

Гречихин Л.И.¹, Куць Н.Г.², Булик Ю.В.², Дубицкий О.С.²

¹Белорусская государственная академия связи

²Луцкий национальный технический университет

ТРАНСПОРТ И ВИХРЕВОЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС

Произведен расчет работы вихревого теплового насоса малой мощности для транспорта. Установлено, что для увеличения захватываемой поверхности вентилятором необходимо использовать высокооборотный винт сравнительно большого диаметра, а вращение такого винта должен обеспечивать электромотор с повышенной мощностью, но это существенно уменьшит коэффициент преобразования. Увеличение числа лопаток в ветрогенераторе возможно при росте диаметра электрогенератора, что также снижает коэффициент преобразования. Показано, что с ростом скорости прокачиваемого воздуха коэффициент преобразования незначительно падает. Существенно возрастает коэффициент преобразования путем увеличения числа каскадов из ветрогенераторов.

Ключевые слова: тепловой насос, ветрогенератор, вентилятор, воздушный винт, лопасти, срывное течение.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного состояния энергетической базы на транспорте зависит от преобразования одного вида энергии в другой ее вид с максимальным коэффициентом преобразования и с минимальной энергией активации в резонансных условиях.

В случае наличия естественной разности энергетических состояний окружающая среда является активной и возникает канал перекачки энергии от окружающей среды к открытой системе. Энергетическая открытая система с активной окружающей средой реализуется в естественных условиях при работе гидроэлектростанций, в ветроэнергетике, в процессе преобразования солнечной энергии, в шаровой молнии, а искусственно при работе кондиционеров, воздушных винтов, вентиляторов, компрессоров, турбин и при полетах самолетов. В открытых системах с активной окружающей средой преобразование энергии происходит без совершения работы, а это значит, что при преобразованиях энергий разных видов внутри системы исключаются переходные процессы.

В транспортных энергетических комплексах следует применять тепловые насосы, работающие с высокопотенциальными источниками энергии. Вентилятор, компрессор и турбина со специальными лопатками представляют собой вихревой тепловой насос и их можно применять в качестве теплового насоса на транспорте.

В транспортных гибридных энергосистемах должны использоваться вихревые тепловые насосы, работающие с высокопотенциальными источниками преобразования энергии. Из общего энергетического комплекса выделяется контролируемая ее часть: электрический двигатель, электрический генератор, воздушный винт и лопасти ветрогенератора для транспортных систем и производится расчет энергии преобразования.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В работах [1, 2] для транспорта предложено применить вихревой тепловой насос на искусственно созданном ветре. В результате показано, что такой вихревой насос преобразует не механическую энергию ветра в электрическую мощность, а тепловую составляющую прокачиваемого потока воздуха. Рассмотрен общий принцип работы такого вихревого теплового насоса. Конкретный расчет преобразования энергий выполнен для воздушных ветрогенераторов. Применительно к транспорту вихревой тепловой насос описан качественными параметрами.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой связи возникла необходимость произвести расчет энергий преобразования вихревым тепловым насосом с применением конкретного электрического двигателя, электрического генератора, воздушного винта и лопастей ветрогенератора для транспортных систем.

На рис. 1 приведена общая схема вихревого теплового насоса.

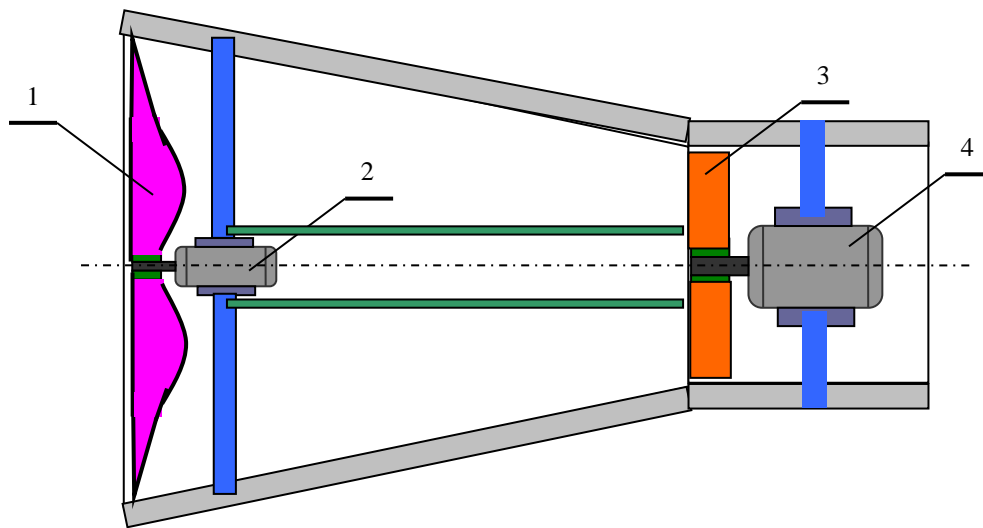


Рисунок 1. Принципиальный общий вид вихревого теплового насоса:

1 – винт вентилятора; 2 – электромотор вентилятора; 3 – лопасти ветрогенератора; 4 – электрогенератор

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вентилятор создает воздушный поток, который воздействует на лопасти ветрогенератора, ветрогенератор вырабатывает мощность больше мощности, потребляемой электромотором вентилятора и затраченной мощности на преодоление сил трения при вращении якорей в электромоторах, а также трение о воздух при вращении лопастей ветрогенератора. В каких условиях это возможно рассмотрим подробнее.

Если использовать лопасти ветрогенератора, конструкция которых позволила бы создать эффективное срывное течение, то в этом случае возможно реализовать тепловой насос со сравнительно большим коэффициентом преобразования. Для проверки такого предположения рассмотрим работу лопасти ветрогенератора наиболее простой формы, изображенной на рис. 2 с соответствующими обозначениями. Лопасть формируется тремя плоскостями – сферической радиуса r и двумя плоскими поверхностями под углом ε шириной L_5 и шириной L_4 по отношению к оси симметрии сферы длиной L_3 . Поток воздуха направляется вдоль поверхности L_5 под углом α . Количество лопастей задается. Ширина лопасти L_3 подбирается такой, чтобы полностью заполнить диаметр цилиндра, размер которого равен диаметру электрогенератора. Угол δ также задается. Если угол δ задан, то угол ε определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \arctg \left(\frac{r - L_3 \tg \delta}{L_3 - r} \right). \quad (1)$$

Ширина плоскостей L_4 и L_5 соответственно равна

$$L_4 = L_3 \sqrt{1 + \tg^2 \delta}, \quad L_5 = \sqrt{(L_3 - r)^2 + (r - L_3 \tg \delta)^2}. \quad (2)$$

Площадь сечения лопатки

$$S = \frac{\pi r^2}{4} - 0,5 r^2 \tg \delta + 0,5 (L_3 - r)^2 \tg \delta + 0,5 (r - L_3 \tg \delta)(L_3 - r). \quad (3)$$

Зная плотность материала, из которого изготовлена лопатка, легко определить ее момент инерции

$$J = 0,5 \rho S L_2^3. \quad (4)$$

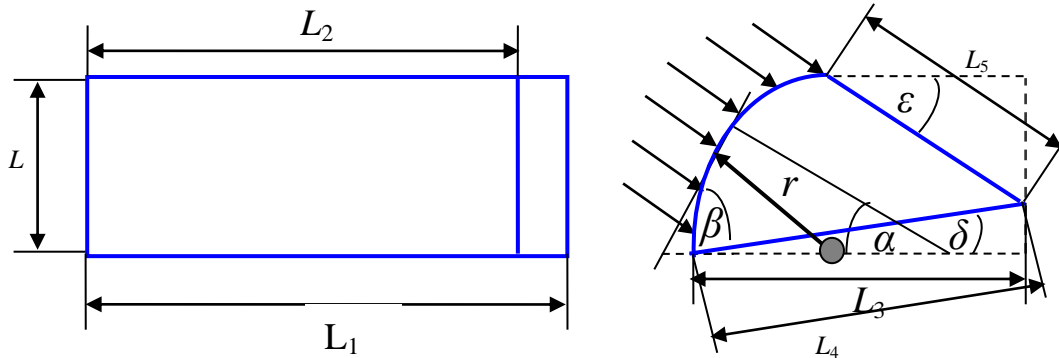


Рисунок 2. Общий вид лопасти ветрогенератора

Рассмотрим конкретно картину газодинамического обтекания каждой поверхности лопатки.

Сферическая поверхность. Сферическая поверхность направлена к потоку воздуха и разделяет его на две составляющие, которые направлены: один на плоскость L_4 , а второй на плоскость L_5 . Картина обтекания газовым потоком сферической поверхности показана на рис. 3. В точке нормального падения поток направлен вдоль радиуса сферической поверхности. При этом угол падения α задается, а угол β определяется по формуле

$$\beta = \arctg \left(\frac{x}{r} \frac{1}{\sqrt{1 - x^2/r^2}} \right). \quad (5)$$

Координаты точки нормального падения при заданном угле α_0 соответствуют

$$x_0 = r \cos \alpha_0, \quad y_0 = r \sin \alpha_0, \quad (6)$$

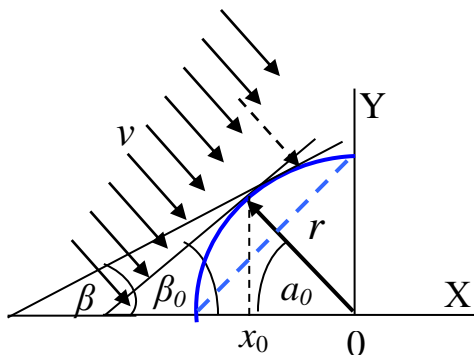


Рисунок 3. Картина обтекания сферической поверхности

а угол

$$\beta_0 = \arctg \left(\frac{x_0}{r} \frac{1}{\sqrt{1 - x_0^2/r^2}} \right). \quad (7)$$

В области $x < x_0$ нормальная и тангенциальные скорости относительно сферической поверхности соответственно равны:

$$v_n = v \cos(\beta_0 - \beta), \quad v_\tau = v \sin(\beta_0 - \beta). \quad (8)$$

В области $x > x_0$ $v_n = v \cos(\beta - \beta_0)$, $v_\tau = v \sin(\beta - \beta_0)$.

Элемент сферической поверхности $\Delta S = \Delta l \Delta z$, где

$$\Delta l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (9)$$

Масса воздуха, которая направляется в отрицательном направлении оси Y-в:

$$\Delta m_1 = \frac{\sqrt{8}}{\pi} \alpha \rho_a \Delta z r v \Delta t, \quad (10)$$

а в положительном направлении

$$\Delta m_2 = \sqrt{2} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} \right) \rho_a \Delta z r v \Delta t. \quad (11)$$

Воздействие потока воздуха на элемент сферической поверхности ΔS определяется ударным воздействием каждой молекулой своей нормальной составляющей скорости потока воздуха об эту поверхность, газодинамическим давлением, обусловленным законом Бернулли, и центробежным воздействием тангенциальной составляющей скорости потока воздуха вдоль рассматриваемого элемента сферической поверхности.

В области $x \leq x_0$ все три силы находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta F_{y\partial} &= 2\rho_a v^2 \Delta l \Delta z \cos^2(\beta_0 - \beta), \\ \Delta F_B &= 0,5\rho_a v^2 \Delta l \Delta z \sin^2(\beta_0 - \beta), \\ \Delta F_{\Pi} &= \rho_a v^2 \Delta l^2 \Delta z \sin^2(\beta_0 - \beta). \end{aligned} \quad (12)$$

В области $x > x_0$ все три силы определяются по этим же формулам, но только разность углов $\beta_0 - \beta$ заменяется на разность углов $\beta - \beta_0$. Результирующая сила воздействия вдоль направления движения потока воздуха на элемент поверхности ΔS :

$$\Delta F_{рез.} = (\Delta F_{y\partial} - \Delta F_B - \Delta F_{\Pi}) \cos(\beta_0 - \beta), \quad (13)$$

а перпендикулярно этому направлению результирующая сила создает вращающий момент лопасти. Однако при этом надо учитывать, что вращающий момент в области $x > x_0$ является отрицательным, а в области $x < x_0$ – положительным.

Чтобы получить результирующий момент силы, необходимо проинтегрировать полученную результирующую силу по оси X-в и по оси Y-в. Вдоль потока момент силы изгибает лопасть и должен компенсироваться упругими свойствами лопасти. Момент силы перпендикулярно потоку воздуха создает крутящий момент. Результирующий крутящий момент для одной лопасти находится следующим образом:

$$M_1 = \int_{x_0}^r \int_0^L z (dF_{y\partial} - dF_B - dF_{\Pi}) \sin(\beta - \beta_0) - \int_0^{x_0} \int_0^L z (dF_{y\partial} - dF_B - dF_{\Pi}) \sin(\beta_0 - \beta). \quad (14)$$

Плоская поверхность L_5 . Картина газодинамического обтекания плоской поверхности L_5 показана на рис. 4. Элемент плоской поверхности размером $\Delta S = L_5 \Delta z$ движется на удалении z от оси вращения. Если вращение происходит со скоростью ω , то линейная скорость этого элемента поверхности $v_g = \omega z$. Результирующая скорость движения потока воздуха

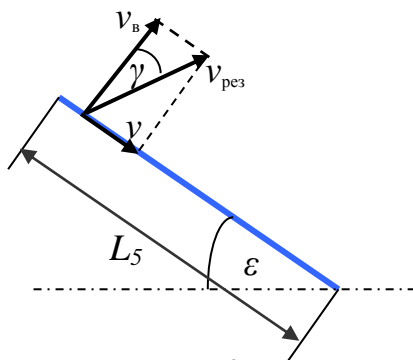


Рисунок 4.
Газодинамическое обтекание
плоской поверхности L_5

$$v_{рез.} = \sqrt{\omega^2 z^2 + v^2}. \quad (15)$$

Угол между линейной скоростью вращения и скоростью потока, направленной вдоль плоской поверхности $\gamma = \arctg\left(\frac{v}{\omega z}\right)$. Взаимодействие потока воздуха с такой плоской поверхностью определяется ударным воздействием при вращении лопатки и законом Бернулли. На элемент поверхности ΔS эти две силы находятся следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta F_{y\partial} &= \rho_a \omega^2 z^2 L_5 \Delta z, \\ \Delta F_B &= 0,5 \rho_a v^2 L_5 \Delta z.\end{aligned}\quad (16)$$

Результирующий тормозящий момент силы на всю поверхность лопасти

$$M_2 = 0,25 \rho_a L_1^2 L_5 (\omega^2 L_1^2 - v^2). \quad (17)$$

Плоская поверхность L_4 . Обтекание плоской поверхности L_4 наиболее сложное. На этой поверхности возникает срывное течение. На основании закона сохранения массы количество воздуха, которое заполняет зону разрежения, должна быть равна той массе воздуха, которая была возмущена лопастью. Эта масса определена выше как Δm_1 . Картина обтекания плоской поверхности шириной L_4 показана на рис. 5. Зона разрежения заполняется со скоростью звука, которая определяется формулой Лапласа

$$v_{3\partial} = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m_a}}. \quad (18)$$

Ударное действие молекул воздуха на элемент поверхности $\Delta S = L_4 \Delta z$

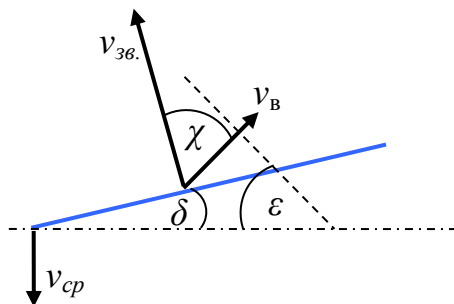


Рисунок 5. Обтекание плоской поверхности шириной L_4

$$\Delta F_{y\partial} = \Delta m_1 2v_{3\partial} / \Delta t. \quad (19)$$

Момент силы определяется интегралом вида

$$M_3 = \int_0^{L_1} z dF_{y\partial} \cos \chi, \quad (20)$$

где $\chi = \alpha + \delta$.

Результирующий момент силы

$$M = M_1 + M_2 + M_3. \quad (21)$$

Мощность, которую будет вырабатывать ветрогенератор за вычетом потерь на преодоление сил трения

$$N = (M - M_{mp.}) \omega. \quad (22)$$

Эта же мощность выражается иначе:

$$N = \frac{J \omega^2}{2} \frac{\omega}{2\pi}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что

$$\omega = \sqrt{4\pi(M - M_{mp.}) / J}. \quad (24)$$

Для каждого типа электрогенератора момент силы трения определяется опытным путем.

Коэффициент преобразования соответственно равен отношению мощности, вырабатываемой ветрогенератором, к мощности потребления электромотором вентилятора:

$$\kappa = \frac{N}{P}. \quad (25)$$

Для работы вихревого теплового насоса был выбран винт APC 7х6, а винт ветрогенератора применен специальной конструкции, изображенной на рис.2.

Конкретный расчет лопастей ветрогенератора вихревого теплового насоса выполнен для системы, изображенной на рис. 6.

Значения основных исходных данных, которые должны задаваться, приведены на рис. 6 и в табл. 1. Габаритные размеры ветрогенератора определяются техническими характеристиками электродвигателей вентилятора и электрогенератора. В качестве электромотора и электрогенератора применены коллекторные электродвигатели типа соответственно TRAXXAS 380 мощностью 100 Вт и TRAXXAS 775 мощностью 350 Вт.

Зависимость вырабатываемой мощности и частота вращения ветрогенератора от мощности, потребляемой вентилятором, приведена в табл.1.

Таблица 1. Зависимость мощности, вырабатываемой ветрогенератором, от мощности потребляемой вентилятором

Параметры	Мощность, потребляемая вентилятором, Вт и скорость потока, м/с					
	50/14,771	60/15,697	70/16,524	80/17,276	90/17,968	100/18,611
N, Вт	303	333	360	385	410	432
N, об/мин	3713	3830	3932	4023	4105	4180
K	6,06	5,54	5,14	4,81	4,56	4,18

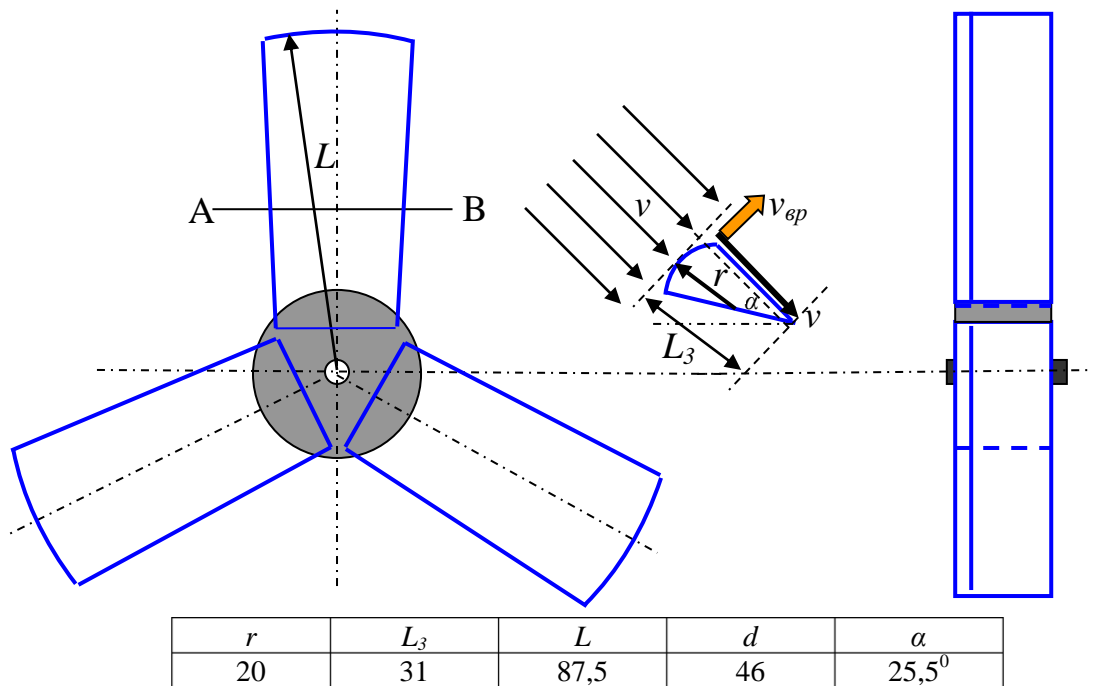


Рисунок 6. Общий вид расположения лопастей в одном каскаде ветрогенератора

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интересное свойство вихревого теплового насоса: максимальное преобразование тепловой энергии движущегося потока воздуха происходит при минимальных скоростях его движения. С ростом скорости движения потока воздуха коэффициент преобразования заметно падает. С увеличением размера винта вентилятора потребляемая мощность возрастает, а коэффициент преобразования падает. Чтобы получать большие выходные мощности с ветрогенератора необходимо не только увеличивать площадь ометаемой поверхности вентилятором с ростом числа лопаток в ветрогенераторе, но и увеличивать скорость движения потока воздуха.

ВЫВОДЫ

Для увеличения ометаемой поверхности вентилятором необходимо использовать высокооборотный винт сравнительно большого диаметра, а вращение такого винта должен

обеспечивать электромотор с повышенной мощностью, но это существенно уменьшит коэффициент преобразования.

Увеличение числа лопаток в ветрогенераторе возможно при возрастании диаметра электрогенератора, что также снижает коэффициент преобразования.

Наиболее эффективный способ получения максимального коэффициента преобразования энергии – это увеличение скорости движения потока воздуха до определенного предела.

Если применить каскадную схему путем расположения двух и более лопастных колец в ветрогенераторе, то резко возрастет коэффициент преобразования вихревого теплового насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куць Н. Г. Двигатели и энергетические комплексы на транспорте / Н. Г. Куць // Луцк: Луцкий НТУ, 2014. – 252 с.
2. Гречихин Л. И. Энергетические комплексы на транспорте / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Мн.: Право и экономика. 2013. – 259 с.

REFERENCES

1. Kuts N. G. (2014). Dvigateli i energeticheskie kompleksi na transporte, 252.
2. Grechihin L. I. (2013). Energeticheskie kompleksi na transporte, 259.

Гречихин Л.И., Куць Н.Г., Булик Ю.В., Дубицкий О.С. Транспорт і вихровий тепловий насос.

У роботах [1, 2] для транспорту запропоновано застосувати вихровий тепловий насос на штучно створеному вітрові. В результаті показано, що такий вихровий насос перетворює не механічну енергію вітру в електричну потужність, а теплову складову потоку повітря, що прокачується. Розглянуто загальний принцип роботи такого вихрового теплового насоса. Конкретний розрахунок перетворення енергій виконаний для повітряних вітрогенераторів. Вихровий тепловий насос, який може бути застосований на транспорті, описаний якісними параметрами. У зв'язку з цим виникла необхідність провести розрахунок енергій перетворення вихровим тепловим насосом із застосуванням конкретного електричного двигуна, електричного генератора, повітряного гвинта і лопатей вітрогенератора для транспортних систем.

Вентилятор створює повітряний потік, який впливає на лопаті вітрогенератора, вітрогенератор виробляє потужність більше потужності, споживаної електродвигуном вентилятора і витраченої потужності на подолання сил тертя при обертанні якорів в електромоторах, а також тертя об повітря при обертанні лопатей вітрогенератора.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для збільшення захоплюваної поверхні вентилятором необхідно використовувати високооборотний гвинт порівняно великого діаметра, а обертання такого гвинта повинен забезпечувати електромотор з підвищеною потужністю, але це суттєво зменшить коефіцієнт перетворення. Збільшення числа лопаток в вітрогенераторі можливе при зростанні діаметра електрогенератора, що також знижує коефіцієнт перетворення.

Встановлено, що найбільш ефективний спосіб отримання максимального коефіцієнта перетворення енергії - це збільшення швидкості руху потоку повітря до певної межі. Якщо застосувати каскадну схему шляхом розташування двох і більше лопатевих кілець в вітрогенераторі, то різко зросте коефіцієнт перетворення вихрового теплового насоса.

Ключові слова: тепловий насос, вітрогенератор, вентилятор, повітряний гвинт, лопаті, зривний потік.

L. Grechikhin, N. Kuts, Y. Bulik, O. Dubytskyi. Transport and vortex heat pump.

In [1, 2], it was proposed to use a vortex heat pump in an artificially created wind for transport. As a result, it was shown that such a vortex pump does not convert the mechanical energy of the wind into electrical power, but the thermal component of the pumped air stream. The general principle of operation of such a vortex heat pump is considered. A specific calculation of energy conversion is performed for wind turbines. In relation to transport, a vortex heat pump is described by qualitative parameters. In this regard, it became necessary to calculate the conversion energies of the vortex heat pump using a specific electric motor, electric generator, propeller and wind turbine blades for transport systems.

The fan creates an air stream that acts on the blades of the wind generator, the wind generator generates more power than the power consumed by the fan motor and the expended power to overcome the

friction forces when the anchors rotate in electric motors, as well as friction against the air when the blades of the wind generator rotate.

As a result of the studies, it was found that to increase the swept surface of the fan, it is necessary to use a high-speed screw of a relatively large diameter, and the rotation of such a screw should provide an electric motor with increased power, but this will significantly reduce the conversion coefficient. An increase in the number of blades in the wind generator is possible with an increase in the diameter of the generator, which also reduces the conversion coefficient.

It has been established that the most effective way to obtain the maximum energy conversion coefficient is to increase the speed of the air flow to a certain limit. If you apply a cascade scheme by arranging two or more blade rings in a wind generator, the conversion coefficient of the vortex heat pump will increase sharply.

Key words: heat pump, wind generator, fan, propeller, blades, stall flow.

ГРЕЧИХИН Леонид Иванович, доктор физико-математических наук, профессор Белорусская государственная академия связи. gretchihin@ya.ru.

КУЦЬ Надежда Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий национальный технический университет e-mail: nadia86@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>.

БУЛИК Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий национальный технический университет e-mail: by_lutsk@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>.

ДУБИЦКИЙ Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий национальный технический университет e-mail: o.dubyttskyi@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>.

Leonid GRECHIKHIN, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Belarusian State Academy of Communications e-mail: gretchihin@ya.ru.

Nadiia KUTS, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: nadia86@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1934-7189>.

Yuriy BULIK, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: by_lutsk@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9787-434X>.

Oleksandr DUBYTSKYI, PhD in Engineering, associate professor of Automobiles and Transport Technologies department, Lutsk National Technical University e-mail: o.dubyttskyi@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4863-4040>.

DOI 10.36910/automash.v1i14.349