

# ВОЗДУШНЫЙ ВИНТ МЁБИУСА

Леонид И. Гречихин, А. Л. Гуцин, А. А. Нарушевич  
Минский государственный высший авиационный колледж,  
Минск, Республика Беларусь

DOI: 10.5937/vojtehg62-4812

ОБЛАСТЬ: машиностроение, авиация  
ВИД СТАТЬИ: оригинальная научная работа

*Краткое содержание:*

*Разработана молекулярно-кинетическая теория работы винта с поверхностью Мёбиуса и осуществлено компьютерное моделирование в различных условиях эксплуатации такого винта. Применение механизации винта с поверхностью Мёбиуса позволяет в определенных условиях использовать такой винт в качестве вихревого теплового насоса. Проведена экспериментальная проверка разработанной теории работы винта с поверхностью Мёбиуса в лабораторных условиях.*

Ключевые слова: *воздушный винт, поверхность Мёбиуса, тепловой насос, механизация винта.*

## Введение

**В** дозвуковой авиации для преобразования энергии вращения вала двигателя в энергию поступательного движения самолета применяются воздушные винты. Идея применения воздушного винта для осуществления полетов на летательных аппаратах (ЛА) в воздушной атмосфере была высказана еще в XV веке Леонардо да Винчи. В настоящее время воздушный винт применяется на дозвуковых большегрузных самолетах достаточно широко. Особое значение воздушные винты приобрели в связи с развитием беспилотных летательных аппаратов. Вращаясь, воздушный винт отбрасывает массу воздуха, что приводит к возникновению тяги для летательного аппарата.

Первая теория воздушного винта была разработана Жуковским (Жуковский, 1948, стр.422), (Жуковский, 1949, стр.652), которая являлась чисто качественной и не позволяла применять ее для конструирования воздушных винтов. Поэтому при разработке воздушных винтов пользовались данными, которые были получены экспериментально на аэродинамических трубах. В результате проведенных исследований получены оптимальные профили лопастей винта, созданы таблицы NASA и ЦАГИ преимущественно для низкооборот-

ных винтов. Для высокооборотных винтов ситуация оказалась более сложной. Так как для практики такие винты были не востребованы, то они оставались вне поля зрения. В настоящее время в связи с развитием беспилотных летательных аппаратов высокооборотные винты стали востребованы практикой и возникла необходимость более подробно разобраться с механизмом взаимодействия высокооборотного винта с окружающим воздухом. Исследования высокооборотных винтов выполнены в работах (Гречихин, и др., 2010а, стр.59-68), (Гречихин, и др, 2010б, стр.61-65), и установлено, что работающий воздушный винт представляет собой тепловой насос. В этой связи проблема создания новых конструкций воздушных тяговых винтов с более эффективным коэффициентом преобразования является актуальной. Например, более эффективными оказались саблевидные лопасти воздушных винтов. Авторы работы (Шпади, Тимофеев, 2008, стр. 40-43) предложили воздушный винт двойной саблевидности, лопасти которого построены из спиральных участков в виде трех полуколец с поверхностью Мёбиуса. В результате такой винт позволил увеличить тягу как минимум в два раза по сравнению с традиционным трехлопастным винтом такого же диаметра. Конструктивно предложенная модель не является оптимальной. Поэтому возникает *цель*: детально рассмотреть динамику взаимодействия винта с поверхностью Мёбиуса и определить, какая конструкция такого винта будет давать максимальное превращение энергии вращения винта в энергию тяги. Поставленная цель требует решения следующих задач:

- определить условия эксплуатации винта с поверхностью Мёбиуса и на этой основе найти оптимум;
- разработать теорию, позволяющую производить компьютерное моделирование в различных условиях его применения;
- рассмотреть возможность его механизации;
- провести компьютерное моделирование для уточнения разработанной модели работы винта с поверхностью Мёбиуса.

В настоящей работе рассмотрим, каким образом были решены поставленные задачи.

## Условия эксплуатации винта с поверхностью Мёбиуса

Для уменьшения лобового сопротивления винт Мёбиуса, когда ось вращения проходит по оси симметрии, следует расположить так, как изображено на рис. 1. Стрелками показано направление тяги и направление вращения.

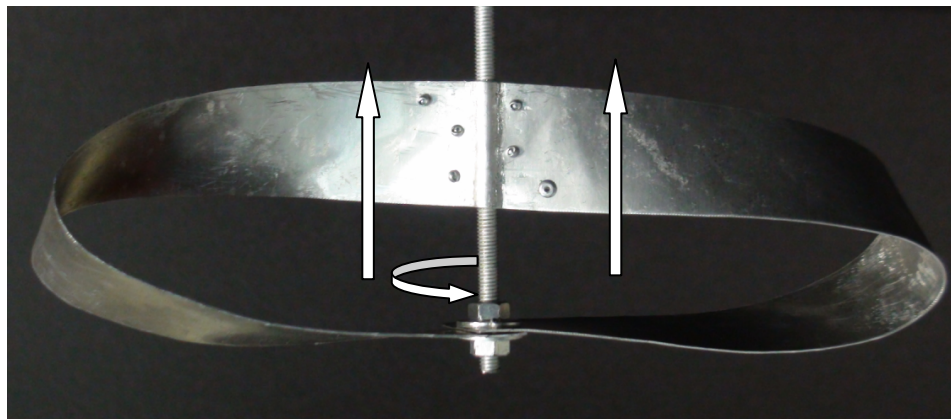


Рис. 1 – Расположение винта с поверхностью Мёбиуса в пространстве, которое обеспечивает максимальную тягу

Slika 1 – Položaj propelera „mobius“ koji obezbeđuje maksimalni potisak

Figure 1 – Mobius propeller position enabling maximum thrust

Такой винт можно вращать с большими скоростями не опасаясь его разрушения. Кроме этого важно, чтобы передняя поверхность винта по оси вращения должна перемещаться вдоль его оси. При этом винт автоматически устанавливается так, чтобы обеспечить минимальное лобовое сопротивление. Ширина полосы, свернутой в поверхность Мёбиуса, путем компьютерного моделирования устанавливается такой, чтобы обеспечить максимальную тягу при минимальном лобовом сопротивлении для заданного летательного аппарата.

Передняя кромка винта представляет собой эллипс, в котором большая полуось  $a$  является полудиаментом круговой ометаемой поверхности винтом, а малая полуось  $b$  – есть расстояние между передней и задней кромкой вдоль оси вращения. Если направить ось  $x$ -в вдоль оси вращения, а ось  $y$ -в перпендикулярно оси вращения с центром между передней кромкой на оси вращения, то винт Мёбиуса в таких координатах имеет вид

$$y = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (1)$$

При расположении винта с поверхностью Мёбиуса в пространстве, которое изображено на рис. 1, рассмотрим теорию его работы, используя общий подход, разработанный в (Гречихин, и др., 2010а, стр.59-68), (Гречихин, и др, 2010б, стр.61-65). При этом следует учитывать образование зоны разрежения за его тыльной стороной и механизм заполнения этой зоны окружающим воздухом.

## Теория работы винта с поверхностью Мёбиуса

Винт, изображенный на рис. 1, взаимодействует с окружающим воздухом своими четырьмя плоскостями. Передняя часть винта формируется верхней и нижней поверхностью, а задняя часть винта – внешней и тыльной поверхностью. Каждая из этих поверхностей обладает своей аэродинамикой (Прицкер, Сахаров, 1968, стр.310).

**Верхняя поверхность передней части винта.** Угол взаимодействия верхней поверхности винта с окружающим воздухом будем отсчитывать относительно направления движения, т.е. относительно вектора тяги. В таком отсчете угол крутки для передней части крыла изменяется от  $0^{\circ}$  до  $45^{\circ}$ . Тогда вдоль оси  $y$ -в угол крутки

$$\alpha_y = \frac{45^{\circ}}{a} y. \quad (2)$$

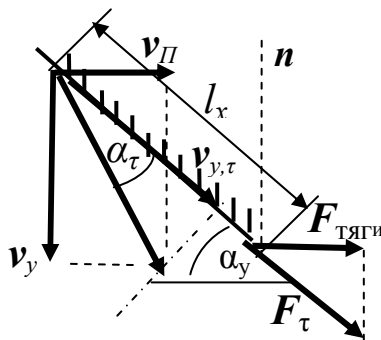


Рис. 2 – Схема взаимодействия молекул воздуха с верхней поверхностью передней части винта

Slika 2 – Šema interakcije molekula vazduha sa gornjom površinom prednjeg dela propelera  
Figure 2 – Schematic presentation of the interaction of air molecules with the upper surface of the propeller front part

На некотором удалении  $y$  в элементе  $\Delta y$  с шириной полосы поверхности Мёбиуса  $l_x$  молекулы окружающего воздуха будут испытывать удар (рис. 2). Величина удара определяется скоростью, с которой вращается винт и массой воздуха, провзаимодействовавшей с элементом поверхности за время  $\Delta t$ . Провзаимодействует масса воздуха с поверхностью  $\Delta S = l_x \cos \alpha_y \Delta y$  на удалении  $y$  на основании рис. 2

$$\Delta m = \rho v_y l_x \Delta y \cos \alpha_y \Delta t. \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность окружающего воздуха,  $v_y$  – линейная скорость элемента винта на удалении  $y$  от оси вращения и  $v_{\Pi}$  – скорость потока воздуха, формируемого винтом.

Изменение импульса  $\Delta p_1 = \Delta m v_y$  приводит к возникновению силы

$$\Delta F_1 = \frac{\Delta p_1}{\Delta t} = \rho v_y^2 l_x \Delta y \cos \alpha_y \quad (4)$$

и момента силы  $\Delta M_1 = \Delta F_1 y$ . (5)

Результирующий момент силы и мощность, формируемые верхней поверхностью передней частью винта Мёбиуса, соответственно равны

$$M_1 = \int_0^a \rho v_y^2 l_x \cos \alpha_y y dy; \quad N_1 = M_1 \omega, \quad (6)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота и  $f$  – линейная частота вращения винта.

Поток воздуха, который устремляется вдоль верхней поверхности передней части винта, движется со скоростью

$$v_\tau = \sqrt{v_y^2 + v_n^2} \sin[\alpha_y + \arctg(v_n / v_y)]$$

и уходит от винта, создавая газодинамический напор на удалении  $y$  от оси вращения

$$\Delta T_{,1} = 0,5 \rho v_{y,\tau}^2. \quad (7)$$

Такой напор создает дополнительный момент силы, который уменьшает энергопотребление от источника энергии и равен

$$W_1 = \int_0^a \Delta T_{,1} l_x \cos(\alpha_y) y dy. \quad (8)$$

Этот же поток создает реактивную силу тяги, создаваемую верхней поверхностью передней частью винта,

$$F_{T,1} = \int_0^a \rho \sqrt{v_y^2 + v_n^2} v_y l_x \sin[\alpha_y + \arctg(v_n / v_y)] \cos^2(\alpha_y) dy, \quad (9)$$

и соответствующую мощность

$$N_1 = \int_0^a \rho (v_y^2 + v_n^2) v_y l_x \sin^2[\alpha_y + \arctg(v_n / v_y)] \cos^2(\alpha_y) dy. \quad (8)$$

**Нижняя поверхность передней части винта.** За нижней поверхностью передней части винта образуется срывное течение. В зоне срывного течения возникает область разрежения. Давление в области разрежения находится следующим образом (Гречихин, 1987, стр.327)

$$P_6 = P_\infty \exp\left(-\frac{m_a v_y^2}{2k_B T_\infty}\right), \quad (9)$$

Здесь  $m_a$  – средняя масса молекул воздуха,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $P_\infty$  и  $T_\infty$  – соответственно давление и температура окружающего воздуха.

В нижней области передней части винта по мере возрастания вращения на длине свободного пробега возникает полный вакуум, который заполняется молекулами воздуха, скорость которых равна скорости звука при температуре окружающей среды  $T_\infty$ , которая определяется по формуле Лапласа, а именно:

$$c = \sqrt{\frac{kR_g T_\infty}{\mu}}. \quad (10)$$

Здесь  $k$  – отношение теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении и примерно равное для воздуха 1,4;  $R_g$  – универсальная газовая постоянная 8,31 Дж/(моль·град) и  $\mu$  – молярный вес воздуха ~ 0,029 кг/моль.

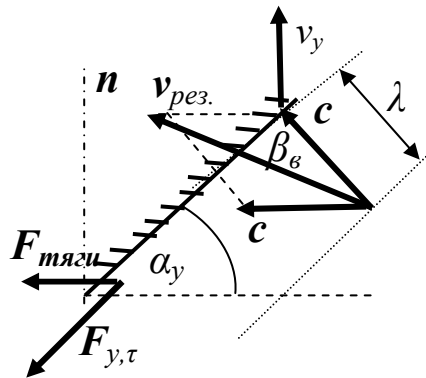


Рис. 3 – Схема взаимодействия молекул воздуха с нижней поверхностью передней части винта

Slika 3 – Šema interakcije molekula vazduha sa donjom površinom prednjeg dela propelera  
Figure 3 – Schematic presentation of the interaction of air molecules with the lower surface of the propeller front part

Общая схема взаимодействия воздуха с нижней поверхностью передней части винта изображена на рис. 3. За винтом образуется зона разрежения, которая заполняется потоком воздуха со скоростью звука нормально к поверхности и вдоль поверхности, как это показано на рис. 3. Скорость потока на основании теоремы косинусов

$$v_{рез.} = c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]}. \quad (11)$$

Поток воздуха на нижнюю поверхность передней части винта составит

$$J_2 = \frac{1}{4}nc\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]}. \quad (12)$$

Масса воздуха, которая взаимодействует с элементом поверхности  $\Delta S$  за время  $\Delta t$  с нижней стороной передней части винта

$$\Delta m_2 = J_2 m_a \Delta t \Delta S. \quad (13)$$

В процессе взаимодействия этой массы воздуха с элементом поверхности  $\Delta S$  на удалении  $u$  винту будет передан импульс

$$\Delta p_2 = 2\Delta m_2 c \sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]}. \quad (14)$$

В результате возникнет сила действия на этот элемент поверхности величиной  $\Delta F_2 = 4J_2 m_a c^2 [1 - \sin(\alpha_y)]$ . В нормальной составляющей этой силы следует учитывать линейную скорость движения рассматриваемого элемента винта  $v_y = 2\pi r \omega$ , которая уменьшает величину скорости потока молекул воздуха на нижнюю поверхность передней части винта. Тогда

$$\Delta F_2 = 2J_2 m_a \left\{ c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]} - v_y \cos(\alpha_y) \right\}^2 \cos(\beta_\epsilon), \quad (15)$$

а в соответствии с рис. 3 угол  $\beta_\epsilon = 45^\circ + \alpha_y / 2$ .

Полученная сила по отношению к вращению способствует увеличению скорости, и вследствие этого разгружает потребляемую мощность от источника энергии. Результирующая действующая сила нормально к поверхности на элемент поверхности  $\Delta S$  на удалении от оси вращения  $u$  составляет

$$\Delta F_2 = \frac{P_\epsilon}{2k_B T_\infty} m_a \left\{ c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]} - v_y \cos(\alpha_y) \right\}^2 l_x \cos(\beta_\epsilon) \Delta y. \quad (16)$$

Под действием такой силы возникает момент силы

$$\Delta M_2 = \Delta F_2 y, \quad (17)$$

а результирующий момент силы, обусловленный ударным действием молекул воздуха на нижнюю поверхность передней части винта перпендикулярно нормали к оси вращения составит

$$M_2 = \int_0^a \frac{P_g}{2k_B T} l_x m_A \{c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]} - v_y \cos(\alpha_y)\}^2 \cos(\beta_g) y dy. \quad (18)$$

Вдоль поверхности возникает поток воздуха со скоростью

$$v_\tau = [c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]} - v_y \cos(\alpha_y)] \cos(\beta_g), \quad (19)$$

Применяя закон Бернулли, получаем момент силы, который увеличивает лобовое сопротивление винта.

$$M'_2 = \int_0^a \frac{P_g}{2k_B T} m_a \{c\sqrt{2[1 - \sin(\alpha_y)]} - v_y \cos(\alpha_y)\}^2 l_x \cos^2(\beta_g) \cos(\alpha_y) y dy \quad (20)$$

Результирующий момент силы  $M_{2,pez.} = M_2 - M'_2$ . Если результирующий момент силы положительный, то винт будет раскручиваться, потребляя энергию из окружающей среды, равную

$$\Delta E_1 = M_{2,pez.} \omega. \quad (21)$$

Поток воздуха вдоль нижней поверхности передней части винта, движется со скоростью  $v_\tau = c \cos(\alpha_y)$ .

На основании закона сохранения массы газа, какое количество воздуха винт возбуждает перед собой, такое количество воздуха взаимодействует с винтом с тыльной стороны. Так как часть воздуха рассеивается в окружающую среду, то это учитывается в уменьшении плотности в зоне срывного течения в соответствии с (9). Поэтому скорость потока массы газа

$$\dot{m} = \frac{P_g}{k_B T} v_n l_x \cos(\alpha_y) \Delta y. \quad (22)$$

На элемент поверхности винта  $\Delta S$  такая скорость движения массы воздуха создает силу тяги

$$\Delta T'_1 = \dot{m} v_\tau = \frac{P}{k_B T} c v_n l_x \cos^2(\alpha_y) \Delta y$$



Результирующая сила тяги находится путем интегрирования

$$W'_1 = \int \Delta T'_1 y dy. \quad (23)$$

**Задняя часть винта.** Угол крутки для внешней и тыльной поверхности задней части винта с поверхностью Мёбиуса относительно нормали к оси вращения

$$\alpha'_y = 90 - \frac{45}{a} y. \quad (24)$$

Все формулы, полученные для передней части винта остаются прежними и для задней части, только угол  $\alpha_y$  заменяется на угол  $\alpha'_y$ .

Для внешней поверхности задней части винта момент силы сопротивления вращению и затрачиваемая мощность

$$M_3 = \int_0^a \rho v_y^2 l_x \cos \alpha'_y y dy; \quad N_3 = M_3 \omega. \quad (25)$$

Для тыльной поверхности задней части винта момент силы увеличения вращения и затрачиваемая при этом мощность

$$M_4 = \int_0^a \frac{P_e}{2k_B T} l_x m_A \left\{ c \sqrt{2[1 - \sin(\alpha'_y)]} - v_y \cos(\alpha'_y) \right\}^2 \cos(\beta_e) y dy; \quad N_4 = M_4 \omega. \quad (26)$$

Полученные расчетные формулы являются основой для компьютерного моделирования работы винта с поверхностью Мёбиуса.

Для увеличения подъемной силы и уменьшения лобового сопротивления крыла самолета применяется различная механизация. Аналогичный подход был использован для винта с поверхностью Мёбиуса.

Передняя часть винта с поверхностью Мёбиуса создает во внутренней области зону разрежения, давление в которой

$$P'_e = P_\infty \exp\left(-\frac{m_a v_\omega^2}{2k_B T}\right). \quad (27)$$

Под таким давлением осуществляется сжатие передней и задней лопастей винта с поверхностью Мёбиуса.

Чем дальше лопасти отстоят друг от друга, тем быстрее заполняется воздухом окружающей атмосферы центральная область между лопастями и в результате снимается напряжение между лопастями. Это значит, что винт работает более эффективно. Эти свойства винта Мёбиуса ранее детально не были исследованы и поэтому часто получали отрицательный результат при его применении. Поэтому в винте Шпади лопасти разнесены на максимально большое удаление друг от друга, как это позволяла конструкция. В результате был получен положительный эффект.

### Механизация вита с поверхностью Мёбиуса

Для увеличения тяги и уменьшения лобового сопротивления винта с поверхностью Мёбиуса можно применить различную механизацию. Рассмотрим механизацию, обусловленную радиусом загиба. На рис. 4 показана такая механизация. Размер радиуса загиба  $\zeta \approx r_y [1 - \cos(\alpha_y)]$ .

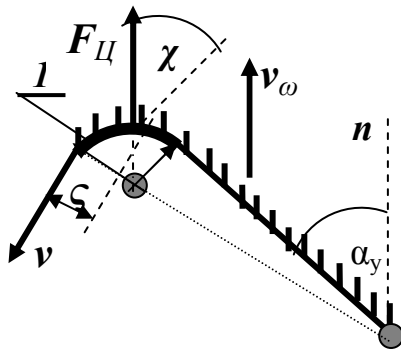


Рис. 4 – Схема расположения радиуса загиба (1) на передней кромке винта с поверхностью Мёбиуса

Slika 4 – Šema položaja radijusa krivine na prednjoj ivici propelera „mobius”  
Figure 4 – Schematic presentation of the position of the curve radius on the Mobius propeller front edge

Масса воздуха, которая взаимодействует с радиусом загиба

$$m = \rho v_y \zeta_y \Delta y \Delta t, \quad (28)$$

где  $\Delta t = r_y \cos \alpha_y / v_y$ .

Радиус загиба изменяется от нуля до  $r_0$ , который задается на удалении от оси вращения винта, равном длине лопасти, а на каждом удалении от оси вращения

$$r_y = \frac{r_0}{a} y. \quad (29)$$

Масса воздуха  $m$  обладает центробежным ускорением и действует на радиус загиба с силой

$$\Delta F_{Ц} = \rho v_y^2 \zeta_y \cos \alpha_y \cos \beta_y \Delta y, \quad (30)$$

где угол  $\beta_y = \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos(\alpha_y)}{\sqrt{4 - \cos^2(\alpha_y)}} \right)$ .

При этом создается момент силы

$$\Delta M_s = \rho v_y^2 \zeta_y \cos \alpha_y \cos \beta_y (y + \zeta_y / 2) \Delta y. \quad (31)$$

Результирующий момент силы, создаваемый радиусом загиба для одной лопасти

$$M_s = \int_0^a \rho v_y^2 \zeta_y \cos \alpha_y \cos \beta_y (y + \zeta_y / 2) dy. \quad (32)$$

Если задан размер лопасти винта  $L_0$ , то на каждом удалении от оси вращения линейная часть лопасти

$$l_y = L_0 - \left[ \frac{r_y \cos \alpha_y}{3} (4 \operatorname{tg} \alpha_y - 1) \right]. \quad (33)$$

Все формулы заданы и поэтому можно осуществить компьютерное моделирование.

## Результаты компьютерного моделирования

Для сравнительного анализа различных конструкций винта с поверхностью Мёбиуса рассмотрим следующий вариант. Пусть радиус лопасти винта составляет 12 см. Ширина лопасти 3,5 см. Потребление мощности и мощность тяги при скорости движения вдоль оси вращения  $v_n = 180$  км/ч без применения и с применением механизации лопастей винта в зависимости от скорости вращения приведены на рис. 5.

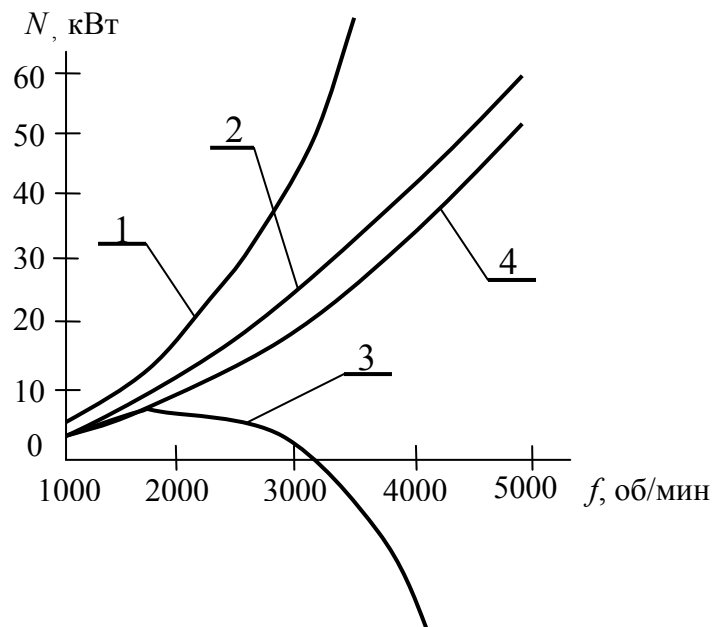


Рис. 5 – Зависимость мощности от частоты вращения винта: 1 – мощность потребления без механизации; 2 – мощность тяги без механизации; 3 – мощность потребления с механизацией; 4 – мощность тяги с механизацией

Slika 5 – Zavisnost snage od brzine rotacije propelera: 1 – potrošena snaga bez mehanizacije, 2 – snaga potiska bez mehanizacije, 3 – potrošena snaga sa mehanizacijom, 4 – snaga potiska sa mehanizacijom

Figure 5 – Dependence of the power on the propeller rotation speed: 1- used power without mechanisation, 2- thrust power without mechanisation, 3- used power with mechanisation, 4- thrust power with mechanisation

В качестве второго примера приведем результаты расчета винта с параметрами: радиус винта 0,65 м, ширина лопасти 10 см, радиус скругления кромки лопасти 3 см и скорость движения 55 км/ч в табл. 1. В последней строчке табл. 1 приведены отношения потребляемых мощностей ( $\chi = \chi_1/\chi_2$ ) и мощностей тяги ( $\xi = \xi_1/\xi_2$ ). Конкретные результаты сравнительного анализа работы такого винта без кривизны внешней кромки ленты с поверхностью Мёбиуса и с наличием такого радиуса кривизны свидетельствуют о следующем. Предлагаемая конструкция механизированного винта отличается от обычного винта с поверхностью Мёбиуса следующими особенностями:

- с возрастанием частоты вращения винта энергия потребления от бортового источника уменьшается, а не возрастает, как это имеет место в обычном винте с поверхностью Мёбиуса;

- коэффициент преобразования потребляемой мощности в мощность тяги в области малых частот вращения при скорости движения самолета 180 км/ч меньше, чем для обычного винта с поверхно-

стью Мёбиуса, а с возрастанием частоты вращения вначале резко возрастает и переходит в режим работы теплового насоса, а с уменьшением скорости движения картина меняется - для обычного винта с поверхностью Мёбиуса значительно падает, а для механизированного винта с поверхностью Мёбиуса резко возрастает и может вообще не потреблять мощность от бортового источника энергии;

– при конкретно реализуемой тяге массогабаритные характеристики предлагаемого винта значительно меньше, чем в обычном винте с поверхностью Мёбиуса в 1,5 – 2 раза за счет увеличения скорости вращения.

Таблица 1 – Сравнение работы винта с поверхностью Мёбиуса без загиба и с наличием загиба внешней кромки ленты

Tabela 1 – Poređenje rada propelera „mobius” bez savijanja i uz prisustvo savijanja spoljašnje ivice trake

Table 1 – omparison of the Mobius propeller functioning with and without bending the strip outer edge

(параметры винта: a) – 0,65 м; b) = 0,25 м; h = 0,10 м; r = 0;  $v_n = 55$  км/ч)

Параметры	Частота вращения, об/мин						
	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
$N_{потр.}$ , Вт	-55600	-104700	-181700	-296800	-460600	-975800	-1812200
$N_{тяги}$ , Вт	46300	77200	119600	173400	238700	403800	615200
$H$	0,83	0,74	0,66	0,58	0,52	0,41	0,34
$T_{тяги}$ , Н	3000	5050	7810	11300	15600	26400	40200
Радиус максимальной кривизны загиба передней кромки ленты $r = 0,03$ м							
$N_{потр.}$ , Вт	-38800	-43300	-32600	-2640	+50300	+240600	+567500
$N_{тяги}$ , Вт	37600	61400	93900	135200	185300	312000	474300
$H$	0,97	1,42	2,88	51,2	-3,68	-1,30	-0,84
$T_{тяги}$ , Н	2460	4010	6140	8830	12110	20390	31000
$\chi/\xi$	1,43/1,22	2,42/1,26	5,57/1,27	112/1,28	-9,2/1,29	-4,0/1,29	-3,2/1,30

Отличительные признаки механизированного винта с поверхностью Мёбиуса следующие:

1. Воздушный винт, содержит ленту с передней кромкой, загнутой с определенным радиусом, изменяющимся от нуля до максимального своего значения на внешней поверхности винта, а сама лента свернута по окружности Мёбиуса и закреплена на оси вращения одной стороной перпендикулярно оси вращения, а другой стороной - перпендикулярно плоскости вращения.

2. Радиус скругления передней кромки ленты винта обеспечивает увеличение коэффициента преобразования в зависимости от частоты вращения до бесконечности, а с преодолением энергии активации винт переходит полностью в режим работы теплового насоса.

3. Для уменьшения энергии активации перехода в режим теплового насоса применяется на верхней поверхности винта щиток, за-

крывающий не рабочую часть винта, радиус которого определяется условиями работы винта по тяге, высоты полета и температуры окружающей среды.

4. Для повышения коэффициента преобразования и уменьшения энергии активации лента винта по окружности Мёбиуса охватывает пространство только вблизи верхней части ометаемой окружности винтом более двух раз.

5. Для упрощения технологии изготовления механизированного винта можно ленту свернуть по обычному эллипсу и развернуть по малой оси на  $90^{\circ}$ . Эффективность работы винта при этом не изменится.

Таким образом, общая модель работы воздушных тянущих и толкающих винтов ЛА определяется возникновением активной составляющей окружающей среды работающего воздушного винта, которая обеспечивает более эффективное преобразование энергии типа вихревого теплового насоса.

Экспериментальную проверку непосредственно в полете осуществить достаточно проблематично. Поэтому эксперимент проводился в помещении при скорости движения практически равной нулю. На тележке устанавливался винт, который вращался электродвигателем переменного тока. Сила тяги измерялась динамометром. Электрические измерения осуществлялись по схеме, приведенной на рис. 6.

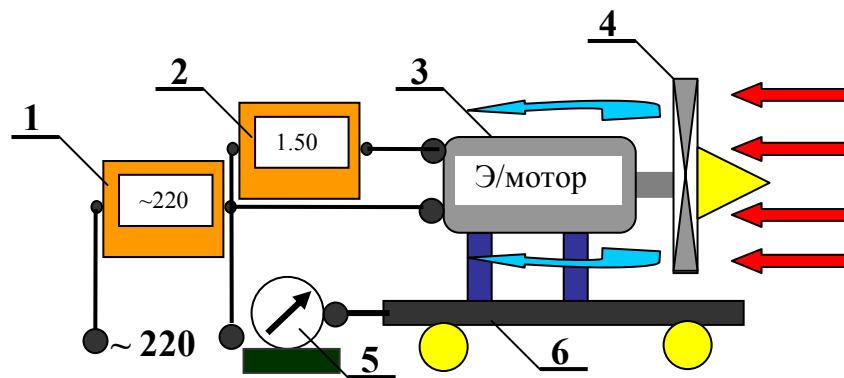


Рис. 6 – Схема проведения лабораторного эксперимента:  
1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – электродвигатель; 4 – исследуемый винт;  
5 – динамометр; 6 – движущаяся тележка

Slika 6 – Šema laboratorijskog eksperimenta:  
1 – voltmetar, 2 – ampermetar, 3 – elektromotor, 4 – ispitivani propeler,  
5 – dinamometar, 6 – pokretna kolica

Figure 6 – Schematic presentation of the laboratory experiment:  
1 – voltmeter; 2 – ampere meter; 3 – electric motor; 4 – tested propeller;  
5 – dynamo meter; 6 – rolling platform

Были проведены испытания винта с поверхностью Мёбиуса со следующими размерами:  $a = 0,200$  м;  $b = 0,08$  м;  $l = 0,06$  м и  $r_0 = 0,0215$  м. Частота вращения электромотора по паспорту 2850 об/мин. Результаты измерений  $U_0 = 210$  В;  $U = 208$  В;  $I = 3,2$  А. Потребляемая мощность 665,6 Вт. Мощность, затрачиваемая на создания тяги  $N_{\text{тяги}} = 2 \cdot 3,2 = 6,4$  Вт. Сила тяги составляла 0,55 кг. По этим данным скорость потока за винтом 1,2 м/с, а перед винтом она должна быть значительно меньше. Поэтому при теоретическом расчете скорость на входе винта использовалась как вариационный параметр. Результаты теоретического расчета мощностей потребления и тяги в зависимости от скорости движения воздуха на винт приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Зависимость мощности потребления и мощности тяги от скорости движения тележки

Tabela 2 – Zavisnost potrošene snage i snage potiska od brzine kretanja kolica  
Table 2 – Dependence of the used power and thrust power on the rolling platform speed

Параметры	Скорость воздуха на входе винта, км/ч					
	$10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$N_{\text{потр,эфф.}}$ Вт	662,0	662,3	662,4	663,6	662,7	662,7
$N_{\text{тяги}}$ Вт	13,49	9,44	6,74	2,69	1,35	0,67

Совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными реализуется при средней скорости потока воздуха на площадь, ометаемую винтом,  $\sim 0,05$  км/ч. Скорость воздуха перед винтом оказалась меньше в  $\sim 86$  раз. Как и следовало ожидать, скорость воздуха перед винтом значительно меньше скорости потока воздуха за винтом. По существу в таком режиме винт работает как вентилятор.

## Выводы

Таким образом, в работе получены следующие результаты:

1. Определены условия эксплуатации винта с поверхностью Мёбиуса и найдены оптимальные условия его эксплуатации.
2. Разработана молекулярно-кинетическая теория работы винта с поверхностью Мёбиуса, которая позволила выполнить компьютерное моделирование в различных условиях его эксплуатации.
3. Показано, что применение механизации винта с поверхностью Мёбиуса позволяет использовать такой винт в качестве вихревого теплового насоса.
4. Проведена экспериментальная проверка разработанной теории работы винта с поверхностью Мёбиуса в лабораторных условиях и получено удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

## Literatura/Literature

Гречихин, Л.И. 1987. *Неравновесное оптическое излучение воздушных и космических летательных аппаратов*. Минск: БПИ., стр. 327. Докторская диссертация.

Гречихин, Л.И., Сахарук, Д.А., Сивашко, А.Б., & Цанава, А.А. 2010а. Энергетика воздушного винта беспилотного летательного аппарата. Теория, ламинарное течение. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 4, стр. 59-68.

Гречихин, Л.И., Сахарук, Д.А., Сивашко, А.Б., & Цанава, А.А. 2010б. Энергетика воздушного винта беспилотного летательного аппарата. Экспериментальные исследования, срывное течение. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 5, стр. 61-65.

Жуковский, Н.Е., 1948, Вихревая теория гребного винта. У *Избранные сочинения. Т. 2.* – М.-Л.: ОГИЗ, стр. 422.

Жуковский, Н.Е., 1949, *Аэродинамика. Избранные сочинения. Т. 4.* – М.-Л.: ОГИЗ, стр.652.

Прицкер, Д.М., & Сахаров, Г.И. 1968. *Аэродинамика*. М.: Машиностроение., стр. 310.

Шпади, А.Л., & Тимофеев, В.Ф. 2008. Невинтовые пропеллеры. У Н.У. Ушакова Ур., *Проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: материалы международной научно-практической конференции 20-21 ноября 2008 г.: научное издание*. Ульяновск: УВАУ ГА., стр. 40-43.

### PROPELER „MOBIUS“

Leonid Ivanovič Grečihin, A. L. Guščin, A. A. Naruševič  
Državni viši koledž za vojno vazduhoplovstvo u Minsku,  
Republika Belorusija

OBLAST: mašinstvo, vazduhoplovstvo  
VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

#### Sažetak:

*U radu je razrađena molekularno-kinetička teorija rada propelera „mobius“ i implementirano njegovo računarsko modeliranje u različitim uslovima eksploatacije. Izvedba mehanizacije propelera „mobius“ dozvoljava u određenim uslovima korišćenje ovog tipa propelera u svojstvu toplotne pumpe. Izvršena je eksperimentalna provera razrađene teorije rada propelera „mobius“ u laboratorijskim uslovima.*

*Ključne reči: propeler, površina „mobius“, toplotne pumpe, mehanizacija propelera.*



## MOBIUS PROPELLER

Leonid Ivanovich Gretchihin, A. L. Gushtchin, A. A. Narushevitch  
Minsk State Higher Aviation College, Department of Natural Science  
Disciplines, Minsk, Republic of Belarus

FIELD: Mechanics, Aviation

ARTICLE TYPE: Original Scientific Paper

### *Summary:*

*The article gives a detailed molecular-kinetic theory of the Mobius propeller functioning and shows the implementation of its computer modelling in different exploitation conditions. The mechanisation of the Mobius propeller can be carried out in such a way that, under certain conditions, it enables using this type of propellers as a heat pump. The developed theory of the Mobius propeller functioning has been experimentally verified in laboratory conditions.*

*Key words: propeller, Mobius surface, heat pumps, propeller mechanization*

Дата получения работы/Paper received on: 04. 11. 2013.

Дата получения исправленной версии работы/Manuscript corrections submitted on:  
20. 01. 2014.

Дата окончательного согласования работы /Paper accepted for publishing on:  
22. 01. 2014.