

УДК 533.6001.5:62-854

И.Д.Еремеев, П.Н.Соляник, М.Л.Сургайло, В.В.Чмовж (Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков)

### Результаты экспериментальных исследований ветроагрегатов вертикально-осевой схемы с прямыми лопастями

*Представлены зависимости коэффициента использования энергии ветра от быстроходности, полученные в результате экспериментальных исследований моделей ветроагрегатов вертикально-осевой схемы с прямыми лопастями в аэродинамической трубе малых скоростей АТ-3 ХАИ. Исследовалось влияние толщины профиля, коэффициента заполнения, углов установки лопасти на коэффициент использования энергии ветра при постоянном удлинении и диаметре роторов.*

*Наведено залежності коефіцієнта використання енергії вітру від швидкохідності, отримані в результаті експериментальних досліджень моделей ветроагрегатів вертикально-осьової схеми з прямими лопатями в аеродинамічній трубі малих швидкостей АТ-3 ХАІ. Досліджено вплив товщини профілю, коефіцієнта заповнення, кутів установки лопаті на коефіцієнт використання енергії вітру при постійному подовженні та діаметрі роторів.*

Аэродинамика является основой теории ветроагрегатов. Важную роль в изучении аэродинамики ветроагрегатов играют экспериментальные исследования, позволяющие не только проверить теоретические данные, но и оптимизировать основные геометрические и конструктивные параметры.

В настоящее время опубликовано достаточно мало работ, посвященных многопараметрическим экспериментальным исследованиям влияния геометрических параметров вертикально-осевых ветроагрегатов различных схем (коэффициента заполнения, удлинения, угла установки, формы лопасти) на их аэродинамические характеристики. В связи с этим в лаборатории дозвуковых скоростей Национального аэрокосмического университета были проведены экспериментальные исследования моделей ветроагрегатов вертикально-осевой схемы с прямыми лопастями в аэродинамической трубе малых скоростей. Целью исследований было изучение влияния угла установки, окружного коэффициента заполнения и толщины профиля лопасти на аэродинамические характеристики ветроагрегатов.

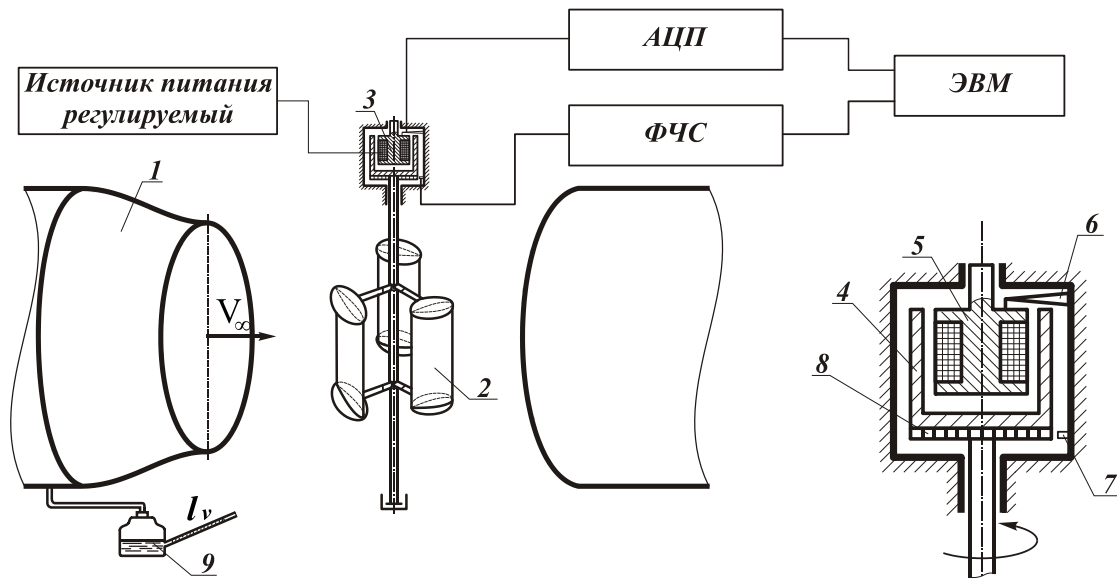
**Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента.** Экспериментальные исследования моделей ветроагрегатов вертикально-осевой схемы проводились в аэродинамической трубе малых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью АТ-3 ХАИ. Диаметр

выходного сечения сопла аэродинамической трубы равен  $D_c = 1,5$  м, длина рабочей части  $L = 2050$  мм, начальная степень турбулентности потока составляет  $\varepsilon = 0,68\%$ . Максимальная скорость потока в рабочей части аэродинамической трубы равна  $V_{\infty max} = 45$  м/с.

На рис. 1 показана схема установки для испытания моделей ветроагрегатов вертикально-осевой схемы.

Нагрузочное устройство 3 представляет собой асинхронную муфту, состоящую из якоря 4, вращающегося вместе с валом испытываемого ветроагрегата, и неподвижного индуктора с катушкой возбуждения 5. При вращении якоря наведенное им магнитное поле создает тормозящий момент, воспринимаемый тензобалкой 6, информация с которой передается через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на ЭВМ. Тормозной момент изменялся при изменении подаваемого напряжения в пределах 5-24 В.

Количество оборотов ротора определялось с помощью датчика частоты вращения, представляющего собой оптопару 7, световой поток которой прерывается диском 8 с 60 прорезями, который установлен на валу ротора. Одному обороту ротора соответствует 60 импульсов. Информация с датчика частоты вращения через формирователь частотного сигнала (ФЧС) передавалась на ЭВМ.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для исследования моделей ветроагрегата вертикально-осевой схемы с прямыми лопастями: 1 – аэродинамическая труба; 2 – модель ветроагрегата; 3 – нагрузочное устройство; 4 – якорь; 5 – индуктор с катушкой возбуждения; 6 – тензобалка; 7 – оптопара; 8 – диск с прорезями; 9 – микроманометр.

Начиная с некоторого значения скорости набегающего потока, модель ветроагрегата, установленная в рабочей части аэродинамической трубы, начинала вращаться. После достижения заданного значения скорости  $V_\infty$ , когда ротор выходил на максимальное для данного режима количество оборотов  $n_{max}$ , на тормозную муфту подавалось напряжение (от 0 до 24 В), что имитировало работу ветроагрегата с нагрузкой.

Достоинствами экспериментальной установки является возможность плавного изменения тормозящего момента и воссоздание приближенных к натурным условий работы ветроагрегата, который сам раскручивается при взаимодействии с набегающим потоком, а затем работает с нагрузкой.

С увеличением нагрузки при фиксированной скорости набегающего потока  $V_\infty$  количество оборотов (а, следовательно, и коэффициент быстроходности  $z$ ) уменьшается, а значение коэффициента использования энергии ветра увеличивается линейно до некоторого значения, соответствующего примерно  $(0,8...0,85)c_{p_{max}}$ , после чего  $c_p(z)$  отходит от линейной зависимости, продолжая увеличиваться до значения  $c_{p_{max}}$ , которому соответствует коэффициент быстроходности

$z_{min}$ , и далее резко уменьшается. Таким образом, для ветроагрегатов с прямыми лопастями до значения примерно  $(0,8...0,85)c_{p_{max}}$  зависимость  $c_p(z)$  линейна и ее можно представить по аналогии с зависимостью коэффициента подъемной силы от угла атаки в виде:

$$c_p = c_p^z (z - z_{max}), \tag{1}$$

где  $c_p^z = dc_p/dz$  – производная коэффициента использования энергии ветра по коэффициенту быстроходности;  $z_{max}$  – коэффициент быстроходности при  $c_p = 0$ .

В результате эксперимента по полученным показаниям микроманометра  $l_v$ , мм, количеству оборотов  $n$ ,  $1/\text{мин}$  и крутящему моменту  $M_{кр}$ , Нм определялись:

- скорость набегающего потока:

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{\rho_{жс}}{\rho_э} \mu k_v l_v g}, \text{ м/с}; \tag{2}$$

- мощность модели ветроагрегата:

$$N = M_{кр} \omega, \text{ Вт}; \tag{3}$$

- коэффициенты крутящего момента ротора, использования энергии ветра и быстроходности соответственно:

$$c_m = \frac{M_{кр}}{q_\infty R S}; \quad c_p = \frac{N}{q_\infty V_\infty S}; \quad z = \frac{\omega R}{V_\infty},$$

где  $\mu$  – коэффициент поля рабочей части аэродинамической трубы;  $\rho_э$  – плотность эталонной жидкости (спирта),  $\rho_э = 0,8095 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_ж$  – плотность жидкости, залитой в микроманометр,  $\text{г/см}^3$ ;  $k_v$  – фактор микроманометра,  $\text{г/см}^3$ ;  $\rho$  – плотность воздуха,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$  – угловая скорость вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – радиус ротора, м;  $S$  – ометаемая площадь ротора,  $\text{м}^2$ ;  $q_\infty = 0,5\rho_\infty V_\infty^2$  – скоростной напор набегающего потока в рабочей части аэродинамической трубы, Па.

Измерение скорости набегающего потока  $V_\infty$  в рабочей части аэродинамической трубы производилось по методу перепада давлений в форкамере и рабочей части с помощью микроманометра, подключенного к форкамере аэродинамической трубы. Влияние загромождения потока моделью ветроагрегата учитывалось при обработке результатов исследований в виде поправок к скорости потока. Для определения поправок к скорости потока измерялось поле скоростей перед моделью вращающегося ветроагрегата в вертикальной плоскости, расположенной на расстоянии  $x = 150 \text{ мм}$  от среза сопла, при нескольких значениях скорости набегающего потока и для нескольких значений углов установки лопастей [1, 2]. Коэффициент поля рабочей части аэродинамической трубы. АТ-3  $\mu = 1,22$ , в присутствии модели –  $\mu = 1,1$  [2].

**Описание моделей ветроагрегатов.** Основные геометрические параметры исследуемых моделей роторов сведены в таблицу 1: количество лопастей  $i$ ; хорда лопасти  $b_l$ , м; профиль лопасти, окружной коэффициент заполнения  $\sigma_{окр} = i b_l / \pi D$  [2], перечень углов установки, при которых проводился эксперимент. Диаметр  $D$  и высота  $H$  ротора были выбраны таким образом, чтобы модель находилась в ядре потока аэродинамической трубы ( $D = 1 \text{ м}$ ,  $H = 0,7 \text{ м}$ ). Профиль траверс – плоская пластина, скругленная по передней и задней кромкам, хорда траверс  $b_{тр} = 42 \text{ мм}$ ; толщина траверс  $c_{тр} = 5 \text{ мм}$ . Траверсы крепились к круглым шайбам, диаметр которых  $d_{ш} = 125 \text{ мм}$ , а лопасти ротора крепились к шайбам, причем лопасть устанавливалась под фиксированным углом установки  $\varphi_l$ .

Лопастей имели симметричные профили серии НАСА с затупленной задней кромкой, причем под затупленную заднюю кромку производилась модификация верхней кормовой поверхности профиля: начиная с максимальной относительной толщины профиля  $c_{\max}$ , контур верхней кормовой поверхности профиля изменялся по параболическому закону до утолщенной на 1,8% задней кромки, что увеличивало полноту верхней и нижней кормовых поверхностей профиля и предотвращало преждевременный срыв потока при положительных или отрицательных углах атаки лопасти. К обозначению модифицированных профилей добавлена литера  $M$ .

Таблица 1. Основные геометрические параметры исследуемых моделей ветроагрегатов вертикально-осевой схемы.

№ модели	$i$ , шт.	$b_l$ , м	Профиль лопасти	$\sigma_{окр}$	$\varphi_l$
1	3	0,100	NACA-0015M	0,095	$0^\circ, +1^\circ, +2^\circ, +3^\circ$
2	3	0,080	NACA-0016M	0,076	$+1^\circ, +2^\circ, +3^\circ$
3	3	0,125	NACA-0012M	0,119	$0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$
4	3	0,110	NACA-0018M	0,105	$0^\circ, +2^\circ, +4^\circ, +6^\circ$

В работе [1] было показано, что скорость набегающего потока  $V_\infty$  не влияет на характер зависимости  $c_{p_{max}}(\varphi)$ , и оптимальное значение угла установки лопасти  $\varphi_{opt}$  не зависит от  $V_\infty$ . С увеличением скорости  $V_\infty$  значения максимального

коэффициента использования энергии ветра  $c_{p_{max}}$  возрастают. Рабочие характеристики моделей ветроагрегатов приведены в таблицах 2–5 и на рис. 2–5 при фиксированной скорости набегающего потока  $V_\infty \approx 11 \text{ м/с}$  при различных углах установки лопасти  $\varphi$ .

Таблица 2. Значения  $z$  и  $c_p$  для модели ветроагрегата №1

$\varphi = 0^\circ$		$\varphi = 1^\circ$		$\varphi = 2^\circ$		$\varphi = 3^\circ$	
$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$
3,398	0,013	3,412	0,014	3,450	0,008	3,456	0,011
3,333	0,047	3,361	0,038	3,375	0,040	3,399	0,034
3,208	0,101	3,254	0,088	3,230	0,119	3,150	0,145
3,040	0,167	3,133	0,135	3,095	0,172	3,020	0,192
2,999	0,181	3,101	0,147	3,015	0,195	2,982	0,202
2,920	0,212	3,001	0,189	2,921	0,228	2,956	0,217
2,873	0,226	2,846	0,240	2,879	0,243	2,864	0,244
2,817	0,236	2,814	0,249	2,828	0,255	2,821	0,258
2,748	0,241	2,767	0,262	2,673	0,307	2,665	0,296
2,725	0,250	2,711	0,274	2,608	0,306	2,631	0,308
2,617	0,254	2,588	0,276	2,452	0,297	2,636	0,307
2,574	0,251	2,522	0,271	2,348	0,279	2,559	0,313
2,494	0,242	2,461	0,260	2,282	0,264	2,425	0,289
2,376	0,224	2,301	0,238				
2,357	0,211						

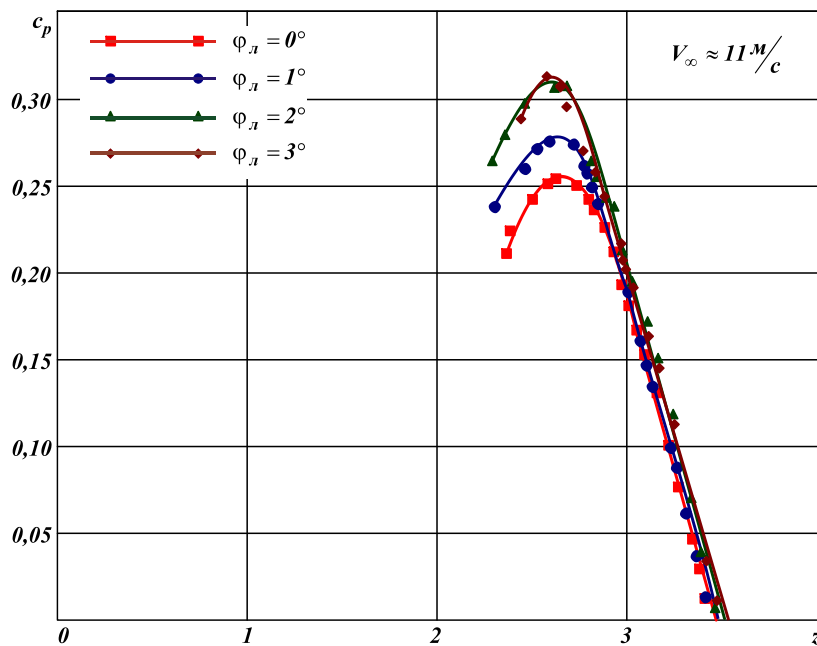


Рис. 2. Зависимости  $c_p = f(z, \varphi_l)$  для модели ветроагрегата №1.

Таблиця 3. Значення  $z$  и  $c_p$  для моделі ветроагрегата №2.

$\varphi = 1^\circ$		$\varphi = 2^\circ$		$\varphi = 3^\circ$	
$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$
3,552	0,010	3,552	0,011	3,526	0,014
3,541	0,015	3,515	0,029	3,448	0,045
3,498	0,035	3,488	0,045	3,389	0,088
3,451	0,051	3,381	0,094	3,278	0,130
3,410	0,077	3,333	0,112	3,208	0,156
3,348	0,102	3,291	0,127	3,133	0,185
3,301	0,126	3,230	0,148	3,059	0,209
3,219	0,150	3,201	0,169	3,020	0,226
3,152	0,170	3,148	0,194	2,968	0,238
3,108	0,188	3,004	0,232	2,903	0,251
3,012	0,201	2,956	0,242	2,856	0,263
2,962	0,217	2,870	0,250	2,791	0,269
2,739	0,218	2,736	0,248	2,772	0,265
2,724	0,218	2,703	0,243		
2,646	0,214	2,655	0,237		
2,379	0,186	2,578	0,288		
		2,526	0,213		

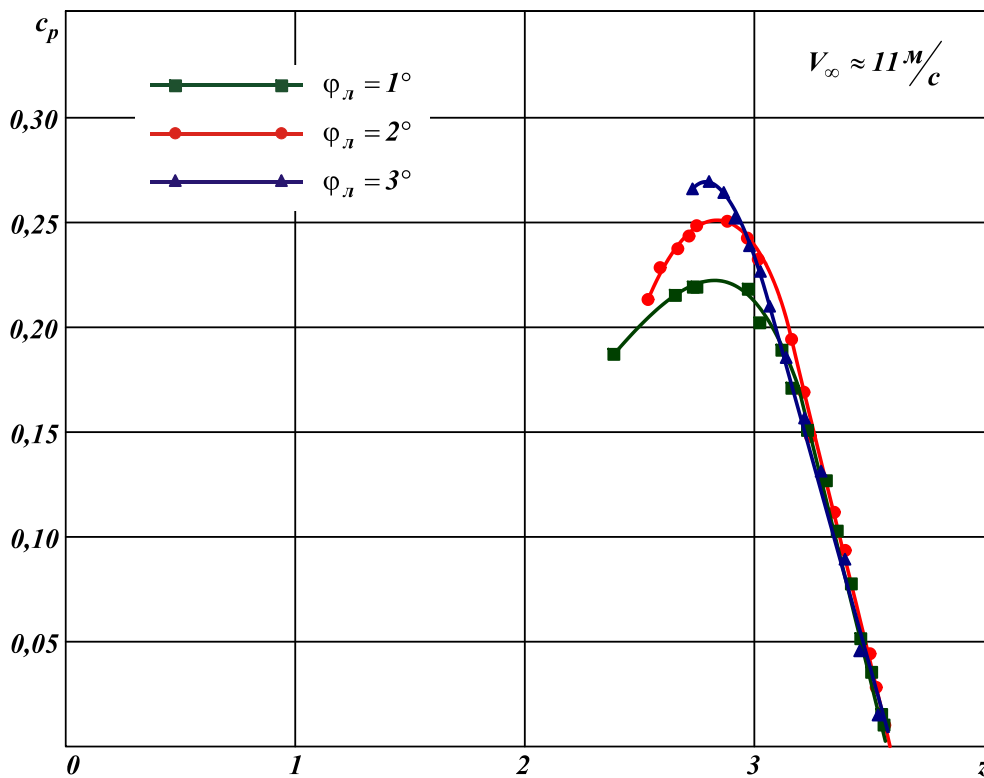


Рис. 3. Зависимости  $c_p = f(z, \varphi_L)$  для модели ветроагрегата №2.

Таблиця 4. Значення  $z$  і  $c_p$  для моделі ветроагрегата №4

$\varphi = 0^\circ$		$\varphi = 2^\circ$		$\varphi = 4^\circ$		$\varphi = 6^\circ$	
$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$
3,501	0,026	3,501	0,009	3,554	0,002	3,457	0,025
3,363	0,102	3,476	0,016	3,491	0,036	3,316	0,093
3,358	0,103	3,363	0,080	3,349	0,103	3,013	0,231
3,088	0,213	3,051	0,221	3,275	0,137	2,906	0,264
3,098	0,212	3,051	0,217	3,098	0,209	2,901	0,262
2,68	0,340	2,562	0,363	2,715	0,337	2,804	0,288
2,69	0,331	2,576	0,358	2,700	0,338	2,755	0,323
2,695	0,333	1,468	0,376	2,675	0,355	2,755	0,312
2,446	0,349	2,463	0,379	2,559	0,386	2,673	0,334
2,446	0,345	2,391	0,389	2,436	0,396	2,629	0,324
		2,391	0,387	2,391	0,391	2,581	0,322

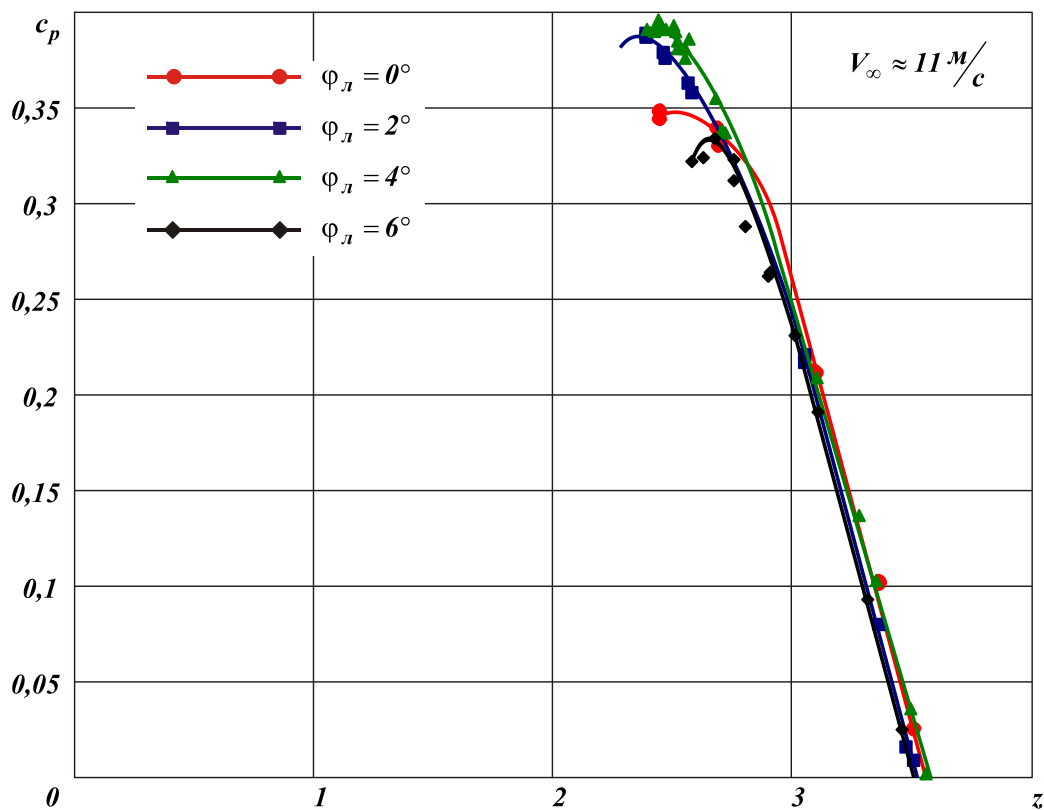


Рис. 4. Зависимости  $c_p = f(z, \varphi_t)$  для моделі ветроагрегата №4.

Таблиця 5. Значення  $z$  і  $c_p$  для моделі ветроагрегата №3

$\varphi = 0^\circ$		$\varphi = 2^\circ$		$\varphi = 4^\circ$	
$z$	$c_p$	$z$	$c_p$	$z$	$c_p$
3,133	0,020	3,152	0,019	3,218	0,016
3,103	0,040	3,085	0,068	3,080	0,074
3,038	0,065	2,979	0,117	2,924	0,136
3,018	0,076	2,935	0,142	2,862	0,170
2,945	0,115	2,867	0,174	2,683	0,266
2,867	0,153	2,799	0,210	2,612	0,302
2,833	0,170	2,730	0,234	2,508	0,326
2,735	0,215	2,504	0,317	2,455	0,342
2,648	0,241			2,311	0,325

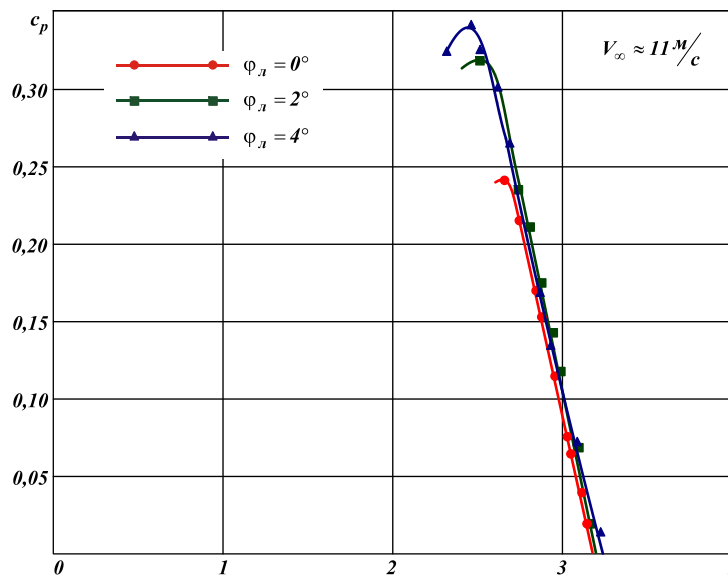


Рис. 5. Залежності  $c_p = f(z, \varphi_n)$  для моделі ветроагрегата №3.

Из рис. 2–5 видно, что производная  $c_p^z$  не зависит от углов установки лопасти для каждой модели. С увеличением толщины профиля производная  $c_p^z$  увеличивается, достигая максимума  $c_p^z = -0,416$  при значении  $\bar{c} = 0,15$ , и при дальнейшем увеличении толщины уменьшается (от  $c_p^z = -0,416$  при  $\bar{c} = 0,15$  до  $c_p^z = -0,454$  при  $\bar{c} = 0,18$ ).

С увеличением окружного коэффициента заполнения увеличивается максимально коэффициент использования ветра от значения  $c_{p_{max}} = 0,269$  при  $\sigma_{окр} = 0,076$ , достигает максимума  $c_{p_{max}} = 0,396$

при  $\sigma_{окр} = 0,105$ , далее уменьшается до  $c_{p_{max}} = 0,342$  при  $\sigma_{окр} = 0,119$ .

С увеличением толщины профиля максимальное значение коэффициента использования энергии ветра уменьшается до  $c_{p_{max}} = 0,269$  при значении  $\bar{c} = 0,16$ , и при дальнейшем увеличении толщины увеличивается до  $c_{p_{max}} = 0,396$  при  $\bar{c} = 0,18$ .

Из рис. 2–5 и таблиц 2–5 в таблицу 6 сведены максимальные значения коэффициентов использования энергии ветра  $c_{p_{max}}$ , максимальный (при  $c_p = 0$ ) и минимальный (соответствующий значению  $c_{p_{max}}$ ) коэффициенты быстроходности, соответствующие исследуемым углам установки лопасти.

Таблица 6. Значения  $c_{p_{max}}$ ,  $z_{min}$  и  $z_{max}$  для исследуемых углов установки  $\varphi$

Модель №1	$\varphi^\circ$	$z_{max}$	$c_{p_{max}}$	$z_{min}$	Модель №2	$\varphi^\circ$	$z_{max}$	$c_{p_{max}}$	$z_{min}$
		0	3,40	0,274		2,678		1	3,55
	1	3,42	0,294	2,720		2	3,60	0,251	2,87
	2	3,50	0,307	2,593		3	3,53	0,269	2,79
	3	3,56	0,313	2,559					
	4	3,45	0,290	2,612					
Модель №3	$\varphi^\circ$	$z_{max}$	$c_{p_{max}}$	$z_{min}$	Модель №4	$\varphi^\circ$	$z_{max}$	$c_{p_{max}}$	$z_{min}$
		0	3,150	0,241		2,648		0	3,550
	2	3,155	0,317	2,504		2	3,480	0,389	2,391
	4	3,220	0,342	2,455		4	3,554	0,396	2,436
						6	3,460	0,334	2,673

На рис. 6 показаны зависимости  $c_{p_{max}}(\varphi)$  для исследуемых моделей ветроагрегатов.

Из рис. 6 видно, что оптимальная величина угла установки лопасти моделей ветроагрегатов №1 и №2 равна  $\varphi_{opt} = 3^\circ$ , а для моделей №3 и №4  $\varphi_{opt} = 4^\circ$ .

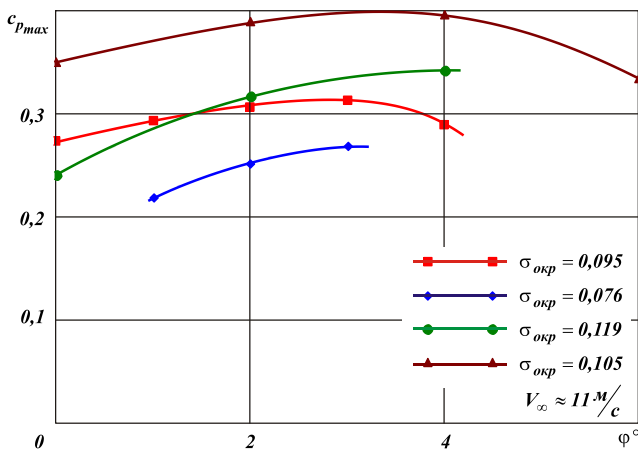


Рис. 6. Зависимости  $c_{p_{max}}(\varphi)$  для исследуемых моделей ветроагрегатов.

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные углы установки лопастей трехлопастных вертикально-осевых ветроагрегатов с прямыми лопастями с модифицированными симметричными профилями серии НАСА. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании вертикально-осевых ветроагрегатов с большими значениями коэффициента использования ветра.

1. *Аэродинамика ветродвигателя с вертикальной осью вращения*: отчет о НИР / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"; рук. Чмовж В.В.; исполн. Еремеев И.Д., Соляник П.Н., Сургайло М.Л., Чмовж В.В., Усик Ю.Ф. – Харьков, 2007. – 109 с. – № ГР 0107U001786. – Инв. № 0207U006273.

2. *Сургайло М.Л.* Определение коэффициентов поля скоростных напоров вблизи вращающегося ротора вертикально-осевой схемы [Текст] / И.А. Ганган, И.Д. Еремеев, П.Н. Соляник, М.Л. Сургайло, В.В. Чмовж // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Вып. 2(89). – X., 2012. – С. 50–54.