

УДК 621.548

## Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса

Н.М. Бычков

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

На основе экспериментальных данных для ветроколеса с вращающимися цилиндрами большого удлинения (до 14) получены расчетные зависимости, которые позволяют определять оптимальные параметры и основные характеристики ветроколеса (мощность, быстроходность). Анализируются влияющие числа цилиндров, их удлинения и скорости вращения, скорости потока и нагрузки на генератор.

### ВВЕДЕНИЕ

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) с эффектом Магнуса имеет ряд существенных отличий от традиционных лопастных ВЭУ. В предыдущих попытках разработки ВЭУ подобного типа (1924-1984 гг.) из-за отсутствия необходимых экспериментальных данных использовались параметры ветроколеса, близкие большинству лопастных ВЭУ (число цилиндров  $i = 3$ , их удлинение  $\lambda = 6$ ), которые оказались неоптимальными. Исследования, проведенные в ИТПМ СО РАН [1, 2], показали, что для ВЭУ с эффектом Магнуса число цилиндров и их удлинение необходимо увеличить приблизительно в два раза. В работе [1] исследованы модели с удлинением цилиндров до  $\lambda = 10,7$ . В настоящей работе приведены дополнительные экспериментальные данные при  $\lambda = 11,5$  и 14.

В работе рассматривается только наиболее простая форма цилиндров — с одинаковым диаметром по всей длине (однородные цилиндры). Достаточно высокая эффективность ветроколеса достигается в этом случае, если удлинение цилиндров будет увеличено до  $\lambda = 14-15$ , что по ряду параметров близко к предельному значению. Дальнейшее повышение эффективности возможно путем соответствующего изменения формы цилиндров или другими способами управления течением. Рассматриваемая разновидность представляет собой первый этап в развитии ВЭУ данного типа.

### 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОКОЛЕСА

Из [1, 2] следует, что характеристики ВЭУ с вращающимися цилиндрами зависят от достаточно большого числа параметров — геометрических, кинематических и энергетических. На рис. 1 приведены основные геометрические параметры:  $R$  — радиус ветроколеса,  $L$  — длина вращающейся части цилиндров,  $R_0$  — расстояние от оси ветроколеса до вращающейся части цилиндров,  $d_0$  — диаметр корпуса ветроколеса и его обтекателя,  $d$  — диаметр цилиндров,  $d_{ш}$  — диаметр концевых дисков (шайб), которые ограничивают нежелательный сход завихренного потока с концов цилиндров.

© Бычков Н.М., 2008

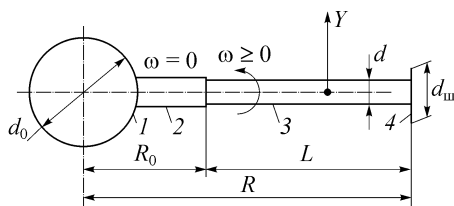


Рис. 1. Ветроколесо с одним из цилиндров.  
1 — корпус ветроколеса, 2 — неврещающаяся часть цилиндра, 3 — вращающаяся часть, 4 — концевая шайба,  $Y$  — сила Магнуса.

Соответствующие безразмерные параметры имеют вид:

$$\lambda = L/d, \quad C = d_{\text{ш}}/d, \quad r_0 = R_0/R, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — удлинение цилиндров,  $C$  — относительный диаметр концевой шайбы,  $r_0$  — относительное расстояние от оси ветроколеса до вращающейся части цилиндров.

Геометрические параметры связаны друг с другом следующими соотношениями:

$$d = \frac{1-r_0}{\lambda} R, \quad (2)$$

$$r_0 = 1 - \frac{\pi\lambda}{i} \beta, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{di}{\pi R} = \frac{1-r_0}{\lambda} \frac{i}{\pi}, \quad (4)$$

где  $i$  — число цилиндров,  $\beta$  — параметр формы ветроколеса (коэффициент заполнения).

## 2. МОЩНОСТЬ И БЫСТРОХОДНОСТЬ ВЕТРОКОЛЕСА

Основными кинематическими и энергетическими характеристиками ветроколеса являются:  $\theta$  — относительная скорость вращения цилиндров,  $Z$  — быстроходность ветроколеса,  $N_k$  — его мощность и  $N_{\text{вр}}$  — затраты мощности на вращение цилиндров. Параметр  $\theta$  выражается в виде [1]

$$\theta = \omega d / 2V = \pi d n_{\text{ц}} / 60V, \quad (5)$$

где  $V$  — скорость потока (ветра),  $\omega$  — угловая скорость вращения цилиндров,  $n_{\text{ц}}$  — частота вращения (число оборотов в минуту).

Мощность  $N_k$ , аналогично лопастному ветроколесу, выражается известной формулой [3, 4]

$$N_k = \eta \frac{\rho V^3}{2} \frac{\pi D^2}{4}, \quad (6)$$

где  $\eta$  — коэффициент мощности,  $D$  — диаметр ветроколеса,  $\rho$  — плотность воздуха. Коэффициент  $\eta$  представляет собой отношение

$$\eta = N_k / N_{\infty}, \quad (7)$$

где  $N_{\infty}$  — мощность набегающего ветрового потока, которая выражается формулой (6) при  $\eta = 1$ . Коэффициент  $\eta$  может изменяться в пределах от нуля до  $\eta_{\text{max}} = 0,593$ , где  $\eta_{\text{max}}$  — максимальное теоретическое значение, которое следует из условия оптимального прохождения ветрового потока через ветроколесо [1, 3, 4].

Кроме формулы (6), мощность  $N_k$ , согласно результатам тарировки при различной нагрузке на генератор (создаваемой дискретными значениями тока возбуждения и сопротивления на выходе генератора), выражается также в виде следующей функции [1]:

$$N_k = K_N n_k^2 = 0,55 \cdot 10^{-3} G^2 n_k^2, \quad (8)$$

где  $n_k$  — частота вращения ветроколеса,  $K_N$  и  $G$  — тарировочные коэффициенты мощности. Используемый далее параметр  $G = 42,6 \sqrt{K_N}$ , который имеет размерность  $\sqrt{Hmc}$ , варьировался в диапазоне  $G = 1-6$ .

Подставляя в (8) значения (6), (7), получим

$$GZ = 1,4D^2 \sqrt{\rho \eta V}, \quad (9)$$

где  $Z$  — быстроходность ветроколеса

$$Z = \frac{\pi D n_k}{60V}. \quad (10)$$

Для наиболее исследованной модели с диаметром  $D = 1,9$  м при условиях эксперимента ( $\rho = 1,2 \text{ Hc}^2 / \text{м}^4$ ) вместо (9) получим обобщающее соотношение

$$ZG = 5,5 \sqrt{\eta V}. \quad (11)$$

Полученные зависимости позволяют оптимизировать параметры ветроколеса  $i$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $G$ ,  $r_0$  и определить основные его характеристики  $\eta$ ,  $Z$ . Для реальных ВЭУ с другими диаметрами  $D$ , при сохранении геометрического подобия (в данном случае при равенстве  $i$ ,  $\lambda$ ,  $C$ ,  $r_0$ ), используются полученные для исследованной модели оптимальные значения  $\eta$ ,  $Z$ ,  $\theta$ , а мощность  $N_k$  определяется по (6) для реальных  $D$ ,  $V$ ,  $\rho$ .

Затраты мощности на вращение цилиндров по результатам предварительного расчета составляют  $N_{вр} \approx 0,17 N_k$ . Для одиночного цилиндра значения  $N_{вр}$  определены в [2].

### 3. МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОКОЛЕСА

В настоящее время отсутствуют точные теоретические методы определения характеристик ветроколеса с эффектом Магнуса. Это связано с тем, что при работе ветроколеса течение возле вращающегося цилиндра является существенно трехмерным из-за растекания потока от центра ветроколеса к его периферии. Трехмерность усиливается вблизи концевой диска, на котором под действием центробежных сил формируется радиальное течение. Кроме того, течение на вращающемся цилиндре зависит от переходных процессов в пограничном слое, которые влияют на положение точек отрыва потока. Сложный трехмерный характер обтекания цилиндра с отрывом пограничного слоя не позволяет в настоящее время получить строгое теоретическое решение. В то же время, результаты экспериментальных исследований, проведенных на моделях ВЭУ и на отдельных вращающихся цилиндрах [1, 2], с учетом некоторых известных теоретических данных [3, 4] позволяют получить достаточно близкие к точным полуэмпирические зависимости для определения характеристик ветроколеса и оптимизации его параметров.

На рис. 2, *a, b* приведены примеры измеренных значений скорости вращения ветроколеса  $n_k$  в зависимости от частоты вращения цилиндров  $\bar{n}_{\text{ц}} = n_{\text{ц}} \cdot 10^{-3}$  (*a*) и от параметра  $\theta$  (*b*) для различных вариантов. Скорости потока (м/с) составляли  $V = 3,5$  ( $\lambda = 14$  и  $11,5$ ) и  $3,77$  ( $\lambda = 10,7$ ) м/с. Относительный диаметр концевых дисков во всех случаях равен  $C = 2$ .

На графиках (рис. 2, *b*) видно, что значения  $n_k$  зависят от всех рассмотренных параметров:  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $i$ ,  $G$ . Максимальной величине  $n_k = n_k^*$  соответствует параметр  $\theta = \theta^*$ , который увеличивается при уменьшении  $i$  (см.  $\theta_1^*$  и  $\theta_2^*$ ). Увеличение  $\theta^*$  приводит к росту затрат мощности на вращение цилиндров, которые пропорциональны величине  $\theta^3$  [2].

На рис. 2, *c* показаны зависимости  $n_k^*(V)$  для различных вариантов. Видно, что функции  $n_k^*(V)$  являются линейными, причем такая линейность, с учетом [1], наблюдается в широком диапазоне условий:  $D = 1,3-2$  м,  $V = 1,5-15$  м/с,  $i = 2-6$ ,  $\lambda = 3,5-14$ ,  $G = 1-6$ ,  $n_{\text{ц}} \leq 8 \cdot 10^3$  об/мин.

Далее будем рассматривать только оптимальные (максимальные) значения  $n_k = n_k^*$ , опуская при этом звездочку — верхний индекс. Представим указанные значения  $n_k$  в следующем виде:

$$N_k = E(V - V_0), \quad V \geq V_0, \quad (12)$$

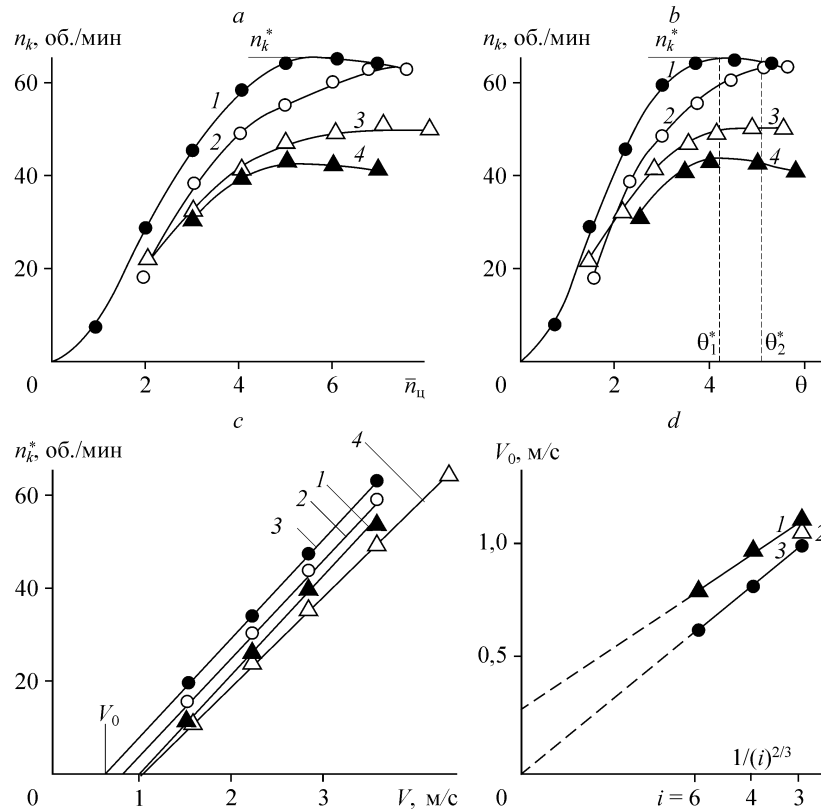


Рис. 2. Экспериментальные значения  $n_k$  (*a, b*),  $n_k^*$  (*c*) и  $V_0$  (*d*) для моделей с диаметром ветроколеса  $D = 1,9$  и  $2$  м при различных параметрах  $\lambda$ ,  $i$ ,  $G$ .

*a, b* —  $\lambda = 14$  (1, 2),  $11,5$  (3),  $10,7$  (4),  $i = 6$  (1, 4),  $4$  (2),  $3$  (3),  $G = 4$  (1-3),  $6$  (4); *c* —  $\lambda = 14$  (1-3),  $11,5$  (4),  $G = 4$  (1-4),  $i = 3$  (1, 4),  $4$  (2),  $6$  (3).

где  $E = dn_k/dV$  — коэффициент наклона функции  $n_k(V)$ ,  $V_0$  — начальная (пусковая) скорость ветра.

На рис. 2,  $d$  приведены значения  $V_0$  в зависимости от отношения  $1/(i)^{2/3}$  для исследованной модели с неоптимальными (увеличенными) параметрами  $\bar{d}_0 = d_0/D$  и  $\bar{r}_0 = R_0/R$  (см. рис. 1 и работу [1]). Из этих данных видно, что с ростом  $\lambda$  и  $i$  скорость  $V_0$  уменьшается. Это увеличивает значения  $n_k$  в формуле (12) и соответственно повышает мощность ветроколеса  $N_k$  в формуле (8). При уменьшении (оптимизации) параметров  $\bar{d}_0$  и  $\bar{r}_0$  характеристики ветроколеса могут быть улучшены за счет увеличения  $\lambda$  и уменьшения  $V_0$  соответственно.

Для точного определения величины  $V_0$  с учетом всех параметров имеющихся данных недостаточно. Для приближенной оценки  $V_0$  используем следующую зависимость, наиболее близкую к варианту  $\lambda = 14$ :

$$V_0 = \frac{5,8}{(1-r_0)^2(\lambda i)^{2/3}}, \quad \lambda = 10-15. \quad (13)$$

Отличия  $V_0$  (13) от экспериментальных данных для  $\lambda = 14$  составляют не более 2 %.

Отметим, что влияние  $V_0$  наиболее заметно сказывается при малых скоростях потока, соизмеримых с величиной  $V_0$ . С увеличением скорости  $V$  влияние  $V_0$ , согласно (12), будет уменьшаться и при достаточно больших  $V$ ,  $\lambda$ ,  $i$  оно будет незначительным.

Более существенным для определения  $N_k$  из (12) и других функций ( $Z$ ,  $\eta$ ) является параметр  $E$ . На рис. 3 приведены экспериментальные значения  $E$  и  $1/E$  в зависимости от  $i$  и  $G$  для модели с удлинением цилиндров  $\lambda = 10,7$ . Из рис. 3,  $a$  видно, что при умеренной нагрузке  $G = 4$  оптимальное число цилиндров, без учета  $V_0$ , составляет  $i = 4$ . С увеличением  $G$  параметр  $i$  будет больше 4 и, наоборот,  $i < 4$  при уменьшении  $G$ . Из рис. 3,  $b$  следует, что функции  $1/E = f(G^2)$  практически линейны (отличия составляют не более 2–3 %). Это позволяет для определения  $E$  построить достаточно простые расчетные формулы, которые имеют вид

$$1/E = a_0 + K_\lambda G^2, \quad (14)$$

где

$$a_0 = 0,022, \quad K_\lambda = (5,6\lambda^2)^{-1}, \quad i = 3, \quad (15)$$

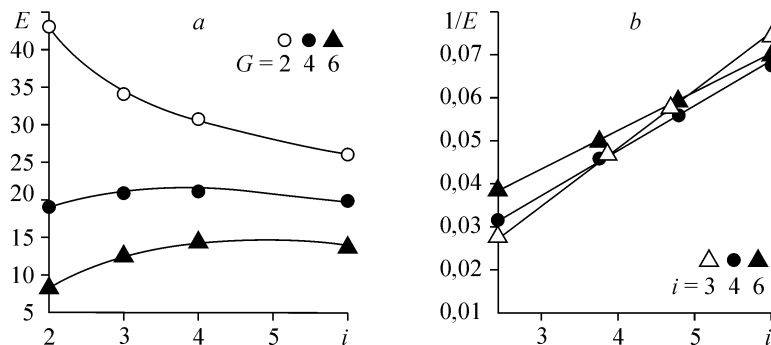


Рис. 3. Значения  $E$  ( $a$ ) и  $1/E$  ( $b$ ) при  $\lambda = 10,7$ .

$$a_0 = 0,027, \quad K_\lambda = (7,3\lambda^2)^{-1}, \quad i = 4, \quad (16)$$

$$a_0 = 0,034, \quad K_\lambda = (9\lambda^2)^{-1}, \quad i = 6, \quad (17)$$

На рис. 4 приведены значения  $E(i, \lambda, G)$ , причем в области  $\lambda \leq 10,7$  графики построены по экспериментальным данным, а в области  $\lambda > 10,7$  — по экстраполяционным формулам (14)–(17). Расчетные значения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными точками, в том числе при  $\lambda = 14, G = 4, i = 4$  и 6. Отметим, что все данные на рис. 4 отнесены к диаметру ветроколеса  $D = 1,9$  м. С увеличением диаметра частота вращения  $n_k$  уменьшается (и наоборот), поэтому при  $D_i \neq 1,9$  м измеренные значения  $E$  пересчитываются умножением на отношение  $D_i / D$ , в соответствии с (10) при  $Z = \text{idem}$ .

Мощность ветроколеса, согласно (8), (12), (14), будет равна

$$N_k = Q(V - V_0)^2, \quad (18)$$

где базовая часть  $Q$  ( $H \cdot c / m$ ) выражается в виде

$$Q = K_N E^2 = \frac{0,55 \cdot 10^{-3} G^2}{(a_0 + K_\lambda G^2)^2}. \quad (19)$$

Приравнивая (6) и (18), получим выражение для коэффициента мощности

$$\eta = \frac{8Q(V - V_0)^2}{\pi \rho D^2 V^3}. \quad (20)$$

Для модели  $D = 1,9$  м при  $\rho = 1,2 H \cdot c^2 / m^4$  будем иметь

$$\eta = 0,6Q \frac{(V - V_0)^2}{V^3}. \quad (21)$$

Быстроходность ветроколеса  $Z(10)$  для этой же модели с учетом (11), (21) имеет вид

$$Z = 4,2 \frac{\sqrt{Q}}{G} \frac{V - V_0}{V}. \quad (22)$$

Из (20), (21) следует, что для ВЭУ данного типа расчетные значения  $\eta(V)$  уменьшаются с ростом скорости  $V$  в области  $V > V_i > V_0$ , где  $V_i = 1,5-2$  м/с. В точке  $V_i$  коэффициент  $\eta$  имеет максимум, который при достаточно большой величине  $Q$  может существенно превосходить максимальное теоретическое значение  $\eta_{\max} = 0,593$ , что нереально.

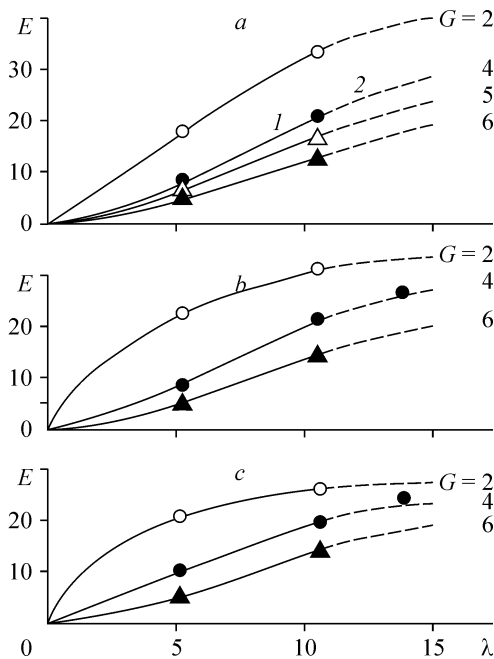


Рис. 4. Значения  $E(\lambda, G)$  при  $i = 3$  (a), 4 (b) и 6 (c)

1 — эксперимент, 2 — расчет по (14)–(17).

Как будет показано далее, необходимое условие  $\eta \leq \eta_{\max}$  можно выполнить путем соответствующего выбора параметра  $G$ , от которого зависит мощность  $N_k$  (8).

#### 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОКОЛЕСА

На рис. 5 приведены зависимости  $Q(G)$  (графики 1), рассчитанные по формуле (19) для модели  $D = 1,9$  м,  $i = 6$ . На графиках видно, что функции  $Q(G)$  имеют максимумы, которые отмечены символом 2, а соответствующие значения  $Q$  и  $G$  обозначены  $Q_m$  и  $G_m$ . Однако достижение этих максимумов сопровождается существенным уменьшением скорости вращения ветроколеса, что не всегда целесообразно. Согласно (22), быстроходность  $Z$  пропорциональна отношению  $\sqrt{Q}/G$ , из чего следует, что параметр  $G$  оказывает на  $Z$  более сильное влияние, чем  $Q$ . При уменьшении  $G$  на 30 %, т. е. до величины  $G_m$  (отмечено цифрой 3), значения  $Q$  из (19) и  $\eta$  из (21) уменьшаются приблизительно на 10 %, а быстроходность  $Z$  из (22), наоборот, увеличивается на 35 %.

На рис. 6, а показаны расчетные зависимости  $Q(G)$  по формуле (19) для  $\lambda = 14$ ,  $i = 3-6$ . Видно, что наибольшая величина  $Q = Q_m$  достигается при  $i = 4$ ,  $G = G_m = 6$ . Однако при  $i > 4$  по формуле (13) уменьшается величина  $V_0$ , что повышает мощность  $N_k$  из (18). Одновременно возрастают значения  $G_m$ , что по (11) и (22) снижает быстроходность ветроколеса  $Z$ . Низкие значения  $Z$  могут создавать определенные технические сложности при передаче вращения от тихоходного ветроколеса к быстроходному генератору. Целесообразно поэтому ограничивать значения  $G_m$ , которые должны удовлетворять условию (11).

Максимальные значения  $Q_m$  и  $G_m$  при  $\lambda \geq 10$ , с использованием соотношений (14)–(19), выражаются аналитически в следующем виде:

$$i = 3: Q_m = 0,035\lambda^2, \quad G_m = 1,9 + 0,016\lambda^2, \quad (23)$$

$$i = 4: Q_m = 0,037\lambda^2, \quad G_m = 2,9 + 0,017\lambda^2, \quad (24)$$

$$i = 6: Q_m = 0,036\lambda^2, \quad G_m = 4,5 + 0,018\lambda^2. \quad (25)$$

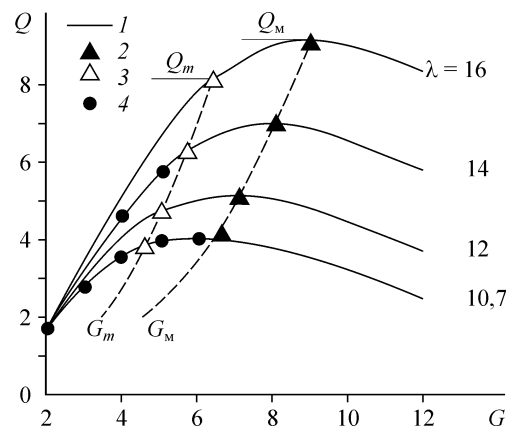
Отсюда видно, что увеличение  $\lambda$  приводит к росту  $Q_m$  и  $G_m$ , а с увеличением  $i$  возрастает только параметр  $G_m$ . Подставляя полученные значения  $Q_m$  в (21), получим максимальную величину коэффициента мощности  $\eta_m$

$$\eta_m = K_i \lambda^2 \frac{(V - V_0)^2}{V^3}, \quad (26)$$

где  $K_i = 0,021$  для  $i = 3$  и  $0,022$  при  $i = 4-6$  (т. е.  $K_i$  изменяется очень слабо).

Рис. 5. Значения  $Q(G, \lambda)$  при  $D = 1,9$  м,  $i = 6$ .

1 — расчет по формуле (19), 2 — значения  $Q_m$  и  $G_m$ , 3 —  $G_m = 0,7G_m$ ,  $Q_m \approx 0,9Q_m$ , 4 — эксперимент.



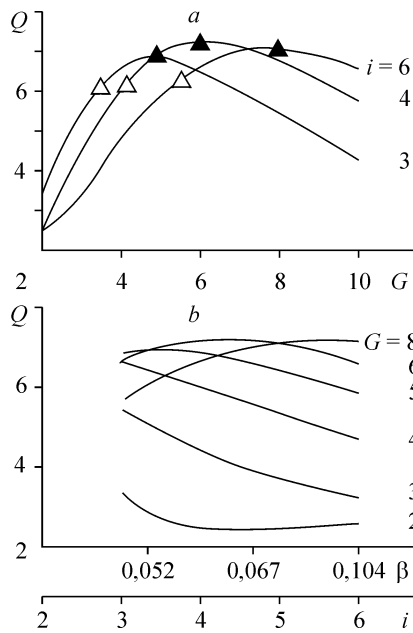


Рис. 6. Влияние числа цилиндров  $i$  и параметра  $G$  на величину  $Q$  из формулы (19) при  $\lambda = 14$ .  
 1 — значения  $Q_m$  и  $G_m$ , 2 —  $G_m = 0,7G_m$ ,  $Q_m = 0,9Q_m$ .

Оптимальные значения коэффициента мощности должны находиться в диапазоне

$$\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}. \quad (27)$$

Верхний предел составляет  $\eta_{\max} \approx 0,59$ , а нижний должен удовлетворять условию, при котором результирующий коэффициент мощности ветроколеса с учетом затрат на вращение цилиндров будет не ниже реальных значений коэффициента мощности для лопастного ветроколеса. Это условие имеет вид

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\min} (1 - \eta_{\text{вр}}) \geq \eta_0, \quad (28)$$

где  $\eta_{\Sigma}$  — результирующий коэффициент мощности,  $\eta_{\text{вр}}$  — коэффициент, учитывающий затраты мощности на вращение цилиндров,  $\eta_0 = 0,42-0,44$  — максимальный коэффициент мощности для большинства современных лопастных ВЭУ [5]. При  $\eta_{\text{вр}} \approx 0,17\eta$  (по результатам предварительного расчета) получим следующий диапазон оптимальных значений  $0,53 \leq \eta \leq 0,59$ .

### 5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОКОЛЕСА

Начальной точкой для расчета характеристик является скорость  $V^*$ , которая определяется из соотношений (21), (19) при выбранном оптимальном значении  $\eta = \eta_M = 0,53-0,59$ , зависящем от параметра  $G$ . При  $V < V^*$  значения  $\eta(V)$  по (21) формально могут оказаться выше величины  $\eta_{\max} = 0,593$ , что противоречит условию оптимального прохождения потока через ветроколесо, которое по [3, 4] выражается в виде  $\eta = f(V_2/V_1)$ , где  $V_1$  и  $V_2$  — скорости потока соответственно до и после ветроколеса. При  $V_2/V_1 = 1/3$  достигается максимальное значение  $\eta_{\max} = 0,593$ . При всех других отношениях скоростей коэффициент  $\eta$  только уменьшается. Выполнение условия  $\eta \leq \eta_{\max}$  при  $V < V^*$  достигается соответствующим изменением параметра  $G$ , что будет показано далее.

Определим скорость  $V^*$  и характеристики ветроколеса при этой скорости. Принимая в первом приближении  $V_0 = 0$ , из (26) получим

$$V^* = K_i \lambda^2 / \eta^*. \quad (29)$$

При  $V_0 \neq 0$  значения  $V^*$  будут ниже, чем по (29), приблизительно на величину  $2V_0$  (здесь индекс \* соответствует точке  $V^*$ ).

Для быстроходности ветроколеса  $Z^*$  в точке  $V^*$ , подставляя в (11) значения  $V = V^*$  из (29), при  $V_0 = 0$  получим

$$Z^* = 0,8\lambda / G^*, \quad (30)$$

где  $G^*(i)$  при  $\eta^* = \eta_{\max}$  определяется по (23)–(25).



На рис. 7 приведены расчетные значения  $V^*$  (29),  $Z^*$  (30), а также величина нагрузки на генератор  $G^*$ , которая определяется по формулам (23)–(25). Видно, что скорость  $V^*$  достаточно интенсивно возрастает с увеличением  $\lambda$ , но относительно слабо зависит от  $i$ . Быстроходность  $Z^*$ , наоборот, сильно зависит от  $i$ , но незначительно от  $\lambda$ . Параметр  $G^*$  возрастает с увеличением  $i$  и  $\lambda$ . Штриховыми линиями показаны соответствующие значения для варианта  $\eta_{\min} = 0,53, i = 4$  (обозначено  $\langle 4 \rangle$ ).

Рассмотрим поведение характеристик ветроколеса во всей области  $V \leq V^*$  при  $\eta = \eta^* \leq \eta_{\max}$ . Примем также условие  $Z(V) = \text{const}$ , при котором скорость вращения ветроколеса  $n_k$ , согласно (10), изменяется пропорционально скорости ветра  $V$ . Тогда для параметра  $G$  по (11), с учетом (30), будем иметь

$$G = 6,8 \frac{G^*}{\lambda} \sqrt{\eta^* V}, \quad V \leq V^*, \quad (31)$$

где  $G^*$  определяется по (23)–(25), если  $\eta = \eta_{\max}$ . Из (31) следует, что в области  $V < V^*$  параметр  $G$  должен уменьшаться пропорционально величине  $\sqrt{V}$ .

Рассмотрим следующую область  $V > V^*$ . Здесь коэффициент мощности  $\eta$ , как уже отмечалось, с увеличением скорости  $V$ , согласно (20) и (21), будет только уменьшаться, что приводит к ограничению роста мощности ветроколеса  $N_k$  из (6). При этом возможны различные варианты уменьшения  $\eta$ , из них наиболее близкой к оптимальной является следующая зависимость:

$$\eta = \eta^* V^* / V, \quad V \geq V^*. \quad (33)$$

Параметры  $Z$  и  $G$  в области  $V \geq V^*$  могут изменяться (регулироваться) в широком диапазоне. Отметим два предельных случая: 1)  $Z = \text{const}$ , 2)  $n_k = \text{const}$ . Первый случай, аналогично области  $V < V^*$ , соответствует пропорциональной зависимости величины  $n_k$  от скорости ветра  $V$ , что при больших  $V$  ограничивается возможностями вращения цилиндров. Второй — требует значительного увеличения параметра  $G(V)$ , что тоже имеет свои ограничения (снижается скорость вращения ветроколеса).

Рассмотрим некоторый промежуточный (более реальный) случай, при котором

$$Z = Z^* \sqrt{V^* / V}, \quad V \geq V^*. \quad (34)$$

Тогда параметр  $G$ , согласно (11), будет равен

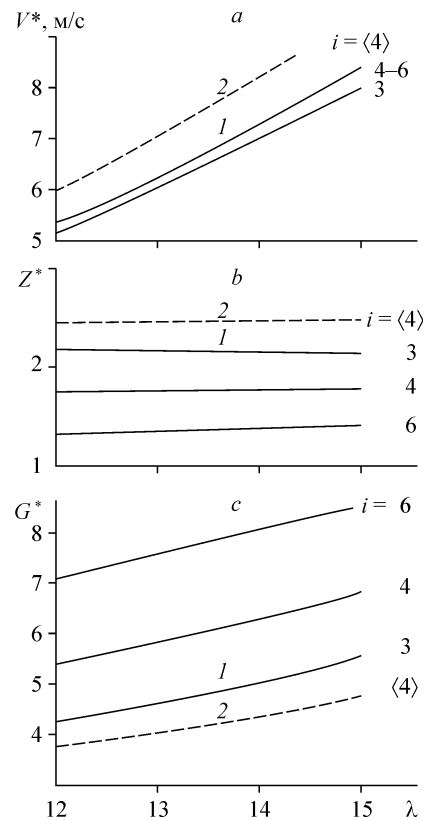


Рис. 7. Расчетные значения  $V^*$ ,  $Z^*$  и  $G^*$  в зависимости от  $\lambda$  и  $i$ .

1 — значения при  $\eta_{\max} = 0,59, i = 3-6$ ; 2 —  $\langle 4 \rangle$ , то же при  $\eta_{\min} = 0,53, i = 4$ .

$$G = \frac{5,5}{Z^*} \sqrt{\eta^* V}, \quad V \geq V^*. \quad (35)$$

В следующей, третьей области ( $V \geq V_p$ ) выполняются условия

$$N_k = \text{const}, \quad n_k = \text{const}, \quad G = \text{const}. \quad (36)$$

Параметры (36) определяются по соответствующим значениям в точке  $V_p$ . Коэффициент  $\eta$ , согласно (6), будет равен

$$\eta = \eta_p \left( \frac{V_p}{V} \right)^3, \quad V \geq V_p. \quad (37)$$

Для быстроходности  $Z$  из (11), (36), (37) следует

$$Z = \frac{5,5}{G_p V} \sqrt{\eta_p V_p^3}, \quad V \geq V_p. \quad (38)$$

## 6. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 8, *a* приведены расчетные значения  $\eta(V)$  для следующих условий:  $\lambda = 15$ ,  $i = 6$ ,  $V_0 = 0,35$  м/с (график 1). В области  $V \leq V^*$  принято максимальное значение  $\eta = 0,53$ , которое характеризуется более низкими затратами мощности на вращение цилиндров, чем при  $\eta_{\max} = 0,59$ . В области  $V^* \leq V \leq V_p$  коэффициент  $\eta$  определяется по формуле (33), а в области  $V \geq V_p$  — по формуле (37). График 1\* соответствует ориентировочным значениям  $\eta$  с учетом затрат мощности  $\eta_{\text{вр}}$  на вращение цилиндров (принимая  $\eta_{\text{вр}} \approx 0,17\eta$ ). График 2 характеризует коэффициент  $\eta$  для лопастной ВЭУ «Südvind» 3127М (ФРГ) [1]. График 3 соответствует среднегодовым значениям повторяемости скоростей ветра  $P(V)$  для континентальных регионов.

Отметим, что в области  $V < 8$  м/с, имеющей наибольшие значения  $P(V)$ , коэффициент  $\eta$  для ветроколеса с вращающимися цилиндрами сохраняет свою максимальную величину, близкую (26), при  $V = V^*$ . Повышенные значения  $\eta$  и  $P$  в этой области позволяют существенно увеличить суточную продолжительность работы ВЭУ и выработку энергии. Для лопастных ВЭУ уменьшение  $\eta$  в области

$V < 8$  м/с связано с тем, что коэффициент подъемной (движущей) силы лопастей не превышает  $C_y = 1$ , в то время как для вращающегося цилиндра он достигает значений  $C_y = 12$  и более [2]. Большая движущая сила вращающегося цилиндра и соответственно большой крутящий

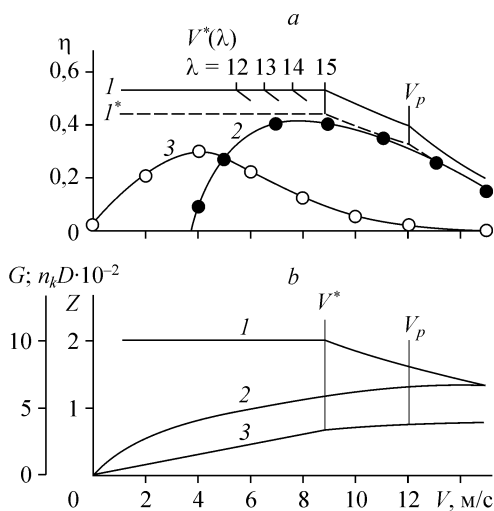


Рис. 8. *a* — значения  $\eta(V)$  для ветроколеса с цилиндрами (1, 1\*) и с лопастями (2). Повторяемость скоростей ветра  $P(3)$ ; *b* — значения  $Z(1)$ ,  $G(2)$  и  $n_k DV(3)$  в зависимости от скорости  $V$  для ветроколеса с цилиндрами  $\lambda = 15$ .

момент обеспечивают работу ветроколеса, начиная со скорости  $V \approx 1,5$  м/с (см. рис. 2, *c*). Для лопастных ВЭУ нижний предел составляет  $V \approx 4$  м/с, а верхний  $V \approx 25$  м/с. Для ВЭУ с эффектом Магнуса рабочий диапазон скоростей ветра составляет приблизительно  $V = 2-40$  м/с.

На рис. 8, *a*, график 1 отмечены также значения  $V^*$  по (29) для различных удлинений цилиндров в диапазоне  $\lambda = 12-15$ . Видно, что условие оптимальности (28) может быть выполнено для однородных цилиндров только при  $\lambda \geq 14-15$ .

На рис. 8, *b* приведены расчетные значения  $Z$ ,  $G$  и  $n_k D$  в зависимости от скорости  $V$  (аналогично рис. 8, *a*) для  $i = 6$  и  $\lambda = 15$ . В точке  $V = V^*$ , согласно (25), получим  $G^* = 8,55$ . Снижая это значение на 30 % (для увеличения  $Z^*$ , как показано в п. 4), будем иметь  $G^* = 6$  и, согласно (30),  $Z^* = 2$ . В области  $V \leq V^*$ , принимая  $Z = Z^* = 2$  и  $\eta = 0,53$ , получим  $G \approx 2\sqrt{V}$ . В области  $V^* \leq V \leq V_p$  величина  $Z$  определялась по (34),  $G$  — по (35), а  $n_k D$  — по (10). В области  $V \geq V_p$  использовались зависимости (36)–(38). По графику 3 можно определить скорость вращения ветроколеса, которая зависит от диаметра  $D$ .

Из полученных данных и результатов [1, 2] следует, что оптимальные значения основных геометрических параметров составляют: число цилиндров  $i = 6$ , их удлинение  $\lambda = 14-15$ , диаметр концевых шайб  $d_{ш} \approx 1,8d$ , диаметр обтекателя  $d_0 \leq 0,1 D$ . Диаметр ветроколеса для натуральных ВЭУ целесообразно иметь не менее  $D = 10$  м [1, 2], чтобы ограничить максимальную частоту вращения цилиндров, пропорциональную величине  $1/D$ . Расстояние от оси ветроколеса до вращающейся части цилиндров должно быть минимальным, т. е.  $r_0 = 2R_0 / D \approx 0,1$ , что достигается при условии, если отсутствует невращающаяся часть 2 (см. рис. 1), когда  $R_0 = d_0 / 2$ .

Напомним, что полученные соотношения и оптимальные параметры относятся к ветроколесу с однородными цилиндрами, имеющими одинаковый диаметр по всей их длине. Предварительные испытания, проведенные с измененной формой цилиндров, показали, что характеристики ветроколеса могут быть улучшены, в частности, уменьшаются значения  $\theta^*$  и затраты мощности на вращение цилиндров.

### ВЫВОДЫ

1. Разработан полуэмпирический метод расчета характеристик ветроколеса, основанный на результатах экспериментальных исследований и с учетом известных теоретических зависимостей. Определены оптимальные параметры и соответствующие характеристики ветроколеса, при этом удлинение цилиндров должно быть увеличено до 14-15, а число цилиндров до шести.

2. Показано что имеется три основных области скоростей ветра с различным поведением характеристик ветроколеса:  $V < V^*$ ,  $V^* < V < V_p$  и  $V > V_p$ , где  $V^* \approx 8$  м/с,  $V_p \approx 12$  м/с. В области  $V < V^*$  скорость вращения цилиндров и ветроколеса пропорциональна скорости ветра, а мощность возрастает пропорционально  $V^3$  (максимальный рост). При  $V > V^*$  скорость вращения цилиндров постоянна, а при  $V > V_p$  она уменьшается, что снижает затраты мощности на их вращение.

3. Наибольшие преимущества ВЭУ с эффектом Магнуса проявляются при скоростях ветра ниже 8 м/с, где коэффициент мощности ветроколеса и повторяемость скоростей ветра имеют максимальные значения. Это увеличивает выработку энергии и особенно суточную продолжительность работы. Лопастные ВЭУ в этой области имеют более низкую эффективность, что связано с малой движущей силой лопастей (на порядок меньше, чем для вращающихся цилиндров) и снижением до нуля коэффициента мощности ветроколеса при уменьшении скорости ветра.

4. Быстроходность ветроколеса с вращающимися цилиндрами в 2-3 раза ниже, чем для лопастных ВЭУ, это повышает экологическую и эксплуатационную безопасность работы ВЭУ.

5. Дальнейшее улучшение характеристик ветроколеса может быть достигнуто изменением формы вращающихся цилиндров, главным образом, для снижения скорости их вращения и соответствующих затрат мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков Н.М.** Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 1. Результаты модельных исследований // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11, № 4. — С. 583–596.
2. **Бычков Н.М.** Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 2. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 1. — С. 159–175.
3. **Сабинин Г.Х.** Теория и расчет ветряных двигателей // Тр. ЦАГИ. — 1931. — Вып. 105. — С. 1–70.
4. **Шефтер Я.И.** Использование энергии ветра. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 201 с.
5. **Ветроэнергетические установки: Справочник. Ч.2. Техничко-экономические характеристики установок и их узлов.** — М.: Информэлектро, 1993. — 196 с.

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2005 г.*