. Методика расчета геометрии лопасти

1.2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока

Задаем несколько значений коэффициента торможения потока e через равный шаг от 0,27 до 0,42:

$$e_k = 0,27 + 0,15 \cdot \frac{k_e - 1}{n_e - 1}, \quad (3)$$

где n_e — число точек деления интервала определения e ; $k_e = 1, 2, \dots, n_e$.

Определяем значения коэффициента идеальной мощности, соответствующие найденным e_k :

$$C_{P_{ид}} = 4e(1 - e)/(1 + e). \quad (4)$$

Находим значения коэффициента концевых потерь \overline{T}_j , соответствующих e_k :

$$\overline{T}_j = \frac{e}{1 - e} \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1 - e}{z_R} \right)^2}}{(1 + e) i_L z_R} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{i_L z_R}{\pi(1 - e/2)} \right)^2}} \right). \quad (5)$$

Определяем значения коэффициента профильных потерь, соответствующих e_k :

$$\overline{T_p} = 2\mu_{a_{\min}} \left(\frac{1-e}{z_R} + \frac{z_R}{3(1-e)} \right), \quad (6)$$

где $\mu_{a_{\min}}$ - минимальное значение μ_a из таблицы аэродинамических характеристик профиля (см. табл. 2).

Вычисляем коэффициент потерь на кручение струи.

Средний по высоте лопасти коэффициент быстроходности

$$z_{cp} = \frac{1+r_0}{2} z_R. \quad (7)$$

Средний по высоте лопасти относительный КПД элементарного ветряка

$$\eta_{отн} = \frac{1 - \mu_{a_{\min}} \cdot z_{cp} / (1-e)}{1 + \mu_{a_{\min}} (1-e) / z_{cp}}, \quad (8)$$

где величина $\eta_{отн}$ определяется для каждого e_k .

Итак, коэффициент потерь на кручение струи

$$\overline{T_m} = C_{P_{уд}} \cdot \eta_{отн}^2 \cdot \frac{\ln(1/\overline{r_0})}{2z_R^2}, \quad (9)$$

где величина $\overline{T_m}$ вычисляется для каждого e_k .

Определим предварительный коэффициент мощности:

$$C_{P_{предв}} = C_{P_{уд}} ((1 - \overline{d_0^2}) - \overline{T_j} - \overline{T_p} - \overline{T_m}), \quad (10)$$

где величина $C_{P_{предв}}$ определяется для каждого e_k .

С помощью сравнения найденных величин $C_{P_{предв}}$ вычисляем их максимальный элемент и соответствующий этому значению элемент e_k из заданного ряда значений e_k , идущих через равный шаг. Этот элемент и является оптимальным значением e_k , т. е. таким образом мы определили e_{opt} .

1.2.2. Методика расчета относительных параметров геометрии лопасти

Принимается, что коэффициент торможения e равен e_{opt} .

Относительный радиус расположения сечения лопасти

$$\bar{r}_K = \bar{r}_0 + (1 - \bar{r}_0)(K - 1)/(n - 1), \quad (11)$$

где n — число сечений лопасти; K — номер сечения.

Коэффициент быстроходности сечения

$$z_K = z_R \cdot \bar{r}_K. \quad (12)$$

Число относительных модулей сечения

$$z_{u_K} = z_K \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + C_{P_{u0}} / z_K^2}}{2(1 - e)}, \quad (13)$$

где $e = e_{opt}$, а под $C_{P_{u0}}$ подразумевается значение $C_{P_{u0}}$, вычисленное для $e = e_{opt}$ по формуле (4).

Выражение (13) является следствием второго уравнения связи (2) и получено путем разрешения уравнения (2) относительно Z_u с учетом малости величины μ_a .

Коэффициент суммарной нагруженности $C_{нагр_K}$ сечений лопасти, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи, определяется по первому уравнению связи (1). С учетом принятого обозначения $C_{нагр} = i_{л} \bar{b} C_{y_a}$ имеем

$$C_{нагр_K} = \frac{8\pi \bar{r}_K e}{(1 + e)(1 - e)^2 (z_u + \mu_a) \sqrt{1 + z_u^2}}, \quad (14)$$

где $e = e_{opt}$; $\mu_a = \mu_{a \min}$.

Принимается, что коэффициент подъемной силы периферийного сечения равен значению C_{y_a} при $\mu_{a \min}$, взятом из аэродинамических характеристик профиля (см. табл. 2 для выбранного профиля):

$$C_{y_a \text{ периф}} = C_{y_a}(\mu_{a \min}). \quad (15)$$

Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения

$$\bar{b}_{\text{периф}} = C_{\text{нагр}_{\text{периф}}} / (i_{\text{л}} \cdot C_{y_a \text{периф}}), \quad (16)$$

где индекс "периф" означает номер сечения, равного n (n — число сечений).

Коэффициент подъемной силы корневого сечения принимается обычно

$$C_{y_a \text{корн}} = (0,9 \dots 1,0) \cdot C_{y_a \text{max}}, \quad (17)$$

где $C_{y_a \text{max}}$ — максимальное значение коэффициента подъемной силы, выбранное из табл. 2.

Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения

$$\bar{b}_{\text{корн}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{корн}}}}{i_{\text{л}} C_{y_a \text{корн}}}, \quad (18)$$

где индекс "корн" означает номер сечения, равного 1.

Задаемся линейным законом изменения относительной хорды вдоль лопасти

$$\bar{b}_k = \bar{b}_{\text{корн}} + (\bar{b}_{\text{периф}} - \bar{b}_{\text{корн}}) \cdot (k - 1) / (n - 1), \quad (19)$$

где n — число сечений лопасти.

Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения

$$C_{y_a k} = C_{\text{нагр}_k} / (i_{\text{л}} \cdot \bar{b}_k). \quad (20)$$

Определим угол атаки α_k , соответствующий найденному значению $C_{y_a k}$.

По табл. 2 (см. столбец C_{y_a}) на восходящей ветви значений ($C_{y_a} \leq C_{y_a \text{max}}$) находим C_{y_a} , ближайшее по величине к $C_{y_a k}$, но большее его. Пусть его номер в столбце таблицы будет i_k , тогда номер пре-

дыдущего элемента — $i_k - 1$. Произведем линейную интерполяцию на интервале $(C_{y_a}(i_k - 1), C_{y_a}(i_k))$ для определения α_k :

$$\alpha_k = \alpha(i_k - 1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \cdot \frac{C_{y_a k} - C_{y_a}(i_k - 1)}{C_{y_a}(i_k) - C_{y_a}(i_k - 1)}. \quad (21)$$

Угол притекания сечения лопасти

$$\beta_k = \arctg(1 / z_{u_k}). \quad (22)$$

Угол установки (заклинения) лопасти

$$\varphi_k = \beta_k - \alpha_k. \quad (23)$$

Итак, для каждого сечения лопасти имеем следующие параметры: относительный радиус расположения сечения, относительную (в долях наружного радиуса) хорду профиля, коэффициент подъемной силы, угол притекания, угол атаки, угол заклинения (угол установки) профиля.

Размерные параметры могут быть получены при построении характеристики ветроколеса и выборе рабочей точки на этой характеристике (см. подразд. 1.3 и 1.4).

1.3. Методика построения характеристик ветроколеса

1.3.1. Определение массива значений, следующих через равный шаг, независимого переменного — угла атаки $\alpha_{цикл}$

Последнее значение в массиве $\alpha_{цикл}$

$$\alpha_{кон} = \alpha(n_{табл}), \quad (24)$$

где $n_{табл}$ — число точек в табл. 2.

Целое число, близкое к $\alpha_{кон}$:

$$\alpha_{кон_{цел}} = E_1(\alpha_{кон} \cdot 0,99), \quad (25)$$

где функция E_1 — означает целую часть от числа.

Начальное значение массива варьируемого угла атаки α

$$\alpha_{нач} = 3 - \varphi_n. \quad (26)$$

Целая часть от $\alpha_{нач}$

$$\alpha_{нач_{цел}} = E_1(\alpha_{нач}).$$

Рассмотрим вариант $\alpha_{нач} < 0$.

Пусть Δ_1 означает разность

$$\Delta_1 = \alpha_{нач_{цел}} - \alpha_{нач} > 0. \quad (26a)$$

Затем сравниваем Δ_1 с величиной 0,5 и если $\Delta_1 > 0,5$, вычитаем 0,5 из $\alpha_{нач_{цел}}$. Назовем полученную величину $\alpha_{нач_{0,5}}$:

$$\alpha_{нач_{0,5}} = \alpha_{нач_{цел}} - 0,5. \quad (27)$$

Рассмотрим вариант $\alpha_{нач} > 0$.

Пусть Δ_2 означает разность

$$\Delta_2 = \alpha_{нач} - \alpha_{нач_{цел}} > 0. \quad (27a)$$

Сравниваем Δ_2 с величиной 0,5 и если $\Delta_2 > 0,5$, добавляем 0,5 к $\alpha_{нач_{цел}}$. Назовем полученную величину так же, как и в варианте для $\alpha_{нач} < 0$, то есть $\alpha_{нач_{0,5}}$:

$$\alpha_{нач_{0,5}} = \alpha_{нач_{цел}} + 0,5. \quad (28)$$

Определим число точек в полуоткрытом интервале $[\alpha_{нач_{0,5}}; \alpha_{кон_{цел}})$:

$$n_{шаг} = E_1((\alpha_{кон_{цел}} - \alpha_{нач_{0,5}}) / H_{al}) + 1. \quad (29)$$

Общее число точек массива

$$n_{ш} = n_{шаг} + 1. \quad (30)$$

Последняя точка массива

$$\alpha_{цикл}(n_{ш}) = \alpha_{кон}. \quad (31)$$

Для точек массива $\alpha_{цикл}$, идущих через равный шаг H_{al} :

$$\alpha_{цикл}(j) = \alpha_{нач_{0,5}} + H_{al} \cdot (j-1), \quad j = 1, 2, \dots, n_{шаг}. \quad (32)$$

Оцениваем разность

$$\Delta = \alpha_{цикл}(n_{ш}) - \alpha_{цикл}(n_{шаг}). \quad (33)$$

Если $\Delta > H_{al}$, то сдвигаем влево последнюю точку, если $\Delta < H_{al}$, то оставляем последнюю точку на месте. Итак, если $\Delta > H_{al}$, то

$$\alpha_{цикл}(n_{шаг}) = \alpha_{цикл}(n_{ш}) + H_{al}. \quad (34)$$

Таким образом, построен массив $\alpha_{цикл}(i_{ц})$, где $i_{ц} = 1, 2, \dots, n_{ш}$.

1.3.2. Определение массивов $C_{y_aцикл}$ и $\mu_{aцикл}$, соответствующих массиву $\alpha_{цикл}$

Каждое значение $\alpha_{цикл}(i_{ц})$ сравниваем с массивом α в таблице аэродинамических характеристик (см. табл. 2). Пусть номер элемента из массива α , ближайшего к $\alpha_{цикл}(i_{ц})$, но больший его, будет i_T . Тогда номер предыдущего элемента из массива α — $i_T - 1$.

Произведем линейную интерполяцию для определения $C_{y_aцикл}(i_{ц})$ и $\mu_{aцикл}(i_{ц})$:

$$C_{y_aцикл}(i_{ц}) = C_{y_a}(i_T - 1) + \frac{\alpha_{цикл}(i_{ц}) - \alpha(i_T - 1)}{\alpha(i_T) - \alpha(i_T - 1)} \cdot (C_{y_a}(i_T) - C_{y_a}(i_T - 1)); \quad (35)$$

$$\mu_{aцикл}(i_{ц}) = \mu_a(i_T - 1) + \frac{\alpha_{цикл}(i_{ц}) - \alpha(i_T - 1)}{\alpha(i_T) - \alpha(i_T - 1)} \cdot (\mu_a(i_T) - \mu_a(i_T - 1)). \quad (36)$$

1.3.3. Углы притекания сечения при вариации угла атаки

Угол притекания β равен

$$\beta_{k,j} = \varphi_k + \alpha_{цикл j}, \quad (37)$$

где φ_k — угол заклинения k -го сечения; $\alpha_{цикл j}$ — элемент в построенном массиве $\alpha_{цикл}$.

Таким образом, $\beta_{k,j}$ — матрица значений, k — номер строки матрицы, соответствующий номеру сечения лопасти, j — номер столбца матрицы, соответствующий номеру элемента из массива $\alpha_{цикл}$.

1.3.4. Число относительных модулей каждого сечения

Число относительных модулей

$$z_{u_{k,j}} = ctg \beta_{k,j}. \quad (38)$$

1.3.5. Определение коэффициента торможения из первого уравнения связи

Преобразуем уравнение (1) к виду

$$\frac{e}{(1+e)(1-e)^2} = A, \quad (39)$$

где

$$A = C_{y_a} \frac{(z_u + \mu_a) \sqrt{1 + z_u^2}}{8\pi r / (i_l b)} \quad (40)$$

правая часть преобразованного первого уравнения связи. Учитывая то, что μ_a — это элемент из одномерного массива $\mu_{a_{цикл}}$ с элементами $\mu_{a_{цикл j}}$,

C_{y_a} — элемент из одномерного массива $C_{y_{a_{цикл}}}$ с элементами $C_{y_{a_{цикл j}}}$,

z_u — элемент матрицы z_u с элементами $z_{u_{\kappa,j}}$, \bar{r} — элемент из одномерного массива с элементами \bar{r}_κ , выражение (40) для A перепишем так:

$$A_{\kappa,j} = C_{y_{a_{цикл}j}} \frac{(z_{u_{\kappa,j}} + \mu_{a_{цикл}j}) \sqrt{1 + z_{u_{\kappa,j}}^2}}{8\pi \bar{r}_\kappa / (i_l \bar{b}_\kappa)}. \quad (41)$$

Все величины, входящие в выражение для $A_{\kappa,j}$, определены, поэтому $A_{\kappa,j}$ — известные числа и образуют некоторую матрицу с элементами $A_{\kappa,j}$.
Уравнение (39) запишем в виде

$$\frac{e}{(1+e)(1-e)^2} - A = 0 \quad (42)$$

(пока опустим индексы κ, j).

Уравнение (42) решается методом деления отрезка пополам. Задается погрешность приближенного решения $\varepsilon > 0$. Определим нижнюю и верхнюю границы корней. Так как по определению коэффициент торможения e всегда больше нуля, то принимаем, что левой границей корней будет

$$e_{лев} = 0. \quad (43)$$

В качестве правой границы корней примем

$$e_{прав} = \frac{A}{1+A}. \quad (44)$$

Выражение (44) для $e_{прав}$ получено путем решения уравнения $\frac{e}{1-e} = A$, левая часть которого представляет собой функцию $f_1(e) = \frac{e}{1-e}$, имеющую тот же корень $e = 0$ и ту же особенность при $e \rightarrow 1 - 0$, но проходящую ниже функции $f_2(e) = \frac{e}{(1+e) \cdot (1-e)^2}$ (рис.4), входящей в уравнение (42), так как $f_1(e)$ получено из $f_2(e)$ путем умножения на выражение $1 - e^2$, меньшее единицы ($0 < e < 1$). Соответственно точки пересечения горизон-

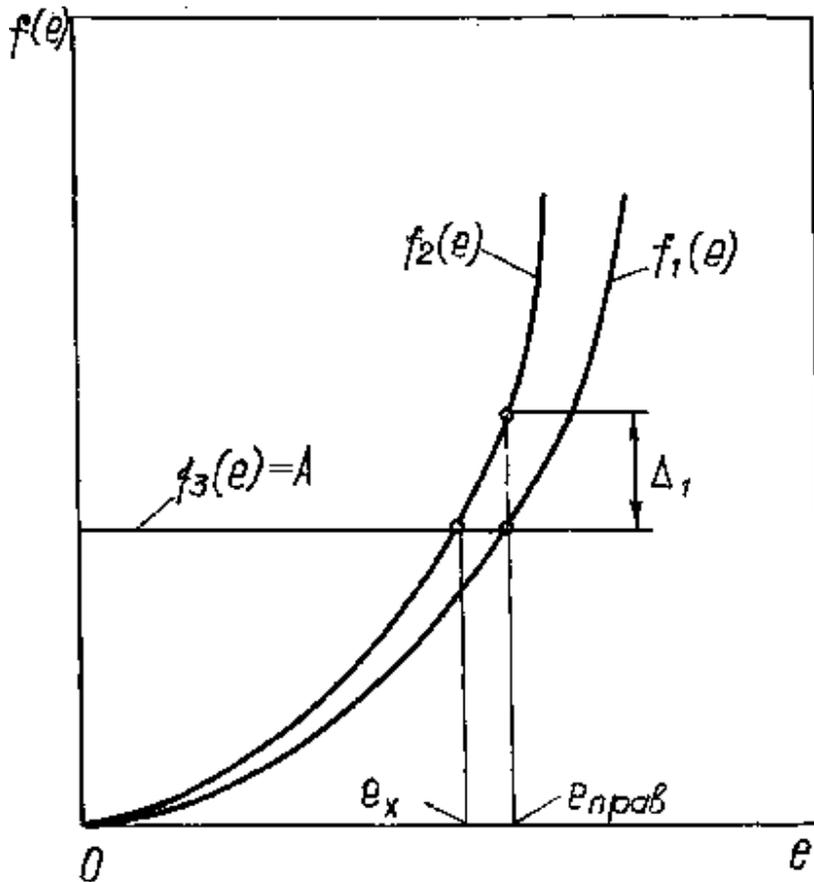


Рис. 4. Пример оценки границы корней уравнения при определении коэффициента торможения

гальной прямой $f_3(e) = A$ графиков функций $f_2(e)$ и $f_1(e)$ расположены: первая — левее, а вторая — правее (рис. 4). Назовем абсциссу точки решения уравнения (42) e_x (рис. 4). Обозначим через $F(e)$ левую часть уравнения (42):

$$F(e) = \frac{e}{(1+e) \cdot (1-e)^2} - A. \quad (45)$$

Определяем знаки функции F_e на левом и правом концах интервала $[e_{лев}; e_{прав}]$. Знак меняется с минуса на плюс, так как при $e = 0$ $F(0) = -A < 0$, поскольку $A > 0$, а при $e = e_{прав}$

$$F(e_{прав}) = f_2(e_{прав}) - A = f_1(e_{прав}) + \Delta_1 - A = \Delta_1,$$

так как $f_1(e_{\text{прав}}) = A$ — по условию, а Δ_1 — положительная разница между $f_2(e_{\text{прав}})$ и $f_1(e_{\text{прав}})$ (см. рис. 4).

Вычисляем разность d между правым и левым концами интервала:

$$d = e_{\text{прав}} - e_{\text{лев}}. \quad (46)$$

Сравниваем d с заданной погрешностью ε . Если $d > \varepsilon$, делим интервал пополам. Первое приближение искомого корня

$$e_{1_x} = 0,5 \cdot (e_{\text{прав}} + e_{\text{лев}}). \quad (47)$$

Определяем знак $F(e)$ при $e = e_{1_x}$. Сравниваем знак $F(e_{1_x})$ со знаком $F(e)$ на левом конце интервала, то есть с минусом. Если $F(e_{1_x}) < 0$, то присваиваем левому концу нового интервала значение e_{1_x} , т.е. $e_{\text{лев}} = e_{1_x}$, а правый оставляем прежним. Сравниваем величину разности d по (46) с заданным ε . Если точность не достигнута, идем на новое деление интервала и получаем второе приближение:

$$e_{2_x} = 0,5 \cdot (e_{\text{прав}} + e_{\text{лев}}). \quad (48)$$

Если же знак $F(e_{1_x})$ совпадает со знаком функции на правом конце интервала, то есть $F(e_{1_x}) > 0$, то присваиваем правому концу нового интервала значение $e_{\text{прав}} = e_{1_x}$, а левый оставляем прежним. Строим разность d по (46), сравниваем ее с погрешностью ε и если требуемая точность не достигнута, идем на новое деление отрезка $[e_{\text{лев}}; e_{\text{прав}}]$ пополам в соответствии с (48).

Процесс прерывается, когда заданная точность достигнута. Тогда корню можно присвоить левое либо правое значение концов интервала. Обычно точность такого типа соотношений при ε порядка 0,1 достигается за две–три итерации. Итак, найден корень уравнения (42) — e_x , однако, учитывая то, что A — это элемент матрицы $A_{k,j}$, решение уравнения (42) e_x также является матрицей коэффициентов торможения с элементами $e_{k,j}$, где k — номер сечения лопасти, j — номер элемента массива варьируемого параметра α .

1.3.6. Приведенный элементарный относительный крутящий момент

Используя выражение для элементарного окружного усилия $dQ_{окр}$, создаваемого суммарной аэродинамической силой, действующей на элементарные лопасти (см. рис. 1 и 2),

$$dQ_{окр} = i_l \cdot b \cdot dr \cdot \frac{\rho}{2} W^2 \cdot (C_{y_a} \cdot \sin \beta - C_{x_a} \cdot \cos \beta), \quad (49)$$

выражение C_{x_a} через C_{y_a} ($C_{x_a} = \mu_a \cdot C_{y_a}$), зависимость для относительной скорости W^2

$$W^2 = \frac{(V - v_1)^2}{\sin^2 \beta} = V^2 \cdot \frac{(1 - e)^2}{\sin^2 \beta}, \quad (50)$$

связь между $ctg \beta$ и числом z_u ($z_u = ctg \beta$), а также выражение $\sin \beta$ и $\cos \beta$ через $ctg \beta$ для элементарного момента относительно оси ветряка, имеем

$$dM = dQ_{окр} \cdot r = 4\pi r^2 \cdot \rho \cdot \frac{e}{1 + e} \cdot V^2 \cdot \frac{1 - \mu_a z_u}{z_u + \mu_a} \cdot dr. \quad (51)$$

Здесь использовано также первое уравнение связи (1) для исключения из соотношения (49) выражения $i_l b C_y$.

В относительных единицах

$$d\bar{M} = \frac{dM}{\pi R^3 \rho \frac{V^2}{2}} = 8\bar{r}^2 \cdot \frac{e}{1 + e} \cdot \frac{1 - \mu_a z_u}{z_u + \mu_a} \cdot d\bar{r}. \quad (52)$$

Назовем приведенным относительным элементарным моментом величину отношения $d\bar{M}$ к $d\bar{r}$:

$$\bar{M}^* = \frac{d\bar{M}}{d\bar{r}} = 8\bar{r}^2 \cdot \frac{e}{1 + e} \cdot \frac{1 - \mu_a z_u}{z_u + \mu_a}. \quad (53)$$

Приведенный относительный элементарный момент представляет собой матрицу с элементами $\bar{M}_{k,j}^*$, так как в правой части выражения (53) величины зависят от k и j .

1.3.7. Коэффициент быстроходности конца лопасти, создаваемый элементарными лопастями, расположенными на радиусах r_k , при различных углах атаки

По второму уравнению связи (2) и с учетом того, что $z_R = \frac{z}{\bar{r}}$, получаем

$$z_{R_{k,j}} = \frac{z_{u_{k,j}} \cdot (1 - e_{k,j}) - \frac{e_{k,j}}{z_{u_{k,j}} \cdot (1 + e_{k,j})}}{\bar{r}_k}, \quad (54)$$

где $z_{u_{k,j}}$ определено по выражению (38).

Имеем матрицу элементов $z_{R_{k,j}}$.

1.3.8. Итог построения трех матриц

Итак, построены три матрицы с элементами $e_{k,j}$, $\bar{M}_{k,j}^*$ и $z_{R_{k,j}}$, где первый индекс k , означает номер сечения лопасти, а второй j — номер элемента из массива варьируемого угла атаки α .

1.3.9. Построение одномерного массива коэффициентов быстроходности z_h конца лопасти

Для получения зависимости суммарного относительного момента от коэффициента z_R для всех сечений лопасти необходимо иметь значения величины \bar{M}^* при одном и том же z_R . Для этого прежде всего строится одномерный массив z_h величин, идущих через равный шаг в диапазоне значений элементов матрицы $z_{R_{k,j}}$.

Определяются минимальное и максимальное значения z_R из всех элементов матрицы $z_{R_{k,j}}$:

$$z_{R\min} = \min(z_{R_{k,j}}); \quad z_{R\max} = \max(z_{R_{k,j}}).$$

Присваиваем первому элементу одномерного массива минимальное значение элементов матрицы z_R :

$$z_h(1) = z_{R\min}. \quad (55)$$

Определяется целое число, ближайшее к $z_{R\min}$, но большее его:

$$z_{\min_{цел}} = E_1(z_{R\min}) + 1, \quad (56)$$

где E_1 означает целую часть числа.

Принимаем, что $z_{\min_{цел}}$ — вторая точка массива, т. е.

$$z_h(2) = z_{\min_{цел}}. \quad (57)$$

Находим целое число, ближайшее к $z_{R\max}$, но меньшее его:

$$z_{\max_{цел}} = E_1(z_{R\max}). \quad (58)$$

В полуоткрытом интервале $[z_{\min_{цел}}; z_{\max_{цел}})$ расположим элементы массива z_h , идущие через постоянный шаг H_z , начиная с элемента $z_{\min_{цел}}$.

Количество точек, находящихся в этом интервале,

$$n_{кон} = E_1((z_{\max_{цел}} - z_{\min_{цел}}) / H_z) + 1. \quad (59)$$

Величины элементов в полуоткрытом интервале $[z_{\min_{цел}}; z_{\max_{цел}})$:

$$z_h(i_{ц} + 1) = z_{\min_{цел}} + H_z \cdot (i_{ц} - 1), \quad (60)$$

где $i_{ц} = 1, 2, \dots, n_{кон}$.

При $i_{\text{ц}} = 1$ имеем вторую точку массива $z_h(2) = z_{\min_{\text{цел}}}$, что соответствует требованию построения точек интервала. При $i_{\text{ц}} = n_{\text{кон}}$ всё зависит от соотношения разности $z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}$ и шага H_z : если шаг укладывается в интервале $z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}$ целое число раз, то

$$E_1((z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}) / H_z) = (z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}) / H_z,$$

так как десятичная часть отсутствует (число целое) и выражение (60) для $i_{\text{ц}} = n_{\text{кон}}$ дает:

$$z_h(n_{\text{кон}} + 1) = z_{\min_{\text{цел}}} + H_z \cdot (z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}) / H_z = z_{\max_{\text{цел}}}.$$

Если же шаг не укладывается целое число раз в интервале $z_{\max_{\text{цел}}} - z_{\min_{\text{цел}}}$, то точка $z_h(n_{\text{кон}} + 1)$ лежит левее точки $z_{\max_{\text{цел}}}$.

Последняя точка одномерного массива

$$z_h(n_{\text{кон}} + 2) = z_{R_{\max}}. \quad (61)$$

Общее число точек одномерного массива

$$n_z = n_{\text{кон}} + 2. \quad (62)$$

1.3.10. Построение моментной характеристики

Суммарный относительный теоретический момент, или коэффициент теоретического момента:

$$C_{m_{\text{теор}}}(\mathbf{Z}_h) = \int_{\bar{r}_0}^1 \bar{M}^*(z_h, \bar{r}) d\bar{r}, \quad (63)$$

или переводя на язык суммы, например, по методу трапеций

$$C_{m_{теор}}(z_h) = \Delta \bar{r} \cdot (0,5 \cdot (\bar{M}_{инт_1}^*(z_h) + \bar{M}_{инт_n}^*(z_h)) + \sum_{k=2}^{n-1} \bar{M}_{инт_k}^*(z_h)), \quad (64)$$

где n — число сечений лопасти;

$$\Delta \bar{r} = (1 - \bar{r}_0) / (n - 1) \quad (65)$$

шаг между сечениями; $\bar{M}_{инт_k}^*(z_h)$ — это величина \bar{M}^* , полученная с помощью интерполяции для заданного z_h и для каждого k -го сечения (см. формулу (66)).

Чтобы найти номера двух последовательных элементов, определяющих интервал интерполяции, необходимо найти эти номера в каждой k -й строке матрицы $z_{R_{kj}}$. В силу того что элементы каждой строки, как показывает расчетный опыт, монотонно убывают, то, как следствие, однозначно определяется номер элемента строки, ближайшего к заданному z_h , но меньшего его. Пусть это будет номер i_t , тогда номер предыдущего элемента — $i_t - 1$. Этим же номерам соответствуют подлежащие интерполяции элементы матриц \bar{M}_{kj}^* и e_{kj} . Величины $\bar{M}_{инт_k}^*$ и $e_{инт_k}$, соответствующие заданному элементу z_h из одномерного массива:

$$\bar{M}_{инт_k}^*(z) = \bar{M}_{k,i_t-1}^* + (\bar{M}_{k,i_t}^* - \bar{M}_{k,i_t-1}^*) \cdot \frac{z - z_{R_{k,i_t-1}}}{z_{R_{k,i_t}} - z_{R_{k,i_t-1}}}, \quad (66)$$

где z_h для простоты заменено на z ,

$$e_{инт_k}(z) = e_{k,i_t} + (e_{k,i_t} - e_{k,i_t-1}) \cdot \frac{z - z_{R_{k,i_t-1}}}{z_{R_{k,i_t}} - z_{R_{k,i_t-1}}}. \quad (67)$$

Затем определяется среднеарифметическое интерполяционных значений $e_{инт_k}$ по всем сечениям:

$$e_{cp}(z) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_{инт_k}(z). \quad (68)$$

Коэффициент конечных потерь

$$\bar{M}_{\text{конц}}(z) = \frac{4e_{cp}^2}{z \cdot (1 + e_{cp})} \cdot \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1 - e_{cp}}{z} \right)^2}}{(1 + e_{cp}) \cdot i_l \cdot z} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{i_l \cdot z}{\pi \left(1 - \frac{e_{cp}}{2} \right)^2}}} \right). \quad (69)$$

Коэффициент момента с учетом концевых потерь

$$C_m(z) = C_{m_{теор}}(z) - \bar{M}_{\text{конц}}(z). \quad (70)$$

1.3.11. Построение мощностной характеристики

Коэффициент мощности C_p связан с коэффициентом момента C_m соотношением

$$C_p(z) = C_m(z) \cdot z. \quad (71)$$

1.3.12. Итог построения моментной и мощностной характеристик

По приведенным выше формулам строятся функции $C_m(z)$ и $C_p(z)$ для каждого значения z из одномерного массива с элементами, идущими через постоянный шаг.

1.3.13. Выбор рабочей точки характеристики $C_m(z)$ и $C_p(z)$

Имея зависимости $C_m(z)$ и $C_p(z)$, выбирают значение $z_{p.m}$, при котором $C_p(z)$ достигает максимального значения. Обычно кривая $C_p(z)$ имеет плавный характер с резко выраженным максимумом. Итак,

$$C_{p_{p.m}} = \max(C_p(z)); \quad z_{p.m} = z_{opt}.$$

При этом же значении z определяют и $C_m(z)$:

$$C_{m_{p.m}} = C_{p_{p.m}} / z_{opt} .$$

Эти значения C_p и C_m считаем расчетными и присваиваем им индекс «расч». А принимаемое уточнённое для практических расчетов C_p выражается через $C_{p_{расч}}$ с некоторым понижающим коэффициентом, в частности,

$$C_p = 0,85 \cdot C_{p_{расч}} ,$$

$$C_m = C_p / z_{p.m} ,$$

где $z_{p.m} = z_{opt}$ — значение z , при котором $C_p(z)$ достигает максимума.

1.3.14. Коэффициент силы лобового давления при расчетной скорости ветра

В общем виде коэффициент лобового давления B может быть записан так:

$$B = \frac{P}{\frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}} , \quad (74)$$

где

$$P = i_{л} \int_{r_0}^R C_{y_a}(r) \cdot b(r) \cdot dr \cdot \rho \frac{W^2(r)}{2} \quad (75)$$

сила лобового давления на колесо, Н.

Учитывая связь модуля относительной скорости ветра W и модуля абсолютной скорости ветра V через угол натекания β и коэффициент торможения e

$$W = \frac{V(1-e)}{\sin \beta} , \quad (76)$$

имеем в относительных единицах

$$B = \frac{i_{л}}{\pi} \int_{\bar{r}_0}^1 C_{y_a}(\bar{r}) \cdot \bar{b}(\bar{r}) \cdot \frac{(1-e)^2}{\sin^2 \beta} d\bar{r} . \quad (77)$$

Переходя от интеграла к сумме, например, по методу трапеций, для коэффициента силы лобового давления при расчетной скорости ветра получаем

$$B = \Delta \bar{r} \cdot \frac{i_L}{\pi} \left(\frac{f_1 + f_n}{2} + \sum_{k=2}^{n-1} f_k \right), \quad (78)$$

где

$$f_k = C_{y_{a k}} \cdot \bar{b}_k \cdot \frac{(1-e)^2}{\sin^2 \beta}. \quad (79)$$

Величины относительной хорды сечений лопасти определяются при расчете геометрии лопасти, а величины $C_{y_{a k}}$, e_k и β_k — это интерполяционные значения этих величин для заданного z — в зависимости от номера k сечения. Номера двух последовательных элементов в матрице $z_{R_{k,j}}$ при заданном z для каждого k выше были обозначены через i_t и $i_t - 1$ (см. подразд. 1.3.10). Тогда аналогично тому, как это сделано для \bar{M}^* и e , для C_{y_a} и β имеем

$$C_{y_{a \text{инт } k}}(z) = C_{y_{a k, i_t}} + (C_{y_{a k, i_t}} - C_{y_{a k, i_t-1}}) \cdot \frac{z - z_{R_{k, i_t-1}}}{z_{R_{k, i_t}} - z_{R_{k, i_t-1}}}; \quad (80)$$

$$\beta_{\text{инт } k}(z) = \beta_{k, i_t-1} + (\beta_{k, i_t} - \beta_{k, i_t-1}) \cdot \frac{z - z_{R_{k, i_t-1}}}{z_{R_{k, i_t}} - z_{R_{k, i_t-1}}}, \quad (81)$$

где $C_{y_{a j}}$ — элемент из массива $C_{y_{a \text{цикл}}}$ при меняющемся α_j — элементе из массива $\alpha_{\text{цикл}}$ (см. выше), $\beta_{k, j}$ — элемент из массива $\beta_{k, j} = \varphi_k + \alpha_j$ (см. формулу (37)).

1.3.15. Коэффициент силы лобового давления при порыве ветра

Учитывая, что угол протекания при порыве ветра и сохранении постоянства окружной скорости

$$\beta_{\text{пор}} = \arctg((\text{tg} \beta_k) \cdot k_{\text{пор}}), \quad (82)$$

где

$$k_{nop} = V_{nop}/V \quad (83)$$

коэффициент порыва, получаем изменение по отношению к формулам (75) и (76), выражающееся в том, что вместо относительной скорости W имеем относительную скорость W_{nop} :

$$W_{nop} = \frac{V_{nop} \cdot (1-e)}{\sin \beta_{nop}} = \frac{K_{nop} \cdot V \cdot (1-e)}{\sin \beta_{nop}}. \quad (84)$$

Коэффициент силы лобового давления при порыве ветра

$$B_{nop} = \frac{i_L \cdot K_{nop}^2}{\pi} \int_{\bar{r}_0}^1 \frac{C_{y_a}(\bar{r}) \cdot \bar{b}(\bar{r}) \cdot (1-e)^2}{\sin^2 \beta_{nop}} \cdot d\bar{r}, \quad (85)$$

где β_{nop} — угол притекания относительной скорости при порыве, определенный по (82); K_{nop} — коэффициент порыва, определенный по (83); остальные величины C_{y_a}, \bar{b}, e совпадают с этими величинами в случае расчетной скорости.

Переходя к сумме по методу трапеций, имеем:

$$B_{nop} = K_{nop}^2 \cdot \frac{i_L}{\pi} \cdot \Delta \bar{r} \cdot \left(\frac{f_{nop_1} + f_{nop_n}}{2} + \sum_{k=2}^{n-1} f_{nop_k} \right), \quad (86)$$

где

$$f_{nop_k} = \frac{C_{y_{ak}} \cdot \bar{b}_k \cdot (1-e_k)^2}{\sin^2 \beta_{nop_k}}. \quad (87)$$

1.3.16. Коэффициент перегрузки

Коэффициент перегрузки определяем из соотношения

$$n_{перезр} = \frac{B_{nop}}{B}. \quad (88)$$

1.4. Расчет размерных параметров ветроколеса

1.4.1. Исходные данные расчета размерных параметров

Исходными данными для расчета размерных параметров являются следующие: номинальная мощность, Вт, КПД электрический, КПД механический, плотность воздуха, кг/м^3 , скорость ветра расчетная, м/с, скорость ветра при порыве, м/с, найденные расчетным путем, а затем уточненные параметры характеристик в рабочей точке: C_p , C_m , $z_{p.m}$, безразмерные координаты выбранного профиля.

1.4.2. Расчетные параметры ветроколеса

Наружный диаметр D , м, ветроколеса

$$D = \sqrt{\frac{8N}{C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}}}. \quad (89)$$

Внутренний диаметр d , м, ветроколеса

$$d = \bar{d}_0 \cdot D. \quad (90)$$

Радиус R , м, ветроколеса

$$R = \frac{D}{2}. \quad (91)$$

Радиус расположения сечения лопасти r_k , м

$$r_k = \bar{r}_k \cdot R. \quad (92)$$

Шаг между сечениями лопасти Δr , м

$$\Delta r = \Delta \bar{r} \cdot R. \quad (93)$$

Хорда сечения b_k , м

$$b_k = \bar{b}_k \cdot R. \quad (94)$$

Толщина профиля c_k , м (см. рис. 3)

$$c_k = \bar{c}_k \cdot b_k, \quad (95)$$

где \bar{c}_k — задаваемая максимальная относительная (в долях хорды b_k) толщина профиля.

Координаты профилей сечений лопасти строятся в соответствии с табл. 1.3.

1.5. Построение регулировочных характеристик ветроколеса

Для получения регулировочных характеристик [6, 7], т. е. для получения характеристик ветроколеса с измененным (по сравнению с расчетным) углом заклинения (установки) на величину $\Delta\varphi$, следует к величинам φ_k для всех сечений лопасти добавить одну и ту же величину $\Delta\varphi$ и далее вести расчет для новых углов заклинения $\varphi_{k_{нов}}$:

$$\varphi_{k_{нов}} = \varphi_k + \Delta\varphi \quad (96)$$

в той же последовательности, что и для полученных в расчете геометрии лопасти углов φ_k , заменив их на $\varphi_{k_{нов}}$.

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ И ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ В СООТВЕТСТВИИ С ТАБЛ. 1.1 — 1.3

2.1. Расчет оптимального коэффициента торможения потока

2.1.1. Коэффициент торможения потока

Задаем шесть значений коэффициента торможения потока e через равный шаг от 0,27 до 0,42 по формуле (3):

$$e_k = 0,27 + 0,15 \cdot \frac{k_e - 1}{n_e - 1}.$$

При $n_e = 6$

$$e_k = 0,27 + 0,15 \cdot \frac{k_e - 1}{6 - 1} = 0,27 + 0,03 \cdot (k_e - 1);$$

$$k_e = 1; 2; 3; 4; 5; 6;$$

$$e_1 = 0,27; e_2 = 0,3; e_3 = 0,33; e_4 = 0,36; e_5 = 0,39; e_6 = 0,42.$$

2.1.2. Коэффициент идеальной мощности

По формуле (4) определяем шесть значений коэффициента идеальной мощности $C_{P_{ид}}$, соответствующих шести значениям e_k :

$$C_{P_{ид}} = 4e \cdot \frac{1 - e}{1 + e};$$

$$C_{p_{уд1}} = 4e_1 \cdot \frac{1 - e_1}{1 + e_1} = 4 \cdot 0,27 \cdot \frac{1 - 0,27}{1 + 0,27} = 0,621.$$

Для остальных значений e_k величины $C_{p_{удk}}$ представлены ниже в табл. 4.

2.1.3. Коэффициент конечных потерь

По формуле (5) определяем шесть значений коэффициента конечных потерь \bar{T}_j , соответствующих e_k :

$$\bar{T}_j = \frac{e}{1 - e} \cdot \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1 - e}{z_R} \right)^2}}{(1 + e) \cdot i_L \cdot z_R} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{i_L \cdot z_R}{\pi \left(1 - \frac{e}{2} \right)} \right)^2}} \right).$$

Приведем вычисление \bar{T}_j для e_1 , остальные значения представим в табл. 4:

$$\bar{T}_{j1} = \frac{0,27}{1 - 0,27} \cdot \left(\frac{8 \sqrt{1 + \left(\frac{1 - 0,27}{6,5} \right)^2}}{(1 + 0,27) \cdot 3 \cdot 6,5} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 6,5}{\pi \left(1 - \frac{0,27}{2} \right)} \right)^2}} \right) = 0,069.$$

2.1.4. Коэффициент профильных потерь

По формуле (6) определяем шесть значений коэффициента профильных потерь \bar{T}_p , соответствующих e_k :

$$\bar{T}_p = 2\mu_{a_{min}} \cdot \left(\frac{1-e}{z_R} + \frac{z_R}{3 \cdot (1-e)} \right).$$

Приведем вычисление \bar{T}_p для e_1 , остальные значения даны в табл. 4:

$$\bar{T}_{p_1} = 2 \cdot 0,0182 \cdot \left(\frac{1-0,27}{6,5} + \frac{6,5}{3 \cdot (1-0,27)} \right) = 0,112.$$

2.1.5. Коэффициент потерь на кручение струи

По формуле (7) определяем средний по высоте лопасти коэффициент быстроходности:

$$z_{cp} = \frac{1 + \bar{r}_0}{2} \cdot z_R = \frac{1 + 0,2}{2} \cdot 6,5 = 3,9.$$

По формуле (8) вычисляем средний по высоте лопасти относительный КПД элементарного ветряка $\eta_{отн}$ для e_1 , остальные значения даны в табл. 4:

$$\eta_{отн} = \frac{1 - \frac{\mu_{a_{min}} \cdot z_{cp}}{1-e}}{1 + \frac{\mu_{a_{min}} \cdot (1-e)}{z_{cp}}};$$

$$\eta_{отн_1} = \frac{1 - \frac{0,0182 \cdot 3,9}{1-0,27}}{1 + \frac{0,0182 \cdot (1-0,27)}{3,9}} = 0,8997 \approx 0,900.$$

По формуле (9) определяем коэффициент потерь на кручение струи для e_1 , остальные значения приведены в табл. 4:

$$\bar{T}_m = C_{P_{ид}} \cdot \eta_{отн}^2 \cdot \frac{\ln(1/\bar{r}_0)}{2z_R^2};$$

$$\bar{T}_{m_1} = 0,621 \cdot 0,9^2 \cdot \frac{\ln(1/0,2)}{2 \cdot 6,5^2} = 0,0096 \approx 0,010 .$$

2.1.6. Предварительный коэффициент мощности

По формуле (10) вычисляем предварительный коэффициент мощности $C_{P_{предв}}$ для e_1 , остальные значения $C_{P_{предв}}$ даны в табл. 4:

$$C_{P_{предв}} = C_{P_{ид}} \cdot \left((1 - \bar{d}_0^2) - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right);$$

$$C_{P_{предв1}} = 0,621 \cdot ((1 - 0,2^2) - 0,069 - 0,112 - 0,010) = 0,477 .$$

2.1.7. Значения параметров, зависящих от коэффициента торможения e

В табл. 4 приводим величины найденных параметров при различных значениях e .

Таблица 4

Величины найденных параметров при различных значениях e

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Номера точек					
			1	2	3	4	5	6
1	Коэффициент торможения потока	e	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42
2	Коэффициент идеальной мощности	$C_{P_{ид}}$	0,621	0,646	0,665	0,678	0,685	0,686
3	Коэффициент концевых потерь	\bar{T}_j	0,069	0,078	0,087	0,097	0,107	0,119
4	Коэффициент профильных потерь	\bar{T}_p	0,112	0,117	0,121	0,127	0,133	0,139
5	Средний по высоте лопасти относительный КПД	$\eta_{отн}$	0,900	0,896	0,891	0,886	0,881	0,875
6	Коэффициент потерь на кручение струи	\bar{T}_m	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
7	Предварительный коэффициент мощности	$C_{P_{предв}}$	0,477	0,488	0,493	0,492	0,486	0,475

2.1.8. Выбор максимального значения $C_{P_{предв}}$ и определение соответствующего ему значения $e—e_{opt}$

Из строки 7 табл. 4 видно, что максимальным значением $C_{P_{предв}}$ является число 0,493, т.е.

$$C_{P_{предв_{max}}} = 0,493, \text{ а } e_{opt} = 0,33.$$

2.2. Расчет относительных параметров геометрии лопасти

Для $e = e_{opt} = 0,33$ при числе сечений лопасти $n = 5$ определяем геометрию лопасти при выбранных пяти сечениях.

2.2.1. Относительный радиус расположения сечения лопасти

По формуле (11) вычислим \bar{r}_k для $n = 5$:

$$\bar{r}_k = \bar{r}_0 + \frac{(1 - \bar{r}_0) \cdot (k - 1)}{(5 - 1)}, \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

$$\text{При } \bar{r}_0 = 0,2 \quad \bar{r}_k = 0,2 + 0,8 \cdot \frac{k - 1}{4};$$

$$\bar{r}_1 = 0,2 \text{ — корневое сечение;}$$

$$\bar{r}_2 = 0,4; \quad \bar{r}_3 = 0,6; \quad \bar{r}_4 = 0,8; \quad \bar{r}_5 = 1.$$

2.2.2. Коэффициент быстроходности сечения лопасти

По формуле (12) находим $z_k = z_R \cdot \bar{r}_k = 6,5 \cdot \bar{r}_k$;

$$z_1 = 1,3; \quad z_2 = 2,6; \quad z_3 = 3,9; \quad z_4 = 5,2; \quad z_5 = 6,5.$$

2.2.3. Число относительных модулей сечения лопасти

По формуле (13) вычисляем

$$z_{u_k} = z_k \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{1 + C_{P_{уд}}}{z_k^2}}}{2 \cdot (1 - e_{opt})} = z_k \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{1 + 0,665}{z_k^2}}}{2 \cdot (1 - 0,33)}.$$

Для $k=1$

$$z_{u_1} = \frac{1,3 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1 + 0,665}{1,3^2}} \right)}{2 \cdot (1 - 0,33)} = 2,115.$$

Остальные значения z_u представлены в табл. 5.

2.2.4. Коэффициент суммарной нагруженности сечений лопастей, находящихся в зоне действия элементарной кольцевой струи

По формуле (14) определяем

$$C_{нагр_k} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \bar{r}_k \cdot e_{opt}}{(1 + e_{opt}) \cdot (1 - e_{opt})^2} \cdot \frac{1}{(z_{u_k} + \mu_{a_{min}}) \cdot \sqrt{1 + z_{u_k}^2}}.$$

Для $k=1$

$$C_{нагр_1} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 0,33}{(1 + 0,33) \cdot (1 - 0,33)^2} \cdot \frac{1}{(2,115 + 0,0182) \cdot \sqrt{1 + 2,115^2}} = 0,557$$

Остальные значения $C_{нагр}$ приведены в табл. 5.

2.2.5. Значения параметров для пяти сечений лопасти

Таблица 5

Значения параметров для пяти сечений

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Номера сечений лопасти				
			1 (корневое)	2	3	4	5 (периферия)
1	Относительное расстояние сечения лопасти от оси колеса	\bar{r}_k	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
2	Коэффициент быстроходности сечения лопасти	z_k	1,3	2,6	3,9	5,2	6,5
3	Число относительных модулей сечения лопасти	z_{u_k}	2,115	3,974	5,884	7,809	9,740
4	Коэффициент суммарной нагруженности	$C_{нагр_k}$	0,557	0,340	0,237	0,180	0,145

2.2.6. Коэффициент подъемной силы периферийного сечения

По формуле (15) — $C_{y_{a\text{ периф}}} = C_{y_a}(\mu_{a\text{ min}})$.

Из исходных данных (см. табл. 2) имеем $\mu_{a\text{ min}} = 0,0182$, соответствующее ему C_{y_a} —

$$C_{y_a}(\mu_{a\text{ min}}) = 0,85.$$

Итак, $C_{y_{a\text{ периф}}} = 0,85$.

2.2.7. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) периферийного сечения

Из формулы (16) имеем

$$\bar{b}_{\text{периф}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{периф}}}}{i_{\text{л}} \cdot C_{y_{a\text{ периф}}}} = \frac{C_{\text{нагр}_5}}{i_{\text{л}} \cdot C_{y_{a\text{ периф}}}} = 0,145 / (3 \cdot 0,85) = 0,057 \approx 0,06.$$

Относительная хорда в долях диаметра колеса равна

$$\bar{b}_{\text{периф}_D} = \bar{b}_{\text{периф}} / 2 \approx 0,06 / 2 = 0,03 \text{ (т.е. около 3 \%)}.$$

2.2.8. Коэффициент подъемной силы корневого сечения

По уравнению (17) определяем

$$C_{y_{a\text{ корн}}} = 0,9 \cdot C_{y_{a\text{ max}}}.$$

Из исходных данных (см. табл. 2) имеем $C_{y_{a\text{ max}}} = 1,18$, следовательно,

$$C_{y_{a\text{ корн}}} = 0,9 \cdot 1,18 = 1,062.$$

2.2.9. Относительная хорда (в долях наружного радиуса колеса) корневого сечения

По уравнению (18) определяем

$$\bar{b}_{\text{корн}} = \frac{C_{\text{нагр}_{\text{корн}}}}{i_{\text{л}} \cdot C_{y_{\text{корн}}}} = \frac{0,557}{3 \cdot 1,062} = 0,175.$$

Принимаем $\bar{b}_{корн} = 0,18$.

Относительная хорда в долях диаметра колеса

$$\bar{b}_{корнD} = \frac{\bar{b}_{корн}}{2} = \frac{0,18}{2} = 0,09 .$$

2.2.10. Относительная хорда (в долях радиуса колеса) промежуточного сечения

По формуле (19) вычисляем

$$\bar{b}_k = \bar{b}_{корн} + (\bar{b}_{периф} - \bar{b}_{корн}) \cdot \frac{k-1}{n-1} .$$

Для $k = 1$ (корневое сечение)

$$\bar{b}_1 = \bar{b}_{корн} = 0,18 \text{ (см. выше),}$$

для $k = 2$

$$\bar{b}_2 = 0,18 + (0,06 - 0,18) \cdot \frac{2-1}{5-1} = 0,15 ,$$

для $k = 3$ $\bar{b}_3 = 0,12$, для $k = 4$ $\bar{b}_4 = 0,09$, для $k = 5$ $\bar{b}_5 = 0,06$
(периферия).

2.2.11. Коэффициент подъемной силы промежуточного сечения

По формуле (20) — $C_{y_{ak}} = \frac{C_{нагрk}}{i_l \cdot \bar{b}_k}$, тогда

$$C_{y_{a1}} = 0,557 / (3 \cdot 0,18) = 1,062 ,$$

$$C_{y_{a2}} = 0,340 / (3 \cdot 0,15) = 0,779 ,$$

$$C_{y_{a3}} = 0,237 / (3 \cdot 0,12) = 0,681 ,$$

$$C_{y_{a4}} = 0,180 / (3 \cdot 0,09) = 0,696 ,$$

$$C_{y_{a5}} = 0,146 / (3 \cdot 0,06) = 0,85 .$$

2.2.12. Номер i_k элемента на восходящей ветви исходных значений C_{y_a} , ближайшего по величине к $C_{y_a k}$ и большего его

Сравниваем $C_{y_a k}$ с восходящей частью массива исходных данных (см. табл. 2, второй столбец).

Для первого сечения $C_{y_a 1} = 1,062$ и, сравнивая его с элементами табл. 2 (для $C_{y_a k} < 1,18$), имеем $i_1 = 8$;

для второго сечения — $C_{y_a 2} = 0,779$ и $i_2 = 6$;

для третьего сечения — $C_{y_a 3} = 0,681$ и $i_3 = 5$;

для четвертого сечения — $C_{y_a 4} = 0,696$ и $i_4 = 5$;

для пятого сечения — $C_{y_a 5} = 0,85$ и $i_5 = 6$

(для пятого сечения значение $C_{y_a 5}$ совпадает со значением элемента массива C_{y_a} в табл. 2).

2.2.13. Угол атаки промежуточного сечения

По уравнению (21) определяем

$$\alpha_k = \alpha(i_k - 1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \cdot \frac{C_{y_a k} - C_{y_a}(i_k - 1)}{C_{y_a}(i_k) - C_{y_a}(i_k - 1)}.$$

Приведем вычисление α_k , например, для $k = 3$, а для остальных запишем результаты вычислений:

для $k = 3$ $i_3 = 5$, тогда $i_3 - 1 = 4$; $\alpha(4) = 0^\circ$; $\alpha(5) = 1^\circ$;

$C_{y_a}(4) = 0,65$; $C_{y_a}(5) = 0,76$.

При $k = 3$ $C_{y_a 3} = 0,681$ (см. выше).

Итак, для $k = 3$

$$\alpha_3 = \alpha(4) + (\alpha(5) - \alpha(4)) \cdot (0,681 - C_{y_a}(4)) / (C_{y_a}(5) - C_{y_a}(4)) = 0^\circ + (1^\circ - 0^\circ) \cdot (0,681 - 0,65) / (0,76 - 0,65) = 0,28^\circ .$$

Аналогично получим остальные α_k :

$$\alpha_1 = 4,71^\circ ; \alpha_2 = 1,22^\circ ; \alpha_3 = 0,28^\circ ; \alpha_4 = 0,41^\circ ; \alpha_5 = 2^\circ .$$

2.2.14. Угол притекания сечения допасти

По формуле (22) определяем $\beta_k = \arctg(1/z_{u_k})$.

В соответствии с полученными значениями z_{u_k} , приведенными в табл. 5,

$$\beta_1 = \arctg(1/2,115) = 25,3^\circ ;$$

$$\beta_2 = 14,1^\circ ; \beta_3 = 9,6^\circ ; \beta_4 = 7,3^\circ ; \beta_5 = 5,9^\circ .$$

2.2.15. Угол заклинения (установки) сечения лопасти

По формуле (23) — $\varphi_k = \beta_k - \alpha_k$;

$$\varphi_1 = \beta_1 - \alpha_1 = 25,3^\circ - 4,7^\circ = 20,6^\circ ;$$

$$\varphi_2 = 12,9^\circ ; \varphi_3 = 9,4^\circ ; \varphi_4 = 6,9^\circ ; \varphi_5 = 3,9^\circ .$$

2.2.16. Итог расчета относительных параметров геометрии лопасти

В табл.2.3 приведены относительные параметры расчета геометрии лопасти.

Таблица 6

Относительные параметры геометрии лопасти

№ п/п	Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Номера сечений				
			1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
1	Относительный радиус расположения сечения сечения лопасти, о.е.	\bar{r}_k	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
2	Относительная (в долях наружного радиуса колеса) хорда сечения лопасти, о.е.	\bar{b}_k	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06

№ п/п	Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Номера сечений				
			1 (корень)	2	3	4	5 (периферия)
3	Коэффициент подъемной силы	C_{yak}	1,062	0,779	0,681	0,696	0,85
4	Угол притекания, град.	β_k	25,3	14,1	9,6	7,3	5,9
5	Угол заклинения (установки) сечения лопасти, град.	φ_k	20,6	12,9	9,4	6,9	3,9

2.3. Построение характеристик ветроколеса

2.3.1. Определение массива углов атаки $\alpha_{цикл}$, следующих через равный шаг

Примем шаг $H_{al} = 2,5^\circ$.

По табл. 2 определяем $\alpha(n_{табл})$, то есть последнее значение в массиве, заданном таблично: $\alpha(n_{табл}) = \alpha(15) = 20^\circ$.

По уравнению (24) вычисляем $\alpha_{кон} = \alpha(n_{табл}) = 20^\circ$.

По формуле (26) определим $\alpha_{нач}$ — начальное предварительное значение массива:

$$\alpha_{нач} = 3 - \varphi_n = 3 - \varphi_5 = 3 - 3,9 = -0,9 < 0$$

(значения φ_k см. в табл. 6).

Определим целую часть от $\alpha_{нач}$:

$$\alpha_{нач_{цел}} = E_1(-0,9) = 0.$$

Вычислим разность Δ_1 для варианта $\alpha_{нач} < 0$ по формуле (26а):

$$\Delta_1 = \alpha_{нач_{цел}} - \alpha_{нач} = 0 - (-0,9) = 0,9.$$

Так как $\Delta_1 > 0,5$, для получения начальной точки массива значений α , идущих через равный шаг, вычитаем 0,5 из $\alpha_{нач_{цел}}$. По формуле (27) —

$$\alpha_{нач_{0,5}} = \alpha_{нач_{цел}} - 0,5 = 0 - 0,5 = -0,5.$$

По уравнению (25) определим целое число $\alpha_{кон_{цел}}$

$$\alpha_{кон_{цел}} = E_1(\alpha_{кон} \cdot 0,99) = E_1(20 \cdot 0,99) = E_1(19,8) = 19.$$

По формуле (29) вычислим число точек в полуоткрытом интервале $[\alpha_{нач_{0,5}}; \alpha_{кон_{цел}})$:

$$\begin{aligned} n_{шаг} &= E_1\left(\frac{\alpha_{кон_{цел}} - \alpha_{нач_{0,5}}}{H_{al}}\right) + 1 = E_1\left(\frac{19 - (-0,5)}{2,5}\right) + 1 = \\ &= E_1\left(\frac{19,5}{2,5}\right) + 1 = E_1(7,8) + 1 = 7 + 1 = 8. \end{aligned}$$

Общее число точек массива найдем по формуле (30): $n_{ш} = n_{шаг} + 1 = 8 + 1 = 9$.

Последнюю точку массива определим по уравнению (31):

$$\alpha_{цикл}(n_{ш}) = \alpha_{кон}, \text{ или } \alpha_{цикл}(9) = 20^\circ.$$

Для точек массива, идущих через равный шаг, из формулы (32) имеем

$$\alpha_{цикл}(j) = \alpha_{нач_{0,5}} + H_{al} \cdot (j - 1),$$

где $j=1, 2, \dots, n_{шаг}$.

В нашем случае

$$\alpha_{цикл}(j) = -0,5 + 2,5 \cdot (j - 1),$$

где $j = 1, 2, \dots, 8$.

По формуле (33) найдем разность

$$\begin{aligned} \Delta &= \alpha_{цикл}(n_{ш}) - \alpha_{цикл}(n_{шаг}) = \alpha_{цикл}(9) - \alpha_{цикл}(8) = \\ &= 20^\circ - 17^\circ = 3^\circ > H_{al} = 2,5^\circ. \end{aligned}$$

Следовательно, (см. (34)), сдвигая влево последнюю точку, получаем

$$\alpha_{цикл}(n_{ш}) = \alpha_{цикл}(n_{шаг}) + H_{al} = \alpha_{цикл}(8) + 2,5 = 17 + 2,5 = 19,5.$$

Итак, построен массив $\alpha_{цикл}$, состоящий из девяти элементов. Значения элементов $\alpha_{цикл}$ приведены в табл. 7.

2.3.2. Определение массивов $C_{y_a \text{цикл}}$ и $\mu_{a \text{цикл}}$,

соответствующих массиву $\alpha_{\text{цикл}}$

Каждое значение $\alpha_{\text{цикл}}(j)$ сравниваем с массивом значений α , заданных таблично (см. табл. 2).

Например, первый элемент $\alpha_{\text{цикл}}(1) = -0,5$.

В табл. 2 номер элемента α , ближайшего к числу $-0,5$, но большего его, — это: $i_T = 4$, тогда $i_T - 1 = 3$, при этом $\alpha(4) = 0^\circ$; $\alpha(3) = -2^\circ$.

Соответственно в массиве C_{y_a}

$$C_{y_a}(4) = 0,65; \quad C_{y_a}(3) = 0,5;$$

в массиве μ_a

$$\mu_a(4) = 0,0192; \quad \mu_a(3) = 0,025.$$

Произведем линейную интерполяцию соответственно по (35) и по (36) для определения первого элемента массива $C_{y_a \text{цикл}}$ и первого элемента массива $\mu_{a \text{цикл}}$:

$$C_{y_a \text{цикл}}(i_u) = C_{y_a}(i_T - 1) + \frac{\alpha_{\text{цикл}}(i_u) - \alpha(i_T - 1)}{\alpha(i_T) - \alpha(i_T - 1)} \cdot (C_{y_a}(i_T) - C_{y_a}(i_T - 1)).$$

При $i_u = 1; i_T = 4; i_T - 1 = 3$

$$\begin{aligned} C_{y_a \text{цикл}}(1) &= C_{y_a}(3) + \frac{\alpha_{\text{цикл}}(1) - \alpha(3)}{\alpha(4) - \alpha(3)} \cdot (C_{y_a}(4) - C_{y_a}(3)) = \\ &= 0,5 + \frac{-0,5 - (-2)}{0 - (-2)} \cdot (0,65 - 0,5) = 0,612. \end{aligned}$$

$$\mu_{a \text{цикл}}(i_u) = \mu_a(i_T - 1) + \frac{\alpha_{\text{цикл}}(i_u) - \alpha(i_T - 1)}{\alpha(i_T) - \alpha(i_T - 1)} \cdot (\mu_a(i_T) - \mu_a(i_T - 1)).$$

При $i_u = 1; i_T = 4; i_T - 1 = 3$

$$\begin{aligned} \mu_{a \text{цикл}}(1) &= \mu_a(3) + \frac{\alpha_{\text{цикл}}(1) - \alpha(3)}{\alpha(4) - \alpha(3)} \cdot (\mu_a(4) - \mu_a(3)) = \\ &= 0,025 + \frac{-0,5 - (-2)}{0 - (-2)} \cdot (0,0192 - 0,025) = 0,02065 \approx 0,0207. \end{aligned}$$

Аналогично определяются остальные элементы массивов $C_{y_a \text{цикл}}$ и $\mu_{a \text{цикл}}$.

В табл. 7 приведены элементы массивов $\alpha_{\text{цикл}}$, $C_{y_a \text{цикл}}$ и $\mu_{a \text{цикл}}$.

Таблица 7

Значения элементов массивов $\alpha_{\text{цикл}}$, $C_{y_a \text{цикл}}$ и $\mu_{a \text{цикл}}$.

Номера точек	$\alpha_{\text{цикл}}$	$C_{y_a \text{цикл}}$	$\mu_{a \text{цикл}}$
1	- 0,5°	0,612	0,0207
2	2,0°	0,850	0,0182
3	4,5°	1,053	0,0213
4	7,0°	1,140	0,0339
5	9,5°	1,175	0,0547
6	12,0°	1,160	0,0862
7	14,5°	1,122	0,1305
8	17,0°	1,075	0,1820
9	19,5°	1,005	0,2487

2.3.3. Построение элементарного момента в зависимости от коэффициента быстроходности для каждого сечения лопасти

Угол притекания сечения при вариации угла атаки α

Как следует из формулы (37), матрица значений углов притекания

$$\beta_{kj} = \varphi_k + \alpha_{\text{цикл}j},$$

где k — номер сечения лопасти; j - номер элемента в массиве $\alpha_{\text{цикл}}$.

В табл. 6 приведены φ_k для $k=1, 2, \dots, 5$. Изменение $\alpha_{\text{цикл}j}$ при $j = 1, 2, \dots, 9$ дано в табл. 7. Таким образом, матрица β_{kj} определена. Например, для второго сечения и седьмого элемента из массива $\alpha_{\text{цикл}}$ имеем

$$\beta_{2,7} = \varphi_2 + \alpha_{\text{цикл}7} = 12,9^\circ + 14,5^\circ = 27,4^\circ.$$

Аналогично определяются остальные элементы матрицы β_{kj} (табл. 8).

Число относительных модулей каждого сечения вычисляется по (38):

$$z_{u_{kj}} = \operatorname{ctg} \beta_{kj} \cdot$$

Например, для второго сечения и седьмого элемента из массива $\alpha_{\text{цикл}}$

$$z_{u_{2,7}} = \operatorname{ctg} \beta_{2,7} = \operatorname{ctg} 27,4^\circ = 1,93.$$

Элементы $z_{u_{kj}}$ даны в табл.8.

Таблица 8

Значения β и z_u

Номер точек массива	Первое сечение (корень)		Второе сечение		Третье сечение		Четвертое сечение		Пятое сечение (периферия)	
	β	z_u	β	z_u	β	z_u	β	z_u	β	z_u
1	20,09 ⁰	2,73	12,41 ⁰	4,55	8,87 ⁰	6,41	6,38 ⁰	8,94	3,36 ⁰	17,02
2	22,59 ⁰	2,40	14,91 ⁰	3,76	11,37 ⁰	4,98	8,88 ⁰	6,40	5,86 ⁰	9,74
3	25,09 ⁰	2,14	17,41 ⁰	3,19	13,87 ⁰	4,05	11,38 ⁰	4,97	8,36 ⁰	6,80
4	27,59 ⁰	1,91	19,91 ⁰	2,76	16,37 ⁰	3,41	13,88 ⁰	4,05	10,86 ⁰	5,21
5	30,09 ⁰	1,73	22,41 ⁰	2,43	18,87 ⁰	2,93	16,38 ⁰	3,40	13,36 ⁰	4,21
6	32,59 ⁰	1,56	24,91 ⁰	2,15	21,37 ⁰	2,56	18,88 ⁰	2,92	15,86 ⁰	3,52
7	35,09 ⁰	1,42	27,41 ⁰	1,93	23,87 ⁰	2,26	21,38 ⁰	2,55	18,36 ⁰	3,01
8	37,59 ⁰	1,30	29,91 ⁰	1,74	26,37 ⁰	2,02	23,88 ⁰	2,56	20,86 ⁰	2,62
9	40,09 ⁰	1,19	32,41 ⁰	1,58	28,87 ⁰	1,81	26,38 ⁰	2,02	23,36 ⁰	2,32

Строки табл. 8 соответствуют столбцам матриц β_{kj} и Z_{kj} .

Правая часть преобразованного уравнения связи

По формуле (41) вычисляем

$$A_{kj} = C_{y_{aj}} \cdot \frac{(z_{u_{kj}} + \mu_{a_j}) \sqrt{1 + z_{u_{kj}}^2}}{8\pi r_k / (i_l \cdot b_k)},$$

где r_k, b_k приведены в табл. 6, μ_{a_j} и $C_{y_{aj}}$ даны в табл. 7 и обозначены $\mu_{a_{\text{цикл}}}$ и $C_{y_{a_{\text{цикл}}}}$; i_l - число лопастей, $i_l = 3$.

Например, для корневого сечения, т.е. при $k = 1$ и $r_1 = 0,2$, вычислим $A_{1,j}$, соответствующий первому элементу массива $\alpha_{\text{цикл}}$, т.е. $j = 1$:

$$A_{1,1} = C_{y_{a_{цикл1}}} \cdot \frac{(z_{u_{1,1}} + \mu_{a_{цикл1}}) \sqrt{1 + z_{u_{1,1}}^2}}{8\pi r_1 / (i_l \cdot \bar{b}_1)} =$$

$$= 0,612 \cdot \frac{(2,73 + 0,0207) \sqrt{1 + 2,73^2}}{8\pi \cdot 0,2 / (3 \cdot 0,18)} = 0,51$$

(значения $\mu_{a_{цикл}}$ и $C_{y_{a_{цикл}}}$ взяты из табл. 7, значение $z_{u_{1,1}}$ — из табл. 8, значение \bar{b}_1 — из табл. 6).

Аналогично определяются остальные $A_{1,j}$ для $k=1$, а также A_{kj} для сечений лопасти при $k=2, 3, 4, 5$. Величины A_{kj} приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения параметра A_{kj}

Номера точек массива $\alpha_{цикл}$	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение (периферия)
1	0,51	0,56	0,59	0,64	1,21
2	0,56	0,54	0,50	0,46	0,55
3	0,56	0,49	0,41	0,34	0,34
4	0,50	0,41	0,32	0,25	0,22
5	0,44	0,33	0,25	0,19	0,15
6	0,37	0,27	0,19	0,14	0,10
7	0,32	0,22	0,15	0,11	0,08
8	0,27	0,18	0,12	0,08	0,06
9	0,26	0,17	0,12	0,08	0,06

Строки табл. 9 соответствуют столбцам матрицы A_{kj} .

Определение корня уравнения (42)

Уравнение $\frac{e}{(1+e) \cdot (1-e)^2} - A = 0$ решается методом деления от-

резка пополам. Заданная погрешность $\varepsilon = 0,1$.

Приведем пример для корневого сечения ($k=1$) и первого элемента массива $\alpha_{цикл}$, т. е. из табл. 9 $A = 0,51$.

Как видно из формул (43) и (44), левая граница корней

$$e_{лев} = 0,$$

правая граница корней — $e_{прав} = \frac{A}{1+A} = 0,51/(0,51+1) = 0,34$.

По формуле (45) строим функцию $F(e_{прав}) = \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} - A$ и сравниваем ее знаки на левой и правой границах интервала $[e_{лев}; e_{прав}]$:

$$F(e_{лев}) = -A = -0,51 < 0;$$

$$F(e_{прав}) = \frac{0,34}{(1+0,34) \cdot (1-0,34)^2} - 0,51 = 0,072 > 0.$$

Величину разности вычисляем по выражению (46): $d = e_{прав} - e_{лев} = 0,34 - 0 = 0,34 > 0,1$, т.е. точность не достигнута и мы делим отрезок $[e_{лев}; e_{прав}]$ пополам. Первое приближение искомого корня — полусумма левого и правого концов интервала:

$$e_{1_x} = 0,5 \cdot (e_{прав} + e_{лев}) = 0,5 \cdot (0 + 0,34) = 0,17.$$

Определяем знак $F(e)$ при $e = e_{1_x} = 0,17$:

$$F(0,17) = \frac{0,17}{(1+0,17) \cdot (1-0,17)^2} - 0,51 = -0,30 < 0.$$

Знак функции в точке $e = e_{1_x}$ совпадает со знаком функции при $e = e_{лев}$, поэтому левому концу интервала приписываем значение e_{1_x} , т.е. $e_{лев} = e_{1_x} = 0,17$, а правый остается прежним $e_{прав} = 0,34$.

Находим разность

$$d = e_{прав} - e_{лев} = 0,34 - 0,17 = 0,17 > 0,1,$$

т.е. точность не достигнута и мы идем на новое дробление интервала пополам.

Второе приближение — полусумма новых значений $e_{лев}$ и $e_{прав}$:

$$e_{2_x} = 0,5 \cdot (e_{прав} + e_{лев}) = 0,5 \cdot (0,17 + 0,34) = 0,254.$$

Определяем знак $F(e)$ при $e = e_{2_x} = 0,254$:

$$F(e_{2_x}) = \frac{0,254}{(1 + 0,254) \cdot (1 - 0,254)^2} - 0,51 = -0,148 < 0.$$

При $e = e_{2_x}$ знак функции $F(e)$ снова совпадает со знаком функции на левом конце интервала, следовательно, заменяем $e_{лев}$ на e_{2_x} , в результате чего имеем $e_{лев} = 0,254$, правый конец интервала оставляем прежним, т.е. $e_{прав} = 0,34$. Оцениваем разность $d = e_{прав} - e_{лев} = 0,34 - 0,254 = 0,086 < 0,1$.

Таким образом, точность достигнута на втором шаге процесса приближений, и мы принимаем, что приближенным значением искомого корня является $e_x = e_{x_2} = 0,254 \approx 0,25$.

Итак, найден коэффициент торможения e для первого (корневого) сечения и для первого элемента массива $\alpha_{цикл}$ (варьируемого угла атаки). Аналогично получаем e для других элементов $\alpha_{цикл}$ и других сечений. В табл. 10 приведены эти значения.

Таблица 10

Значения коэффициента торможения e

Номер точек массива	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение (периферия)
1	0,25	0,27	0,28	0,29	0,48
2	0,27	0,26	0,25	0,24	0,27
3	0,27	0,25	0,22	0,19	0,19
4	0,25	0,22	0,18	0,10	0,09
5	0,23	0,19	0,10	0,08	0,06
6	0,20	0,16	0,08	0,06	0,05
7	0,18	0,09	0,07	0,05	0,04
8	0,16	0,08	0,06	0,04	0,03
9	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02

Строки табл. 10 соответствуют столбцам матрицы e_{kj} .

Определение приведенного относительного элементарного момента

По уравнению (53)

$$\overline{M}_{kj}^* = \frac{8r_k^{-2}}{1 + e_{kj}} \cdot e_{kj} \cdot \frac{1 - \mu_{\alpha_{цикл}j} \cdot z_{u_{kj}}}{z_{u_{kj}} + \mu_{\alpha_{цикл}j}},$$

где k — номер сечения: $k = 1, 2, \dots, 5$; j — номер элемента варьируемого параметра $\alpha_{цикл}$; значения \overline{r}_k , $\mu_{\alpha_{цикл}j}$, $z_{u_{kj}}$ и e_{kj} даны в табл. 5, 7, 8 и 9.

Дадим пример вычисления приведенного элементарного момента для корневого сечения ($k = 1$) и первого элемента варьируемого параметра $\alpha_{цикл}$:

$$\begin{aligned} \overline{M}_{1,1}^* &= \frac{8r_1^{-2}}{1 + e_{1,1}} \cdot e_{1,1} \cdot \frac{1 - \mu_{\alpha_{цикл}1} \cdot z_{u_{1,1}}}{z_{u_{1,1}} + \mu_{\alpha_{цикл}1}} = \\ &= \frac{8 \cdot 0,2^2}{1 + 0,25} \cdot 0,25 \cdot \frac{1 - 0,0207 \cdot 2,73}{2,73 + 0,0207} = 0,022. \end{aligned}$$

В табл. 11 приведены значения \overline{M}^* для остальных значений элементов $\alpha_{цикл}$ и остальных сечений.

Таблица 11

Значения приведенного относительного элементарного момента

Номер точек массива	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение (периферия)
1	0,022	0,054	0,085	0,105	0,099
2	0,027	0,066	0,105	0,134	0,142
3	0,030	0,074	0,116	0,148	0,159
4	0,031	0,074	0,114	0,098	0,102
5	0,030	0,070	0,074	0,088	0,087
6	0,028	0,064	0,064	0,073	0,070
7	0,026	0,038	0,053	0,058	0,053
8	0,023	0,032	0,043	0,046	0,040
9	0,014	0,026	0,033	0,034	0,027

Строки табл. 11 соответствуют столбцам матрицы \overline{M}_{kj}^* .

2.3.4. Построение коэффициентов быстроходности конца лопасти, создаваемых элементарными лопастями, расположенными на радиусах r_k

Коэффициенты быстроходности конца лопасти определяются по второму уравнению связи (см. формулу (2)) при различных углах атаки $\alpha_{цикл}$:

$$z_{R_{kj}} = \left(z_{u_{kj}} \cdot (1 - e_{kj}) - \frac{e_{kj}}{z_{u_{kj}} \cdot (1 + e_{kj})} \right) / \overline{r_k},$$

где $z_{u_{kj}}$ — коэффициент относительных модулей, приведенный в табл. 8;

e_{kj} — коэффициент торможения (см. табл. 10); $\overline{r_k}$ — относительное расстояние сечения от оси колеса (см. табл. 6).

В качестве примера вычислим z_R для корневого сечения ($k=1$) и номера $j=1$, соответствующего первому элементу массива варьируемого параметра $\alpha_{цикл}$:

$$\begin{aligned} z_{R_{1,1}} &= \left(z_{u_{1,1}} \cdot (1 - e_{1,1}) - \frac{e_{1,1}}{z_{u_{1,1}} \cdot (1 + e_{1,1})} \right) / \overline{r_1} = \\ &= \left(2,73 \cdot (1 - 0,25) - \frac{0,25}{2,73 \cdot (1 + 0,25)} \right) / 0,2 = 9,8. \end{aligned}$$

В табл. 12 приведены значения z_R для всех сечений лопасти ($k=1, 2, \dots, 5$) и всех элементов массива $\alpha_{цикл}$ ($j=1, 2, \dots, 9$).

Таблица 12

Значения коэффициентов быстроходности конца лопасти z_R

Номер точек массива	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение (периферия)
1	9,8	8,2	7,7	7,9	8,8
2	8,3	6,8	6,2	6,1	7,1
3	7,3	5,9	5,2	5,0	5,5
4	6,7	5,2	4,6	4,5	4,7
5	6,1	4,8	4,3	3,9	3,9
6	5,7	4,4	3,9	3,4	3,3
7	5,3	4,3	3,5	3,0	2,9
8	4,9	3,9	3,1	2,7	2,5
9	5,0	3,6	2,8	2,4	2,3

Строки табл. 12 соответствуют столбцам матрицы $Z_{R_{kj}}$.

2.3.5. Построение одномерного массива коэффициентов быстроходности z_h

Определяем минимальный и максимальный элементы одномерного массива z_h .

На основании табл. 12 с убывающими элементами строк, представляющей собой транспонированную матрицу элементов коэффициента z_R , находим минимальный элемент матрицы z_R как минимальный элемент последнего (девятого) столбца матрицы z_R , или девятой строки табл. 12, и максимальный элемент матрицы z_R как максимальный элемент первого столбца матрицы z_R , или первой строки табл. 12:

$$z_{R_{\min}} = \min(5,0; 3,6; 2,8; 2,4; 2,3) = 2,3;$$

$$z_{R_{\max}} = \max(9,8; 8,2; 7,7; 7,9; 8,8) = 9,8.$$

Таким образом, одномерный массив z_h расположен между числами

$$z_{R_{\min}} = 2,3 \text{ и } z_{R_{\max}} = 9,8.$$

Присвоим первому элементу одномерного массива z_h минимальное значение элементов матрицы z_R в соответствии с формулой (55):

$$z_h(1) = z_{R_{\min}} = 2,3.$$

По формуле (56) вычисляем целое число, ближайшее к $z_{R_{\min}}$, но большее его:

$$z_{\min_{\text{цел}}} = E_1(z_{R_{\min}}) + 1 = E_1(2,3) + 1 = 2 + 1 = 3.$$

Как следует из уравнения (57), это вторая точка массива z_h :

$$z_h(2) = z_{\min_{\text{цел}}} = 3.$$

Определим целое число, ближайшее к $z_{R_{\max}}$, но меньшее его:

$$z_{\max_{\text{цел}}} = E_1(z_{R_{\max}}) = E_1(9,8) = 9.$$

В полуоткрытом интервале $[z_{\min_{\text{цел}}}; z_{\max_{\text{цел}}})$, то есть в интервале $[3;9)$ расположим элементы массива z_h , идущие через постоянный шаг, начиная с элемента $z_h = 3$. Количество этих точек по формуле (59)

$$n_{\text{кон}} = E_1((z_{\min_{\text{цел}}} - z_{\max_{\text{цел}}}) / H_z) + 1,$$

или при выбранном шаге $H_Z = 1,5$ и для полученных выше $z_{\min_{цел}}$ и $z_{\max_{цел}}$

$$n_{кон} = E_I \left(\frac{9-3}{1,5} \right) + 1 = E_I(4) + 1 = 4 + 1 = 5.$$

Величины элементов в полуоткрытом интервале $[z_{\min_{цел}}, z_{\max_{цел}})$ определяем по формуле (60):

$$z_h(i_u + 1) = z_{\min_{цел}} + H_Z \cdot (i_u - 1) = 3 + 1,5 \cdot (i_u - 1),$$

где $i_u = 1, 2, 3, 4, 5$.

$$\text{Для } i_u = 1, \quad z_h(2) = z_{\min_{цел}} = 3;$$

$$i_u = 2, \quad z_h(3) = z_{\min_{цел}} + 1 \cdot 1,5 = 3 + 1,5 = 4,5;$$

$$i_u = 3, \quad z_h(4) = 3 + 2 \cdot 1,5 = 6;$$

$$i_u = 4, \quad z_h(5) = 3 + 3 \cdot 1,5 = 7,5;$$

$$i_u = 5, \quad z_h(6) = 3 + 4 \cdot 1,5 = 9.$$

В данном частном случае правый конец интервала также вошел в число точек, идущих через равный шаг, — это зависит от конкретного соотношения шага H_Z и длины интервала $(z_{\max_{цел}}; z_{\min_{цел}})$ — см. подразд. 1.3.9.

Последняя точка одномерного массива z_h :

$$z_h(7) = z_{\max} = 9,8.$$

Итак, общее число точек массива z_h , (см. (62)).

$$n_Z = n_{кон} + 2 = 5 + 2 = 7.$$

Одномерный массив z_h :

$$z_h(1) = 2,3; \quad z_h(2) = 3; \quad z_h(3) = 4,5; \quad z_h(4) = 6; \quad z_h(5) = 7,5;$$

$$z_h(6) = 9; \quad z_h(7) = 9,8.$$

2.3.6. Построение моментной характеристики

Для примера построим коэффициент суммарного теоретического момента для пятого элемента одномерного массива z_h , т. е. для $z_h(5) = 7,5$.

В табл. 12 для каждого столбца ($k=1, 2, 3, 4, 5$), соответствующего строке матрицы Z_R , т. е. сечению лопасти, определяем номер i_t элемента столбца, ближайшего к данному числу 7,5, но меньшего его:

$$\begin{aligned} k=1 \text{ (корень)} & \quad 7,3 < 7,5 < 8,3; \quad i_t = 3; \\ k=2 & \quad 6,8 < 7,5 < 8,2; \quad i_t = 2; \\ k=3 & \quad 6,2 < 7,5 < 7,7; \quad i_t = 2; \\ k=4 & \quad 6,1 < 7,5 < 7,9; \quad i_t = 2; \\ k=5 \text{ (периферия)} & \quad 7,1 < 7,5 < 8,8; \quad i_t = 2. \end{aligned}$$

По формуле (66) и с помощью табл. 11 и 12 для приведенного относительного элементарного момента $\overline{\Delta M}^*$ и коэффициента быстроходности Z_R находим интерполяционное значение $\overline{\Delta M}_{инт}^*$ при $Z = 7,5$ в интервале между номерами i_t и $i_t - 1$ для сечения с номером k :

$$\begin{aligned} \overline{M}_{инт k}^*(z) &= \overline{M}_{k, i_t - 1}^* + \left(\overline{M}_{k, i_t}^* - \overline{M}_{k, i_t - 1}^* \right) \times \\ &\times \left(\frac{z - z_{R_{k, i_t - 1}}}{z_{R_{k, i_t}} - z_{R_{k, i_t - 1}}} \right). \end{aligned}$$

Для $k=1$ (корневое сечение):

$$\begin{aligned} i_t = 3, \quad i_t - 1 = 2; \quad \overline{M}_{1,2}^* = 0,027; \quad \overline{M}_{1,3}^* = 0,030; \\ z_{R_{1,2}} = 8,3; \quad z_{R_{1,3}} = 7,3; \end{aligned}$$

$$\overline{M}_{инт 1}^*(7,5) = 0,027 + (0,030 - 0,027) \cdot \frac{7,5 - 8,3}{7,3 - 8,3} = 0,029.$$

Для $k=2$

$$\begin{aligned} i_t = 2; \quad i_t - 1 = 1; \quad \overline{M}_{2,1}^* = 0,054; \quad \overline{M}_{2,2}^* = 0,066; \\ z_{R_{2,1}} = 8,2; \quad z_{R_{2,2}} = 6,8; \end{aligned}$$

$$\overline{M}_{инт 2}^*(7,5) = 0,054 + (0,066 - 0,054) \cdot \frac{7,5 - 8,2}{6,8 - 8,2} = 0,060.$$

Для $k=3$

$$\begin{aligned} i_t = 2; \quad i_t - 1 = 1; \quad \overline{M}_{3,1}^* = 0,085; \quad \overline{M}_{3,2}^* = 0,105; \\ z_{R_{3,1}} = 7,7; \quad z_{R_{3,2}} = 6,2; \end{aligned}$$

$$\overline{M}_{инт 3}^*(7,5) = 0,085 + (0,105 - 0,085) \cdot \frac{7,5 - 7,7}{6,2 - 7,7} = 0,088.$$

Для $k = 4$

$$i_t=2, \quad i_t-1=1; \quad \overline{M}_{4,1}^* = 0,105; \quad \overline{M}_{4,2}^* = 0,134;$$

$$z_{R_{4,1}} = 7,9; \quad z_{R_{4,2}} = 6,1;$$

$$\overline{M}_{инт_4}^*(7,5) = 0,105 + (0,134 - 0,105) \cdot \frac{7,5 - 7,9}{6,1 - 7,9} = 0,110.$$

Для $k = 5$ (периферия)

$$i_t=2, \quad i_t-1=1; \quad \overline{M}_{5,1}^* = 0,099; \quad \overline{M}_{5,2}^* = 0,142;$$

$$z_{R_{5,1}} = 8,8; \quad z_{R_{5,2}} = 7,1;$$

$$\overline{M}_{инт_5}^*(7,5) = 0,099 + (0,142 - 0,099) \cdot \frac{7,5 - 8,8}{7,1 - 8,8} = 0,132.$$

Коэффициент суммарного теоретического момента для $z = 7,5$.

По формуле (64) определяем

$$C_{m_{теор}}(z) \equiv \overline{M}_{сум}(z) =$$

$$= \Delta \bar{r} \cdot \left(\left(\overline{M}_{инт_1}^*(z) + \overline{M}_{инт_n}^*(z) \right) / 2 + \sum_{k=2}^{n-1} \overline{M}_{инт_k}^*(z) \right),$$

где n — число сечений.

Из уравнения (65) $\Delta \bar{r} = (1 - \bar{d}_0) / (n - 1)$ — относительный шаг между сечениями, где $\bar{d}_0 = \bar{r}_0$ приведено в исходных данных.

В нашем случае $\bar{d}_0 = 0,2$, $n = 5$ и $\Delta \bar{r} = 0,2$, тогда

$$C_{m_{теор}}(7,5) = \overline{M}_{сум}(7,5) = 0,2 \cdot \left(\left(\overline{M}_{инт_1}^*(7,5) + \overline{M}_{инт_5}^*(7,5) \right) / 2 + \right.$$

$$\left. + \overline{M}_{инт_2}^*(7,5) + \overline{M}_{инт_3}^*(7,5) + \overline{M}_{инт_4}^*(7,5) \right) = 0,2 \cdot \left(\frac{0,029 + 0,132}{2} + \right.$$

$$\left. + 0,060 + 0,088 + 0,110 \right) = 0,0677.$$

Из коэффициента суммарного теоретического момента должен быть вычтен коэффициент концевых потерь, зависящий от среднеарифметического коэффициента торможения по сечениям лопасти $e_{ср}$ (см. формулу (68)).

Коэффициент $e_{ср}$ находим с помощью интерполяционных значений e — $E_{инт_k}$ для каждого сечения. Для $z = 7,5$ получаем $E_{инт_k}$ анало-

гично тому, как это выполнялось для $\overline{M}_{инт_k}^*$, только вместо значений \overline{M}^* (см. табл. 11) используются значения e из табл. 10.

В итоге имеем: $E_{инт_1} = 0,269$; $E_{инт_2} = 0,267$; $E_{инт_3} = 0,275$; $E_{инт_4} = 0,280$; $E_{инт_5} = 0,314$ (их округленные значения приведены в табл. 14). Среднеарифметическое значение этих величин находим по (68):

$$e_{cp} = (E_{инт_1} + E_{инт_2} + E_{инт_3} + E_{инт_4} + E_{инт_5})/n = \\ = (0,269 + 0,267 + 0,275 + 0,280 + 0,314)/5 = 0,281.$$

Итак, $e_{cp} = 0,281$.

Коэффициент конечных потерь определяем по уравнению (69):

$$\overline{M}_{конц} = \frac{4e_{cp}^2}{z \cdot (1 + e_{cp})} \cdot \left(\frac{8\sqrt{1 + \left(\frac{(1 - e_{cp})}{z}\right)^2}}{(1 + e_{cp}) \cdot i_l \cdot z} - 1 \right) / \sqrt{1 + \left(\frac{i_l \cdot z}{\pi \cdot (1 - e_{cp}/2)}\right)^2}.$$

В нашем случае $z = 7,5$; $e_{cp} = 0,281$; $i_l = 3$, тогда

$$\overline{M}_{конц} = \frac{4 \cdot 0,281^2}{7,5 \cdot (1 + 0,281)} \cdot \left(\frac{8 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1 - 0,281}{7,5}\right)^2}}{(1 + 0,281) \cdot 3 \cdot 7,5} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 7,5}{\pi \cdot (1 - 0,281/2)}\right)^2}} \right) = 0,0052.$$

Следовательно, коэффициент момента (см. (70))

$$C_m = C_{теор} - \overline{M}_{конц} = 0,0677 - 0,0052 = 0,0625,$$

или приближенно: $C_m = 0,063$.

Аналогично строятся значения C_m для остальных шести значений z .

2.3.7. Построение мощностной характеристики

Как следует из формулы (71), коэффициент мощности $C_p = C_m \cdot z$. В нашем случае $C_m = 0,063$; $z = 7,5$.

Следовательно,

$$C_p = 0,063 \cdot 7,5 \cong 0,47.$$

Аналогично строятся значения C_p для остальных шести значений z .

В табл. 13 приведены параметры мощностной и моментной характеристик.

Таблица 13

Мощностная и моментная характеристики

Номер точек	Коэффициент быстроходности, z	Коэффициент мощности, C_p	Коэффициент момента, C_m
1	2,3	- 0,17	- 0,078
2	3,0	0,008	0,003
3	4,5	0,28	0,060
4	6,0	0,45	0,075
5	7,5	0,47	0,063
6	9,0	0,43	0,048
7	9,8	0,38	0,039

2.4. Коэффициент силы лобового давления на колесо

2.4.1. Коэффициент силы лобового давления B при расчетной скорости ветра

По формуле (78) приближенная величина коэффициента лобового давления на колесо при расчетной скорости ветра

$$B = \Delta \bar{r} \cdot \left(\frac{f_1 + f_n}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} f_k \right) i_n / \pi .$$

В нашем случае (см. (65))

$$\Delta \bar{r} = (1 - r_0) / (n - 1) = (1 - 0,2) / (5 - 1) = 0,2; n=5; i_n = 3.$$

Из формулы (79) имеем

$$f_k = C_{y_{ak}} \cdot \bar{b}_k \cdot (1 - e_k)^2 / \sin^2 \beta_k ,$$

где k — номер сечения.

Величины \bar{b}_k (относительных хорд сечений) приведены в табл. 6. Под величинами $C_{y_{ak}}$, e_k , β_k подразумеваются интерполяционные значения этих величин для заданного z_h в зависимости от номера k сечения. В частности, $e_k = E_{инт k}$ подсчитано выше, а $C_{y_{ak}}$ и β_k для найденного номера i_t , зависящего от номера сечения, находятся с помощью интерполяции элементов $C_{y_{aj}}$ (см. табл. 7) и β_{kj} (см. табл. 8) по формулам (80) и (81) и вместе с e_k приведены в виде таблицы в зависимости от номера сечения при заданном коэффициенте быстроходности $z_h = 7,5$ (табл. 14).

Интерполяционные значения параметров для пяти сечений лопасти

Параметры	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение (периферия)
Коэффициент торможения $E_{инт}$	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31
Угол притекания β	24,6°	13,6°	9,1°	6,9°	5,3°
Коэффициент подъемной силы C_{y_a}	1,02	0,73	0,64	0,66	0,80

Для примера

$$f_1 = C_{y_a 1} \cdot \bar{b}_1 \cdot (1 - e_1)^2 / \sin^2 \beta_1 =$$

$$= 1,02 \cdot 0,18 \cdot (1 - 0,27)^2 / \sin^2 24,6^\circ = 0,565.$$

Аналогично получаем

$$f_2 = 1,055; f_3 = 1,592; f_4 = 2,075; f_5 = 2,678.$$

Определяем величину коэффициента лобового давления B на колесо при расчетной скорости ветра (см. формулу (78)):

$$B = 0,2 \cdot \left(\frac{0,565 + 2,678}{2} + 1,055 + 1,592 + 2,075 \right) \cdot 3 / \pi = 1,17.$$

Аналогично могут быть найдены B для остальных значений z . Значения B приведены в табл. 15.

2.4.2. Коэффициент силы лобового давления $B_{пор}$ при порыве ветра

Коэффициент порыва ветра

По формуле (83) определяем $K_{пор}$:

$$K_{пор} = V_{пор} / V = 25 / 7,5 = 3,33.$$

Угол притекания при порыве

По уравнению (82) вычисляем $\beta_{пор_k} = \arctg((tg \beta_k) \cdot K_{пор})$.

Следовательно:

$$\beta_{nop_1} = \arctg((tg24,6^\circ) - 3,33) = 56,7^\circ;$$

$$\beta_{nop_2} = \arctg((tg13,6^\circ) - 3,33) = 38,9^\circ;$$

$$\beta_{nop_3} = \arctg((tg9,1^\circ) - 3,33) = 28,1^\circ;$$

$$\beta_{nop_4} = \arctg((tg6,9^\circ) - 3,33) = 21,9^\circ;$$

$$\beta_{nop_5} = \arctg((tg5,3^\circ) - 3,33) = 17,2^\circ.$$

Коэффициент силы лобового давления при порыве

Из формулы (86) находим

$$B_{nop} = K_{nop}^2 \Delta \bar{r} \cdot \left(\frac{f_{nop_1} + f_{nop_n}}{2} + \sum_{k=2}^{n-1} f_{nop_k} \right) i_{л} / \pi,$$

где по (87) $f_{nop_k} = C_{y_a k} \cdot \bar{b}_k \cdot (1 - e_k)^2 / \sin^2 \beta_{nop_k}$; $C_{y_a k}$, \bar{b}_k , e_k — те же, что и для случая определения B при расчетной скорости ветра (см. табл. 6 и табл. 14), а величины угла притекания при порыве β_{nop_k} подсчитаны выше.

В качестве примера определим f_{nop_1} :

$$\begin{aligned} f_{nop_1} &= C_{y_a 1} \cdot \bar{b}_1 \cdot (1 - e_1)^2 / \sin^2 \beta_{nop_1} = \\ &= 1,02 \cdot 0,18 \cdot (1 - 0,27)^2 / \sin^2 56,7^\circ = 0,140. \end{aligned}$$

Аналогично вычисляются:

$$f_{nop_2} = 0,148; \quad f_{nop_3} = 0,179; \quad f_{nop_4} = 0,215; \quad f_{nop_5} = 0,261.$$

Определяем B_{nop} :

$$\begin{aligned} B_{nop} &= (3,33)^2 \cdot 0,2 \cdot \left(\frac{0,140 + 0,261}{2} + 0,148 + 0,179 + 0,215 \right) \cdot 3 / \pi = \\ &= 1,53. \end{aligned}$$

2.4.3. Сравнение B и $B_{пор}$, определение коэффициента перегрузки

При заданном коэффициенте быстроходности $z = 7,5$ найденные величины B и $B_{пор}$ равны: $B = 1,17$, $B_{пор} = 1,53$.

Итак, коэффициент перегрузки (см. формулу (88))

$$n_{перезр} = B_{пор} / B = 1,3 / 1,17 = 1,3.$$

То есть, при увеличении скорости ветра с 7,5 до 25 м/с коэффициент силы лобового давления увеличивается на 30 %.

Значения B и $B_{пор}$ для остальных величин z приведены в табл. 15.

Таблица 15

Коэффициент лобового давления

Номера точек	Коэффициент быстроходности z	Коэффициент лобового давления при расчетной скорости ветра B	Коэффициент лобового давления при порыве ветра $B_{пор}$
1	2,3	0,38	1,56
2	3,0	0,53	1,32
3	4,5	0,77	1,46
4	6,0	1,03	1,54
5	7,5	1,17	1,53
6	9,0	1,32	1,55
7	9,8	1,53	1,68

2.5. Графическое представление расчетных характеристик ветроколеса

Расчетные зависимости коэффициентов мощности C_p , момента C_m и лобового давления B от коэффициента быстроходности z (см. табл. 13 и 15) представлены в виде графиков на рис. 5 — 7 для расчетного угла установки, т. е. $\Delta\varphi = 0^\circ$. Там же в качестве примера нанесены регулировочные кривые для $\Delta\varphi = 4^\circ$ и $\Delta\varphi = 8^\circ$. Их расчет предлагается в виде самостоятельного задания.

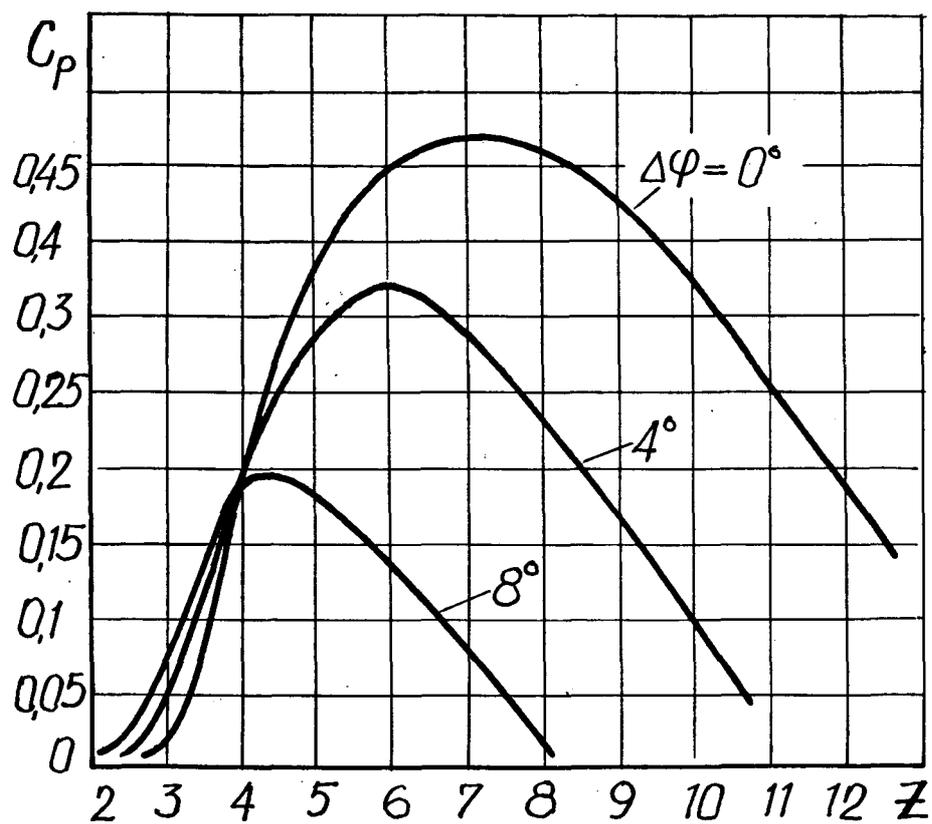


Рис. 5. Коэффициент мощности

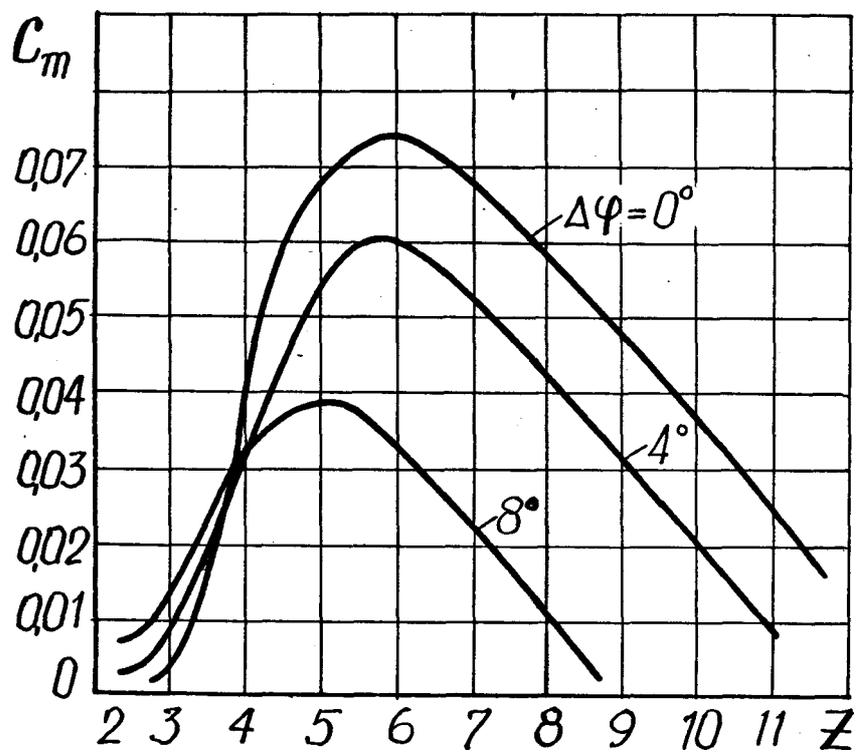


Рис. 6. Коэффициент момента

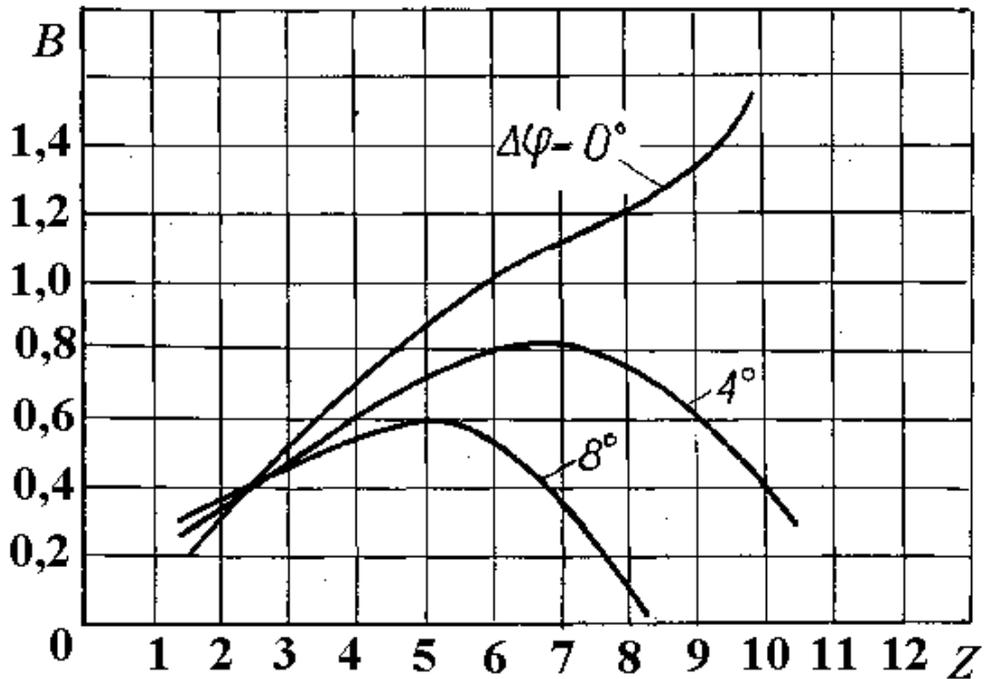


Рис. 7. Коэффициент лобового давления

2.6. Выбор рабочей точки характеристики

В табл. 13 даны параметры C_p и C_m в зависимости от коэффициента быстроходности z . Определяем точку, где коэффициент мощности является максимальным. Это $C_{p_{расч}} = 0,47$ при $z = 7,5$; при этом

$$C_{m_{расч}} = 0,063, \quad z_{p.m} = 7,5.$$

По формуле (72) уменьшенное значение C_p :

$$C_p = 0,85 \cdot C_{p_{расч}} = 0,85 \cdot 0,47 = 0,4;$$

$$C_m = C_p / z_{p.m} = 0,4 / 7,5 = 0,053.$$

2.7. Расчет размерных параметров ветроколеса

2.7.1. Исходные данные расчета размерных параметров

Исходными данными для расчета размерных параметров являются (см. табл. 1):

номинальная мощность $N = 1000 \text{ Вт};$

КПД электрический $\eta_{эл} = 0,6;$

КПД механический $\eta_{мех} = 0,9;$

плотность воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;

скорость ветра расчетная $V = 7,5 \text{ м/с}$;

скорость ветра при порыве $V_{пор} = 25 \text{ м/с}$,

найденный расчетным путем коэффициент быстроходности в рабочей точке $z_{p.m} = 7,5$, а также коэффициенты $C_{p_{расч}}$ и $C_{m_{расч}}$ в рабочей точке

$$C_{p_{расч}} = 0,47; C_{m_{расч}} = 0,063.$$

Уточненные по (72) и (73) коэффициенты C_p и C_m таковы:

$$C_p = 0,85 \cdot C_{p_{расч}} = 0,85 \cdot 0,47 = 0,4;$$

$$C_m = C_p / z_{p.m} = 0,4 / 7,5 = 0,053.$$

К исходным данным расчета относятся также безразмерные координаты профиля типа «Эсперо» пятнадцатипроцентной толщины (см. табл. 3).

2.7.2. Расчетные параметры ветроколеса

Наружный диаметр ветроколеса

По формуле (89) определяем

$$D_{расч} = \sqrt{\frac{8N}{C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1000}{0,4 \cdot 1,2 \cdot 7,5^3 \cdot \pi \cdot 0,6 \cdot 0,9}} = 4,8 \text{ м.}$$

Принимаем $D = 5 \text{ м}$.

Радиус ветроколеса

$$R = D / 2 = 5 / 2 = 2,5 \text{ м} = 2500 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр ветроколеса

$$d_0 = \bar{d}_0 \cdot D = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ м.}$$

Радиус расположения сечения лопасти

Из формулы (92) имеем

$$r_k = \bar{r}_k \cdot R ;$$

$$r_1 = 0,2 \cdot 2500 \text{ мм} = 500 \text{ мм};$$

$$r_2 = 0,4 \cdot 2500 \text{ мм} = 1000 \text{ мм};$$

$$r_3 = 0,6 \cdot 2500 \text{ мм} = 1500 \text{ мм};$$

$$r_4 = 0,8 \cdot 2500 \text{ мм} = 2000 \text{ мм};$$

$$r_5 = 1 \cdot 2500 \text{ мм} = 2500 \text{ мм}.$$

Расстояние между сечениями лопасти (шаг)

Из уравнения (93) находим $\Delta r = \Delta \bar{r} \cdot R = 0,2 \cdot 2,5 = 0,5 \text{ м} = 500 \text{ мм}$.

Хорда сечения

По формуле (94) определяем $b_k = \bar{b}_k \cdot R$.

Найденные и представленные в табл. 6 величины \bar{b}_k должны быть скорректированы. В связи с тем, что полученная величина $\bar{b}_{\text{корн}_R} = 0,18$ очень велика, а общепринятым значением является $\bar{b}_{\text{корн}_R} = 0,12$ или $\bar{b}_{\text{корн}_D} = 0,06$, получим значения \bar{b}_{k_R} для всех промежуточных сечений, считая, как и раньше, что \bar{b}_k меняется по линейному закону от \bar{r}_k . При этом на периферийном сечении $\bar{b}_{\text{периф}_R} = 0,06$, то есть на периферии оставляем старое значение:

$$\bar{b}_{k_R} = \bar{b}_{\text{корн}_R} + (\bar{b}_{\text{периф}_R} - \bar{b}_{\text{корн}_R}) \cdot (k-1) / (5-1),$$

или, учитывая, что $\bar{b}_{\text{корн}_R} = 0,12$, а $\bar{b}_{\text{периф}_R} = 0,06$:

$$\bar{b}_{k_R} = 0,12 + (0,06 - 0,12) \cdot (k-1) / 4,$$

или

$$\bar{b}_{k_R} = 0,12 - 0,015 \cdot (k-1).$$

Безразмерные и размерные величины хорды в зависимости от номера сечения лопасти даны соответственно в табл. 16 и 17.

Таблица 16

Безразмерные величины хорды

Номер сечения	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение периферия
\bar{b}_{kR}	0,12	0,105	0,09	0,075	0,06

Таблица 17

Размерная хорда при $R = 2,5 \text{ м} = 2500 \text{ мм}$

Номер сечения	Первое сечение (корень)	Второе сечение	Третье сечение	Четвертое сечение	Пятое сечение периферия
$b_k, \text{мм}$	300	262,5	225	187,5	150

Толщина профиля

Толщина профиля k -го сечения (см. формулу (95)) $c_k = \bar{c}_k \cdot b_k$. Для профилей пятнадцатипроцентной толщины $\bar{c}_k = 0,15$, т. е. $c_k = 0,15 \cdot b_k$.

Для пяти сечений:

$$\begin{aligned} c_1 &= 0,15 \cdot b_1 = 0,15 \cdot 300 \text{ мм} = 45 \text{ мм}; \\ c_2 &= 0,15 \cdot b_2 = 0,15 \cdot 262,5 \text{ мм} = 39,4 \text{ мм}; \\ c_3 &= 0,15 \cdot b_3 = 0,15 \cdot 225 \text{ мм} = 33,8 \text{ мм}; \\ c_4 &= 0,15 \cdot b_4 = 0,15 \cdot 187,5 \text{ мм} = 28,1 \text{ мм}; \\ c_5 &= 0,15 \cdot b_5 = 0,15 \cdot 150 \text{ мм} = 22,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Координаты профилей

Для выбранного профиля "Эсперо" безразмерные координаты верхней ($\underline{x}, \underline{y}_B$) и нижней ($\underline{x}, \underline{y}_H$) дуг приведены в табл. 3.

С помощью пересчета для размерных хорд b_k и толщин c_k получаем таблицы размерных координат профилей.

Приводим табл. 18 координат профиля для первого (корневого) сечения, полученных по формулам (см. обозначения в табл. 3):

$$x_i = \bar{x}_i \cdot \frac{b_1}{100}; \quad y_{vi} = \bar{y}_{vi} \cdot \frac{c_1}{100}; \quad y_{ni} = \bar{y}_{ni} \cdot \frac{c_1}{100}, \text{ или}$$

$$x_i = \bar{x}_i \cdot 300 / 100; \quad y_{vi} = \bar{y}_{vi} \cdot 45 / 100; \quad y_{ni} = \bar{y}_{ni} \cdot 45 / 100.$$

Таблица 18

Координаты профиля первого (корневого) сечения лопасти

Номер точек	x , мм	y_v , мм	y_n , мм
1	0	18,8	18,8
2	3,8	24,2	12,6
3	7,5	27,3	10,3
4	15	31,2	7,5
5	30	37,0	5,0
6	60	43,2	2,5
7	90	45,3	1,0
8	120	45,0	0
9	150	42,5	0
10	180	37,4	0
11	210	31,2	0
12	240	23,0	0
13	270	13,8	0
14	292,5	52,2	0
15	300	1,0	0

Координаты центра совмещения профилей (ЦСП)

В соответствии с подразд. 1.1 имеем:

$$x_{\text{цсп}} = b_k \cdot 0,352;$$

$$y_{\text{цсп}} = c_k \cdot 0,5.$$

Для первого сечения

$$x_{\text{цсп}_1} = b_1 \cdot 0,352 = 300 \text{ мм} \cdot 0,352 = 105,6 \text{ мм};$$

$$y_{\text{цсп}_1} = c_1 \cdot 0,5 = 45 \text{ мм} \cdot 0,5 = 22,5 \text{ мм}.$$

Аналогично для остальных сечений

$$\begin{cases} x_{цсп_2} = 92,4 \text{ мм}; \\ y_{цсп_2} = 19,7 \text{ мм}; \end{cases} \begin{cases} x_{цсп_3} = 79,2 \text{ мм}; \\ y_{цсп_3} = 16,9 \text{ мм}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{цсп_4} = 66,0 \text{ мм}; \\ y_{цсп_4} = 14,1 \text{ мм}; \end{cases} \begin{cases} x_{цсп_5} = 52,8 \text{ мм}; \\ y_{цсп_5} = 11,3 \text{ мм}. \end{cases}$$

Частота вращения ветроколеса в рабочей точке характеристики

При $z = 7,5$ и $D = 5$ м

$$n = \frac{60 \cdot V \cdot Z}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 7,5 \cdot 7,5}{\pi \cdot 5} = 215 \text{ об/мин.}$$

Крутящий момент

Крутящий момент, создаваемый ветроколесом на валу электрогенератора:

$$M_{кр} = C_m \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех} =$$

$$= 0,053 \cdot 1,2 \cdot 7,5^2 / 16 \cdot \pi \cdot 5^3 \cdot 0,6 \cdot 0,9 = 47,4 \text{ Н·м.}$$

Угловая скорость вращения ветроколеса

Угловая скорость вращения ветроколеса, выраженная через частоту вращения:

$$\omega = \pi \cdot n / 30 = \pi \cdot 215 / 30 = 22,5 \text{ 1/с.}$$

Для сравнения определим крутящий момент через мощность на валу N и угловую скорость ω :

$$M_{кр} = N / \omega = 1000 / 22,5 = 44,4 \text{ Н·м.}$$

Имеем отличие от $M_{кр}$, вычисленного выше, на 6 %, что связано с округлением принимаемого диаметра ($D = 5$ м вместо $D = 4,8$ м).

При $D = 4,8$ м величины $M_{кр}$ совпадают.

Сила лобового давления на колесо

Размерная сила лобового давления на колесо определяется по формулам

$$P = B \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ Н}; \quad P_{\text{пор}} = B_{\text{пор}} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ Н}.$$

Величины B и $B_{\text{пор}}$ даны в табл. 15 в зависимости от Z .

В табл. 19 приведены величины P и $P_{\text{пор}}$ в зависимости от Z .

Таблица 19

Лобовое давление на колесо

Номер точек	Коэффициент быстроходности z , о.е.	Лобовое давление при расчетной скорости ветра P , Н	Лобовое давление при порыве ветра P , Н
1	2,3	252	1034
2	3	351	875
3	4,5	510	968
4	6	683	1021
5	7,5	775	1014
6	9	875	1027
7	9,8	1014	1113

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По представленной методике могут быть получены энергетические характеристики и спроектированы ветроколеса для различного типа профилей, на которые имеются табличные или графические зависимости коэффициентов C_{x_a} и C_{y_a} от угла атаки α . В частности, в приложении приводятся зависимости коэффициентов профильного сопротивления и подъемной силы от угла атаки в диапазоне его изменения от -10 до 20 градусов для профиля "Эсперо" двадцатипроцентной толщины по данным испытаний кафедры аэрогидродинамики Национального аэрокосмического университета "ХАИ" [8].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Коэффициенты профильного сопротивления и подъемной силы
двадцатипроцентного профиля «Эсперо» в диапазоне углов атаки
от – 10 до 20 градусов по данным работы [8]

Таблица П.1

Номера точек	α , град.	C_{x_a}	C_{y_a}
1	- 9,51	0,02417	- 0,46203
2	- 7,66	0,02036	- 0,28682
3	- 5,79	0,01686	- 0,13211
4	- 3,95	0,01586	0,05415
5	- 1,78	0,01297	0,23697
6	- 0,24	0,01967	0,40753
7	1,61	0,02462	0,58611
8	3,45	0,03352	0,77160
9	5,30	0,04414	0,95200
10	7,15	0,05627	1,13201
11	9,02	0,06856	1,28061
12	10,92	0,08386	1,40484
13	12,86	0,10335	1,47176
14	14,83	0,12675	1,50139
15	16,83	0,15307	1,51091
16	18,83	0,18240	1,50173
17	20,85	0,21402	1,48039

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярас Л., Хоффман Л., Ярас А., Обермайер Г. Энергия ветра. Пер. с англ./Под ред. Я.И.Шефтера. — М.: Мир, 1982. — 256 с.
2. Wilson R.E. Wind turbine aerodynamics// J. of Ind. Aerod. 1980, v.5. P.357 – 372.
3. Preuss R.O., Sussiu E.O., Morino L. Potential Aerodynamic analysis of horizontal – axis windmills // AIAA Paper. 1977, № 132. P. 1132 – 1140.
4. Wilson R.E., Lissaman R.B.S., Walker S.N. Aerodynamic performance of wind turbines. Washington, 1976. — 194 p.
5. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М., 1957.—544 с.
6. Яковлев А.И., Затучная М.А. Рабочие и регулировочные характеристики ветротурбин пропеллерного типа// Авиационно-космическая техника и технология: Сб.науч.тр., Харьков, 1999. Вып. 8. С. 39 – 43.
7. Сабинин Г.Х. Теория регулирования быстроходных ветродвигателей поворотом лопастей центробежным регулятором. Труды ЦАГИ. М., 1957. № 8. С. 5 – 77.
8. Отчет о НИР кафедры аэрогидродинамики ХАИ № 297 (заключительный). Харьков, 1991.— 222 с.

Александр Иванович Яковлев

Маргарита Авадьевна Затучная

Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа

Редактор С. П. Гевло

Св. план, 2001

Подписано в печать 22.08.2001

Формат 60×84 1/16. Бум. Офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,88. Т. 75 экз. Заказ 341. Цена свободная

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт»

61070, Харьков–70, ул. Чкалова, 17

Ротапринт типографии «ХАИ»

61070, Харьков–70, ул. Чкалова, 17