

УДК 621.548.001.24

Г.А. Оборский, д-р техн. наук, проф.,  
Б.А. Моргун, канд. техн. наук, доц.,  
А.Н. Бундюк, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕТРОКОЛЕСА С САМОНАСТРАИВАЕМОЙ ЛОПАСТЬЮ

**Введение.** Сегодня не существует однозначной и рациональной методики выбора оптимальных аэродинамических профилей для лопастей ветроэнергетических установок [1...3]. При выборе профиля лопасти приходится учитывать условия ее работы в широком диапазоне изменения скорости ветра и при разных углах заклинивания, а также возможности формирования большого количества геометрических комбинаций профилей лопастей. Поэтому конструирование профиля лопасти является достаточно актуальной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследования ученых, посвященные использованию ветроэнергетических установок, показывают возможность генерации электрической энергии на базе возобновляемых источников, что подтверждается научными публикациями последних лет. Эти исследования посвящены сравнительному анализу установок [1], использованию новых материалов для лопастей [2], моделированию динамики установок и методам управления их мощностью [3...6], что не относится к исследованию новых конструкций лопастей. В таких условиях разработка новой методики расчета ветроколес с самонастраиваемыми лопастями является не менее актуальной задачей.

**Цель работы.** Разработать методику проектирования и рассчитать конструкцию ветроколеса с самонастраиваемой лопастью.

**Изложение основного материала.** В ветроэнергетической лаборатории ОНПУ разработано ветроколесо с самонастраиваемыми лопастями, которые установлены с эксцентриситетом относительно маха и могут свободно поворачиваться вокруг своей оси.

При работе колеса сила ветра, создающая крутящий момент, и сила сопротивления вращению лопасти от встречного потока воздуха, действуя в разных направлениях, стремятся повернуть лопасть относительно ее оси. Лопасть характеризуется длиной секции  $L$ , хордой секции  $b$  и углом поворота секции относительно маха в диапазоне  $\alpha=0...45^\circ$ .

В начальный период, когда лопасть располагается под углом  $45^\circ$  относительно плоскости вращения колеса, воздушный поток с максимальной силой вращает колесо. При этом скорость вращения увеличивается, что вызывает увеличение сопротивления от встречного потока воздуха и приводит к повороту лопасти и уменьшению угла  $\alpha$ . Это, в свою очередь, уменьшает крутящую силу. Когда крутящая сила и сила сопротивления уравниваются, лопасть устанавливается под определенным углом  $\alpha$ , а скорость вращения колеса становится постоянной и наибольшей для данной скорости ветра, таким образом, коэффициент использования мощности воздушного потока становится максимальным.

Вычислены энергетические характеристики для односекционной лопасти (рис. 1, а) длиной  $L=0,24$  м, с хордой  $b=0,18$  м для скоростей воздушного потока  $V_1=4...8$  м/с.

Под действием воздушного потока, направленного в центр давления лопасти ветроколеса (точка 0, рис. 1, б), возникает как крутящая сила  $Q_k$ , так и противодействующая ей сила  $Q_p$ , которые равны в равновесном состоянии ветроколеса, т.е.

$$Q_k = Q_p \quad (1)$$

Энергетическая мощность воздушного потока ( $P_{вп}$ ) определяется соотношением [1]

---

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.22

© Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.Н. Бундюк, 2014

$$P_{\text{вп}} = 0,5\rho R^2 V^3, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $R$  — радиус площади ометания, м;  
 $V$  — скорость воздушного потока, м/с.

Крутящая сила ветроколеса  $Q_k$  определяется из прямоугольного треугольника  $Q_k, Q_{\text{вп}}$  (см. рис. 1, б)

$$Q_k = Q_{\text{вп}} \sin \alpha.$$

Мощность противодействия  $P_{\text{п}}$  определяется из уравнения

$$P_{\text{п}} = 0,5\rho S_{\text{л}} U^3,$$

где  $S_{\text{л}}$  — парусность лопасти, м<sup>2</sup>;  
 $U$  — окружная скорость лопасти в крайней точке, м/с.

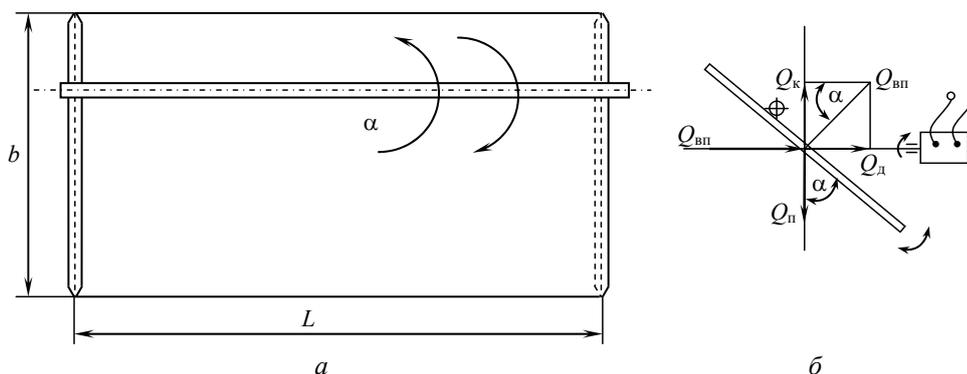


Рис. 1. Схема равновесия сил на лопасти: односекционная лопасть (а); силы, действующие на лопасть (б)

Парусность  $S_{\text{л}}$  определяется соотношением

$$S_{\text{л}} = bL \sin \alpha.$$

Окружная скорость лопасти  $U$  определяется как

$$U = \omega R,$$

где  $\omega$  — угловая частота вращения ветроколеса, с<sup>-1</sup>.

Угловая частота вращения

$$\omega = \pi n / 30,$$

где  $n$  — скорость вращения ветроколеса, об/мин.

Зависимости мощности воздушного потока  $P_{\text{вп}}$ , мощности ветроколеса  $P_k$  и оборотов ветроколеса  $n$  от скорости ветрового потока  $V$  представлены на рис. 2.

Однако равновесие (1) между  $Q_k$  и  $Q_{\text{п}}$  нарушается при изменении не только мощности воздушного потока  $P_{\text{вп}}$ , но и при изменении угла лопасти  $\alpha$ .

Изменения крутящей  $P_k$  и противодействующей  $P_{\text{п}}$  мощностей показаны на рис. 3, из которого видно, что при повышении скорости воздушного потока  $V_1$  указанные параметры  $P_k$  и  $P_{\text{п}}$  изменяются тем сильнее, чем больше  $\alpha$ .

При изменении скорости воздушного потока  $V$  изменяется угловая скорость вращения ветроколеса  $n$ , что приводит к изменению крутящей силы  $Q_k$  и, в свою очередь, приводит к нарушению равновесия (1), т.е.  $Q_k \neq Q_{\text{п}}$ . Вследствие этого лопасть поворачивается вокруг своей продольной оси, устанавливаясь в положение с новым углом  $\alpha$ .

Но при изменении угловой скорости вращения ветроколеса изменяется окружная скорость  $U$  и парусность лопасти  $S_{\text{л}}$ , что приводит к изменению противодействующей силы  $Q_{\text{п}}$  и повороту лопасти, т.е. к изменению угла  $\alpha$ . При изменении угла  $\alpha$  также изменяется парусность лопасти.

сти  $S_n$ , на которую воздействует сила противодействия  $Q_n$ , что приводит к изменению положения лопасти. После некоторых ее колебаний вокруг своей продольной оси устанавливается новое равновесие  $Q_k=Q_n$ .

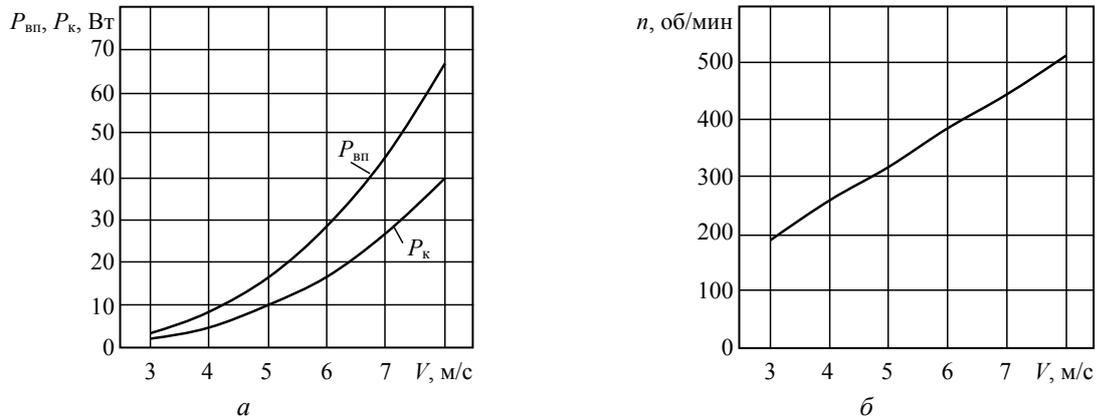


Рис. 2. Изменение характеристик ветроколеса: мощность ветрового потока и ветроколеса (а); обороты ветроколеса (б)

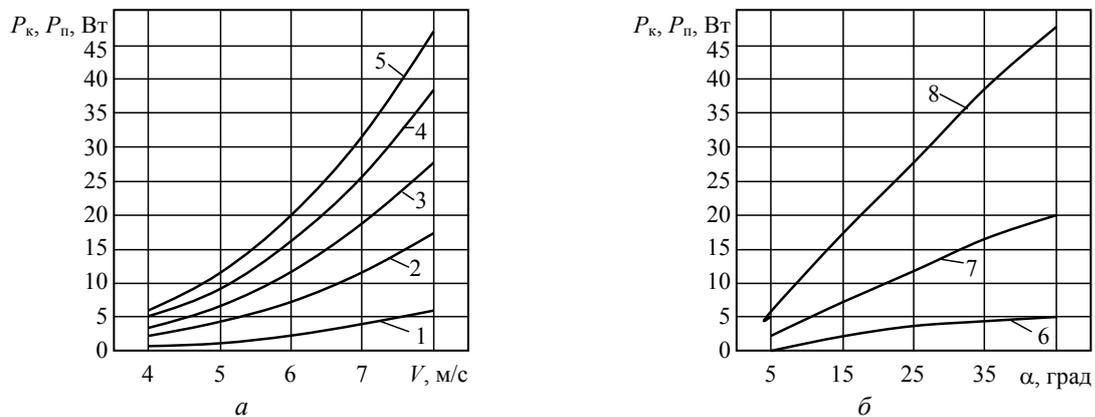


Рис. 3. Изменение мощностей ветроколеса при изменении скорости ветра для разных  $\alpha$  (а) и при изменении  $\alpha$  для разных скоростей ветра (б):  $\alpha = 5$  (1), 15 (2), 25 (3), 35 (4), 45° (5);  $V = 4$  (6), 6 (7), 8 м/с (8)

Таким образом, свободно поворачиваемая лопасть при изменении скорости воздушного потока автоматически устанавливается в положение, определяемое оптимальным углом  $\alpha_{опт}$ , что гарантирует максимальную мощность  $P_k$ .

Коэффициент использования мощности воздушного потока при всех скоростях принимает значение  $C_p = P_k / P_{вп} = 0,593$ . Эта величина совпадает со значением  $C_p^{max}$ , приведенным в [1]. Но при изменении угла в пределах  $\alpha = 5 \dots 45^\circ$  коэффициент использования мощности изменяется в пределах  $C_p = 0,087 \dots 0,707$  (рис. 4).

Проведен также расчет мощности ветроколеса с заклиненной лопастью под углом  $9,5^\circ$  с радиусом  $R = 0,26$  м при скоростях воздушного потока  $V_1 = 4 \dots 8$  м/с и при угловых скоростях вращения ветроколеса  $n = 200 \dots 800$  об/мин по методике, предложенной в [1]. Кинетическая энергия воздушного потока  $P_{вп}$  перед ветроколесом определяется по формуле (2).

Для заданной скорости воздушного потока  $V$  и угловой скорости вращения ветроколеса  $n$  быстрходность ветроколеса

$$Z = \frac{\pi R n}{30V}.$$

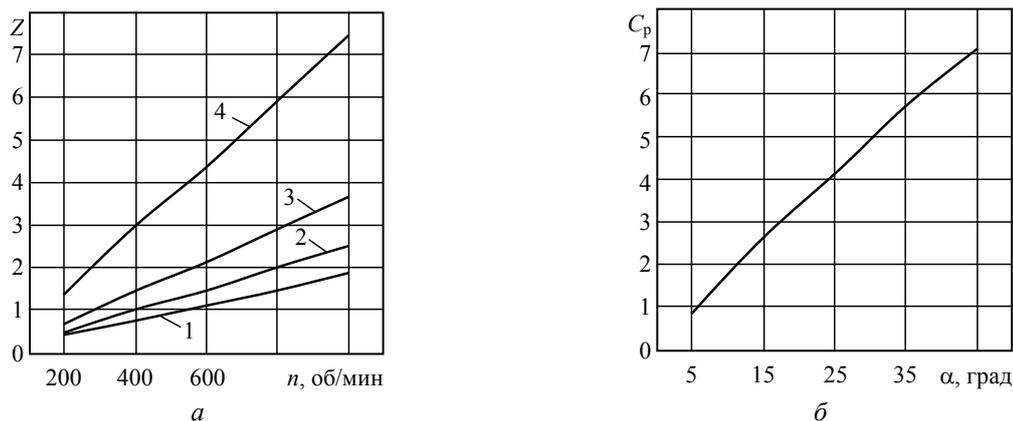


Рис. 4. Изменение характеристик ветроколеса: быстроходности  $Z$  (а) при  $V = 8$  (1), 6 (2), 4 (3), 2 м/с (4); коэффициента использования мощности воздушного потока  $C_p$  (б)

Быстроходность  $Z$  позволяет определить коэффициент использования мощности воздушного потока  $C_p$  из [1] по формуле

$$C_p = C_p^{\max} \left( \frac{Z}{Z_{\text{опт}}} \right)^2 \left[ 3 - 2 \left( \frac{Z}{Z_{\text{опт}}} \right) \right],$$

где  $Z_{\text{опт}}$  — оптимальная быстроходность ветроколеса ( $Z_{\text{опт}} = 4,9$ ).

Мощность ветроколеса

$$P_k = P_{\text{вп}} C_p.$$

Изменение мощности ветроколеса  $P_k$  при разных скоростях воздушного потока  $V$  и оборотах  $n$  представлено на рис. 5.

Мощность ветроколеса  $P_k$  зависит не только от скорости воздушного потока  $V$ , но и от скорости его вращения  $n$ .

Результаты расчетов мощности ветроколеса с самонастраиваемой лопастью и мощности ветроколеса с заклиненной лопастью при изменении скорости воздушного потока и угла установки лопасти показаны на рис. 6.

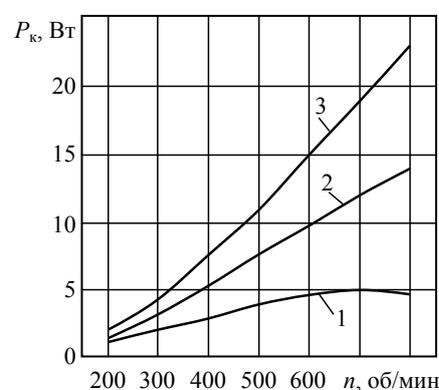


Рис. 5. Изменение мощности ветроколеса при  $V = 4$  (1), 6 (2), 8 м/с (3)

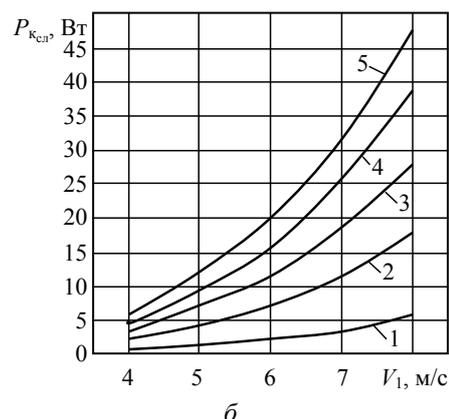
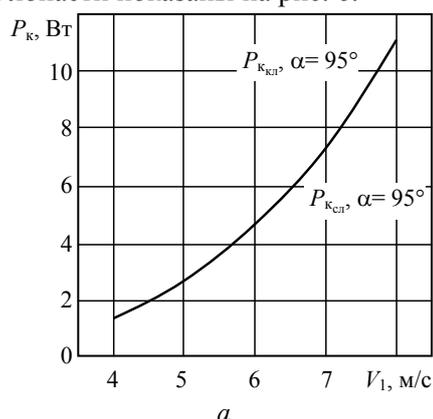


Рис. 6. Изменение мощности ветроколеса: с заклиненной и самонастраиваемой лопастью (а), с самонастраиваемой лопастью (б) при  $\alpha = 5$  (1), 15 (2), 25 (3), 35 (4), 45° (5)

При указанных значениях скоростей  $V$  воздушного потока определены скорости вращения ветроколеса  $n$  при постоянном значении  $Z$ .

Индекс “сл” относится к самонастраиваемой лопасти, а индекс “кл” — к классической. При установке классической и самонастраиваемой лопастей под углом  $9,5^\circ$  их мощности совпадают во всем диапазоне изменения скорости воздушного потока.

График показывает большую мощность ветроколеса с самонастраиваемой лопастью во всем диапазоне изменения скорости воздушного потока при больших углах установки лопасти, что подтверждает преимущество самонастраиваемой лопасти над лопастью с фиксированным углом установки. Это связано с увеличением коэффициента использования мощности воздушного потока  $C_p$  (см. рисунок 4, б).

#### Результаты:

— Предложена новая методика расчета энергетических характеристик ветроколеса, учитывающая не только крутящую силу ветра, но и силу сопротивления воздушного потока, возникающего при вращении ветроколеса.

— Предложена новая конструкция лопасти ветроколеса, в которой лопасть установлена с эксцентриситетом относительно маха и может поворачиваться вокруг своей оси.

— Проведенные расчеты энергетических характеристик ветроколеса с самонастраиваемой лопастью по предложенной методике показали, что при изменении скорости ветра лопасть самоустанавливается под оптимальным углом к плоскости вращения ветроколеса, обеспечивая максимальную скорость его вращения.

— Расчет энергетических характеристик ветроколеса по обеим методикам показал их совпадение во всем диапазоне изменения скорости ветрового потока, что позволяет оценивать предложенную методику как достоверную.

— Сравнительный анализ энергетических характеристик ветроколес показал, что при одинаковых скоростях воздушного потока и радиусе ветроколеса мощность ветроколеса с самонастраиваемой лопастью больше, чем мощность ветроколеса с заклиненной лопастью.

**Выводы.** Разработанная конструкция ветроколеса с самонастраиваемыми лопастями обеспечивает максимальный коэффициент использования мощности воздушного потока, что позволяет ее эффективно использовать даже при низких скоростях ветра.

Предложенная методика расчета энергетических характеристик ветроколес представляет собой новый подход к определению аэродинамических характеристик ветроколес, который упрощает расчет и позволяет целенаправленно определять пути повышения коэффициента использования мощности воздушного потока.

#### Литература

1. Дзензерский, В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков; ред.: А.Я. Бельдид; НАН Украины, Ин-т трансп. систем и технологий “Трансмаг”, Междунар. науч.-пром. корпорация “Веста”. — К.: Наук. думка, 2011. — 591 с.
2. Астахов, О.Е. Опыт эксплуатации стеклопластиковых лопастей для ветроагрегатов / О.Е. Астахов, Г.В. Титов, С.П. Гейко // Труды III международной конференции “Нетрадиционная энергетика в XXI веке”, 9–15 сентября 2002, Судак. — 2002. — С. 115 — 117.
3. Кузьо, І. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І. Кузьо, В. Корендід // Вісн. ТНТУ. — 2011. — Т. 16, № 3. — С. 85 — 94.
4. Оборский, Г.А. Построение математической модели ветроэлектрической установки как объекта управления оборотами ротора / Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.М. Бундюк // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2013. — Вип. 2(41). — С. 142 — 147.
5. Оборский, Г.А. Исследование динамических характеристик ВЭУ / Г.А. Оборский, А.Н. Бундюк, Б.А. Моргун // Сб. трудов МНПК “Новые технологии в автоматизированном управлении: теория и практика”, 12–15 сентября 2013, Одесса. — 2013. — С. 54 — 57.
6. Оборский, Г.А. Регулирование мощности ветродвигателя путем поворота в упругой опоре лопастей ветроколеса относительно оси маха / Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, И.И. Сидоренко // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2013. — Вип. 2(41). — С. 48 — 53.

## References

1. Dzenzersky, V.A., Tarasov, S.V. and Kostyukov, I.Yu. (2011). *Wind-Stream Installations of Low Power*. Kyiv: Naukova dumka.
2. Astakhov, O.E., Titov, G.V. and Geiko, S.P. (2002). Operating experience of fiberglass blades for wind-wheels. In A.V. Shurchkov (Ed.), *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Alternative Energetics in XXI century* (pp. 115-117). Sudak, Ukraine: Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine.
3. Kuzyo, I. and Korendiy, V. (2011). Theoretical aspects of modeling of wind-power plants. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 16(3), 85-94.
4. Oborsky, G.A., Morgun, B.A. and Bundyuk, A.N. (2013). Construction of a mathematical model of wind-electric installation as an object of rotor speed control. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, 2, 142-147.
5. Oborsky, G.A., Bundyuk, A.N. and Morgun, B.A. (2013). Research of dynamic characteristics of wind-electric installations. In *Proceedings of the Conference on New Technologies in Automated Management: Theory and Practice* (pp. 54-57). Odessa, Ukraine: Astroprint.
6. Oborskiy, G.A., Morgun, B.A. and Sydorenko, I.I. (2013). Wind turbine power control by turning in an elastic bearing of rotor blades relative to the stroke axis. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, 2, 48-53.

## АНОТАЦІЯ / ANNOTATION / ABSTRACT

*Г.О. Оборський, Б.О. Моргун, А.М. Бундюк. Методика розрахунку вітроколеса з самоналаштувуваною лопаттю.* Спроектовано конструкцію вітроколеса, самоналаштувана лопать якого встановлена з ексцентриситетом відносно маха і може вільно повертатися навколо своєї вісі. Розроблено методику розрахунку енергетичних характеристик вітроколеса з самоналаштувуваною лопаттю, яка враховує не тільки силу вітру, а й силу опору обертанню лопаті від зустрічного повітряного потоку. У початковий період, коли лопать встановлюється під кутом  $\alpha=45^\circ$  відносно площини обертання колеса, повітряний потік з максимальною силою обертає колесо. При цьому, швидкість обертання збільшується, що викликає збільшення опору від зустрічного потоку повітря та призводить до повороту лопаті і зменшенню кута  $\alpha$ . Це, в свою чергу, зменшує крутячу силу. Коли крутяча сила і сила опору врівноважуються, лопать встановлюється під певним кутом  $\alpha$ , і швидкість обертання колеса стає постійною. Вітроколесо з самоналаштувуваною лопаттю дозволяє збільшити коефіцієнт використання потужності повітряного потоку порівняно з вітроколесом, оснащеним заклиненою лопаттю.

*Ключові слова:* конструювання вітроколеса, самоналаштувана лопать, енергетична характеристика, вісь обертання, ексцентриситет, повітряний потік, крутяча сила, зустрічний потік.

*Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.Н. Бундюк. Методика расчета ветроколеса с самонастраиваемой лопастью.* Спроектирована конструкция ветроколеса, самонастраиваемая лопать которого установлена с эксцентриситетом относительно маха и может свободно поворачиваться вокруг своей оси. Разработана методика расчета энергетических характеристик ветроколеса с самонастраиваемой лопастью, которая учитывает не только силу ветра, но и силу сопротивления лопасти от встречного воздушного потока. В начальный период, когда лопать располагается под углом  $\alpha=45^\circ$  относительно плоскости вращения колеса, воздушный поток с максимальной силой вращает колесо. При этом, скорость вращения увеличивается, что вызывает увеличение сопротивления от встречного потока воздуха и приводит к повороту лопасти и уменьшению угла  $\alpha$ . Это, в свою очередь, уменьшает крутящую силу. Когда крутящая сила и сила сопротивления уравниваются, лопать устанавливается под определенным углом  $\alpha$ , и скорость вращения колеса становится постоянной. Ветроколесо с самонастраиваемой лопастью позволяет увеличить коэффициент использования мощности воздушного потока по сравнению с ветроколесом, оснащенным заклиненной лопастью.

*Ключевые слова:* конструирование ветроколеса, самонастраиваемая лопать, энергетическая характеристика, ось вращения, эксцентриситет, воздушный поток, крутящая сила, встречный поток.

*G.A. Oborsky, B.A. Morgun, A.N. Bundyuk. Design procedure for a wind-wheel with self-adjusting blade mechanism.* Developed is a wind-wheel design equipped with the self-adjusting blade. The blade is positioned eccentrically to the balance wheel and can freely rotate around its axis. Elaborated is the method of calculating the energy characteristics for a wind-wheel with the self-adjusting blade, considering not only the wind force but the force of air counter flow resistance to the blade's rotation. Initially, the blade being located at an angle  $\alpha = 45^\circ$  to the wheel rotation plane, the air flow rotates the wheel with the maximum force. Thus, the speed of rotation increases that involves the increase in air counter flow resistance and results in blade turning with respective angle  $\alpha$  reduction. This, consequently, reduces the torque. When the torsional force and the resistance enter into equilibrium, the blade takes a certain angle  $\alpha$ , and the wheel speed becomes constant. This wind-wheel design including a self-adjusting blade allows increasing the air flow load ratio when compared to the wind-wheel equipped with a jammed blade.

*Keywords:* wind-wheel design, self-adjusting blade, power characteristic, rotation axis, eccentricity, air flow, torque force, air counter flow.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Гутыря С.С.

Поступила в редакцию 24 мая 2014 г.