УДК 621.548; 621.311.24

И. А. ШЕДЛОВСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ МНОГОЛОПАСТНОГО ВЕТРОКОЛЕСА

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. О. Поля, 19, 49005, Днепр, Украина; e-mail: botticelli@i.ua

Большинство существующих способов исследования характеристик физических моделей ветрогенераторов ориентированы на использование специализированного оборудования и аэродинамической трубы. Эти исследования в некоторых случаях чрезмерно дороги или вообще недоступны. Альтернативой таким исследованиям является транспортирование модели ветроколеса с требуемой скоростью. Целью работы является определение механических характеристик физической модели горизонтально-осевого ветроколеса на основании результатов измерений, проведенных при транспортировании модели с требуемой скоростью. В результате получены механические характеристики, позволяющие оценить эффективность ветроколеса, условия наиболее эффективной работы в зависимости от скорости ветра, требования к параметрам генератора электроэнергии для совместной работы с ветроколесом.

Скорость ветра как составляющая набегающего на лопасть потока воздуха в относительном движении учитывается как фактор, вызывающий вращение, а радиальная скорость элементарного участка лопасти – следствие действия скорости ветра и оказывает противодействие вращению. Определены моменты относительно оси ветроколеса, которые создаются этими составляющими. Результирующий момент на оси ветроколеса определяется как сумма моментов составляющих набегающего потока воздуха в относительном движении.

Практически, транспортируя ветроколесо в условиях безветрия, измеряем скорость набегающего потока, усилие, создаваемое на оси ветроколеса потоком воздуха, максимальную частоту вращения ненагруженного ветроколеса. По результатам измерений получаем реальные механические характеристики исследуемого ветроколеса.

Більшість способів дослідження характеристик фізичних моделей вітрових генераторів орієнтовані на використання спеціалізованого обладнання і аеродинамічної труби. Такі дослідження в деяких випадках надзвичайно коштовні або взагалі неможливі за відсутності обладнання. Альтернативою таким дослідженням є транспортування моделі вітрового колеса з необхідною швидкістю. Метою роботи є визначення механічних характеристик фізичної моделі вітрового колеса з горизонтальною віссю за результатами вимірювань, які проводяться при транспортуванні моделі з необхідною швидкістю. В результаті отримано механічні характеристики, що дозволяють дати оцінку ефективності вітрового колеса, умови, за яких забезпечується найбільш ефективна робота в залежності від швидкості вітру, вимоги до параметрів генератора електроенергії, що буде використовуватися з вітровим колесом.

Швидкість вітру як складова потоку повітря, що набігає на лопать у відносному русі, враховується як фактор, що викликає обертання, а радіальна швидкість елементарної ділянки лопаті – результат дії швидкості вітру і викликає протидію обертанню. Визначено моменти сил відносно осі вітрового колеса, які викликані цими складовими потоку. Результуючий момент сил на осі вітрового колеса визначається як сума моментів складових потоку повітря, що набігає на лопасті у відносному русі.

Практично, якщо транспортувати вітрове колесо в умовах відсутності вітру, вимірюється швидкість потоку повітря, зусилля на осі, максимальна частота обертання ненавантаженого вітрового колеса. За результатами вимірювань отримуємо механічні характеристики досліджуваного вітрового колеса.

The majority of the existing techniques for studying the characteristics of physical models of wind generators are oriented on the use of the specialized equipment and a wind tunnel. In some cases, these investigations are too expensive or unattainable. Transportation of the wind wheel model with the required velocity is alternative to such studies. The study objective is to determine the mechanical characteristics of a physical model of a horizontal-axial wind wheel based on the results of measurements during transportation of the model with the required velocity. The mechanical characteristics to evaluate the wind wheel effectiveness, the most efficient operational conditions related to the wind velocity, requirements for the electrical generator parameters have been resulted from studies.

The wind velocity as a component of the incoming airflow near the blades in a relative motion is considered as a factor resulted in the rotation, and a radial velocity of an elemental blade portion is a consequence of the effects of the wind velocity and is able to counter the rotation. Torques about the wind wheel axis due to those components are found. The resulting torque in the wind wheel axis is determined as the sum of torques of the incoming airflow components in a relative motion.

Practically, while transporting the wind wheel under wind calm conditions, we measure the velocity of the incoming airflow, the force produced by the airflow in axis of the wind wheel, a maximal rotational speed of an unloaded wind wheel. From measurements, we derive the real mechanical characteristics of the wind wheel under consideration.

Ключевые слова: *ветроэнергетическая установка, многолопастное ветроколесо, аэродинамика, механические характеристики, экспериментальное исследование, физическая модель.*

Введение. Экспериментальное исследование ветроэнергетической установки – достаточно трудоемкий процесс. Наиболее точные и достоверные результаты исследований получают в аэродинамической трубе в комплексе с точными измерительными приборами. Не всегда у исследователя есть возможность использовать аэродинамическую трубу. В литературе довольно часто встречаются описания исследований характеристик моделей ветроустановок путем их транспортирования автомобилем в безветренную погоду. Характеристики исследуемых ветроустановок определяются на основании данных электрогенератора, подключенного к валу ветроколеса, и непрерывной, в режиме реального времени, фиксации измеренных значений.

Целью работы является разработка способа, позволяющего экспериментально получить механические характеристики горизонтально-осевого ветроколеса путем его транспортирования. Особенность разработанного способа – измерение усилия, которое развивает остановленное ветроколесо, и измерение максимальной частоты вращения при отсутствии нагрузки на оси. На основании результатов измерения рассчитываются механические характеристики ветроколеса с учетом его геометрических особенностей.

В статье расчеты и формулы приведены в абсолютных величинах. Используемые формулы справедливы для исследования и расчетов характеристик ветровых колес, лопасти которых не имеют «крутки» по длине, другими словами, лопасть имеет постоянный угол заклинения.

Постановка задачи. Анализ методов моделирования ветровых турбин показывает, что результатом моделирования должны быть в первую очередь зависимости, которые определяют механические характеристики:

– зависимость выходной механической мощности P_m от скорости ветра v и оборотов ветроколеса n

$$P_m = f(v, n), \tag{1}$$

– зависимость механического момента M_M от P_m и угловой скорости вращения w

$$M_M = \frac{P_m}{w}, \tag{2}$$

– уравнение движения ветроколеса

$$J \cdot \frac{dw}{dt} = M_M - M_g, \tag{3}$$

где J – момент инерции ветроколеса; M_g – момент, создаваемый полезной нагрузкой на валу.

Эти зависимости представляют собой полную динамическую модель ветроколеса [1].

На рис. 1 показана схема действия эквивалентных сосредоточенных сил Q_v, Q_{wr}, а также силы F_g , которая создает момент полезной нагрузки на валу ветроколеса. На рис. 1: R – внешний радиус ветроколеса; r_g – плечо приложения силы F_g ; *O* – ось ветроколеса; *r* – плечо приложения силы Q_v ; r_1 – плечо приложения силы Q_{wr}. Отметим, что Q_v , Q_{wr} – это эквивалентные силы, создаваемые всеми лопастями ветроколеса.

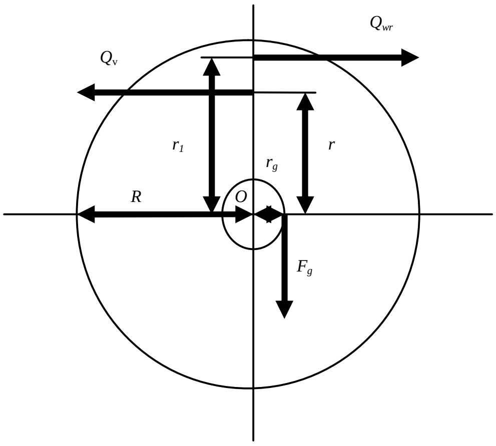

Рис. 1 – Схема действия на ветроколесо результирующих эквивалентных сил

Произведение эквивалентных сил на длину плеча Q_v *r*, Q_{wr} r_1 и F_g r_g – это моменты сил, действующих на ветроколесо относительно его оси вращения.

Обозначим моменты:

– момент, создаваемый ветром со скоростью *v*:

$$M_v = Q_v \cdot r\,, \tag{4}$$

– момент, создаваемый лопастями, вращающимися с угловой скоростью *w*:

$$M_{wr} = Q_{wr} \cdot r_1\,, \tag{5}$$

– момент, создаваемый полезной нагрузкой:

$$M_g = F_g \cdot r_g\,. \tag{6}$$

Результирующий механический момент, создаваемый лопастями ветроколеса:

$$M_M = M_v - M_{wr} - M_g\,. \tag{7}$$

Начало движения ветрового колеса характеризуется тем, что M_{wr} равен нулю. Под действием момента M_v лопасти ветрового колеса ускоряются, возрастает угловая скорость *w* и M_{wr} – противодействующий вращению момент. При равенстве M_v=M_{wr}+M_g угловая скорость лопастей стабилизируется. Если ветровое колесо вращается без нагрузки (M_g=0), тогда в пределе обеспечивается равенство M_v = M_{wr}, при этом обороты ветроколеса будут максимально возможными (при постоянной скорости ветра *v*).

Для построения механической характеристики ветроколеса необходимо знать значения M_{wr} и M_v, а значение M_g мы можем определить как разницу M_g=M_v - M_{wr}, и это позволит рассчитать зависимость мощности P_m от значения угловой скорости *w*. В дальнейшем достаточно просто определить оптимальный режим работы ветроколеса.

На лопасти ветроколеса действуют распределенные по длине лопасти силы dQ_{wr} и dQ_v. В каждом сечении лопасти dQ_{wr} и dQ_v являются функциями элементарной площади *dS*.

В упрощенном виде векторы сил и скоростей, которые действуют на элемент лопасти ветроколеса площадью *dS*, показаны на рис. 2.

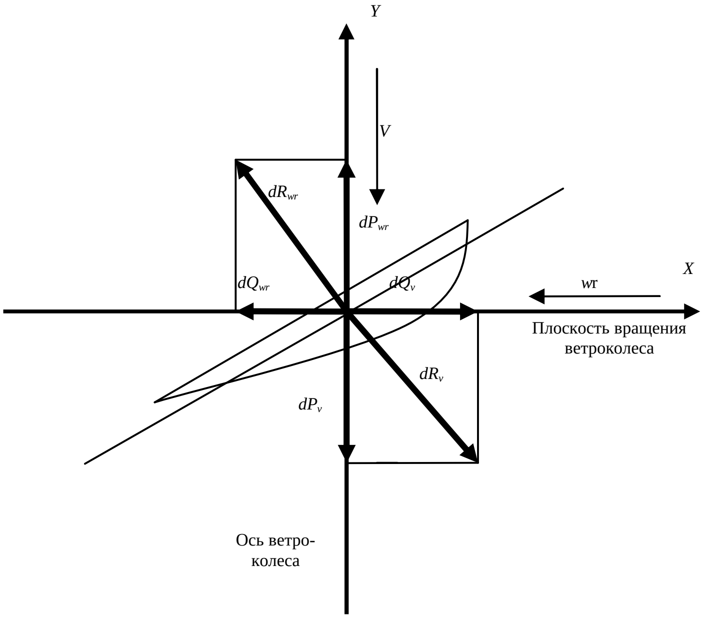

Рис. 2 – Схема векторов сил и скоростей на элементе лопасти ветроколеса

Вращение ветроколеса – следствие воздействия на лопасти ветра со скоростью *v*. Вектор скорости *wr* направлен противоположно вектору линейной скорости вращения элемента лопасти ветроколеса *dS*, *wr* – это воздействие вращающегося ветроколеса на воздушный поток.

Вследствие действия на лопасти *v* и *wr* на каждом элементе лопасти *dS* возникают силы:

dR_v – результирующая сила, возникающая под действием потока ветра со скоростью *v* на элемент лопасти площадью *dS*;

dR_{wr} – результирующая сила, величина которой определяется угловой скоростью лопастей ветроколеса *w* и расстоянием от оси ветроколеса до элемента лопасти *dS*;

dP_v – проекция dR_v на ось ветроколеса;

dQ_v – проекция dR_v на плоскость вращения;

dP_{wr} – проекция dR_{wr} на ось ветроколеса;

dQ_{wr} – проекция dR_{wr} на плоскость вращения.

Угол между вектором скорости *v* и вектором результирующей силы dR_v зависит от угла атаки, что в предложенной схеме соответствует углу установки лопасти. Аналогично, угол между вектором *wr* и вектором результирующей силы dR_{wr} также зависит от угла установки лопасти. *wr* – это следствие действия скорости ветра *v*, и *wr* действует на «верхнюю» плоскость аэродинамического профиля лопасти.

Векторы проекций силы dR_{wr} – dP_{wr} и dQ_{wr} направлены в противоположную сторону относительно dP_v , dQ_v.

Анализируя составляющие результирующих сил dR_{wr}, dR_v можем сделать выводы:

- проекции элементарных сил dQ_{wr} и dQ_v находятся в плоскости вращения ветроколеса и направлены в противоположные стороны. Проекция dQ_v «инициирует» вращение ветроколеса, а проекция dQ_{wr} является следствием и оказывает сопротивление вращению [2];

- проекция dP_v – это давление потока воздуха на лопасти ветроколеса. Но вследствие вращения возникает сила dP_{wr}, компенсирующая это давление. Чем выше угловая скорость лопастей w, тем меньшее результирующее усилие действует на лопасти в направлении оси ветроколеса.

Численная методика. Так как в соответствии с векторной диаграммой (рис. 2) влияние скорости ветра и угловой скорости лопастей ветроколеса рассматривается раздельно, можем определить значение момента M_g, измерив усилие F_g, которое создается при полностью остановленном ветроколесе (рис. 3).

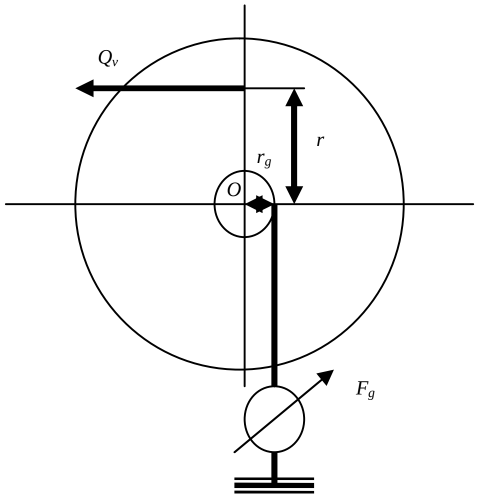

Рис. 3 – Схема измерения F_g для определения значения M_g

При проведении анализа результатов измерения необходимо учитывать то, что зависимость значения момента M_v от скорости ветра может быть нелинейной.

Определить зависимость момента M_{wr} от угловой скорости можно из равенства M_v=M_{wr}, для чего необходимо получить зависимость максимальной частоты вращения ветроколеса от скорости ветра при $M_g = 0$.

Чтобы получить аналитические соотношения, которые позволят рассчитать механическую характеристику ветроколеса, рассмотрим элементарный участок лопасти (рис. 4).

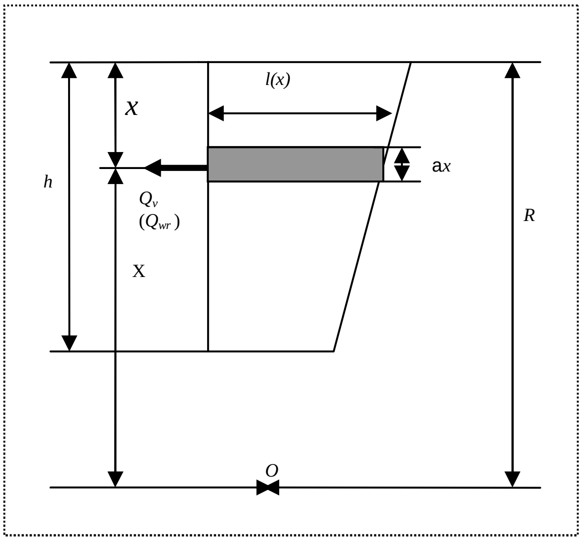

Рис. 4 – Схема расчета сил, действующих на элемент лопасти *dS*

Значение $dQ_v(x)$ определяется формулой экспериментальной аэродинамики

$$dQ_v(x) = \frac{1}{2} C_{Qv} \circ \Delta x l(x) v^2 , \qquad (8)$$

где : $\Delta x l(x)$ = *dS;* C_{Qv} – безразмерный аэродинамический коэффициент; ° – плотность воздуха; *v* – скорость ветра.

При определении $dQ_{wr}(x)$ необходимо дополнительно учитывать расстояние до оси ветроколеса

$$dQ_{wr}(x) = \frac{1}{2} C_{Qwr} \circ \Delta x l(x)(wx)^2 . \qquad (9)$$

В выражениях (8) и (9) коэффициенты C_{Qv} и C_{Qwr} необходимо рассматривать как коэффициенты, связывающие характеристики используемого профиля в существующих условиях обдува с проекциями соответствующих сил на плоскость вращения.

Для проведения расчетов нужно определить количество элементарных участков лопасти *k*, задаваясь шириной элементарного участка Δx

$$k = \frac{h}{\Delta x} . \qquad (10)$$

Диапазон изменения текущей координаты *n*

$$x_n = n \cdot \Delta x , \quad n = 0 \cdots k . \qquad (11)$$

Плечо X_n определяется с учетом радиуса ветроколеса *R* и длины лопасти *h*

$$X_n = (R - h) + x_n . \qquad (12)$$

Момент dM_{Vn}, создаваемый элементарной силой dQ_v

$$dM_{vn} = \frac{1}{2} \cdot C_{Qv} \cdot \circ \cdot \Delta x \cdot l(x_n) \cdot v^2 \cdot X_n \,. \qquad (13)$$

Момент, создаваемый лопастью

$$M_v = \sum_n dM_{vn} \,. \qquad (14)$$

С учетом (13)

$$M_v = \frac{1}{2} \cdot C_{Qv} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n \,. \qquad (15)$$

Так как в формуле (16) используется измеренное значение M_g, то можно определить значение аэродинамического коэффициента C_{Qv}

$$C_{Qv} = \frac{M_g / N}{\frac{1}{2} \cdot \circ \cdot v^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n}, \qquad (16)$$

где N – количество лопастей.

В полученных соотношениях $M_g = f(v)$, а $\sum_n \Delta S_n X_n$ характеризует геометрические особенности лопасти. В целом, аэродинамический коэффициент C_{Qv} зависит только от скорости ветра v [3].

При постоянной скорости ветра угловая скорость стабилизируется при равенстве моментов.

Момент dM_{wr}, создаваемый элементарной силой dQ_{wr}

$$dM_{wr_n} = \frac{1}{2} \cdot C_{Qwr} \cdot \circ \cdot \Delta x \cdot l(x_n) \cdot (w \cdot X_n)^2 \cdot X_n \,. \qquad (17)$$

Момент, создаваемый лопастью

$$M_{wr} = \sum_n dM_{wr_n} \,. \qquad (18)$$

С учетом (17)

$$M_{wr} = \frac{1}{2} \cdot C_{Qwr} \cdot \circ \cdot w^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n{}^3 \,. \qquad (19)$$

Коэффициент C_{Qwr} рассчитывается исходя из равенства $M_v = M_{wr}$, $w = w_{max}$.

$$C_{Qwr} = \frac{M_g / N}{\frac{1}{2} \cdot \circ \cdot w^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n{}^3} \,. \qquad (20)$$

Выражение (20) показывает, что аэродинамический коэффициент C_{Qwr} при v = const зависит от угловой скорости w. При «разгоне» ветроколеса угловая скорость лопастей изменяется от нуля до максимального значения. При этом непрерывно изменяется аэродинамический коэффициент C_{Qwr}. Поэтому при расчете механических характеристик ветроколеса необходимо аппроксимировать зависимость $C_{Qwr} = f(w)$.

Механическую характеристику можно построить по выражению

$$M_M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left[C_{Qv} \cdot v^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n - C_{Qwr} \cdot w^2 \cdot \sum_n \Delta S_n X_n^3 \right]. \qquad (21)$$

Результаты экспериментального исследования физической модели ветроколеса. Приведем размеры и особенности исследуемой модели ветроколеса.

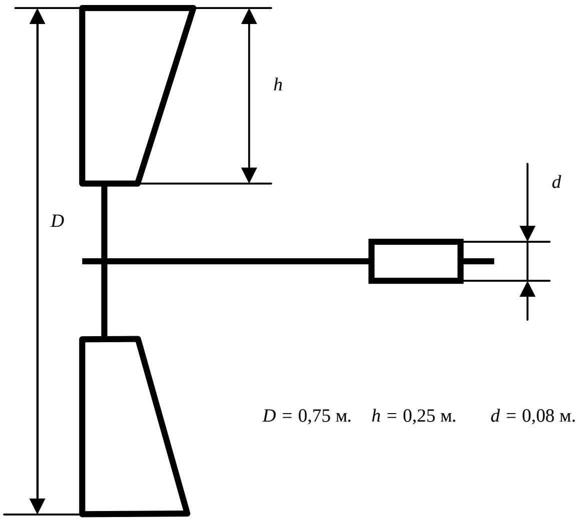

Рис. 5 – Основные размеры исследованной модели ветроколеса

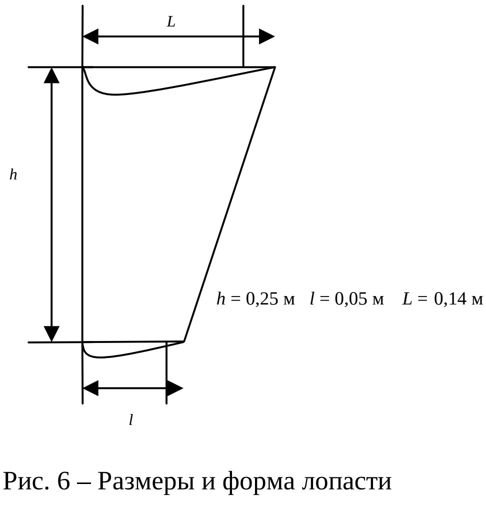

Рис. 6 – Размеры и форма лопасти

Ветроколесо состоит из семи лопастей. Лопасть выполнена по аэродинамическому профилю Р-III (15,5 %), разработан и испытан в 1932г. [4].

Рассчитан момент инерции ветроколеса $J = 0{,}072$ кг·м^2. Угол атаки лопастей $\alpha = 55°$. Установка лопастей узкой частью к оси преследовала цель исследовать механические характеристики тихоходного многолопастного ветроколеса, способного работать при малых скоростях ветра. Большинство известных методик ориентированы на моделирование и расчет конструкции быстроходных ветротурбин (обычно двух- или трехлопастных) со сложным профилем лопасти. Но эти методики не предназначены для проведения исследований ветроколеса без аэродинамической трубы [5].

В результате измерений (рис. 3) получаем зависимость показаний динамометра от скорости ветра. При этом показания динамометра отражают работу всех семи лопастей ветроколеса. Для дальнейших расчетов это значение необходимо разделить на семь. По выражению (16) определяем зависимость $C_{Qv} = f(v)$. Далее производим аппроксимацию этой зависимости.

При определенной скорости ветра измеряем максимальное значение оборотов ветроколеса, получаем зависимость $w_{max} = f(v)$. По результатам измерений, используя формулу (20), с учетом (15) рассчитываем зависимость $C_{Qwr} = f(w)$.

Коэффициент C_{Qwr} – эквивалент коэффициента лобового сопротивления. Известные результаты исследований коэффициентов лобового сопротивления объектов в дозвуковом диапазоне скоростей [2] показывают, что коэффициент лобового сопротивления зависит от линейной скорости исследуемого объекта.

В отношении ветроколеса, C_{Qwr} необходимо привести к частоте вращения w, при этом коэффициент будет учитывать и взаимное аэродинамическое влияние лопастей [5]. Для дальнейшего использования коэффициента C_{Qwr} экспериментально полученные значения необходимо аппроксимировать.

По формуле (21) можно рассчитать и построить зависимость момента, приведенного к валу ветроколеса, от угловой скорости лопастей или частоты вращения n (об/мин), рис. 7 .

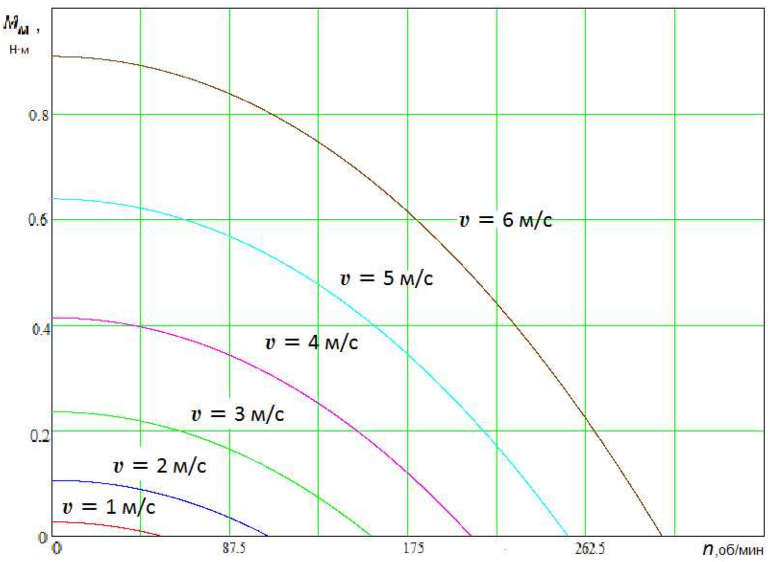

Рис. 7 – Характеристика моментов ветроколеса при скоростях ветра 1 м/с – 6 м/с

Произведение момента на валу ветроколеса на угловую скорость позволит определить мощность на валу и условия, при которых она обеспечивается (рис. 8).

Мощность ветрового потока, проходящего через сечение, площадь которого равна площади, ометаемой лопастями ветроколеса

$$S = \frac{\text{®}D^2}{4} - \frac{\text{®}(D-2h)^2}{4}\,. \qquad (22)$$

Площадь S = 0,393 м^2.

Мощность ветрового потока:

$$P(v) = \frac{\rho S v^3}{2}\,. \qquad (23)$$

.

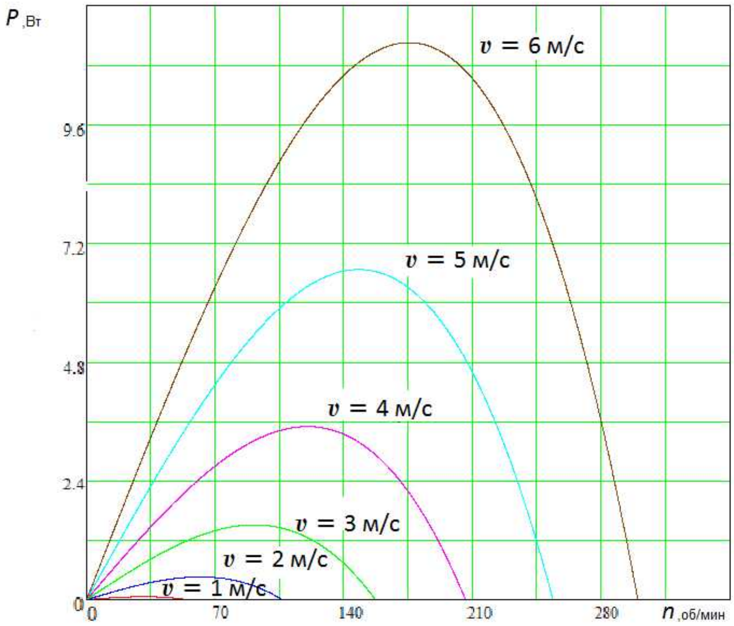

Рис. 8 – Мощность на валу ветроколеса в зависимости от частоты вращения при различных скоростях ветра

Отношение мощности на валу к мощности ветрового потока является коэффициентом использования мощности ветрового потока C_p, его максимальное значение определится нагрузкой на вал, этой нагрузке соответствует определенное значение частоты вращения ветрового колеса (рис. 9).

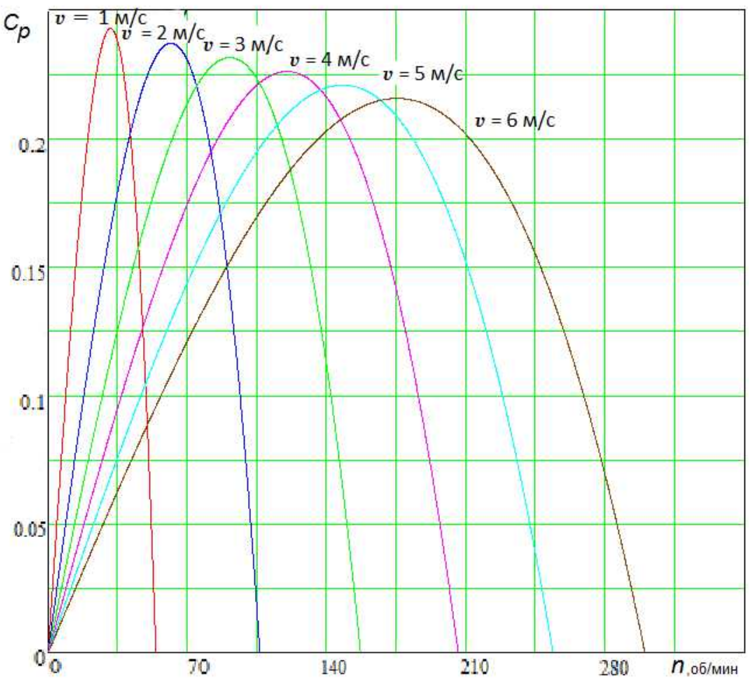

Рис. 9 – Зависимость коэффициента использования мощности ветрового потока от частоты вращения

В таблице приведены значения основных механических параметров исследуемого ветроколеса.

№ п/п	Скорость ветра v, м/с	Мощность ветрового потока P_n, Вт	Условие наибольшей эффективности			
			Частота вращения n, об/мин	Момент на валу M_M, Н· м	Мощность на валу $P_в$, Вт	Коэффициент C_p
1	1	0,242	31	0,026	0,039	0,243
2	2	1,934	62	0,0975	0,458	0,237
3	3	6,526	90	0,23	1,51	0,231
4	4	15,468	121	0,405	3,495	0,226
5	5	30,212	158	0,63	6,667	0,221
6	6	52,206	190	0,9	11,249	0,215

Выводы

1. Разработанный способ позволил определить механические характеристики ветроколеса. При заданной скорости ветра максимальный коэффициент преобразования энергии ветра в механическую энергию можно получить только при определенном моменте, создаваемом нагрузкой на валу ветроколеса. Это условие определяет также частоту вращения вала ветроколеса. Значение коэффициента C_p находится в пределах от 0,243 до 0,215 в диапазоне скоростей ветра (1 – 6) м/с.

2. Расчеты и исследования показывают, что точность используемого способа экспериментального исследования механических характеристик ветроколеса зависит от достоверности экспериментальных данных: измеренных значений скорости ветра, усилий, которые развивают неподвижные лопасти, и максимальной частоты вращения ненагруженного ветроколеса. Аппроксимация зависимостей значений коэффициентов $C_{Qv} = f(v)$ и $C_{Qwr} = f(w)$ также оказывает влияние на достоверность полученных механических характеристик, но в то же время позволяет исключить влияние на результат расчетов малых отклонений измеряемых величин от действительных значений.

1. *Обухов С. Г.* Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности. Ветроэнергетика. 2011. №1. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 142 с.
2. *Фарапонов В. В., Савкина Н. В., Дьячковский А. С., Чупашев А. В.* Расчет аэродинамического коэффициента лобового сопротивления тела в дозвуковых и трансзвуковых режимах движения с помощью пакета ANSYS Fluent. Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. №4. С. 845 – 853.
3. *Андрианов В. Н., Быстрицкий Д. Н., Вашкевич К. П., Секторов В. Р.* Ветроэлектрические станции. Под общей редакцией проф. В. Н. Андрианова. М.: Госэнергоиздат, 1960. 324 с.
4. *Кравец А. С.* Характеристики авиационных профилей. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1939.
5. *Яковлев А. И., Затучная М. А.* Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2001. 78 с.

Получено 20.04.2017,
в окончательном варианте 22.06.2017