

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-264-284>

УДК 621.436.004.5

## Воздушный тепловой насос в ветроэнергетике

Л. И. Гречихин<sup>1)</sup>, А. И. Гутковский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ООО «БСВТ – новые технологии» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования срывного течения в воздушном тепловом насосе. Воздушный винт теплового насоса не производит тянущих или толкающих усилий. Внешний воздушный поток создается высокооборотным винтом перпендикулярно плоскости вращения винта теплового насоса и выполняет функциональную роль вентилятора. При этом создается срывное течение в тыльной стороне винта теплового насоса и реализуются условия превращения тепловой составляющей воздушного потока вентилятора в электрическую энергию электрогенератором. Разработана аэродинамическая модель обтекания лопастей винта теплового насоса во взаимно перпендикулярном воздушном потоке. Проведены экспериментальные исследования работающего винта как теплового насоса с учетом трения при вращении ротора в статоре электрогенератора. Чтобы воздушный тепловой насос воспринимал действующий воздушный поток от вентилятора, необходимо его приводить во вращение с минимальной мощностью. В результате для двух стандартных спаренных двухлопастных винтов, размещенных на двигателе 100 Вт, при скорости ветра 2,17 м/с, создаваемого вентилятором, коэффициент преобразования составил 5,04. С ростом скорости потока воздуха от вентилятора коэффициент преобразования резко падал. При размещении двух указанных винтов на моторе 300 Вт минимальная мощность предварительного вращения составила 5,7 Вт. В этом случае при скорости потока воздуха 1,08 м/с коэффициент преобразования достигал всего 2,93 и также резко падал с ростом скорости потока воздуха. Когда на моторе 300 Вт использовался экспериментальный трехлопастной винт, ситуация резко менялась. При раскрутке мотора со специальным винтом мощностью 12,1 Вт и формировании потока воздуха со скоростью 3,2 м/с коэффициент преобразования составил 12,4. С уменьшением мощности раскрутки до 5,9 Вт и скорости потока воздуха, создаваемого вентилятором, до 1,7 м/с коэффициент преобразования увеличился до 14,9. Теоретический расчет коэффициента преобразования теплового насоса подтвержден экспериментальными данными. Установлены условия, при которых данный коэффициент достигает максимального значения. Проведено компьютерное моделирование разных конструкций лопастей воздушного винта теплового насоса. Показано, что воздушный тепловой насос является сложной открытой энергосистемой.

**Ключевые слова:** тепловой насос, лопасти винта, воздушный винт, коэффициент преобразования, ветрогенератор

**Для цитирования:** Гречихин, Л. И. Воздушный тепловой насос в ветроэнергетике / Л. И. Гречихин, А. И. Гутковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 264–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-264-284>

---

**Адрес для переписки**  
Гречихин Леонид Иванович  
ООО «БСВТ – новые технологии»  
ул. Солтыса, 187,  
220070, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 355-19-29  
[gretchihin@yandex.ru](mailto:gretchihin@yandex.ru)

---

**Address for correspondence**  
Gretchikhin Leonid I.  
BSVT – New Technologies  
187, Soltysa str.,  
220070, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 355-19-29  
[gretchihin@yandex.ru](mailto:gretchihin@yandex.ru)

---

## Air Heat Pump in Wind Power

L. I. Gretchikhin<sup>1)</sup>, A. I. Hutkouski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>BSVT – New Technologies (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract:** An experimental facility has been developed and manufactured to study the disruptive flow in an air heat pump. The propeller of the heat pump does not produce pulling or pushing forces. The external air flow is created by a high speed propeller perpendicular to the plane of rotation of the heat pump propeller and acts as a ventilator. Herewith, a disruptive flow in the back side of the heat pump propeller is being created and conditions for converting the thermal component of the ventilator air flow into electrical energy by an electric power generator are realized. An aerodynamic model of the flow around the propeller blades of the heat pump in mutually perpendicular airflow has been developed. Experimental studies of the operating propeller as a heat pump, taking into account the friction during rotation of the rotor in the stator of the electric generator, were carried out. In order for the air heat pump to perceive the impacting air flow from the ventilator, it must rotate with minimal power. As a result, for two standard twin-bladed propellers mounted on a 100 W engine under the wind generated by the ventilator which speed is 2.17 m/s the conversion factor was 5.04. As the speed of air flow from the ventilator increased, the conversion coefficient decreased sharply. When placing the two specified propellers on a 300 W motor, the minimum pre-rotation power was 5.7 W. In this case, when an air flow speed is of 1.08 m/s, the conversion coefficient reached only 2.93 and also fell sharply with the increase in the air flow speed. When a three-blade propeller with blades was used on a 300 W motor, then situation has changed dramatically. When the motor with a special propeller with a power of 12.1 W was spun and the air flow was formed at a speed of 3.2 m/s, the conversion coefficient was 12.4. With the reduction in the power of the spinup down to 5.9 W and in the speed of the air flow created by the ventilator to 1.7 m/s, the conversion coefficient increased to 14.9. The theoretical calculation of heat pump conversion coefficient is confirmed by experimental data. The conditions under which this coefficient reaches its maximum value are set. Computer modeling of different designs of heat pump propeller blades was performed. It is demonstrated that an air heat pump is a complex open energy system.

**Keywords:** heat pump, propeller blades, propeller, conversion rate, wind generator

**For citation:** Gretchikhin L. I., Hutkouski A. I. (2020) Air Heat Pump in Wind Power. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 264–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-264-284> (in Russian)

### Введение

В настоящее время ветроэнергетика является весьма перспективной отраслью энергетики [1]. Непрерывно совершенствуются электрические и газодинамические параметры различных типов ветроустановок. При этом в основном внимание сосредоточено на техническом усовершенствовании и вопросы осуществления разных видов энергопреобразования в ветроэнергетике не затрагиваются. Не вдаваясь в проблемы совершенствования электрических параметров ветроустановок, рассмотрим газодинамический блок, который преобразует энергию ветра в другие виды энергии. Энергия ветра имеет две составляющие: механическую и тепловую.

Составляющая механической мощности пропорциональна кубу скорости движения потока воздуха

$$N_1 = \frac{\rho S v^3}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;  $S$  – ометаемая площадь, которая возмущается лопастями ветроустановки;  $v$  – скорость распространения воздуха.

Тепловая мощность потока воздуха

$$N_2 = \frac{3}{2} \frac{\rho S v}{m_0} k_B T, \quad (2)$$

где  $m_0$  – масса молекул воздуха;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура потока воздуха.

Зависимость составляющих механической мощности  $N_1$  и тепловой  $N_2$  потока воздуха от скорости его движения при температуре 273 К через площадь 1 м<sup>2</sup> представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость механической и тепловой составляющих мощности потока воздуха от скорости его движения**

**The dependence of the power of the mechanical and thermal components of the air flow on its speed**

Параметры	Скорость потока воздуха, м/с					
	1	2	3	5	10	15
$N_1$ , Вт	0,645	5,16	17,40	80,60	645,00	2177,00
$N_2$ , кВт	1,520	3,03	4,55	7,56	15,15	22,73

Из табл. 1 следует, что составляющая тепловой мощности  $N_2$  потока воздуха превосходит механическую  $N_1$  более чем на порядок. Поэтому в ветроустановках механическая энергия потока воздуха приводит во вращение воздушный винт ветрогенератора, а тепловая энергия превращается в электрическую. Следовательно, ветрогенераторы нужно рассматривать как тепловые насосы.

Обычно тепловой насос рассматривается с позиции превращения источника теплоты с низкой температурой в источник теплоты с высокой температурой. Общая теория работы таких насосов представлена в [2–4]. Реально тепловой насос обеспечивает самопроизвольный переход разных видов энергии от одной энергосистемы к другой с коэффициентом преобразования более единицы [5, 6]. Низкооборотные аэродинамические винты, применяемые в авиации, обладают коэффициентом преобразования воздушного потока 2,5–3,5 и по этому параметру являются тепловыми насосами [7–9]. Экспериментально установлено [7], что низкооборотный винт реализует коэффициент преобразования тепловой составляющей воздуха в его кинетическую энергию величиной 2,85 [7]. Для высокооборотных винтов этот коэффициент равен 3,5 [8, 9]. Для винта Мёбиуса, который начал внедряться в авиации, коэффициент преобразования может достигать 10 и более [10–12]. При этом тепловая составляющая окружающего воздуха преобразуется в электрическую энергию при возникновении срывного течения. В начальный момент возникновения разрыва в тыльной стороне поток воздуха в зону разрежения устремляется со скоростью звука. По мере заполнения возмущенной составляющей воздуха зоны разрежения за винтом скорость потока резко падает, так как начинает возникать разре-

жение уже в окружающей среде. Получается довольно сложный механизм заполнения зоны разрежения в тыльной стороне движущегося объекта в земной атмосфере с дозвуковой скоростью.

Аэродинамические винты ветрогенераторов самопроизвольно преобразуют тепловую энергию ветра в электрическую. Доля теплоты, отбираемой от ветрового потока, не более 0,35 % [6]. Следовательно, в ветрогенераторах происходит преобразование не механической энергии ветра в электрическую, а его тепловой составляющей [3]. Коэффициент преобразования при этом следует рассматривать как отношение отбираемой тепловой энергии от ветрового потока к его механической составляющей, а это не более 0,33. Эффективность применения ветрогенераторов в качестве получения электрической энергии из тепловой составляющей ветрового потока достаточно низкая.

В связи с вышеизложенным целью исследований было детально выяснить, каким образом образуется срывное течение и как оно влияет на работу воздушного винта в качестве теплового насоса в ветроэнергетических установках. Для реализации поставленной задачи необходимо следующее:

- сконструировать и изготовить специальную экспериментальную установку;
- применительно к данной установке разработать модель аэродинамического обтекания исследуемых лопастей при потоках воздуха во взаимно перпендикулярных направлениях;
- провести экспериментальные исследования по определению коэффициента преобразования в зависимости от скорости вращения винта;
- сравнить полученные экспериментальные результаты с теоретическим расчетом;
- выяснить, при каких условиях возникает максимальный коэффициент преобразования воздушного винта как теплового насоса;
- путем компьютерного моделирования определить оптимальную форму лопастей воздушного теплового насоса.

Последовательно рассмотрим перечисленные задачи.

### **Описание экспериментальной установки**

Для экспериментальных исследований был изготовлен специальный трехлопастной винт, общий вид которого показан на рис. 1.

Форма лопастей и направление их вращения не создают тянущих или толкающих усилий и выбраны в виде, удобном для теоретического анализа аэродинамики их обтекания. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2. На оси коллекторного электромотора 3 постоянного тока TRAXXAS 775 мощностью 350 Вт закреплен воздушный винт 2. Винт с мотором 3 – электрогенератор. Высокоскоростной винт APS 7X6E совместно с коллекторным электромотором TRAXXAS 380 мощностью 100 Вт являются вентилятором 4, создающим поток воздуха перпендикулярно плоскости вращения исследуемого винта, как это реализуется в ветрогенераторах.

Электродвигатель и вентилятор расположены внутри жесткого цилиндрического корпуса 1 на некотором удалении друг от друга. Корпус, панель управления и измерительные приборы установлены на массивной платформе 5.

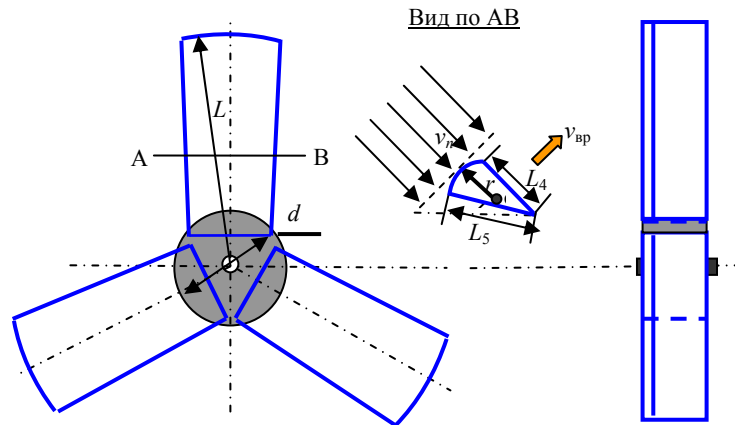


Рис. 1. Общий вид расположения лопастей в винте и их поперечный разрез  
Fig. 1. The general view of the placement of the blades in the propeller cross section

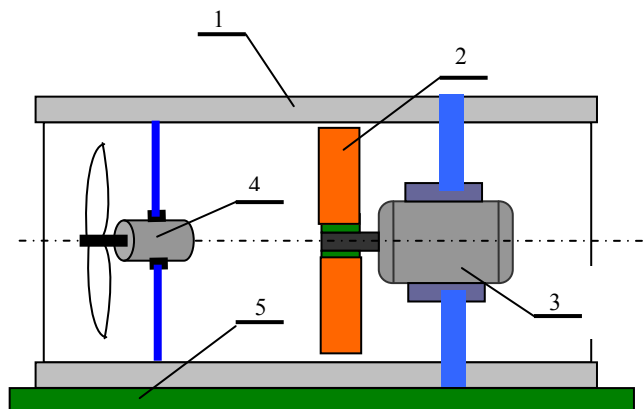


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки:  
1 – корпус; 2 – исследуемый винт; 3 – электродвигатель постоянного тока;  
4 – вентилятор; 5 – платформа

Fig. 2. The general view of the experimental facility:  
1 – case; 2 – propeller under study; 3 – DC electric motor;  
4 – ventilator; 5 – platform

Электрическая схема установки приведена на рис. 3.

Электрический ток и падение напряжения на электродвигателях вентилятора и исследуемого воздушного винта измерялись амперметром и вольтметром соответственно, частота вращения моторов – тахометрами с применением оптопары на отражении.

Электропитание мотора 100 Вт осуществлялось аккумулятором напряжением 7,4 В и емкостью 3000 мкА·ч, а электропитание мотора 300 Вт –

аккумулятором напряжением 11,2 В и емкостью 5000 мкА·ч. Изменение скорости вращения электромоторов и направления их вращения производилось специально разработанным регулятором.

Совокупность измерительных приборов позволила контролировать параметры работы электродвигателей и выполнять измерения потребляемой мощности двигателями в зависимости от частоты вращения.

Исследуемый винт с электромотором – открытая энергосистема, представляющая собой воздушный тепловой насос. Когда на него направляется ветровой поток, то насос – это уже ветрогенератор. На такую энергосистему воздействуют аккумулятор и внешний воздушный поток. В разработанной лабораторной установке воздушный поток создается вентилятором. На рис. 4 изображен ветрогенератор как открытая энергосистема, на которую воздействуют электрический аккумулятор, от которого отбирается мощность  $N$ , и ветровой поток мощностью  $\Delta N$ .

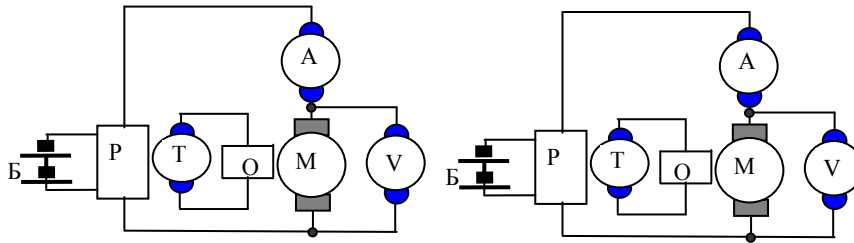


Рис. 3. Электрическая схема установки  
Fig. 3. The electrical diagram of the facility



Рис. 4. Воздействие на открытую энергосистему  
Fig. 4. Impact on the open energy system

При вращении электромотор потребляет мощность

$$N = IU, \quad (3)$$

где  $I$  – потребляемый электрический ток;  $U$  – падение напряжения на якоре электромотора.

Мощность ветрового потока воздуха пропорциональна кубу скорости движения потока

$$\Delta N = kv_p^3. \quad (4)$$

Этот поток воздействует на лопасти винта ветрогенератора, являющегося воздушным тепловым насосом. Скорость вращения якоря электромотора изменяется, и на его статоре дополнительно наводится электродвижущая сила (ЭДС), которая в зависимости от направления вращения винта либо увеличивает падение напряжения на якоре электромотора, либо уменьшает. Тогда

$$N_{\text{вых}} = I'(U \pm \text{ЭДС}). \quad (5)$$

При этом скорость вращения якоря электромотора ветрогенератора возрастает или уменьшается. Поскольку внутреннее трение изменяется, то и электрический ток также должен несколько изменяться. В этом случае данная замкнутая система энергию ветрового потока преобразует в электрическую с коэффициентом преобразования

$$\eta = \frac{N_{\text{вых}} - N}{\Delta N}. \quad (6)$$

Дополнительный механический момент на валу электромотора ветрогенератора создается аэродинамикой обтекания каждой лопасти воздушного винта и их количеством. Число лопастей определяется скоростью ветрового потока так, чтобы возмущенная масса воздуха между лопастями полностью восстанавливалась за время прохождения лопастью винта межлопастного расстояния. Рассмотрим аэродинамику обтекания каждой лопасти винта и выясним, какие механические моменты возникают на валу двигателя, а также определим дополнительную мощность, которую они вырабатывают под влиянием ветрового потока.

#### Аэродинамика обтекания лопасти винта ветрогенератора

Форма лопасти винта ветрогенератора и основные обозначения ее сечения приведены на рис. 5.

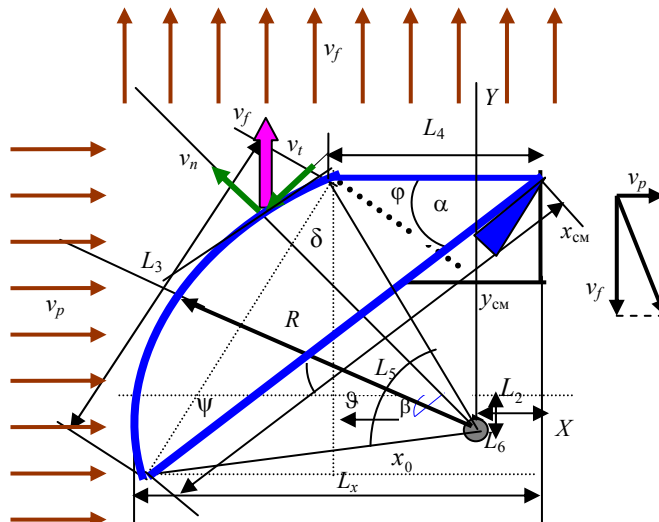


Рис. 5. Форма лопасти винта ветрогенератора и основные обозначения ее сечения

Fig. 5. The propeller blade shape and basic designations

Обтекание лопастей осуществляется двумя взаимно перпендикулярными воздушными потоками. При вращении винта возникает воздушный поток в плоскости вращения, а перпендикулярно плоскости вращения винта поток формируется входным вентилятором. При вращении лопасти скорость вращения элемента поверхности на удалении от оси вращения  $r$  определяется по формуле  $\vec{v}_f = [\vec{r} \cdot \vec{\omega}]$  и при заданной частоте вращения  $\omega$  линейно возрастает с удалением от оси вращения.

Мощность, которую потребляет вентилятор, расходуется на преодоление сил трения и создание потока воздуха вдоль оси вращения мотора, а мощность потока воздуха, создаваемого вентилятором, определяется законом Бернулли. Тогда

$$\Delta N = I_v U_v = N_{\text{тр}} + \frac{\pi r^2 v_p^3}{2}. \quad (7)$$

Соответственно скорость потока воздуха внутри цилиндрического кожуха

$$v_p = \sqrt[3]{\frac{2(IU - N_{\text{тр}})}{\pi r^2}}. \quad (8)$$

В соответствии с рис. 5 лопасти винта определяются размерами  $L_4$ ,  $L_5$  и углом между плоскостями  $\alpha$ . Цилиндрическая поверхность радиусом  $R$  расположена между плоскостями  $L_4$  и  $L_5$ . Применительно к изготовленному винту эти величины приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные параметры лопастей экспериментального винта ветрогенератора**  
**The main parameters of the blades of the experimental propeller of the wind generator**

$R$ , мм	$L_4$ , мм	$L_5$ , мм	$L$ , мм	$d$ , мм	$\alpha$ , град
20,0	13,0	33,5	87,5	46,0	45

Хорда кругового сегмента  $L_3$  определяется законом косинуса

$$L_3 = \sqrt{L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \cos \alpha}. \quad (9)$$

Лицевая плоскость  $L_4$ , цилиндрическая поверхность радиусом  $R$  и срывное течение в тыльной стороне лопасти при вращении винта ветрогенератора совместно создают механический момент на валу электродвигателя. Когда угол нормали  $\varphi$  к лицевой плоскости  $L_4$  по отношению к направлению вращения винта отличен от нуля, то наряду с ударным воздействием нормальной составляющей скорости вращения следует учитывать движение воздуха вдоль плоскости. Тангенциальное движение воздуха вдоль обтекаемой плоскости определяется законом Бернулли.

Вдоль плоскости  $L_4$  результирующая скорость движения воздуха



$$v_1 = \sqrt{v_f^2 + v_p^2}. \quad (10)$$

С учетом (10) скорости потока воздуха по нормали к плоскости  $L_4$  и вдоль этой плоскости:

$$v_{1,n} = v_1 \sin(\varphi + \sigma); \quad v_{1,\tau} = v_1 \cos(\varphi + \sigma). \quad (11)$$

$$\text{Угол } \varphi \text{ задается, а угол } \sigma = \arctg\left(\frac{v_f}{v_p}\right).$$

Элементом поверхности  $\Delta S = L_4 \cos \varphi \Delta r$  плоскости  $L_4$  возмущается масса воздуха

$$\Delta m_1 = \rho_\infty v_{1,n} L_4 \cos \varphi \Delta r \Delta t. \quad (12)$$

Следует учитывать, что вращающиеся лопасти винта своей передней стороной производят возмущение воздушного потока не только плоскостью  $L_4$ , но и цилиндрической поверхностью радиусом  $R$ . По оси  $X$  нормальная и тангенциальная скорости движения потока воздуха в каждой точке плоскости, перпендикулярной радиусу цилиндрической поверхности  $R$ , соответственно равны:

$$v'_{1,n} = v_p \sin \delta + v_f \cos \delta \text{ и } v'_{1,\tau} = v_p \cos(\delta) - v_f \sin \delta, \quad (13)$$

$$\text{где } \delta = \arctg\left(\frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}\right).$$

Масса воздуха, которая возмущается плоскостью  $L_4$ , составит

$$\Delta m = \Delta m_1 + \Delta m_2, \quad (14)$$

$$\text{где } \Delta m_2 = \rho_\infty (R - x_0)(v_p \cos \delta' - v_f \sin \delta') \Delta r \Delta t; \quad \delta' = \arctg\left(\frac{x_0}{\sqrt{R^2 - x_0^2}}\right).$$

Результирующие моменты сил на ось мотора, создаваемые плоскостью  $L_4$ , запишем в виде:

$$M'_{\text{уд}} = Z \int_{d/2}^L \frac{\Delta m}{\Delta t} v'_{1,n} \cos \varphi r dr; \quad M'_B = Z \int_{d/2}^L 0,5 \rho v_{1,\tau}^2 L_4 \cos^2 \varphi r dr, \quad (15)$$

где  $Z$  – число лопастей в винте.

Вырабатываемая мощность при этом

$$N'_y = (M'_{\text{уд}} - M'_B) \omega. \quad (16)$$

Цилиндрическая поверхность радиусом  $R$  при вращении лопасти также взаимодействует с окружающей атмосферой, создавая ударное воздействие своей нормальной составляющей скорости вращения, а тангенциальная составляющая скорости вращения создает континуальное обтекание, которое определяется законом Бернулли.

Цилиндрическая поверхность лопасти охватывается углом  $\beta$ , который равен

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{L_3}{\sqrt{4R^2 - L_3^2}} \right). \quad (17)$$

Размер лопастей вдоль оси  $X$  составляет  $L_x = L_5 \cos \alpha$ , а вдоль оси  $Y$   $L_y = L_5 \sin \alpha$ . В свою очередь, дуга цилиндрической поверхности заканчивается по оси  $X$  на удалении  $x_0 = L_4 - L_2$ . В этом равенстве содержатся две неизвестные  $x_0$  и  $L_2$ . В соответствии с рис. 5  $\delta + \theta = \pi/2 - \beta/2$ , тогда

$$\theta = \pi/2 - \beta/2 - \delta. \quad (18)$$

Угол  $\delta$  определяется следующим образом:

$$\delta = \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{L_3^2 - L_5^2 \sin^2 \alpha}}{L_5 \sin \alpha} \right). \quad (19)$$

На основании (15) с учетом (16) имеем  $x_0 = R \sin \theta$  и  $L_2 = L_4 - x_0$ .

Длина  $L_6 = L_5 \sin \alpha - R \cos \theta$ . Тогда

$$\psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{L_6}{\sqrt{R^2 - L_6^2}} \right). \quad (20)$$

Элемент дуги цилиндрической поверхности  $dl = R d\xi$ , где угол  $\xi = \pi/2 - \operatorname{arctg} \left( \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \right)$ . В каждой точке цилиндрической дуги скорость вращения лопасти обладает нормальной и тангенциальной составляющими:

$$v'_n = v_p \cos \xi - v_f \sin \xi; \quad v'_t = v_p \sin \xi + v_f \cos \xi. \quad (21)$$

Масса воздуха элементом дуги  $dl$  за время  $dt$  возмущается вдоль осей  $X$  и вдоль  $Y$  соответственно:

$$\Delta m_X = \rho v_p R \sin \xi d\xi \Delta r dt; \quad \Delta m_Y = \rho v_f R \cos \xi d\xi \Delta r dt. \quad (22)$$

С учетом (22) нормальная сила ударного действия на элемент поверхности лопасти является результатом интегрирования по углу  $\xi$  от нуля до угла  $\gamma$  и составляет

$$\Delta F''_n = \rho R \Delta r \int_0^\gamma (v_p \sin \xi + v_f \cos \xi)(v_p \cos \xi - v_f \sin \xi) d\xi,$$

где  $\gamma = \beta - \psi$ .

Тангенциальная составляющая действующей силы на элемент цилиндрической поверхности лопасти определяется законом Бернулли и направ-

лена по нормали к поверхности. В результате интегрирования по углу  $\xi$  получаем

$$\Delta F_B'' = 0,5\rho R\Delta r \int_0^\gamma (v_p \sin \xi - v_f \cos \xi)^2 d\xi.$$

Интегрирование по длине лопасти вдоль направления вращения лопасти винта определяет результирующий момент силы. Общий момент силы и величина мощности как ударного действия, так и действия закона Бернулли, для цилиндрической поверхности в тыльной стороне лопастей винта соответственно равны:

$$M_n'' = Z \int_{x_0}^R r dF_n; \quad N_n'' = M_n'' \omega;$$

$$M_B'' = Z \int_{x_0}^R r dF_B; \quad N_B'' = M_B'' \omega.$$

При вращении винта с угловой скоростью  $\omega$  за лопастями в тыльной стороне создается зона разрежения с двух сторон лопасти, в которой давление падает до величины

$$p = p_\infty \exp \left( - \frac{m_a (v_p^2 + v_f^2)}{2k_b T} \right),$$

где  $p_\infty$  – давление в окружающей атмосфере;  $m_a$  – средняя масса молекул окружающей атмосферы.

В соответствии с рис. 5 поток воздуха обтекает лопасть справа и слева. Возникшее разрежение справа заполняется потоком воздуха окружающей среды в начальный момент со скоростью звука. Масса воздуха, которая возмущается вращающейся лопастью, равна такой же массе воздуха, заполняющей зону разрежения с разных сторон. Запишем закон сохранения массы, определяемой по (12), для случая справа

$$\Delta m \cong 2\rho \left( \frac{1}{2} x_{cp} y_{cp} \right) \Delta r, \quad (23)$$

$$\text{где } \Delta t = y_{cp}/v_{зв}; \quad \Delta S_n = L' \Delta r; \quad L' = \begin{cases} L_4 & \text{при } v_p \sin \xi \leq v_f \cos \xi; \\ [L_4 + (R - x_0)] & \text{при } v_p \sin \xi > v_f \cos \xi. \end{cases}$$

Из (23) следует

$$x_{cp} = \frac{\Delta m}{\Delta t \rho} \frac{1}{v_{зв}} L'.$$

На этом расстоянии разность давлений за лопастью на удалении от края на длину  $x_{cp} \sin(\alpha - \varphi)$  и окружающей среды выравнивается. Далее поток воздуха движется в соответствии с разностью давлений в зоне раз-

режения и окружающей среды. Вследствие этого за лопастью винта образуется срыв течения и формируется воздушная среда в виде плоского конуса с пониженным давлением. Вершина угла плоского конуса в плоскости  $XZ$  составляет угол  $\pi - 2\alpha$ .

Результирующая скорость заполнения зоны разрежения в тыльной стороне лопасти у ее края

$$v_r = \sqrt{v_{3B}^2 + v_f^2 + v_p^2}, \quad (24)$$

где  $v_{3B} = \sqrt{1,4k_b T / m_a}$  – скорость звука.

Нормальная и тангенциальная составляющие скорости заполнения зоны разрежения от края лопасти и до расстояния  $x_{cp} \sin \alpha$  приобретают значения

$$v_{n,pez} = v_r \sin(\alpha - \varphi - \varphi' - \sigma); \quad v_{\tau,pez} = v_r \cos(\alpha - \varphi - \varphi' - \sigma),$$

$$\text{где } \varphi = \arctg\left(\frac{v_f}{v_{3B}}\right); \quad \sigma = \arctg\left(\frac{v_p}{v_f}\right).$$

Масса воздуха, которая заполняет зону разрежения на элементе длины лопасти  $\Delta r$  за время  $\Delta t$ , определяется по (12). Эта масса воздуха создает ударное воздействие на элемент поверхности  $\Delta S = x_{cp} \sin \alpha \Delta r$  с одной из сторон лопасти. Возникающая сила ударного действия на элемент лопасти винта

$$\Delta F''_{уд,n} = 2\chi \rho_\infty L' v_1 \Delta r [v_r \sin(\alpha - \varphi - \varphi' - \sigma) - v_f \cos(\alpha - \varphi - \varphi' - \sigma)] \cos \sigma, \quad (25)$$

где  $\chi$  – коэффициент, учитывающий долю возмущенной массы воздуха вращающимся винтом с площадью  $\Delta S = L' \Delta r$ , которая заполняет зону разрежения с одной из сторон вращающейся лопасти.

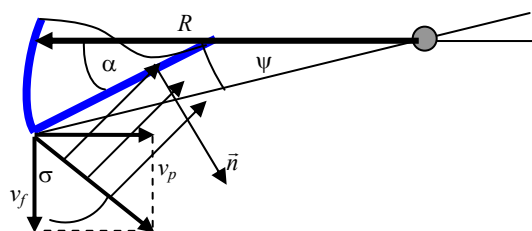
Сила ударного воздействия (25) уменьшает лобовое сопротивление вращающейся лопасти.

В (25) при  $\chi = 0,5$  тыльная область заполняется возмущенной массой воздуха, когда разлет ударно сжатого воздуха у поверхности  $L_4$  происходит с двух сторон с равной вероятностью. Когда разлет осуществляется со всех четырех сторон, то  $\chi = 0,25$ . В общем случае разлет сжатого воздуха перед винтом возникает во все стороны равновероятно. Тогда  $\chi \approx 1/2\pi = 0,159$ . Так как разлет происходит и в переднюю полусферу вследствие диффузии, то реально коэффициент разлета может быть меньше 0,159. Теоретически учесть долю разлета воздуха в окружающую среду достаточно сложно. Поэтому коэффициент  $\chi$  уточнялся по экспериментальным данным путем определения электрической мощности потребления в процессе вращения винта. При этом следует учитывать, что коэффициент разлета не должен превышать 0,5. Если плоскость  $L_4$  развернуть на некоторый угол  $\varphi$  (рис. 5)

Наличие тангенциальной составляющей скорости движения потока воздуха на длине  $x_{cp} \sin(\alpha - \varphi)$  создает силу, обусловленную законом Бернулли:

### Результирующая сила

$$\Delta F''_{\text{рез},n} = \Delta F''_{\text{б},n} - \Delta F''_{\text{вд},n}.$$

$$\Delta M'' = \Delta F''_{\text{рез},n} \cos(\alpha - \varphi - \varphi')r.$$
$$M'' = 3 \int_{d/2}^L r \cos(\alpha - \varphi - \varphi') dF''_{\text{pe3},n}; \quad N'' = M'' \omega.$$


*Fig. 6. Stall on the left side of the propeller blade*

Для случая обтекания воздушным потоком лопасти винта слева закон сохранения массы

$$\begin{aligned} \rho_{\infty} \Delta S_n \Delta t (v_p + v_f) &\cong \\ &\cong 2\rho \left( \frac{1}{2} x_{\text{cp}} y_{\text{cp}} \right) \Delta r, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{где } \Delta t = y_{\text{cp}}/v_{3\text{в}}; \quad \Delta S_n = L''\Delta r; \quad L'' = \begin{cases} [L_4 + (R - x_0)] & \text{при } v_p \sin \xi \leq v_f \cos \xi; \\ 0 & \text{при } v_p \sin \xi > v_f \cos \xi. \end{cases}$$

$$x'_{\text{cp}} = \frac{\rho_{\infty}(v_p + v_f)}{\rho} \frac{L''}{v_{3B}} + \frac{\rho_{\infty} v_p}{\rho} \frac{R \operatorname{tg} \psi}{v_{3B}}.$$

Результирующая скорость заполнения зоны разрежения в тыльной стороне лопасти слева у ее края определяется по формуле (24). Нормальная и тангенциальная составляющие скорости заполнения зоны разрежения от края лопасти и до расстояния  $x'_{\text{сд}} \cos(\alpha - \varphi)$  приобретают значения:

$$v_{n,pez} = v_r \cos(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma'); \quad v_{\tau,pez} = v_r \sin(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma'),$$

$$\text{где } \varphi' = \arctg\left(\frac{v_p}{v_{3B.}}\right); \quad \sigma' = \arctg\left(\frac{v_f}{v_p}\right).$$

Масса воздуха, которая участвует в заполнении зоны разрежения на элементе длины  $\Delta r$  за время  $t$ :

$$\Delta m = \rho_{\infty} L' v_1 \Delta r t \cos \sigma', \quad (27)$$

$$\text{где } v_1 = \sqrt{v_p^2 + v_f^2}.$$

Масса воздуха, определяемая по (27), создает ударное воздействие на элемент поверхности  $\Delta S = x_{cp} \sin \alpha \Delta r$  с одной из сторон лопасти, и тогда сила ударного действия на элемент лопасти винта

$$\Delta F''_{уд,n} = 2\chi \rho_{\infty} L'' v_1 \Delta r [v_r \cos(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma') - v_f \cos(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma')] \cos \sigma'.$$

Наличие тангенциальной составляющей скорости движения потока воздуха на длине  $x_{cp} \sin \alpha$  создает силу, обусловленную законом Бернулли:

$$\Delta F''_{Б,n} = 0,5 \rho_{\infty} v_r^2 \cos^2(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma') x_{cp} \sin(\alpha - \varphi) \Delta r. \quad (28)$$

Результирующая сила

$$\Delta F''_{рез,n} = \Delta F''_{Б,n} - \Delta F''_{уд,n}.$$

Момент силы на отдельный элемент вращающейся лопасти в тыльной области

$$\Delta M''' = \Delta F''_{рез,n} \cos(\alpha - \varphi + \varphi') r.$$

Суммарный момент силы слева

$$M''' = Z \int_{d/2}^L r \cos(\alpha - \varphi + \varphi' - \sigma') dF''_{рез,n}.$$

Масса воздуха, сосредоточенная в зоне разрежения, движется совместно с лопастью, не изменяясь по форме. Поэтому она создает газодинамическую силу, обусловленную разностью давлений между передней и задней стенками вращающейся лопасти. Эта сила вдоль направления вращения лопасти определяется по формуле

$$\Delta \tilde{F}_n = (P_{\infty} - P)[L_5 - x_{cp} \sin(\alpha - \varphi) - x'_{cp} \cos(\alpha - \varphi)] \cos(\alpha) \Delta r.$$

Момент силы (28) сдерживает вращение трехлопастного винта ветрогенератора

$$\tilde{M} = Z \int r d\tilde{F}_n.$$

Результирующий момент силы при вращении трехлопастного винта ветрогенератора

$$M_{\text{рез}} = M' - M'' + M''' + \tilde{M}.$$

Потребляемая ветрогенератором от источника питания мощность

$$N_{\text{рез}} = M_{\text{рез}} \omega.$$

Полученное теоретическое обоснование работы ветрогенератора в качестве воздушного теплового насоса позволило выполнить экспериментальные исследования и компьютерное моделирование на разработанной экспериментальной установке, а также провести сравнение теории с экспериментом.

### Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование

Потери на трение при вращении якорей электродвигателей были получены путем измерения мощности потерь в зависимости от подаваемого напряжения в режиме холостого хода. Результаты измерений мощности, потребляемой электродвигателями на холостом ходу в зависимости от подаваемого напряжения питания, приведены на рис. 7. Мощность холостого хода, потребляемая электродвигателями, линейно зависит от приложенного напряжения при слабом изменении потребляемого электрического тока. Тангенс угла наклона для мотора 100 Вт соответствует  $\sim 0,30$ , а для мотора 350 Вт  $\sim 2,1$ . Это позволило при компьютерном моделировании постоянно учитывать мощность потерь, расходуемых на трение, по линейной зависимости для обоих двигателей:

$$P_1 \cong 0,30V; P_2 \cong 2,1V,$$

где  $V$  – падение напряжения на моторе.

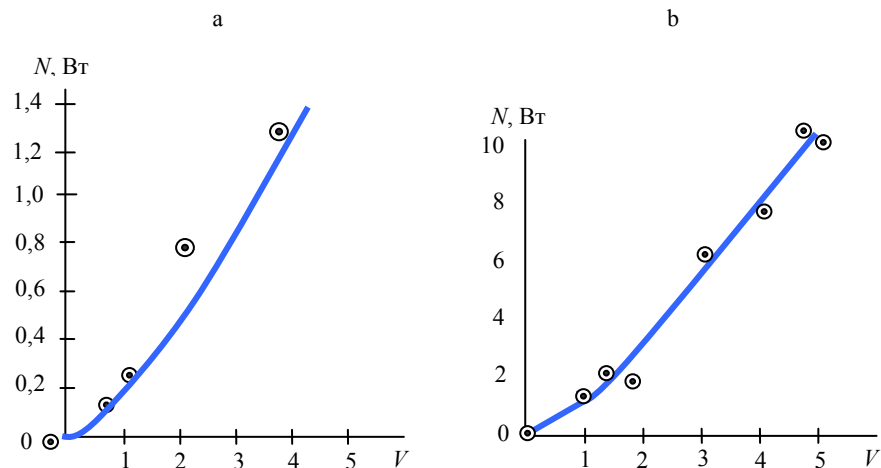
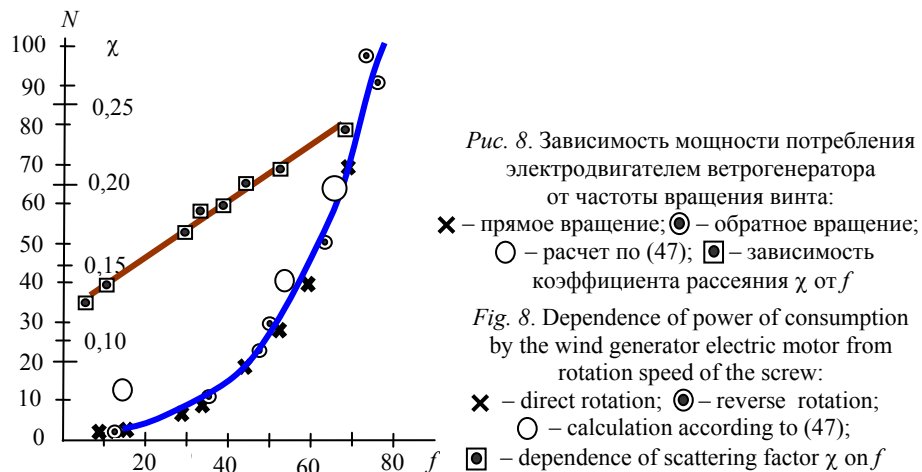


Рис. 7. Зависимость потерь мощности на трение от приложенного напряжения для вращающегося мотора: а – 100 Вт; б – 300 Вт

Fig. 7. Dependency of the friction loss power on applied voltage for the rotating motor: a – 100 W; b – 300 W

Измерение мощности потребления электродвигателем в зависимости от частоты вращения производилось в прямом и обратном направлениях вращения винта (рис. 8).



Результаты выполненных измерений в одном из направлений вращения представлены в табл. 3.

Потребляемая электродвигателем с трехлопастным винтом мощность в зависимости от частоты при прямом и обратном направлениях вращения практически мало отличается. Это понятно, так как мощность пропорциональна кубу частоты вращения, а возмущающаяся масса воздуха и момент инерции не изменяются.

Чтобы теоретический расчет полностью совпадал с экспериментальными данными, необходимо коэффициент рассеяния  $\chi$  полагать вариационным параметром. При этом полученная величина  $\chi$  не должно выходить за рамки граничных значений, определяемых аэродинамикой обтекания. Для вытянутых лопастей винта этот коэффициент не должен превышать 0,5.

Если учесть, что вдоль лопасти также имеет место некоторое течение воздуха, то рассеяние уплотненного воздуха должно совершаться равномерно по всей окружности  $\chi$  и не должно быть менее 0,159. При малых скоростях вращения винта граница уплотнения за счет диффузии может совершать движение в направлении вектора линейной скорости, и тогда определенная доля возмущенного воздуха будет исключаться из процесса формирования зоны разрежения в тыльной стороне вращающейся лопасти. В этом случае коэффициент рассеяния должен быть менее 0,159. На рис. 9 видно, что до частоты вращения винта ~20 Гц диффузионные процессы для исследуемого винта соизмеримы с линейной скоростью вращения винта до нижней границы каждой лопасти. Начиная с 20 Гц и выше диффузионные процессы и рассеяние воздуха вдоль лопасти несколько ослабевают и поэтому коэффициент  $\chi$  превышает граничное значение 0,159.

Важно было определить, с какого расстояния в тыльной области каждой лопасти происходит срыв течения. Теоретически рассчитанное расстояние приведено на рис. 9.



Таблица 3

Результаты проведенных испытаний  
Test results

Ведущий 100 Вт					Ведомый		
$I, A$	$U, B$	$N, Bт$	$V, м/с$	$\eta_{усл}$	$I, A$	$U, B$	$N, Bт$
Две лопасти					100 Вт, четыре лопасти		
0	0	0	—	—	0,11	0,77	0,085
0,4	0,42	0,164	2,17	5,04	1,20	0,76	0,912
0,6	0,69	0,414	2,78	2,23	1,20	0,71	0,852
0,8	0,94	0,752	3,37	1,39	1,30	0,72	0,936
1,2	1,40	1,680	4,43	0,56	1,40	0,62	0,868
1,8	1,90	3,420	5,69	0,38	1,80	0,67	1,206
2,3	2,20	5,060	6,57	0,25	1,90	0,62	1,178
3,3	2,70	8,910	7,96	0,17	2,20	0,67	1,474
4,2	3,30	13,440	9,16	0,11	2,30	0,64	1,472
4,3	3,23	13,890	4,28	0,12	2,40	0,70	1,680
Две лопасти					300 Вт, четыре лопасти		
0	0	0	—	—	3,4	1,80	5,70
0,5	0,45	0,225	1,08	2,93	3,7	1,84	6,36
1,0	0,74	0,670	1,61	1,54	3,8	1,90	6,73
1,6	1,40	1,960	2,33	0,59	4,0	1,82	6,85
2,2	1,80	3,540	2,82	0,51	4,4	1,80	7,50
4,0	3,20	11,800	4,16	0,76	5,2	1,80	8,94
Две лопасти					300 Вт, три лопасти		
0	0	0	—	—	7,1	2,15	12,06
0,6	1,22	0,502	3,15	12,43	9,0	2,48	18,30
1,4	1,80	2,090	5,07	4,41	9,8	2,60	21,28
2,0	2,10	3,450	5,99	3,40	10,4	2,70	23,78
2,5	2,50	5,550	7,02	2,61	11,2	2,80	26,56
3,9	3,30	11,840	9,04	1,27	11,2	2,85	27,12
Две лопасти					300 Вт, три лопасти		
0	0	0	—	—	5,5	1,42	5,87
0,635	0,73	0,393	1,66	14,86	7,1	2,10	11,71
1,000	1,53	1,230	4,25	7,55	8,2	2,30	15,16
1,900	2,00	3,300	5,90	3,41	8,8	2,40	17,12
2,700	2,50	6,050	7,22	2,42	9,7	2,55	20,54
4,000	3,20	11,800	9,03	1,37	10,0	2,65	22,10

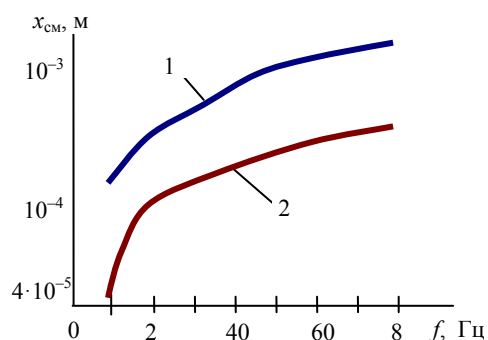


Рис. 9. Расстояние, с которого начинается срыв течения в зависимости от частоты вращения винта:  
1, 2 – у конца и основания лопасти  
Fig. 9. Distance at which the stall begins depending on the rotational frequency of the screw:  
1, 2 – at the end at the base of the blade

Получается, что только небольшая кромка в тыльной области лопасти испытывает ударное действие уплотненной воздушной средой практически со скоростью звука, т. е. когда не сформировался поток воздуха за счет возникшей разности давлений в соответствии с законом Бернулли. Остальная тыльная область сдерживается зоной разрежения, формируемой действием закона Бернулли.

Полученные экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о том, что разработанная молекулярно-кинетическая модель достаточно адекватно описывает динамику аэродинамического обтекания воздушным потоком лопастей исследуемого винта. Это позволило провести компьютерное моделирование работы винта с использованием лопастей разной конфигурации. Важно было выяснить, как будет изменяться энергопотребление в зависимости от угла  $\alpha$  между плоскостями  $L_4$  и  $L_5$  лопастей винта (рис. 5). Для прямого вращения винта результаты расчета приведены на рис. 10.

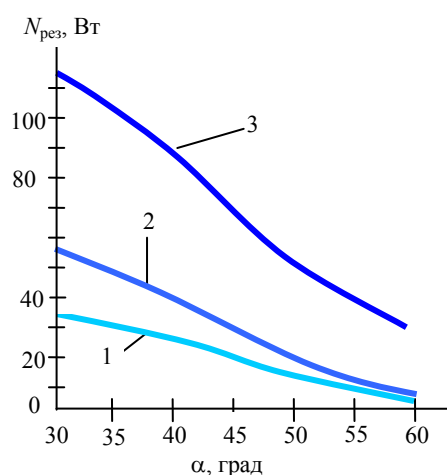


Рис. 10. Зависимость мощности потребления электродвигателем от угла между плоскостями  $L_4$  и  $L_5$  (рис. 5) лопасти винта при скорости вращения двигателя, Гц:  
1 – 42,2; 2 – 51,0; 3 – 67,7

Fig. 10. Dependency of the power consumption by an electric motor on the angle between the  $L_4$  and  $L_5$  planes (Fig. 5) of the propeller blade at the motor rotational speeds of, Hz:  
1 – 42.2; 2 – 51.0; 3 – 67.7

С возрастанием угла  $\alpha$  мощность потребления падает. Это обусловлено тем, что ударное действие на тыльную поверхность лопастей существенно возрастает за счет увеличения расстояния, с которого начинается срыв течения, и вследствие возрастания нормальной составляющей потока воздуха при заполнении зоны разрежения.

Зависимость коэффициента преобразования ветрогенератора, работающего в качестве воздушного теплового насоса, от скорости потока воздуха показана на рис. 11. Значение  $\eta_{\text{усил}}$  при скоростях потока воздуха менее 2 м/с резко возрастает, а при  $v > 2,5$  м/с уменьшается.

Важно было выяснить, в каких условиях воздушный винт работает как тепловой насос. Для этого провели компьютерное моделирование по определению мощности потребления воздушным винтом с лопастями прямоугольной формы в зависимости от поворота лопастей относительно плоскости вращения винта (табл. 4).

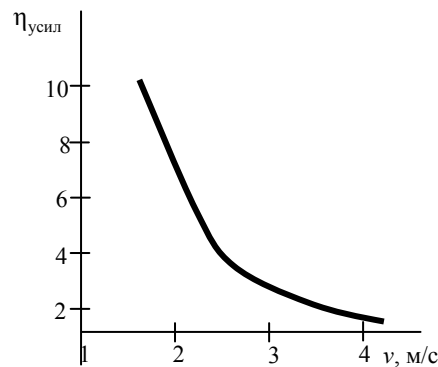


Рис. 11. Зависимость коэффициента преобразования теплового насоса от скорости набегающего потока воздуха

Fig. 11 Dependency of the conversion coefficient on the incoming air flow velocity

Таблица 4

**Результат воздействия окружающего воздуха на лопасти винта  
в зависимости от разворота лопастей относительно плоскости вращения винта**  
**The result of the action of ambient air on the rotor blades depending  
on the rotation of the blades relative to the plane of rotation**

Передняя плоскость лопасти				Тыльная плоскость лопасти				$W_{\text{рез}}, \text{ Вт}$
$N_1, \text{ Вт}$	$N_2, \text{ Вт}$	$N_3, \text{ Вт}$	$N_{\text{рез}}, \text{ Вт}$	$Z_1, \text{ Вт}$	$Z_2, \text{ Вт}$	$Z_3, \text{ Вт}$	$Z_{\text{рез}}, \text{ Вт}$	
$\chi = 0,217; \alpha = 45^\circ; \beta = 0; N_{\text{TP}} = 5,429 \text{ Вт}; f = 51 \text{ Гц}$								
24,14	11,82	-5,71	35,68	-69,96	45,49	16,40	-8,07	27,60
$\chi = 0,442; \alpha = 45^\circ; \beta = 15^\circ; N_{\text{TP}} = 5,429 \text{ Вт}; f = 51 \text{ Гц}$								
21,37	10,78	-4,53	33,05	-114,53	52,18	20,19	-42,16	-9,11
$\chi = 0,546; \alpha = 45^\circ; \beta = 25^\circ; N_{\text{TP}} = 5,429 \text{ Вт}; f = 51 \text{ Гц}$								
17,00	13,07	-3,38	32,11	-96,44	40,79	22,00	-33,65	-1,54

Получается, что воздушный винт с прямоугольными лопастями при прямом вращении, угле разворота относительно плоскости вращения винта более  $10^\circ$  и частоте вращения 51 Гц переходит в режим работы теплового насоса. Максимальный эффект возникает при развороте на  $17^\circ$  и ( $N = 9,7 \text{ Вт}$ ). Возрастание или падение частоты вращения винта приводит к незначительному уменьшению эффекта работы винта как теплового насоса. При угле разворота лопастей винта относительно плоскости вращения более  $20^\circ$  коэффициент рассеяния  $\chi$  превышает 0,5.

Если в тыльной стороне на краю лопастей создать прилив (рис. 5), который обеспечит постоянный угол встречи с потоком  $\sim 54^\circ$ , то такой винт ветрогенератора будет работать как тепловой насос и позволит на всех частотах вращения получать максимальную избыточную мощность на выходе электрического генератора. Например, на частоте вращения 67,7 Гц винт ветрогенератора, изображенный на рис. 1, с размерами, указанными в табл. 1, сможет выдавать избыточную мощность  $\sim 100 \text{ Вт}$  при скорости потока воздуха менее 2 м/с.

При скорости ветрового потока 2 м/с его кинетическая мощность на испытательной установке составляет  $\sim 0,06 \text{ Вт}$ . Чтобы получить такой поток воздуха вентилятором на испытательной установке, электромотор должен

потреблять мощность от источника питания менее 1 Вт (табл. 3). В ветрогенераторе, работающем как воздушный тепловой насос, преобразуется не кинетическая энергия воздушного потока, а его тепловая энергия. Тепловая мощность воздушного потока на экспериментальной установке при нормальной температуре и скорости движения 2 м/с составит 1,25 кВт. В этих условиях ветрогенератор отбирает только 8 % тепловой энергии от ветрового потока, температура на выходе ветрогенератора уменьшается на ~23 °С.

## ВЫВОДЫ

1. Ветрогенератор реализуется в качестве воздушного теплового насоса, когда за лопастями применяемого винта образуется эффективное срывное течение.
2. Лопасти воздушного винта ветрогенератора не должны работать в режиме тянущего или толкающего винта.
3. Падающий ветровой поток не воздействует непосредственно на лопасти воздушного винта, а выносит охлажденный поток воздуха за его пределы.
4. Установлены условия, когда ветрогенератор начинает работать как воздушный тепловой насос с максимальным коэффициентом преобразования теплоты ветрового потока в электрическую энергию.
5. Ветрогенератор в качестве воздушного теплового насоса является сложной открытой энергосистемой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
2. Амерханов, Р. А. Тепловые насосы / Р. А. Амерханов. М.: Энергоатомиздат, 2005. 160 с.
3. Мазурова, О. К. Тепловые насосы и их эффективность для целей теплоснабжения и улучшения экологической обстановки / О. К. Мазурова, Н. В. Кузнецов, С. Д. Квакин // Изв. Рост. гос. строит. ун-та. 2006. № 10. С. 266–273.
4. Оценка энергетической эффективности цикла теплового насоса со ступенчатым сжатием / С. К. Абилюдинова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302>.
5. Гречихин, Л. И. Аэродинамика летательных аппаратов / Л. И. Гречихин, А. А. Лапцевич, Н. Г. Куць. Минск: Право и экономика, 2012. 285 с.
6. Гречихин, Л. И. Энергетические комплексы на транспорте / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць. Минск: Право и экономика, 2013. 259 с.
7. Санников, В. По ветру быстрее ветра / В. Санников // Популярная механика. 2010. № 9. С. 84–87.
8. Энергетика воздушного винта беспилотного летательного аппарата. Теория, ламинарное течение / Гречихин Л. И. [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 4. С. 59–68.
9. Энергетика воздушного винта беспилотного летательного аппарата. Экспериментальные исследования, срывное течение / Л. И. Гречихин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 5. С. 61–65.
10. Гречихин, Л. И. Воздушный винт Мёбиуса / Л. И. Гречихин, А. Л. Гушин, А. А. Нарушевич // Военно-технический вестник. Научный журнал Министерства обороны Республики Сербия. 2014. № 2. С. 27–43.

11. Гречихин, Л. И. Общие основы формирования и превращения энергетических полей разной природы / Л. И. Гречихин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2006. № 3. С. 32–40.
12. Гречихин, Л. И. Тепловые насосы в авиации / Л. И. Гречихин // Военно-технический вестник. Научный журнал Министерства обороны Республики Сербия. 2013. № 2. С. 37–54.

Поступила 26.08.2019    Подписана в печать 05.11.2019    Опубликована онлайн 29.05.2020

#### REFERENCES

1. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
2. Amerkhanov R. A. (2005) *Heat Pumps*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 160 (in Russian).
3. Mazurova O. K., Kuznetsov N. V., Kvakin S. D. (2006) Heat Pumps and their Effectiveness for the Purposes of Heat Supply and Improvement of the Ecological Environment. *Izvestiya Rostovskogo Gosudarstvennogo Stroitel'nogo Universiteta* [Proceedings of the Rostov State University of Civil Engineering], (10), 266–273 (in Russian).
4. Abildinova S. K., Musabekov R. A., Rasmukhametova A. S., Chicherin S. V. (2019) Evaluation of the Energy Efficiency of the Stage Compression Heat Pump Cycle. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3), 293–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-293-302> (in Russian).
5. Grechikhin L. I., Laptsevich A. A., Kuts' N. G. (2012) *Aerodynamics of Aircraft*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 285 (in Russian).
6. Grechikhin L. I., Kuts' N. G. (2013) *Energy Complexes in Transport*. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ. 259 (in Russian).
7. Sannikov V. (2010) The Wind is Faster than the Wind. *Populyarnaya Mekhanika* [Popular Mechanics], (9), 84–87 (in Russian).
8. Grechikhin L. I., Saharuk D. A., Sivashko A. B., Tsanova A. A. (2010) Energy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Propeller (Theory, Streamlined Airflow). *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 59–68 (in Russian).
9. Grechikhin L. I., Saharuk D. A., Sivashko A. B., Tsanova A. A. (2010) Energetics of Windmill in Unmanned Aerial Vehicle (Experimental Investigations, Stalling Flow). *Energetika. Izvestiya vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 61–65 (in Russian).
10. Grechikhin L. I., Gushtchin A. L., Narushevitch A. A. (2014) Propeler Mobius. *Vojno-Tekhniki Glasnik* [Military Technical Courier], (2), 27–43 (in Russian).
11. Grechikhin L. I. (2006) General Principles of Formation and Transformation of Energy Fields of Different Nature. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 32–40 (in Russian).
12. Grechikhin L. I. (2013) Heat Pumps in Aviation. *Vojno-Tekhniki Glasnik* [Military Technical Courier], (2), 37–54 (in Russian).

Received: 26 August 2019

Accepted: 5 November 2019

Published online: 29 May 2020