

УДК 553.65.11.32:681.3:629.7.015

РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ВИНТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА И СТЕПЕНИ РЕДУКЦИИ

О.В. ГЕРАСИМОВ, Б.С. КРИЦКИЙ

Представлены методики проекторочного и поверочного расчета изолированного воздушного винта для малого беспилотного летательного аппарата (мини-БЛА), основанные на вихревой теории Н.Е. Жуковского. Приводятся результаты расчета воздушного винта мини-БЛА и их сравнение с результатами подбора винта по нормальной диаграмме. Показано влияние числа Re , а также степени редукции на аэродинамические и геометрические характеристики воздушного винта.

Ключевые слова: воздушный винт, беспилотный летательный аппарат, коэффициент полезного действия.

Введение

Беспилотные летательные аппараты класса мини-БЛА имеют полетную массу, исчисляемую единицами килограмм. Они предназначены для применения в составе комплексов мониторинга земной поверхности. Поэтому одной из важных характеристик мини-БЛА является его продолжительность полета. Как известно [1], продолжительность полета БЛА самолетного типа изменяется прямо пропорционально величине коэффициента полезного действия (КПД) воздушного винта (ВВ) и аэродинамическому качеству БЛА. Аэродинамическим качеством, близким к максимальному, мини-БЛА обладает на скоростях, близких к экономической скорости полета, которая соответствует наименьшей потребной мощности. Если для старта мини-БЛА используется катапульта и его силовая установка оснащена винтом фиксированного шага (ВФШ), то расчетным скоростным режимом ВВ будет полет мини-БЛА на скорости, близкой к экономической. При этом КПД ВВ должен быть возможно большим. Следует также отметить, что по сравнению с ВВ, используемыми в пилотируемой авиации, на характеристики ВВ, применяемых для мини-БЛА, вследствие малых скоростей полета и малых размеров ВВ существенное влияние оказывает число Рейнольдса Re потока в сечениях лопастей.

1. Методика проекторочного расчета воздушного винта

Методики проекторочного и поверочного расчетов ВВ основаны на вихревой теории Н.Е. Жуковского [2]. Воздействие лопастей ВВ на окружающую среду заменяется воздействием системы присоединенных и свободных вихрей, сбегających с лопастей и движущихся по линиям тока. В результате принятых в теории допущений [2], вихревая теория Н.Е. Жуковского применяется для расчета ВВ с малой нагрузкой на ометаемый диск и небольших относительных скоростях полета. При этом сила тяги и потребляемая мощность получаются пропорциональными числу лопастей ВВ. Если распределение циркуляции по радиусу лопасти принимается постоянным (ВВ типа НЕЖ), то его вихревая система состоит из активного диска, вихревого цилиндра диаметром, равным диаметру ВВ, и центрального вихревого жгута, состоящего из свободных вихрей, сходящих с внутренних торцов лопастей. В вихревой теории Н.Е. Жуковского линейные величины относятся к радиусу ВВ, а скорости – к окружной скорости конца лопасти ωR .

В качестве исходных данных при проекторочном расчете использовались такие характеристики, как скорость и высота полета мини-БЛА, мощность установленного на нем двигателя и частота вращения ВВ, диаметр и число лопастей, а также угол атаки в сечении лопасти и число Re . Известными считаются также экспериментальные характеристики профилей сечений лопасти $C_y = f(\alpha, \bar{c}, Re)$, $C_x = f(\alpha, \bar{c}, Re)$. В результате проекторочного расчета, кроме геометрических характеристик лопасти, определяются суммарные аэродинамические характеристики ВВ, такие как сила тяги и КПД.

В данной работе рассматривались ВВ с постоянным (ВВ типа НЕЖ) и эллиптическим распределением циркуляции по радиусу лопасти. При этом для ВВ типа НЕЖ, кроме циркуляции $\bar{\Gamma}$, постоянными по размаху лопасти являются также скорость протекания \bar{V}_1 и величина C_y .

В процессе проектировочного расчета определение циркуляции $\bar{\Gamma}$ и скорости протекания в плоскости диска ВВ \bar{V}_1 осуществляется методом итераций при совместном решении уравнений:

$$\bar{V}_1 = \frac{\bar{V}_0}{2} + \sqrt{\frac{\bar{V}_0^2}{4} + \bar{\Gamma}}; \quad (1)$$

$$\bar{T} = \bar{\Gamma} \cdot \left[\bar{V}_1 \cdot \left(-\bar{r}_0^2 \right) + \frac{2}{3} \mu \cdot \left(-\bar{r}_0^3 \right) - 2\mu \cdot \bar{\Gamma} \left(-\bar{r}_0 \right) \right], \quad (2)$$

где \bar{V}_0 – относительная скорость набегающего на ВВ потока; $\mu = C_x/C_y$ – величина обратного аэродинамического качества профиля сечения лопасти, которая определяется по аэродинамическим характеристикам профиля при заданном угле атаки α ; $\bar{\Gamma} = k_d \Gamma / 4\pi\omega R^2$ – относительная циркуляция при числе лопастей k_d .

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока выполняется неравенство

$$\left| \frac{\bar{T} - \bar{T}_{дв}}{\bar{T}} \right| > \varepsilon_1, \quad (3)$$

где ε_1 – малая величина; $\bar{T}_{дв}$ – мощность двигателя, кгс·м/с, которая вычисляется по формуле

$$\bar{T}_{дв} = 75 \cdot \frac{N_{дв}}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R^5}, \quad (4)$$

где $N_{дв}$ – мощность двигателя, л.с.; ρ – массовая плотность воздуха на высоте полета мини-БЛА, кгс·с²/м⁴; ω – угловая скорость вращения ВВ, рад/с; R – радиус ВВ, м.

После расчета циркуляции и скорости протекания определяется сила тяги и КПД ВВ:

$$\bar{P} = \bar{\Gamma} \cdot \left[-\bar{r}_0^2 + 2 \cdot \bar{\Gamma} \cdot \ln \bar{r}_0 - 2 \cdot \mu \cdot \bar{V}_1 \cdot \left(-\bar{r}_0 \right) \right]; \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\bar{P} \cdot \bar{V}_0}{\bar{T}}. \quad (6)$$

Если циркуляция распределяется по радиусу лопасти по закону эллипса, то ее величина при $\bar{r} = \bar{r}_0 \div 1$ определялась в расчетном сечении по формуле

$$\bar{\Gamma} = \bar{\Gamma}_{НЕЖ} \sqrt{1 - \frac{\left[-0,5 \cdot \left(+\bar{r}_0 \right) \right]^2}{\left[0,5 \cdot \left(-\bar{r}_0 \right) \right]^2}}, \quad (7)$$

где $\bar{\Gamma}_{НЕЖ}$ – предварительно рассчитанная циркуляция ВВ типа НЕЖ; \bar{r} – относительный радиус сечения лопасти; \bar{r}_0 – относительный радиус втулки ВВ.

Интегральные характеристики ВВ определялись численным интегрированием по размаху лопасти согласно формуле (20), представленной ниже в поверочном расчете. Итерационный процесс осуществляется согласно условию (3), тяга и КПД ВВ определялись согласно формулам (5), (6).

Для определения геометрических характеристик лопасти использовалось уравнение связи, которое связывает циркуляцию $\bar{\Gamma}$ и скорость потока \bar{W} с суммарной относительной шириной лопастей ВВ и величиной коэффициента C_y в сечении лопасти

$$\bar{\Gamma} = \frac{1}{2} \cdot C_y \cdot \bar{b} \cdot \bar{W}, \quad (8)$$

где $\bar{b} = k_1 b / 4\pi R$ – относительная ширина лопасти, а значение C_y определяется из экспериментальных аэродинамических характеристик для профиля сечения. Результирующая скорость потока в сечении равна

$$\bar{W}_1 = \sqrt{\bar{V}_1^2 + \bar{U}_1^2}, \quad (9)$$

где величина скорости протекания определялась по формуле (1), а величина окружной скорости

$$\bar{U}_1 = \bar{r} - \frac{\bar{\Gamma}}{\bar{r}}. \quad (10)$$

Суммарное значение относительной ширины лопастей в расчетном сечении определялось по формуле

$$\bar{b}_\Sigma = \frac{2 \cdot \bar{\Gamma}}{\bar{W}_1 \cdot C_y}. \quad (11)$$

Окончательно получалась размерная величина хорды сечения лопасти ВВ

$$b_{\text{л}} = \frac{4\pi \cdot \bar{b}_\Sigma \cdot R}{k_{\text{л}}}. \quad (12)$$

Для расчета распределения угла геометрической крутки по размаху лопасти в каждом расчетном сечении определялись величины угла притекания потока β и потребный угол установки в сечении φ . При этом угол протекания определялся по формуле

$$\beta = \arctan \left(\frac{\bar{V}_1}{\bar{U}_1} \right), \quad (13)$$

а потребный угол установки

$$\varphi = \beta + \alpha_{\text{расч}}. \quad (14)$$

В результате вычислялся угол геометрической крутки по радиусу лопасти

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{0,75}, \quad (15)$$

где $\varphi_{0,75}$ – угол установки сечения лопасти на относительном радиусе $\bar{r} = 0,75$.

После нахождения распределения ширины лопасти по радиусу в каждом сечении ВВ вычислялось число Рейнольдса

$$Re = \frac{b \cdot W}{\nu}, \quad (16)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха на расчетной высоте полета. Если полученное в расчете число Re не соответствовало заданному, итерационный процесс продолжался до тех пор, пока выполнялось неравенство

$$\left| \frac{Re_p - Re_{\text{зад}}}{Re_p} \right| > \varepsilon_2, \quad (17)$$

где Re_p – расчетное число Re ; $Re_{\text{зад}}$ – заданное число Re ; ε_2 – малое число.

2. Методика поверочного расчета воздушного винта

Целью поверочного расчета являлось определение распределенных и суммарных аэродинамических характеристик ВВ при заданных геометрических характеристиках лопасти ВВ, таких как диаметр, распределение по радиусу ширины и угла геометрической крутки лопасти, а также числе лопастей ВВ и наборе профилей в сечениях. Аэродинамические характеристики профилей сечений $C_y = f(\alpha, \bar{c}, Re)$, $C_x = f(\alpha, \bar{c}, Re)$, частота вращения ВВ и скорость полета БЛА также считаются известными.

Лопасть ВВ разбивалась на ряд участков $\Delta\bar{r}$, и расчетные сечения на лопасти принимались в середине участков.

Задавалось начальное значение угла атаки α_i в сечении лопасти ВВ. По известному значению угла установки сечения φ определяется начальное значение угла протекания струи

$$\beta_i = \varphi - \alpha_i, \quad (18)$$

далее с помощью уравнений (8), (10) рассчитывается величина циркуляции

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{\bar{r}}{\frac{2 \cdot \cos \beta_i}{C_y \cdot \bar{b}} + \frac{1}{\bar{r}}}. \quad (19)$$

Значения \bar{V}_1 и \bar{U}_1 определялись по формулам (1), (10). Расчетное значение угла установки определялось по формуле

$$\varphi_i = \alpha_i + \arctan\left(\frac{\bar{V}_1}{\bar{U}_1}\right). \quad (20)$$

Итерационный процесс продолжался до тех пор, пока выполнялось условие

$$\left| \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_i} \right| > \varepsilon_3, \quad (21)$$

где ε_3 – малое число.

Сила тяги и мощность, потребляемая ВВ, в отвлеченных величинах определялись численным интегрированием

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{K_y} \bar{\Gamma}_i \cdot (\bar{U}_1 - \mu \cdot \bar{V}_1) \cdot \Delta \bar{r}; \quad (22)$$

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^{K_y} \bar{\Gamma}_i \cdot (\bar{U}_1 - \mu \cdot \bar{V}_1) \cdot \bar{r} \cdot \Delta \bar{r}. \quad (23)$$

При этом КПД ВВ рассчитывался по формуле (6).

После определения зависимостей $\bar{P} = f(\varphi)$, $\bar{T} = f(\varphi)$ для заданного диапазона углов установки лопасти согласно формулам (3, 4), с помощью процедуры кубической интерполяции определялся угол установки на $\bar{r} = 0,75$, а также аэродинамические характеристики ВВ, при котором потребляемая мощность соответствовала мощности двигателя, установленного на БЛА.

3. Результаты расчетов

В работе [3] приведены геометрические характеристики ВВ английской серии (рис. 1, 2), аэродинамические характеристики профиля лопасти RAF-6, а также экспериментальная диаграмма, в которой представлены зависимости коэффициентов мощности β и полезного действия η от относительной поступи λ ВВ.

Для проверки согласования поверочного расчета ВВ с данными, представленными в нормальной диаграмме ВВ английской серии, был проведен расчет ВВ переменного шага (ВИШ). При этом мощность двигателя составляла $N = 0,21$ л.с. при частоте вращения $n = 14000$ об/мин и скорости полета мини-БЛА $V = 40$ км/ч – 110 км/ч. В результате были получены зависимости относительного шага, силы тяги и КПД ВВ от скорости полета, представленные на рис. 3 – 5.

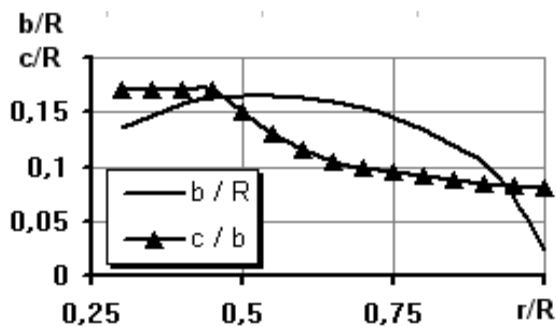


Рис. 1. Относительная ширина и толщина лопасти

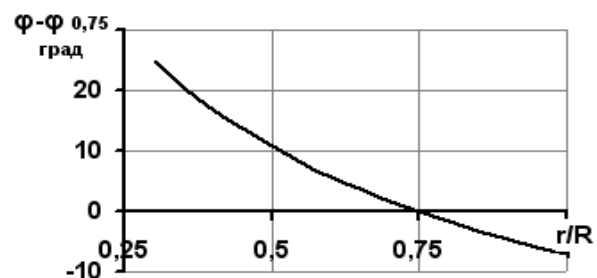


Рис. 2. Угол геометрической крутки лопасти

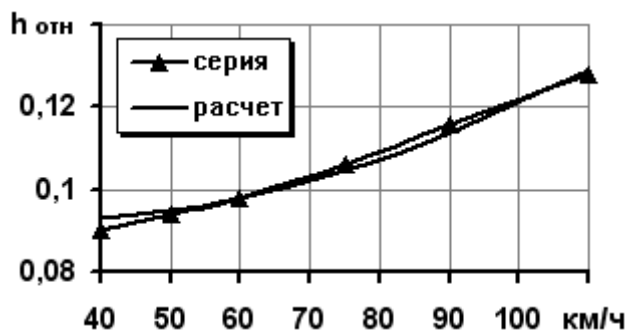


Рис. 3. Относительный шаг воздушного винта

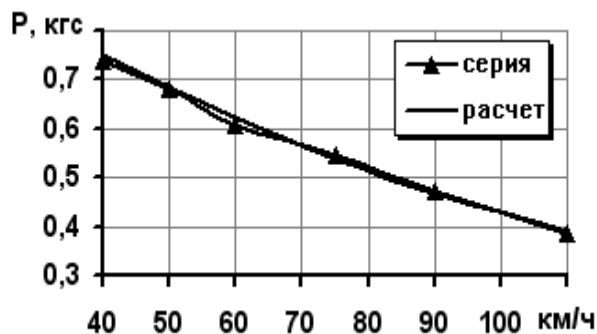


Рис. 4. Сила тяги воздушного винта

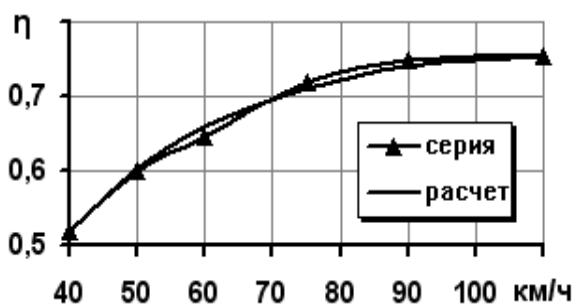


Рис. 5. Коэффициент полезного действия воздушного винта

Сравнение результатов поверочного расчета с данными, полученными из экспериментальной диаграммы, показывает их удовлетворительное согласование.

При геометрических параметрах ВВ, используемых для мини-БЛА, число Рейнольдса в сечениях лопастей составляет $Re = 50000 \div 80000$. При таких числах Re аэродинамические характеристики профилей, применяемых на ВВ пилотируемой авиации, соответствуют докритическому обтеканию, когда аэродинамические характеристики сильно зависят от Re . Местные отрывы ламинарного пограничного слоя приводят к ухудшению несущих свойств и существенному увеличению коэффициента лобового сопротивления профиля [4]. Все это показывает, что подбор ВВ по экспериментальной диаграмме может дать значительные погрешности. Поэтому для проверки результатов подбора ВВ необходимо провести его поверочный расчет с использованием аэродинамических характеристик профиля при низких числах Re . Однако экспериментальные характеристики винтовых профилей при таких числах Re являются малораспространенными.

В данной работе проводился проектировочный расчет ВВ типа НЕЖ с постоянным профилем К-2 по размаху лопасти с известными экспериментальными характеристиками для $Re = 33000 \div 64000$ [4]. Важной особенностью ВВ типа НЕЖ является то, что в каждом сечении по радиусу лопасти при небольших скоростях полета число Re является практически постоянным. Кроме того, лопасть ВВ типа НЕЖ сильно расширяется к корню и, с точки зрения прочности, соответствует реальной лопасти.

Для проектировочного расчета ВВ использовались следующие исходные данные. Мощность двигателя составляла $N = 0,21$ л.с. при частоте вращения 14000 об/мин. Скорость полета равнялась $V = 75$ км/ч. Расчет проводился для диаметров ВВ $D = 150$ мм, 200 мм, 250 мм. Угол атаки в сечениях лопасти принимался равным $\alpha = 4^\circ$. В результате расчета были получены геометрические характеристики ВВ и коэффициент полезного действия, а также проведено их сравнение с ВВ английской серии, подобранным по нормальной диаграмме.

Геометрические характеристики ВВ с диаметром $D = 200$ мм, полученные в расчете, представлены на рис. 6, 7. Коэффициент полезного действия ВВ приводится на рис. 8. Видно, что ВВ английской серии имеет более широкую лопасть, что связано с эллиптическим распределением циркуляции по радиусу ВВ и расчетным углом атаки в сечениях лопасти $\alpha < 4^\circ$ для уменьшения потерь, связанных со сжимаемостью потока. Расчетный угол крутки по радиусу также меньше, что связано с большей расчетной скоростью для ВВ английской серии.

Сравнение КПД расчетного ВВ с КПД ВВ, выбранного по нормальной диаграмме, показало следующее. При диаметре ВВ $D = 150$ мм, 250 мм расчетный КПД существенно превышает

КПД английской серии, при $D = 200$ мм превышение незначительное. Некоторое уменьшение расчетного КПД при $D = 250$ мм связано с тем, что, несмотря на увеличение диаметра ВВ, уменьшается ширина и число Re в сечениях лопасти. Большая разница в значениях КПД для расчетного ВВ и ВВ английской серии при $D = 150$ мм, 250 мм связано с тем, что относительная ширина лопасти в расчетном варианте при увеличении диаметра винта уменьшается, а в ВВ английской серии остается постоянной.

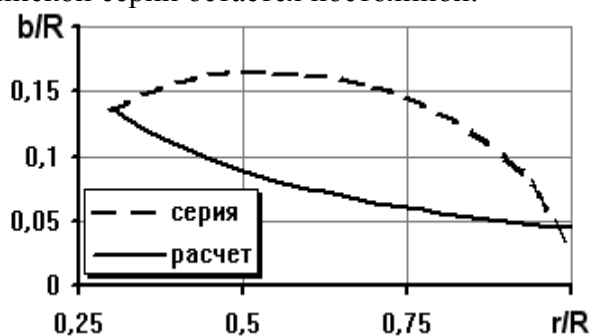


Рис. 6. Относительная хорда лопасти

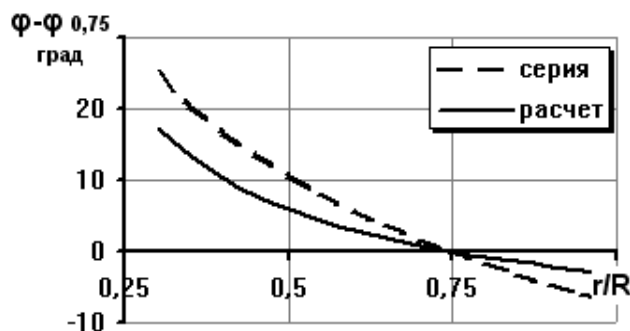


Рис. 7. Угол геометрической крутки

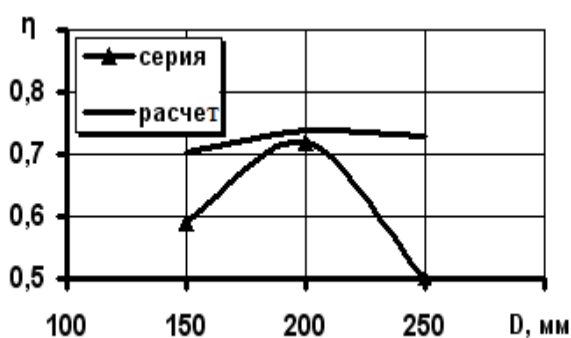


Рис. 8. Коэффициент полезного действия

проведен подбор ВВ английской серии по нормальной диаграмме.

В результате была получена зависимость КПД ВВ английской серии от диаметра винта для различных значений степени редукции и диаметра ВВ (рис. 9). Аналогичная зависимость, полученная с помощью проектировочного расчета ВВ, представлена на рис. 10.

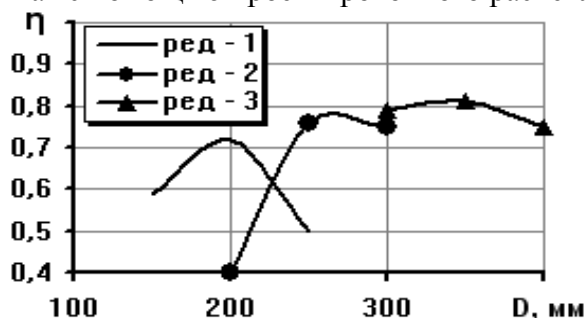


Рис. 9. Коэффициент полезного действия воздушного винта английской серии

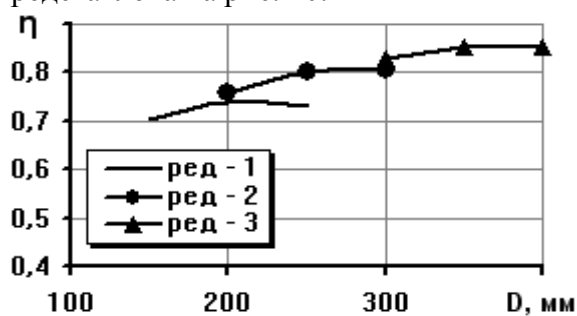


Рис. 10. Расчетный коэффициент полезного действия воздушного винта

Анализ приведенных результатов позволил получить зависимость максимального значения КПД ВВ от степени редукции для вариантов расчета и подбора ВВ по нормальной диаграмме (рис. 11), а также величины диаметров ВВ, соответствующие максимуму КПД, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Степень редукции	1	2	3
Расчет	200	300	350
Подбор	200	250	350

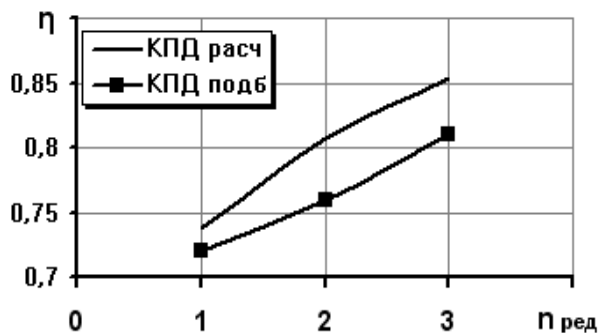


Рис. 11. Максимальный коэффициент полезного действия воздушного винта

ских характеристик профилей сечений при малых числах Re позволяет уточнить характеристики ВВ, полученные путем подбора по экспериментальной диаграмме.

Применение редуктора в силовой установке мини-БЛА позволяет увеличить коэффициент полезного действия воздушного винта на расчетном режиме. Воздушные винты, геометрические характеристики которых получены с помощью проекторочного расчета, дают возможность получить более высокие значения КПД, чем винты, подобранные по экспериментальным диаграммам ВВ, применяемых в пилотируемой авиации.

Таким образом, принятый на практике подбор воздушного винта для мини-БЛА по нормальной диаграмме может дать значительные погрешности, обусловленные докритическим режимом обтекания сечений лопасти вследствие низкого числа Re потока.

Проекторочный расчет ВВ для мини-БЛА позволяет учесть влияние числа Re и получить такие геометрические характеристики ВВ по радиусу лопасти, которые обеспечивают максимальный КПД на данном режиме полета. Проекторочный расчет ВВ при наличии аэродинамических

ЛИТЕРАТУРА

1. Остославский И.В. Аэродинамика самолета. - М.: Оборонгиз, 1957.
2. Александров В.Л. Воздушные винты. - М.: Госиздобронпром, 1951.
3. Арпьев А.Н. Вопросы проектирования легких самолетов // Анализ проектного решения. - М.: МГТУ ГА, 2000.
4. Болонкин А.А. Теория полета летающих моделей. - М.: ДОСААФ, 1962.
5. Масленников М.М., Раппорт М.С. Авиационные поршневые двигатели. - М.: Госиздобронпром, 1951.

CALCULATION OF PROPELLER UAV BASED REYNOLDS NUMBER AND DEGREE OF REDUCTION

Gerasimov O.V., Kritsky B.S.

Presented methodology to the design and check calculations of an isolated propeller for mini-UAV based on the vortex theory of Zhukovsky. Results of the calculation of propeller mini-UAVs and their comparison with results matching propeller on a normal chart. Shows the effect of Re , as well as the degree of reduction in the aerodynamic and geometric characteristics of the propeller.

Key words: propeller, unmanned aerial vehicle, efficiency.

Сведения об авторах

Герасимов Олег Викторович, 1962 г.р., окончил Харьковское ВВАИУ (1985), кандидат технических наук, научный сотрудник Истринского экспериментально-механического завода, автор 24 научных работ, область научных интересов – численные методы и их алгоритмическая реализация, аэродинамика несущего винта.

Крицкий Борис Сергеевич, 1949 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1976), доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, автор более 150 научных работ, область научных интересов – численные методы в аэрогидродинамике, аэродинамика и аэроакустика винтокрылых летательных аппаратов.