

РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕТРОКОЛЕС С ЛОПАСТЯМИ КРЫЛОВОГО НЕЗАМКНУТОГО ТИПА

Волков Н.И., доц.

Аэродинамика ортогональных ветродвигателей (рис.1) с лопастями, имеющими крыловой незамкнутый профиль [1,2] (рис.2) практически мало

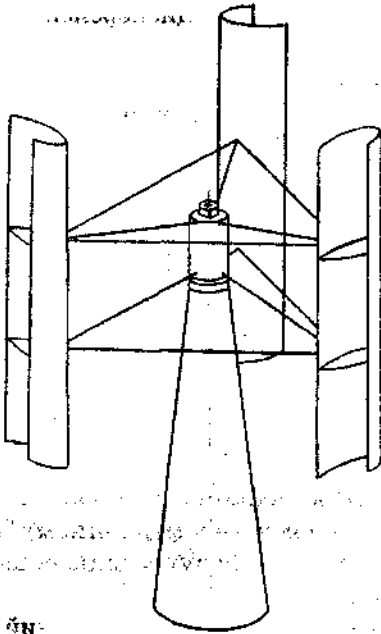


Рис.1. Ветродвигатель ортогонального типа

изучена. В лаборатории ветроэнергетики СумГУ имеется некоторый экспериментальный и расчетный материал по исследованию обтекания одиночных профилей такого типа и снабженных ими моделей вертикально-осевых ветроколес. Результаты исследований представлены в соответствующих отчетах за 1990-95 годы и отдельных публикациях. Расчету аэродинамических характеристик одиночных профилей крылового незамкнутого типа посвящены, в частности, работы [3,4].

В настоящей статье изложены методика расчета аэродинамических характеристик ортогональных ветроколес с лопастями крылового незамкнутого типа, а также численная реализация математической модели взаимодействия потока с лопастью системы ветроколеса. Представлены отдельные результаты расчетов и некоторые выводы по проектированию ветроколес с лопастями

указанного типа.

Математическая модель взаимодействия потока с лопастью системы ветроколеса построена на базе метода дискретных вихрей в постановке нестационарного отрывного обтекания лопастей идеальной несжимаемой средой [5-7]. Задача решена как плоская. Дополнительное торможение потока, вызванное особенностями работы и типами конструкций ортогональных ветроколес, учтено по методу [8].

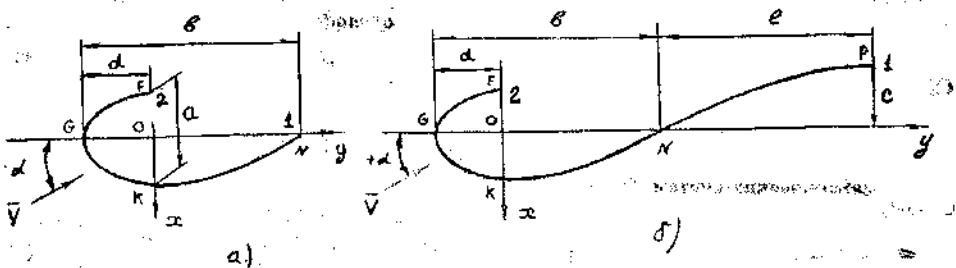


Рис.2. Профили типа КН и КНД

Схема вертикально-осевого ветродвигателя с лопастями, имеющими крыловой незамкнутый профиль (КН) или КН с демпфером отрывных течений (КНД), представлена на рис.3, а сами профили показаны на рис.2.

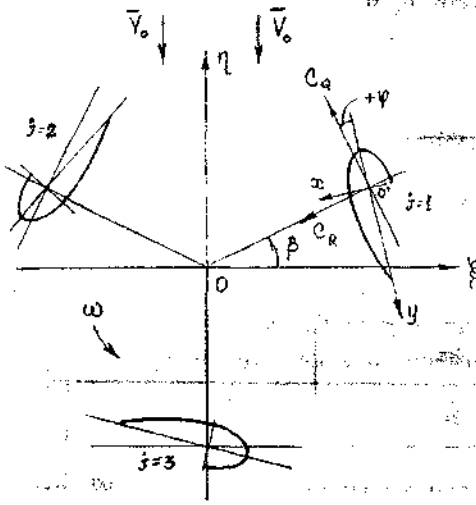


Рис.3. Схема ветроколеса

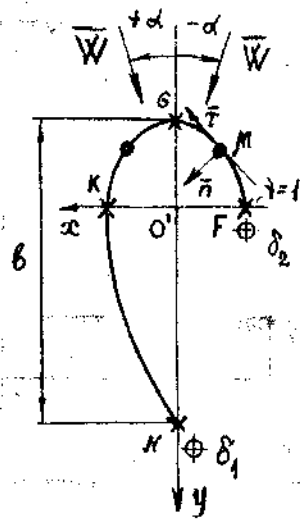


Рис.4. Схема расположения вихрей и контрольных точек

При построении расчетной схемы исследования взаимодействия потока с ветроколесом целесообразным оказалось сохранение ориентации, использованной ранее [3,4] для одиночных профилей локальной (связанной с профилем) системы координат $xO'y$ (рис.2-5). Это несколько усложнило процедуру связи координат и соответствующих углов с центральной системой $\xi O\eta$, однако позволило проще и быстрее переходить к программам расчета ветроколес с различными типами лопастей (рис.3), используя их как подпрограммы.

Схема распределения вихрей и контрольных точек на контуре профиля лопасти, а также ориентации нормалей и касательных в них взяты аналогичными [3,4] (рис.4). Разбивка профилей на участки производилась со сгущением в носике, сход свободных вихрей предполагался по касательным к их кромкам 1 и 2.

Координаты точек профиля первой ($j=1$) лопасти при любом значении β азимутального угла вычислялись как:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 \cos \beta - \eta_0 \sin \beta, \\ \eta &= \xi_0 \sin \beta + \eta_0 \cos \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где величины ξ_0 и η_0 имеют вид:

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \xi_0 - (x \cos \varphi + y \sin \varphi), \\ \eta_0 &= \eta_0 + (x \sin \varphi - y \cos \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ξ_0, η_0 - координаты точки крепления (поворота) первой лопасти к траверсе в начальный ($\tau=0$) момент времени ($\xi_0 = r=1$); φ - угол установки лопасти (угол между хордой профиля и положительным направлением касательной к круговой траектории движения лопасти при повороте её носика

наружу).

Координаты точек других лопастей ($j=1, \dots, i$) вычисляются аналогично (1), (2) с учетом начального значения азимутального $\beta_j = 2\pi(j-1)/i$ угла положения j -й лопасти.

Исходные углы между нормальными n_j и осями координат локальной системы в контрольных точках v профиля приведены в табл. 1.

Таблица 1

Участок профиля	n, x	n, y
FG	$0 \dots \pi/2$	$-\pi/2 \dots 0$
GK	$\pi/2 \dots \pi$	$0 \dots \pi/2$
KN	$\geq \pi$	$\geq \pi/2$
NP (демпфер)	$\geq \pi$	$\geq \pi/2$

Скорость невозмущенного потока обозначена через V_0 , линейные размеры отнесены к радиусу R ветроколеса, безразмерная интенсивность вихревого слоя введена как $\gamma = \Gamma/bV_0$, безразмерное время $\tau = tV_0/b$.

Интенсивность суммарных вихрей на профилях определяется из условий непротекания в контрольных точках профилей и гипотезы Жуковского-Чаплыгина на их кромках. Свободные вихри в следе движутся вместе с частицами среды, а их интенсивности сохраняются неизменными во времени.

Система уравнений для определения неизвестных циркуляций суммарных вихрей в расчетный момент времени M имеет вид

$$\sum_{j=1}^i \left\{ \sum_{\mu=1}^N \gamma_{\mu j}^M a_{\mu j}^{v j} + \delta_{\mu j}^M a_{\mu j}^{v j} + \delta_{2j}^M a_{2j}^{v j} \right\} = 2\pi f_{v j}^M - \sum_{L=1}^{M-1} \left\{ \delta_{1j}^L a_{2j}^{L, v j} + \delta_{2j}^L a_{2j}^{L, v j} \right\},$$

$$\sum_{\mu=1}^N \gamma_{\mu j}^M + \delta_{\mu j}^M + \delta_{2j}^M = - \sum_{L=1}^{M-1} (\delta_{1j}^L + \delta_{2j}^L), \quad (3)$$

$$v=1, \dots, N+1, \quad j=1, \dots, i, \quad j=1, \dots, i.$$

Порядок системы (3) равен $i(N+1)$, где i - число лопастей, N - количество участков, на которые разбит контур каждого профиля.

Коэффициенты a левой части системы (3), не зависящие от времени,

$$a_{\mu j}^{v j} = -v_{\xi}^{\mu, v j} \cos[(n, \xi)_{v j} + \pi + \beta_j - \varphi] - v_{\eta}^{\mu, v j} \cos[\pi - (n, \eta)_{v j} - \beta_j + \varphi], \quad (4)$$

где функции координат v_{ξ} и v_{η} определяются в центральной системе координат аналогично [5, 6].

Таким же образом вычисляются и коэффициенты $a_{1j}^{v j}$, $a_{2j}^{v j}$ влияния первых сошедших с острых кромок профилей свободных вихрей с интенсивностями δ_1, δ_2 , зависящие от времени коэффициенты $a_{\mu j}^{L, v j}$, $a_{2j}^{L, v j}$ определяются с

учетом положения свободных вихрей в следе.

Функции f_{vj}^M зависят от времени и имеют вид

$$f_{vj}^M = -2\pi \left\{ \sin[(\hat{n}, \hat{\xi})_{vj} - \pi + \beta_j - \varphi] + \theta \sin[(\hat{n}, \hat{\xi})_{vj} - \pi - \varphi] \right\}; \quad (5)$$

где $\theta = \omega R / V_0$ - быстроходность ветроколеса.

Следует подчеркнуть, что в формулах (4), (5) и ниже значения углов $\hat{n}, \hat{\xi}$ и $\hat{\eta}, \hat{\eta}$ берутся постоянными в соответствующих контрольных точках профиля при $\beta=0$ и $\varphi=0$ (т.е. по первому профилю), а β_j должно дополнительно учитывать начальное азимутальное положение j -й лопасти наращиванием угла первой лопасти на величину $2\pi(j-1)/i$. Угол установки φ принят одинаковым для всех лопастей.

Опуская далее для простоты записей индексы соответствующих вихрей контрольных точек и номера лопастей, запишем компоненты безразмерных (отнесенных к V_0) скоростей для вычисления перемещений свободных вихрей в M -й расчетный момент времени:

$$W_{\xi} = W_{\xi}^{np} + W_{\xi}^{cp} + \theta \sin \beta, \quad W_{\eta} = W_{\eta}^{np} + W_{\eta}^{cp} - \theta \cos \beta. \quad (6)$$

Здесь W_{ξ}, W_{η} - компоненты скоростей, индуцированные дискретными вихрями, а последние слагаемые $\theta \sin \beta$ и $-\theta \cos \beta$ следует сохранять в (6) при определении компонент скоростей лишь первых (ближайших к кромкам профилей) свободных вихрей.

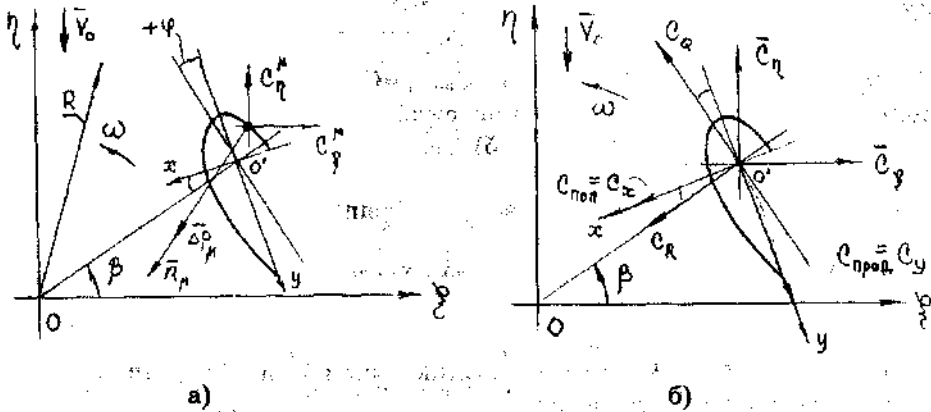


Рис.5. Компоненты аэродинамических нагрузок

Касательные скорости в точках профиля

$$W_{\tau}^M = -W_{\alpha}^M \cos[3\pi/2 - (\hat{n}, \hat{\xi}) - \beta_M + \varphi] + W_{\alpha 0}^M \cos[(\hat{n}, \hat{\eta}) - \pi/2 + \beta_M - \varphi], \quad (7)$$

где $W_{\alpha}^M, W_{\alpha 0}^M$ - соответствующие компоненты индуцированных вихрями скоростей и скорости набегающего потока в тех же точках.

Аэродинамические нагрузки (коэффициенты перепада давления) на каждом расчетном μ -м участке j -го профиля в моменты времени M вычислялись с использованием интеграла Лагранжа-Коши:

$$\Delta p_{\mu}^M = 2(p_{\text{внеш}} - p_{\text{внутр}}) / \rho V_0^2 = 2(\gamma_{\mu\Sigma}^M W_{\mu}^M - \Delta G_{\mu}^M / \Delta \tau). \quad (8)$$

Здесь $\gamma_{\mu\Sigma}^M$ - безразмерная интенсивность суммарного вихревого слоя; ΔG_{μ}^M - изменение интенсивности вихрей за время Δt по замкнутому контуру, охватывающему весь вихревой след за соответствующей кромкой профиля, и присоединенные вихри включительно до номера μ с учетом расположения критической точки.

Положительным перепад давления считается по положительному направлению нормали n в соответствующих точках контура профиля; положение критических точек на каждом из профилей определяется в процессе численной реализации задачи обтекания.

Компоненты коэффициентов перепада давления (проекции на координатные оси центральной системы $\xi O\eta$) на μ -х расчетных участках любого из профилей в M -й момент времени:

$$\begin{aligned} C_{\xi}^{\mu} &= -\Delta p_{\mu}^M \cos[(\hat{n}, \xi)_{\mu} - \pi + \beta_M - \varphi], \\ C_{\eta}^{\mu} &= -\Delta p_{\mu}^M \cos[\pi - (\hat{n}, \eta)_{\mu} - \beta_M + \varphi], \end{aligned} \quad (9)$$

а компоненты коэффициента результирующей аэродинамической нагрузки отдельного профиля (рис.5) в расчетный момент времени:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\xi}^M &= \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^N C_{\xi}^{\mu}, \\ \bar{C}_{\eta}^M &= \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^N C_{\eta}^{\mu}. \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициенты поперечной $\bar{C}_{\text{попер}} = \bar{C}_x$ и продольной $\bar{C}_{\text{прод}} = \bar{C}_y$ результирующей аэродинамической силы, действующей на отдельный профиль лопасти ветроколеса (рис.5), можно вычислить как

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{попер}}^M &= \bar{C}_{\xi}^M \cos(\beta_M - \varphi) - \bar{C}_{\eta}^M \sin(\beta_M - \varphi), \\ \bar{C}_{\text{прод}}^M &= \bar{C}_{\xi}^M \sin(\beta_M - \varphi) + \bar{C}_{\eta}^M \cos(\beta_M - \varphi). \end{aligned} \quad (11)$$

Коэффициенты радиальной C_R и тянущей C_Q составляющих полной аэродинамической силы (рис.5), возникающей при обтекании профиля лопасти ветроколеса, имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{C}_R^M &= \bar{C}_{\xi}^M \cos \beta_M - \bar{C}_{\eta}^M \sin \beta_M, \\ \bar{C}_Q^M &= \bar{C}_{\xi}^M \sin \beta_M + \bar{C}_{\eta}^M \cos \beta_M. \end{aligned} \quad (12)$$

Положительными значениями радиальной силы принято ее направление к оси ветроколеса, а тянущей - по вращению лопасти. Коэффициенты сил отнесены к комплексу $0.5\rho V_0^2 S$, где $S = 2RH$ - ометаемая площадь, а H - высота ветроколеса.

Среднее значение коэффициента вращающего момента отдельной лопасти за один полный оборот ветроколеса

$$C_M = \frac{\Delta\beta}{2\pi} \sum_{m=1}^k C_Q^m, \quad (13)$$

где $\Delta\beta$ - шаг лопасти по азимутальному углу, $k = 2\pi/\Delta\beta$.

Среднее значение коэффициента вращающего момента ветроколеса с i числом лопастей за p полных оборотов

$$\bar{C}_M = \frac{\Delta\beta}{2\pi i} = \sum_{j=1}^i \sum_{m=1}^L C_{Q_m}^{j m} \quad (14)$$

Здесь $L=2\pi i/\Delta\beta$ зависит от количества дискретных (расчетных) положений лопасти на круговой трассе движения и устанавливается в процессе численной реализации задачи.

Коэффициент использования энергии ветра на режимах различной быстроходности

$$C_p = \bar{C}_M Q \quad (15)$$

Изложенная выше методика позволила построить алгоритмы, создать программы и провести численную реализацию задач по расчету

аэродинамических характеристик ортогональных ветродвигателей, снабженных лопастями специальной аэродинамической формы, а так же провести обширные параметрические исследования таких ветроагрегатов.

Отметим ряд общих особенностей результатов расчета аэродинамических характеристик ортогональных ветродвигателей, полученных при численной реализации математической модели в рамках постановки задачи о нестационарном отрывном обтекании лопастей ветроколеса идеальной несжимаемой средой.

Прежде всего следует подчеркнуть, что для всех исследованных профилей при малых быстроходностях имеет место положительный

вклад тянущей силы как на наветренной, так и на подветренной сторонах ветроколеса, а при больших быстроходностях - лишь на наветренной стороне

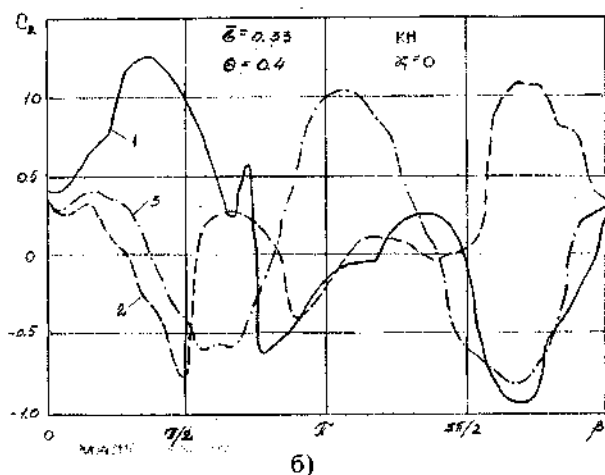
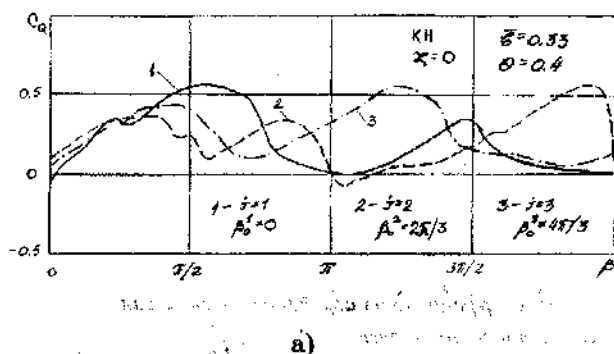


Рис.6. Изменение коэффициентов тангуищих и радиальных сил при движении лопастей по круговой трассе

ветроколеса. Аналогично ведет себя и радиальная сила, суммарные коэффициенты которой за один оборот положительны на большей части трассы наветренной половины (рис.6,7) ветроколеса.

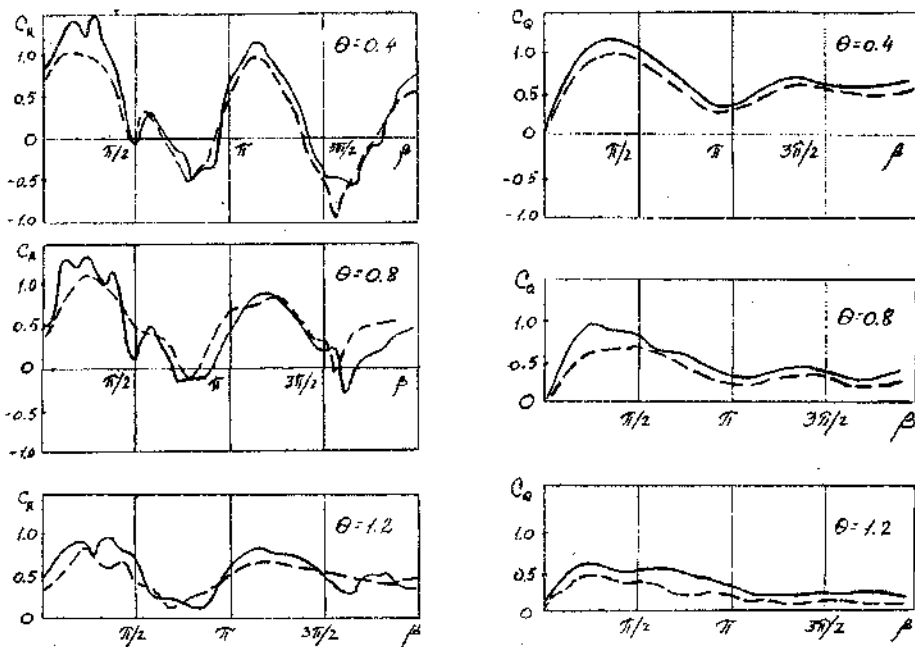


Рис.7. Изменение суммарных коэффициентов аэродинамических сил трехлопастного колеса

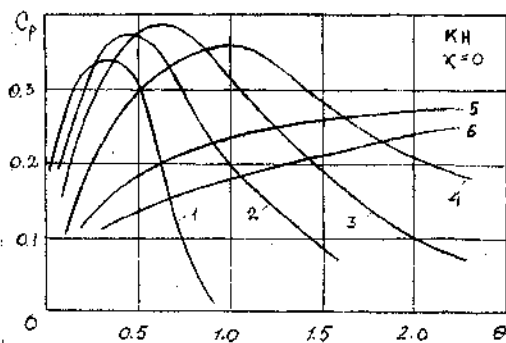


Рис.8. Зависимость коэффициента C_p использования энергии ветра от быстроходности и степени затенения ветроколеса:

$$1-\bar{\sigma}=1.0, 2-\bar{\sigma}=0.7, 3-\bar{\sigma}=0.5,$$

$$4-\bar{\sigma}=0.33, 5-\bar{\sigma}=0.2, 6-\bar{\sigma}=0.15$$

Общим характерным для ортогональных колес с лопастями профиля КН является тот факт, что с уменьшением степени затенения $\sigma = ib/2$ ветроколеса значения коэффициентов C_p использования энергии ветра несколько растут в областях малых быстроходностей и существенно снижаются на больших быстроходностях (рис.8). Кривые $C_p = f(\theta)$ растягиваются по шкале быстроходности, более того, в ряде случаев не стремятся к нулю, что противоречит действительности. Это несоответствие является результатом использования

математической модели, не учитывающей вязкость среды, а следовательно и рост сопротивления профилей. При малых относительных скоростях обтекания профилей неучет вязкости в значительно меньшей степени

сказывается на результирующих аэродинамических силах, чем при больших быстроходностях. Поэтому отмеченные обстоятельства следует дополнительно учитывать при численной реализации алгоритма.

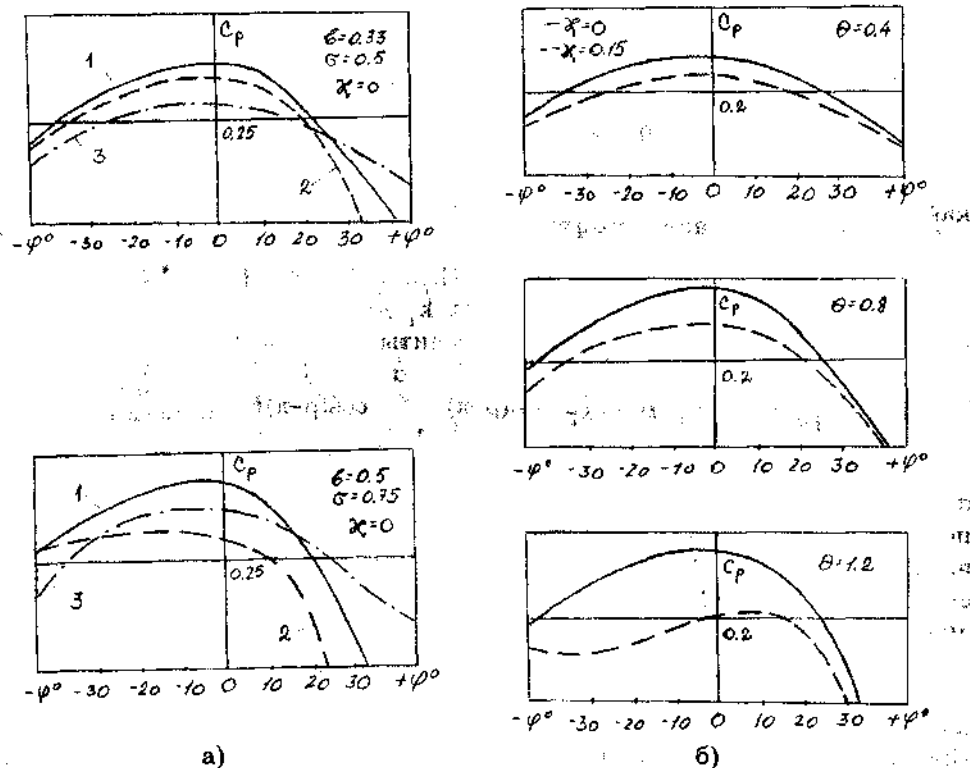


Рис.9 Зависимость C_p от угла установки лопастей на режимах различной быстроходности

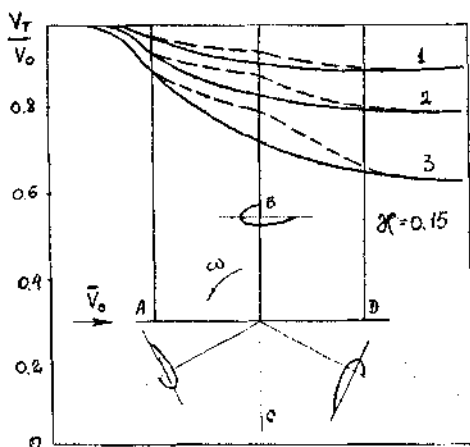


Рис.10. Изменение скоростей потока при взаимодействии с лопастной системой ветроколеса: — на участке ABD, --- на участке ACD; 1- $\sigma=0.5$, $\theta=0.3$; 2- $\sigma=0.5$, $\theta=0.8$; 3- $\sigma=0.75$, $\theta=1.5$

Следует обратить внимание еще на один общий момент - выбор угла φ установки лопастей в ветроколесе. Проведенные исследования показывают, что максимальные значения достигаются чаще всего при $\varphi=5^\circ-10^\circ$ (рис.9). Более глубокий анализ даст возможность рекомендовать оптимальные углы установки лопастей как на рабочих быстроходностях, так и предпочтительные закономерности их изменения при движении лопастей по круговой трассе.

Наконец учет торможения потока в ветроколесе приводит к существенному изменению аэродинамических нагрузок на

лопасти и ветроколесо в целом (рис.10-12).

Предложенный в [8] учет торможения потока основан на том, что величины относительных скоростей натекания потока на лопасти, а также соответствующие компоненты скоростей ближайших к кромкам профилей свободных вихрей рассчитывается не по скоростям V_0 невозмущенного потока, а по скоростям V_T ветрового потока, заторможенного лопастью системой ветроколеса, т.е.

$$\bar{W} = \bar{V}_T \cdot \bar{R}. \quad (16)$$

Величины скоростей заторможенного ветроколесом потока определяются как

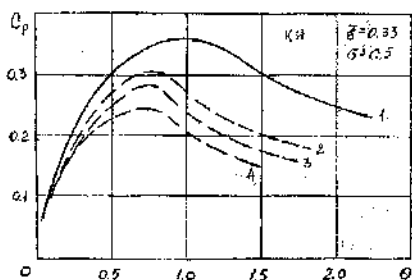
$$\bar{V}_T = \bar{V}_0(1 - k_T), \quad (17)$$

где коэффициент торможения потока k_T для любого значения угла β азимутального положения лопасти рассчитывается по зависимости

$$k_T = \chi \sigma \sqrt{\theta} \left[2 + \sin(\beta - \pi) \frac{\sigma}{1 + \theta} \cos(\beta - \pi) \right]. \quad (18)$$

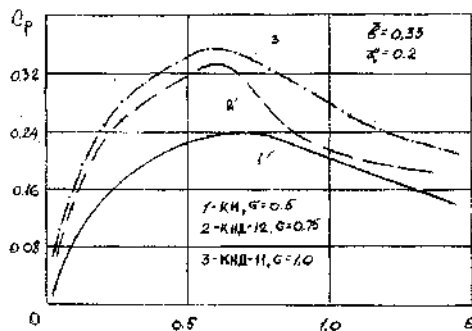
На величину коэффициента k_T определяющим образом влияют затенение σ и быстрходность θ ветроколеса, значительно в меньшей степени - положение лопасти по отношению к вектору невозмущенного ветрового потока. Коэффициенты зависимости (18) выбирались на основании анализа соответствующих расчетов по импульсным теориям, данных экспериментальных исследований а также некоторых физических соображений. На величину параметра торможения $\chi = 0.1 - 0.2$ влияют, кроме всего прочего, конструктивные особенности траверса, способы крепления лопастей, размеры опорного вала и другие факторы.

На рис.10 показано рассчитанное по (17,18) изменение величин скоростей потока при взаимодействии с лопастью системой ветроколеса. Сплошные линии соответствуют значениям скоростей на половине ВК, где лопасти идут против ветра, пунктирные - по ветру.



1- $\chi=0$, 2- $\chi=0.1$, 3- $\chi=0.15$, 4- $\chi=0.2$

а)



б)

Рис.11. Зависимости коэффициентов C_p для ветроколес с лопастями различного типа при учете торможения потока

Рис. 11 иллюстрирует сопоставительные характеристики ветроколес с

лопастями типов КН, КНД - 11 ($l=b, c=0,3b$), КНД-12 ($l=0,5b, c=0,2b$).

Расчет аэродинамических характеристик ортогональных ветроколес по изложенной выше методике производился на ЭВМ. Программы численной реализации алгоритмов разработаны на языке ФОРТРАН. Шаг по азимутальному углу брался $\Delta\beta=\pi/18$, меньшие значения не вносили существенных изменений в результаты расчетов. Шаг по безразмерному времени Δt рассчитывался как $\Delta t=\Delta\beta/\theta b$. Число расчетных участков профиля типа КН $N=18$, КНД- $N=25$.

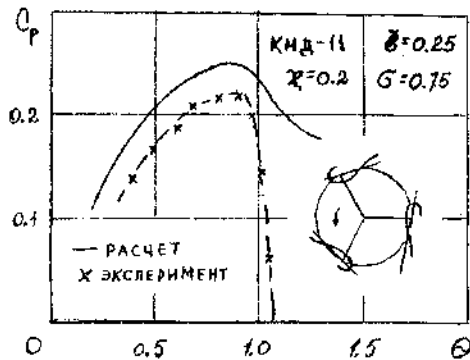


Рис. 12. Расчетные и экспериментальные зависимости $C_p(\theta)$ ветроколес с лопастями КНД-11.

На рис. 12 приведено сопоставление результатов расчета трехлопастного ветроколеса с экспериментальными данными, полученными в лаборатории ветроэнергетики Сумского госуниверситета для модели ветроколеса, снабженного лопастями криволинейного незамкнутого типа КНД-11 с демпфером отрывных течений. Параметрами использованных лопастей являлись $b=0.25, l=b, c=0.3b, \sigma=0.75, \varphi=10^\circ$. Параметр торможения потока $\chi=0.2$.

Таким образом, разработанная методика позволила создать пакеты прикладных программ для расчета аэродинамических характеристик ортогональных ветроколес с лопастями специальной аэродинамической формы. Численный эксперимент дал возможность исследовать влияние различных геометрических, аэродинамических, конструктивных параметров лопастей и ветроколес в целом на аэродинамические характеристики ветродвигателей и дать определенные рекомендации для проектирования установок.

В дальнейшем представляется целесообразным построение математических моделей, учитывающих вязкость среды, а также торможение и снос потока при взаимодействии с ветроколесом.

SUMMARY

The paper deals with the technique and results of calculating aerodynamic characteristics of orthogonal wind-wheels with open-loop airfoil-type blades, these calculations being made by a single vortex method. The problem about the interaction between a non-viscous incompressible fluid flow and the blade system of the wind-wheel is solved for the case of the non-steady separated blades flow-past, with vortices coming from the sharp profile edges. The results of numerical experiments and parametric investigations are also given in the paper.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. N 1733680 А1. Лопасть ветроколеса / В.М.Коваленко, Н.И.Волков, Л.Г. Рожкова; Оpubл. 15.05.92, Бюл. N 18.-1992.
2. А.С. N1765493 А1. Ветроколесо/В.М.Коваленко, Н.И.Волков, Л.Г.Рожкова; Оpubл. 30.09.92, Бюл. N 36.-1992.
3. Волков Н.И., Бабенко Н.П. Расчет нестационарного отрывного обтекания лопасти

ветродвигателя, имеющей крыловой незамкнутый профиль //Вестник Сумского государственного университета. -1994.-N1.-С.80-83.

4. Волков Н.И. Влияние демпфера отрывных течений на аэродинамические характеристики лопасти ортогонального ветродвигателя//Вестник Сумского государственного университета.-1994.-N2.- С.43-46.
5. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью.-М.:Наука, 1978.-352 с.
6. Белоцерковский С.М., Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел. -М.:Наука, 1968.-232с.
7. Гогин Л.В., Степанов Г.Ю. Отрывные и кавитационные течения. -М.:ФМЛ.-1990.-384 с.
8. Волков Н.И. Учет торможения потока в вихревых моделях ортогональных ветродвигателей //Вестник Сумского государственного ун-та.-1995.-N3. - С.33-35.

Поступила в редколлегию 6 февраля 1996 г.