

УДК 621.311.24

А.И.Яковлев, докт. техн. наук, **М.А.Затучная**, **В.Н.Пашков**, **М.М.Балбеков**,
В.Н.Меркушев (Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков)

Сравнение энергетических характеристик лопастей ортогональных ВЭУ различных типов

В работе рассматривается сравнительный анализ энергетических характеристик ортогональных ветроколес. Делается вывод об оптимальных углах установки лопастей для различных вариантов исполнения ветроколес.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, ветроколесо, ортогональная ветротурбина, энергетическая характеристика.

В роботі розглядається порівняльний аналіз енергетичних характеристик ортогональних вітроколес. Надається висновок про оптимальні кути установки лопатей для різних варіантів виконання вітроколес.

Ключові слова: вітроелектрична установка, вітроколесо, ортогональна вітротурбіна, енергетична характеристика.

Введение. Объектом исследования является влияние углов установки лопастей ветроколеса на энергетические характеристики ветротурбины ветроэлектрических установок (ВЭУ) с вертикальной осью вращения при двух вариантах исполнения лопастей – вариант 1: прямые вертикальные и прямые наклонные лопасти и вариант 2: лопасти, изогнутые по параболе.

Анализ характеристик. Метод исследования основан на использовании идеи, изложенной в [1], и на применении алгоритма, разработанного авторами на основании этой идеи, изложенного в [2–4]. Для оптимизации углов установки лопастей были взяты за основу варианты основных геометрических параметров ветроколеса, дающих наиболее благоприятные значения максимального коэффициента мощности $C_{P_{max}}$ и соответствующего ему аргумента – коэффициента быстроходности, называемого оптимальным Z_{opt} . Также было принято во внимание значение максимального коэффициента быстроходности при $C_P = 0$, а именно Z_{max} .

На рис. 1 и 2 приведены условные обозначения.

Профилем для исследования был принят симметричный профиль НАСА 18-ти процентной толщины.

Исследования были проведены при следующих параметрах лопасти:

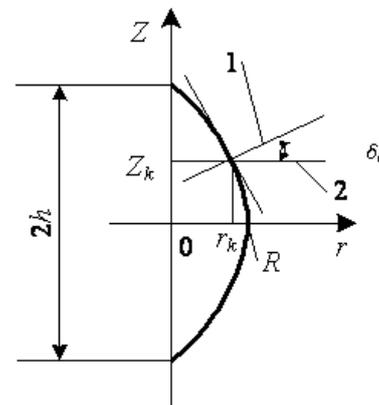


Рис. 1. Лопасти, изогнутые по параболе:

1 – плоскость профиля; 2 – горизонтальная плоскость.

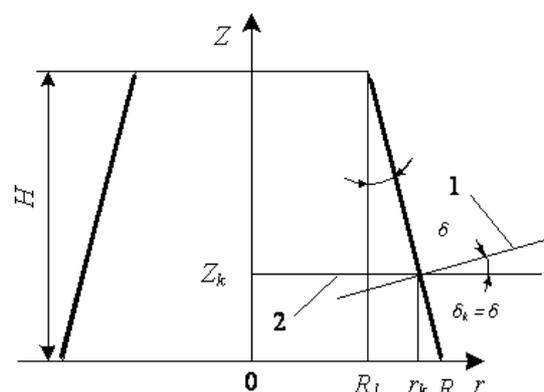


Рис. 2. Наклонные лопасти: 1 – плоскость профиля;

2 – горизонтальная плоскость.

- относительная хорда лопасти в долях радиуса $\bar{b}_R = 0,08$ (для всех вариантов);
- угол наклона лопасти относительно оси $\delta = 0^\circ$ (прямые вертикальные лопасти);

- угол наклона лопасти относительно оси $\delta = 15^\circ, 30^\circ$ (прямые наклонные лопасти);
- относительная высота колеса в долях радиуса $\bar{h}_R = 1,0$ и $1,5$ для прямых вертикальных и прямых наклонных лопастей, а для лопастей, изогнутых по параболе, этот параметр задается как половина относительной высоты колеса в долях радиуса, то есть, он составит величины $\bar{h}_R = 0,5$ и $0,75$.

Угол установки выбирался из следующего ряда (для всех вариантов):

$$\varphi = -2^\circ; -1^\circ; 0^\circ; 1^\circ; 2^\circ; 4^\circ; 6^\circ; 8^\circ. \quad (1)$$

В некоторых случаях для поиска максимума C_{Pmax} были построены дополнительные характеристики, что отмечено в леген-

дах к графикам.

На рис. 3–8 представлены характеристики $C_P(Z)$ для различных значений φ при изменении параметров \bar{b}_R и \bar{h}_R для ветроколес с прямыми вертикальными и прямыми наклонными лопастями.

На рис. 9–14 приведены зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ для ветроколес с прямыми вертикальными и прямыми наклонными лопастями.

На рис. 15 и 16 представлены характеристики $C_P(Z)$ для различных значений φ при изменении параметров \bar{b}_R и \bar{h}_R для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе.

На рис. 17 и 18 приведены зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе.

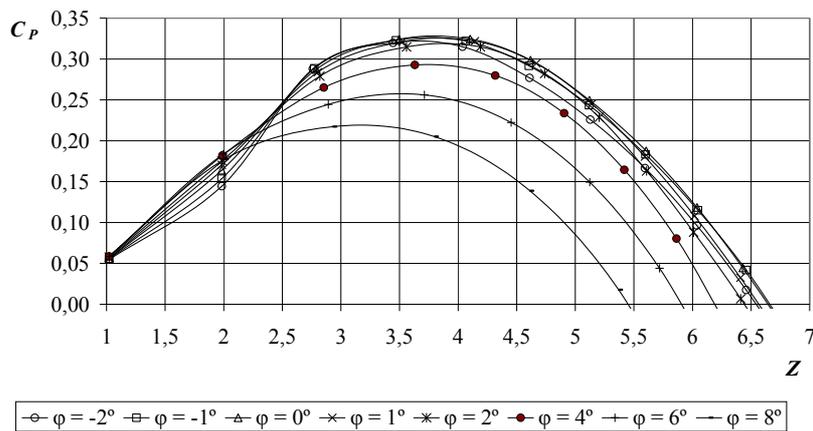


Рис. 3. Зависимости $C_P(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 0^\circ$ для ветроколес с прямыми вертикальными лопастями.

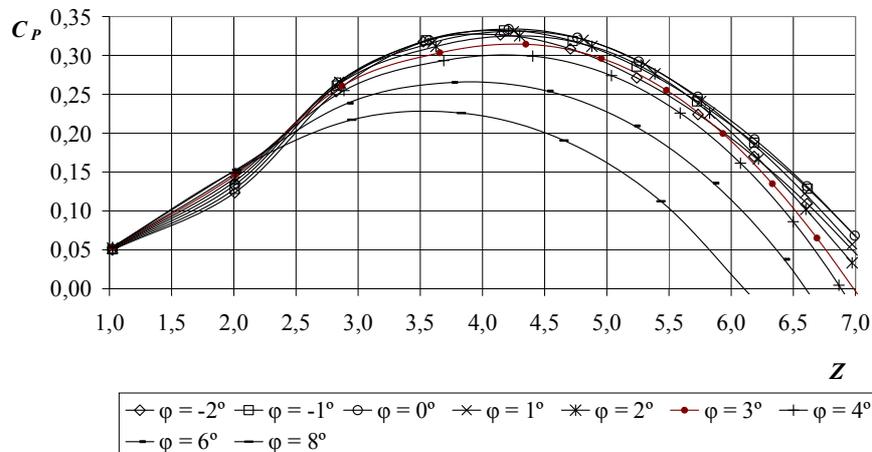


Рис. 4. Зависимости $C_P(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 15^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями.

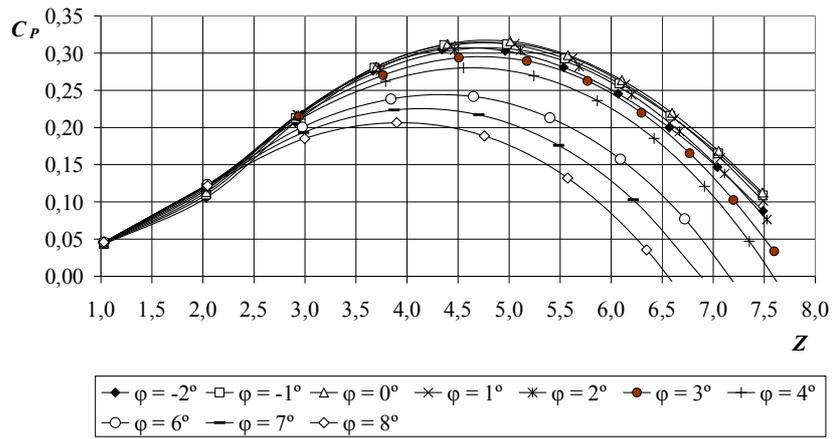


Рис. 5. Зависимости $C_p(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 30^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями.

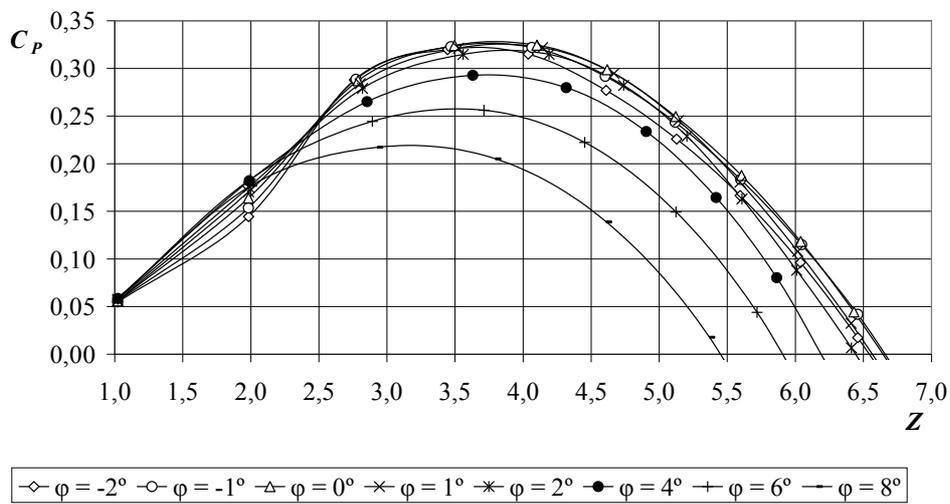


Рис. 6. Зависимости $C_p(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 0^\circ$ для ветроколес с прямыми вертикальными лопастями.

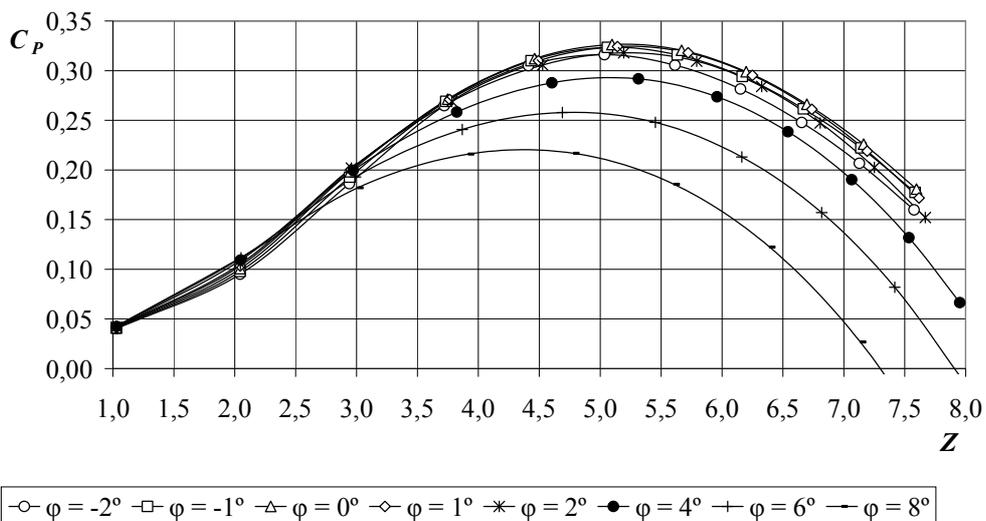


Рис. 7. Зависимости $C_p(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 15^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями.

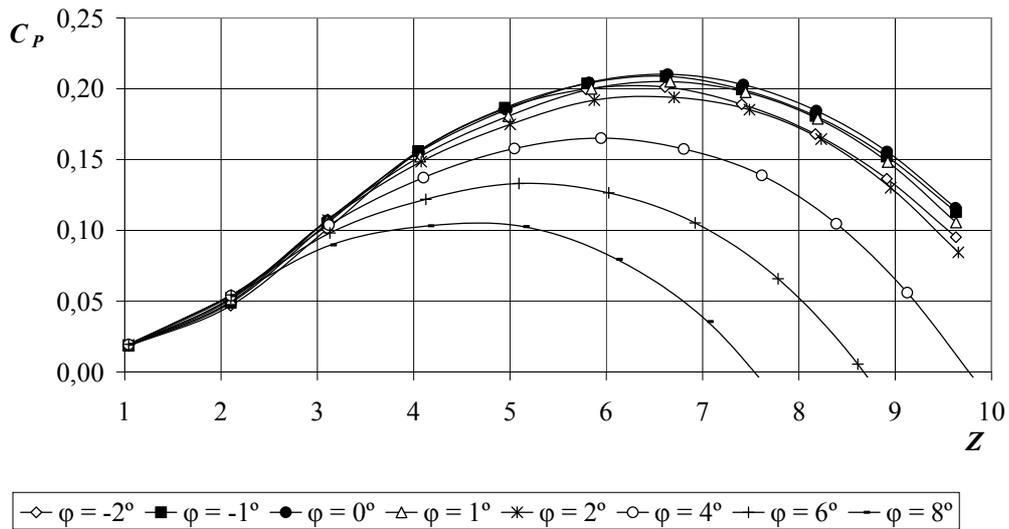


Рис. 8. Зависимости $C_p(Z)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 30^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями.

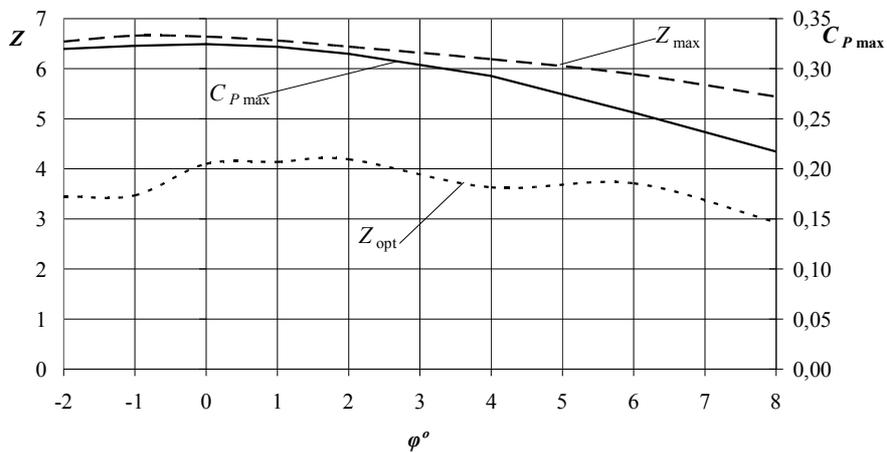


Рис. 9. Зависимости $C_{P_{max}}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 0^\circ$ для ветроколес с прямыми вертикальными лопастями. Максимумом является $C_{P_{max}} = 0,3245$ при $Z_{opt} = 4,10$ и $\varphi = 0^\circ$.

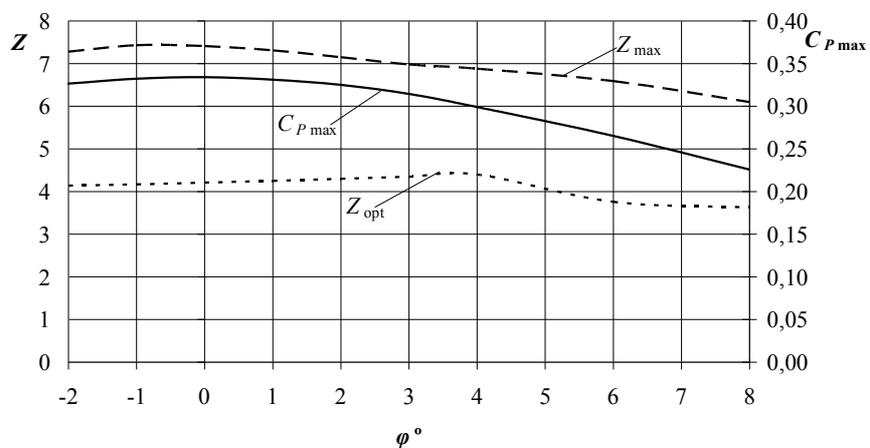


Рис. 10. Зависимости $C_{P_{max}}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 15^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями. Максимумом является $C_{P_{max}} = 0,3341$ при $Z_{opt} = 4,21$ и $\varphi = 0^\circ$.

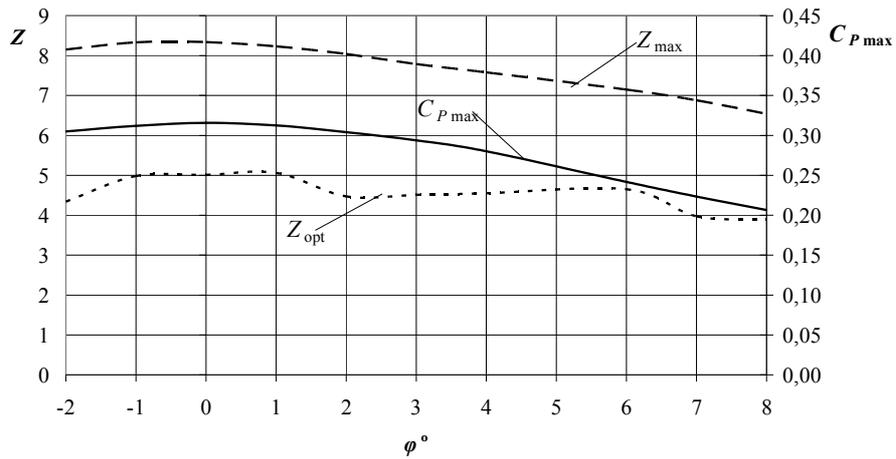


Рис. 11. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,0$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 30^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями. Максимумом является $C_{Pmax} = 0,3158$ при $Z_{opt} = 5,01$ и $\varphi = 0^\circ$.

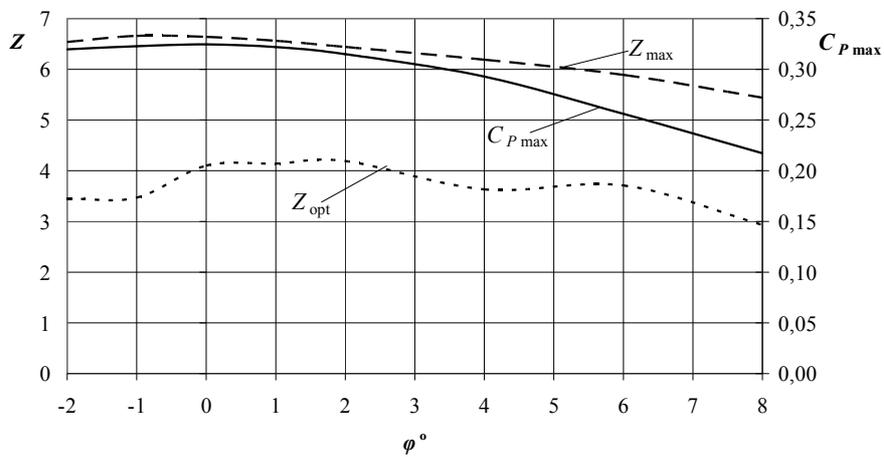


Рис. 12. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 0^\circ$ для ветроколес с прямыми вертикальными лопастями. Максимумом является $C_{Pmax} = 0,3245$ при $Z_{opt} = 4,10$ и $\varphi = 0^\circ$.

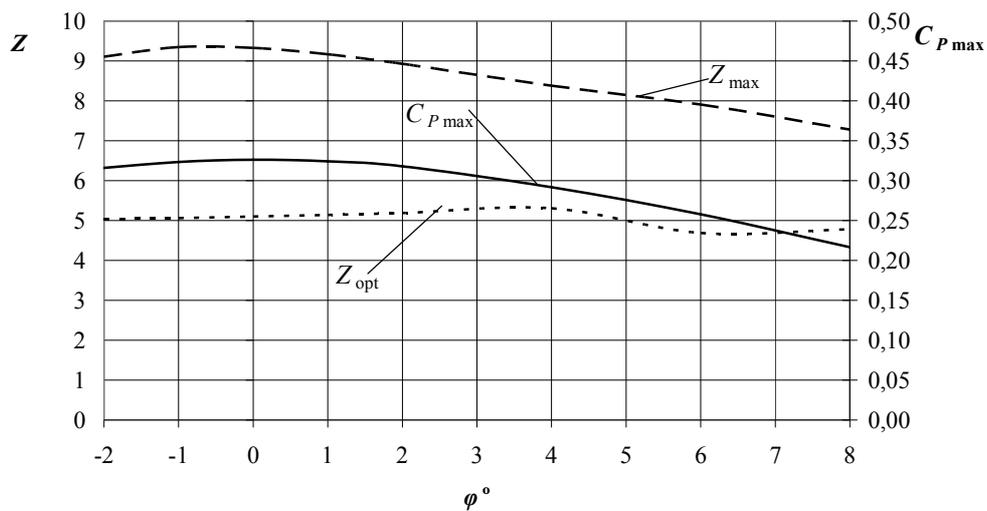


Рис. 13. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 15^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями. Максимумом является $C_{Pmax} = 0,3263$ при $Z_{opt} = 5,10$ и $\varphi = 0^\circ$.

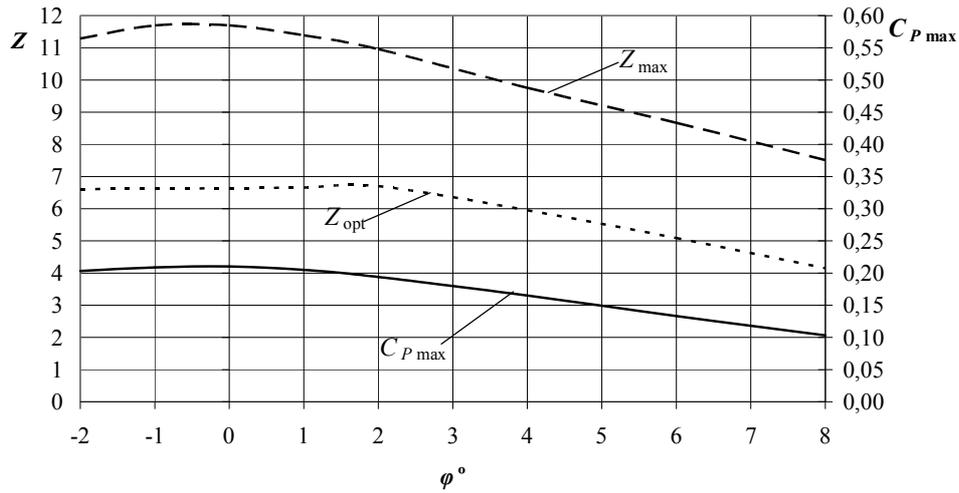


Рис. 14. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 1,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ и $\delta = 30^\circ$ для ветроколес с прямыми наклонными лопастями. Максимумом является $C_{Pmax} = 0,2102$ при $Z_{opt} = 6,64$ и $\varphi = 0^\circ$.

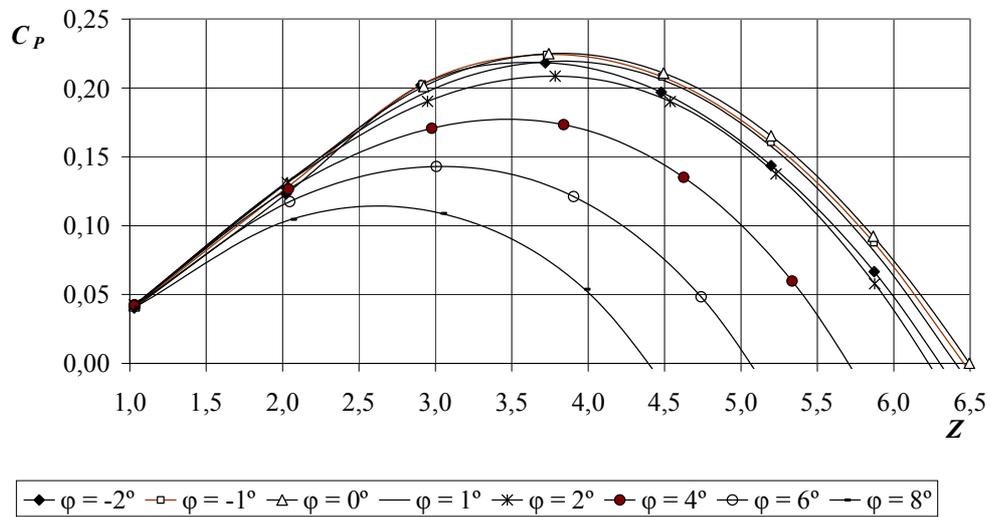


Рис. 15. Зависимости $C_P(Z)$ при $\bar{h}_R = 0,5$; $\bar{b}_R = 0,08$ для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе.

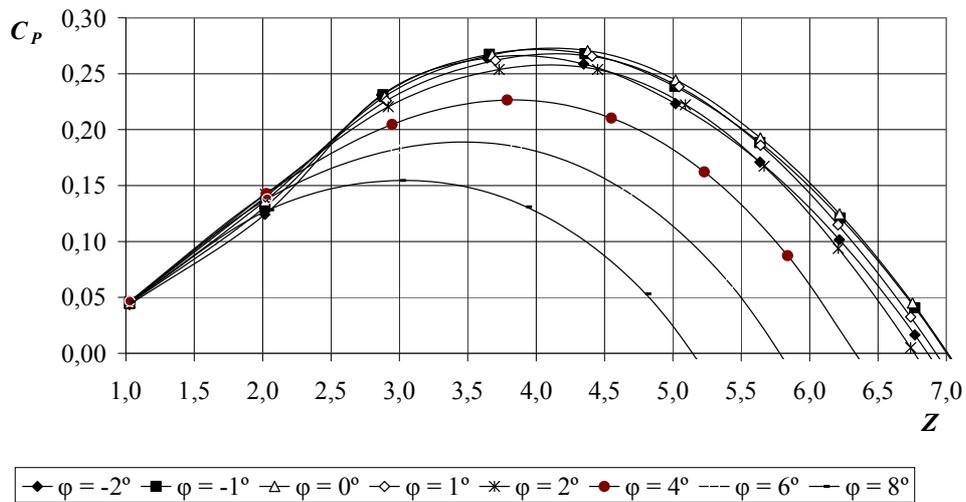


Рис. 16. Зависимости $C_P(Z)$ при $\bar{h}_R = 0,75$; $\bar{b}_R = 0,08$ для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе.

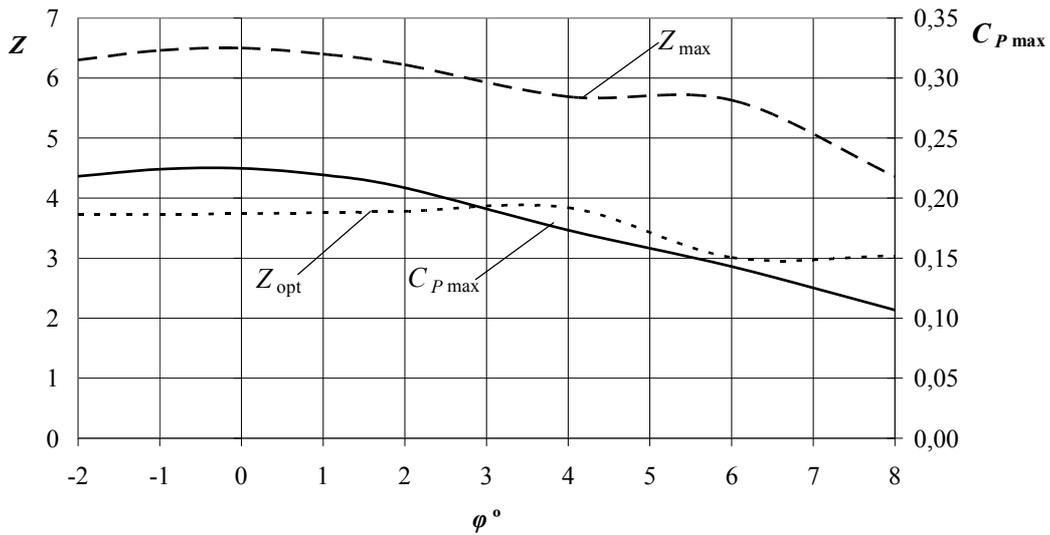


Рис. 17. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 0,5$ и $\bar{b}_R = 0,08$ для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе. Максимумом является $C_{Pmax} = 0,2248$ при $Z_{opt} = 3,74$ и $\varphi = 0^\circ$.

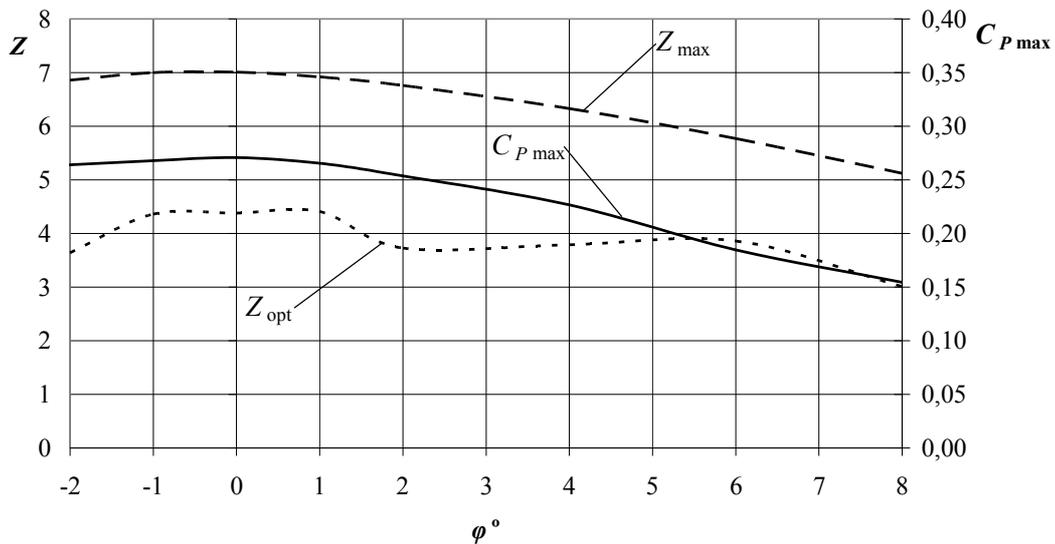


Рис. 18. Зависимости $C_{Pmax}(\varphi)$, $Z_{opt}(\varphi)$ и $Z_{max}(\varphi)$ при $\bar{h}_R = 0,75$ и $\bar{b}_R = 0,08$ для ветроколес с лопастями, изогнутыми по параболе.

Максимумом является $C_{Pmax} = 0,2707$ при $Z_{opt} = 4,38$ и $\varphi = 0^\circ$.

Результаты анализа графиков для прямых вертикальных и прямых наклонных лопастей (рис. 3–14) сведены в табл. 1 и 3, а для лопастей, изогнутых по параболе (рис. 15–18) – в табл. 3 и 4.

Таблица 1. Результаты анализа графиков для прямых вертикальных и прямых наклонных лопастей для максимума коэффициента мощности

\bar{h}_R	δ , градус	φ , градус	Z_{opt} , о.е.	C_{Pmax} , о.е.
1	0°	0°	4,10	0,3245
	15°	0°	4,21	0,3341
	30°	0°	5,01	0,3158
1,5	0°	0°	4,10	0,3245
	15°	0°	5,10	0,3263
	30°	0°	6,64	0,2120

Таблица 2. Результаты анализа графиков для прямых вертикальных и прямых наклонных лопастей для максимума коэффициента максимальной быстроходности

\bar{h}_R	δ , градус	φ , градус	Z_{\max} , о.е.	$C_{P\max}$, о.е.
1	0°	-1°	6,66	0,3228
	15°	-1°	7,43	0,3323
	30°	0°	8,34	0,3158
1,5	0°	-1°	6,66	0,3228
	15°	-1°	9,35	0,3235
	30°	-1°	11,70	0,2088

Таблица 3. Результаты анализа графиков для лопастей, изогнутых по параболе, для максимума коэффициента мощности

\bar{h}_R	φ , градус	Z_{opt} , о.е.	$C_{P\max}$, о.е.
0,5	0°	3,74	0,2248
0,75	0°	4,38	0,2707

Таблица 4. Результаты анализа графиков для лопастей, изогнутых по параболе, для максимума коэффициента максимальной быстроходности

\bar{h}_R	φ , градус	Z_{\max} , о.е.	$C_{P\max}$, о.е.
0,5	0°	6,50	0,2248
0,75	0°	7,01	0,2707

Выводы. 1. Можно заключить, что ВЭУ с прямыми наклонными лопастями достигает максимума коэффициента мощности при угле установки 0° или близком к нему. ВЭУ с лопастями, изогнутыми по параболе, также достигает максимума коэффициента мощности при угле установки 0°.

2. Для прямых вертикальных лопастей при $\bar{h}_R = 1,0$ и $\bar{h}_R = 1,5$ характеристики близки.

3. Для прямых наклонных лопастей при $\delta = 30^\circ$ относительная высота лопасти \bar{h}_R существенно влияет на характеристики. Так, при $\delta = 30^\circ$ и $\bar{h}_R = 1,5$ характеристики значительно ниже, чем при $\delta = 30^\circ$ и $\bar{h}_R = 1,0$.

4. Для лопастей, изогнутых по параболе, лучше ведут себя характеристики при большей относительной высоте, а именно: при $\bar{h}_R = 0,75$ коэффициент $C_{P\max}$ больше, чем при $\bar{h}_R = 0,5$.

5. ВЭУ с прямыми вертикальными или прямыми наклонными лопастями обладают большей

быстроходностью для $Z = Z_{\text{opt}}$ и большим коэффициентом мощности для $C_P = C_{P\max}$.

6. В дальнейшем желательно произвести исследование поведения коэффициента мощности C_P при варьировании параметра \bar{b}_R для рассмотренных случаев.

1. *Абрамовский Е.Р.* Аэродинамика ветродвигателей / Е.Р. Абрамовский, С.В. Горюдько, Н.В. Свиридов – Учеб. пособие – Днепропетровск: ДГУ, 1987. – 220 с.

2. *Кривцов В.С.* Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.

3. *Яковлев А.И.* Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения / А.И. Яковлев, М.А. Затучная. – Учеб. пособие по курсовому проектированию. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2002. – 61 с.

4. *Яковлев А.И.* Энергетические характеристики ветротурбин с вертикальной осью вращения / А.И. Яковлев, М.А. Затучная // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. трудов. Вып. 7. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 1998. – С. 98–102.