

Численное исследование эффективности винтокольцевых движителей с однорядными винтами с равным покрытием и различным количеством лопастей

Н.В. ПРОДАН,
канд. физ.-мат. наук,
А.И. МЕЛЬНИКОВА,
аспирант
(БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург;
ФГАОУ ВО
«Севастопольский
государственный
университет»,
Севастополь)
angelika044@gmail.com

Проведено сравнение эффективности различных подходов к изменению формы конструкции воздушных винтов для удовлетворения строгих требований по габаритным размерам движителя на летательном аппарате. Рассмотрен параметр геометрического покрытия воздушного винта в плане и определяется наиболее предпочтительный конструктивный способ повышения его значения для снижения габаритов движителя без существенной потери аэродинамических свойств. По результатам исследования получено, что с точки зрения аэродинамики и удельной тяги на единицу мощности наиболее эффективно увеличение покрытия воздушного винта за счет увеличения величины хорды лопасти. Характер изменения аэродинамических свойств при изменении величины покрытия также существенно зависит от формы профиля лопастей.

Винт, винтокольцевой движитель, лопасть, покрытие, численное моделирование

В условиях ограничения габаритных размеров беспилотных воздушных судов целесообразно прибегать к использованию винтокольцевых движителей, которые позволяют достигать с ометаемой винтами площади мощность больше, чем в случае изолированных винтов. Эффективность кольца тем выше, чем большая мощность подведена к винту, причем увеличение мощности может достигаться различными способами.

Конструктивно, т. е. без изменений силовой установки, приводящей воздушные винты во вращение, увеличение мощности может достигаться либо увеличением величины покрытия воздушного винта в плане, либо увеличением угла установки лопастей воздушного винта. На конструктивном уровне возможно повысить эффективность воздушного кольца либо увеличением величины его покрытия в плане, либо изменением крутки профиля лопасти. Так как изменение крутки лопасти может непредсказуемо повлиять на динамику полета с использованием движителей на воздушных винтах, целесообразно изменение величины покрытия.

Чем выше покрытие винта, тем больше тяга на единицу мощности. Покрытие можно увеличивать за счет увеличения количества лопастей или уменьшения их удлинения, т. е. увеличивая относительную толщину хорды лопасти. Неочевидным является вопрос, какой из этих методов изменения формы воздушного винта наиболее эффективен с точки зрения аэродинамики. Подобные изменения структурно влияют на картину течения, могут приводить к достаточно сложным взаимодействиям пространственных вихревых присоединенных жгутов с поверхностями лопастей или друг с другом. Данный вопрос влияния формы конструкции воздушного винта на его аэродинамику требует особого рассмотрения.

Для анализа данной проблемы берутся различные конструктивные исполнения воздушного винта. Для всех рассматриваемых вариантов сохраняется единым значение покрытия воздушного винта в плане, однако варьируются параметры количества лопастей и величины относительной хорды лопастей. Для сравнения также взят воздушный винт с иным профилированием, но с аналогичным значением покрытия воздушного винта.

Рассматривается три типа винтов в кольце (винтокольцевых движителей) – винт К184В с четырьмя лопастями (рис. 1, а), новый винт К6М-4 с четырьмя лопастями (рис. 1, б), винт К6М-8 с восемью лопастями (рис. 1, в).

Геометрия винта К184В, разработанного для использования в судах на воздушной подушке, подробно описана в монографии [1]. Серия многолопастных винтов К6 была разработана в ЦАГИ (Жуков-

ский) на основе винта К184В. Эта серия винтов отличается большим удлинением лопастей, по сравнению с лопастями винта К184В, и значительно большей круткой. Винты К6М-8 были разработаны на основе винтов К6. Основное отличие – переменная длина хорды b по длине лопасти. Хорда изменяется таким образом, чтобы проекция лопасти на плоскость вращения оставалась прямоугольной. Увеличение хорды у втулки винта позволяет увеличить его прочность и применять винты при высоких частотах вращения. Кроме того, благодаря такой форме обеспечивается благоприятное течение в кольце при низких числах Рейнольдса.

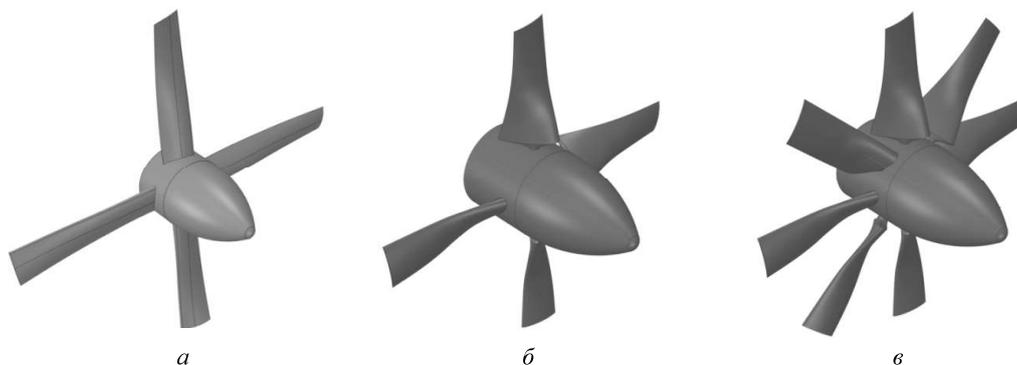


Рис. 1

Характеристики винтов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Винт	Количество лопастей	Относительная хорда \bar{b}	Покрытие σ
К184В	4	0,117	0,4468
К6М-4	4	0,117	0,4468
К6М-8	8	0,058	0,4464

Сравнение винтокольцевых движителей производится в безразмерных величинах:

- коэффициент тяги

$$\alpha = \frac{T}{\rho n_c^2 D^4}; \quad (1)$$

- коэффициент мощности

$$\beta = \frac{N}{\rho n_c^3 D^5}. \quad (2)$$

Здесь: ρ – плотность; n_c – частота вращения, c^{-1} ; D – диаметр винта, м; T – тяга; N – мощность.

Относительный диаметр втулки винта $d_b/D = 0,258$. Во внутренних сечениях лопасти до текущего относительного радиуса винта $r < 0,572R$ (где R – радиус винта) использованы профили П-117 [1]: П-117-6 (рис. 2, а), П-117-9 (рис. 2, б), П-117-12 (рис. 2, в), П-117-15 (рис. 2, г), П-117-1 (рис. 2, д). Во внешних сечениях лопасти используются профили П-105аМ [1]: П-105-4,5 (рис. 2, е), П-105а-4,5 (рис. 2, ж), П-105а-6 (рис. 2, з), П-105а-9 (рис. 2, и), П-105а-12 (рис. 2, к). В винтах К6М профили П-117 деформировались за счет увеличения хорды.

Форма лопастей профилируется изменением по размаху лопасти таких параметров, как угол поворота $\varphi(r)$, относительная толщина $\bar{c}(r)$, равная отношению максимальной толщины лопасти c в сечении r к длине хорды аэродинамического профиля b в сечении r , относительная кривизна аэродинамического профиля в сечении $\bar{f}(r)$, равная отношению максимальной кривизны лопасти f в сечении r к длине хорды аэродинамического профиля b в сечении r , и относительная хорда профиля $\bar{b}(r)$, равная отношению максимальной длины хорды b в сечении r к диаметру воздушного винта D .

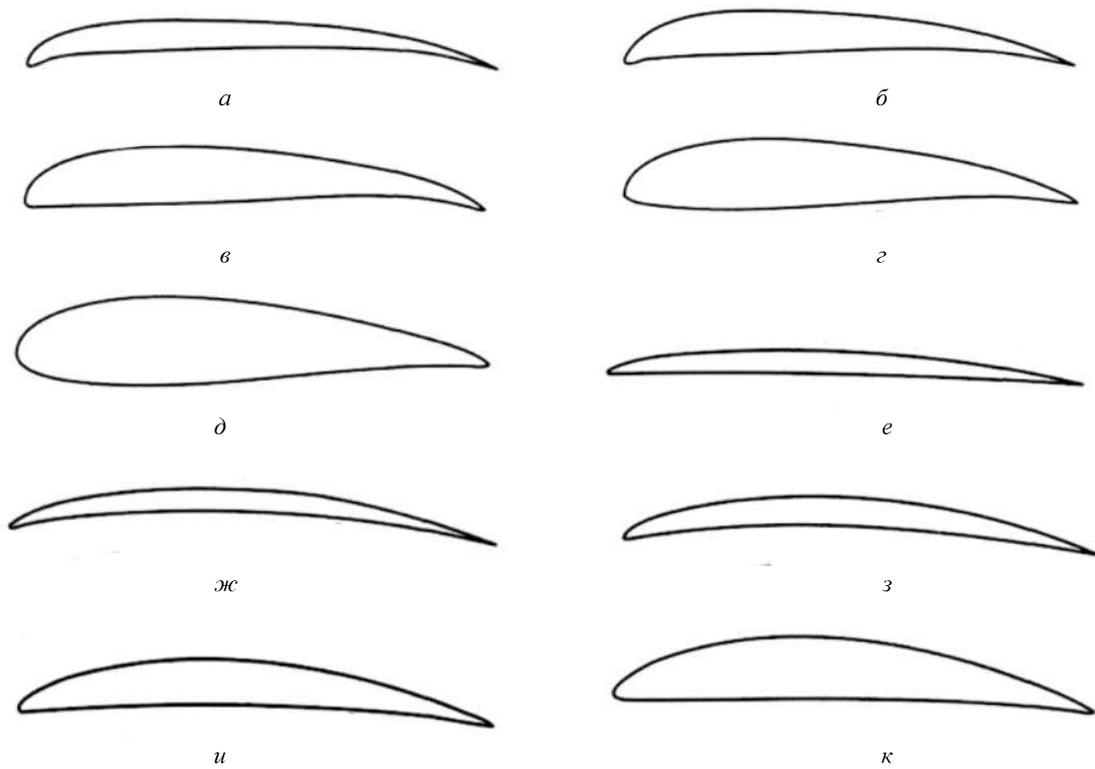


Рис. 2

Приведем графики изменения относительной толщины $\bar{c}(r)$ (рис. 3), угла поворота $\varphi(r)$ (рис. 4) и относительной кривизны $\bar{f}(r)$ (рис. 5) для воздушного винта КБ.

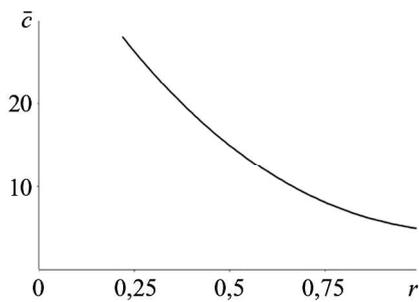


Рис. 3

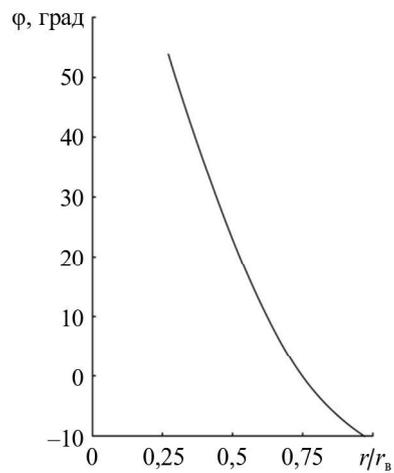


Рис. 4

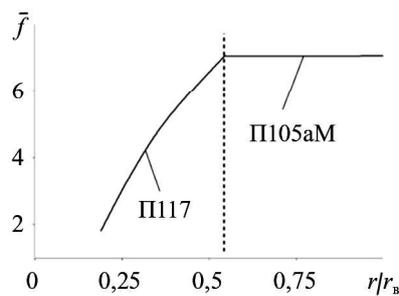


Рис. 5

Геометрия винтокольцевого движителя в общем виде представлена на рис. 6.

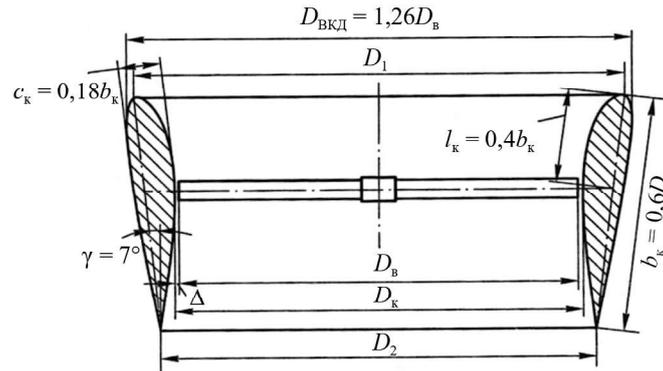


Рис. 6

Относительная кривизна профиля П-105аМ принимает постоянное значение по размаху лопасти, равное $\bar{f} = 7\%$. У профиля П-117 она меняется по закону $\bar{f} = 11 - \bar{c}/3$. Удлинение лопастей повышает их аэродинамическое качество, с другой стороны, из-за увеличения количества лопастей усиливается их негативное влияние друг на друга и увеличиваются потери [2]. Таким образом, возникает вопрос оптимизации [3].

Используемый в работе численный метод применяли в работе [4]. В статье [5] выполнено сравнение биротативного двухрядного винта с четырехлопастным и восьмиллопастными винтами. Показано, что в случае до $\beta < 0,3 \div 0,4$ удовлетворительное совпадение (в пределах 5 %) можно получить с использованием стандартной модели турбулентности $k-\omega$ -SST [6]. При $\beta > 1$ более высокая точность получена с использованием четырехпараметрической tSST-модели [7].

Настройка моделей турбулентности и сеток ведется по методике [8]. В расчетах используется многосеточный метод на неструктурированных сетках [9]. В целом постановка задачи повторяет работу [10]. На всех твердых поверхностях задано сгущение гексаэдральными ячейками. Толщина первого слоя – 0,005 мм, число слоев – 9, отношение толщин соседних слоев – 1,5. Начальный уровень турбулентности потока на входе в винтокольцевой движитель – 5 %, считается, что турбулентная вязкость превосходит динамическую вязкость в десять раз. Суммарное количество ячеек определялось по достижении сеточной сходимости (примерно 1 млн ячеек). Все расчеты проводились для винта диаметром 1 м на частоте вращения 2000 об/мин.

Приведем результаты расчетов.

Сравнение характеристики $\alpha = f(\beta)$ винтокольцевых движителей с винтами трех типов представлено на рис. 7, характеристики $\alpha = f(\varphi)$ – на рис. 8.

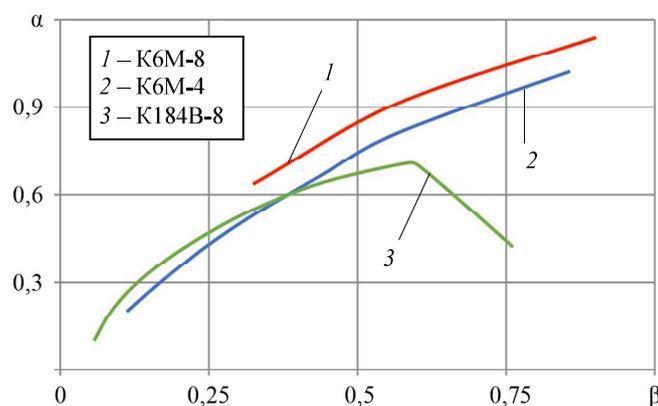


Рис. 7

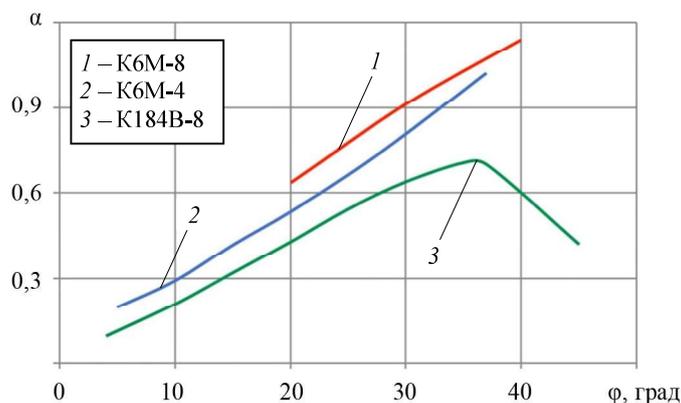


Рис. 8

При проектировании винтов с более широкими лопастями К6М-4 и с большим количеством лопастей ставилась задача обеспечить увеличение силы тяги в области умеренных нагрузок $\beta = 0,6 \div 0,8$.

На рис. 9 приведена зависимость показателя эффективности α/β от угла установки лопасти φ и коэффициента подведенной мощности β .

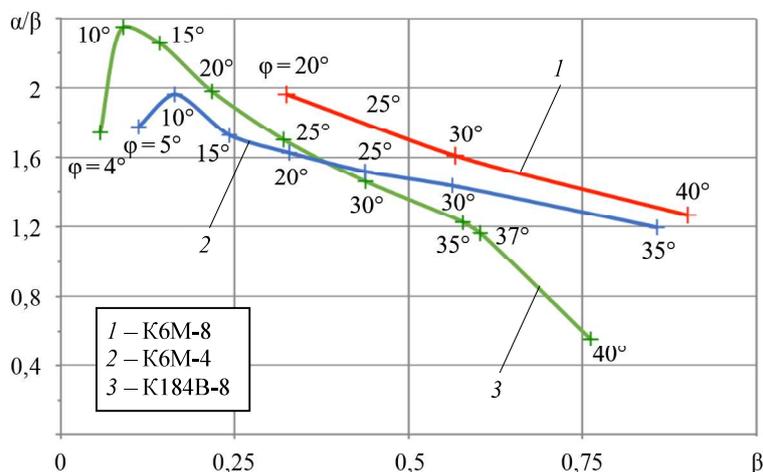


Рис. 9

Как видим (см. рис. 9), воздушные винты серии К6М имеют локальный максимум по критерию энергетической эффективности α/β при малом коэффициенте мощности, где $\beta < 0,3$. Однако при больших значениях β , т. е. на режимах большой рабочей нагрузки, реализующихся на компактных по габаритам движителях, разработанные воздушные винты с большой круткой лопасти менее эффективны по сравнению с воздушным винтом К184В.

Характеристики винтокольцевых движителей с винтами всех трех типов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Угол установки, град	К6М-4			К6М-8			К184В		
	α	β	α/β	α	β	α/β	α	β	α/β
4	-	-	-	0,099	0,057	1,737	-	-	-
5	0,199	0,112	1,777	-	-	-	-	-	-
10	0,292	0,164	1,780	0,212	0,090	2,356	-	-	-
15	0,419	0,242	1,731	0,321	0,142	2,261	-	-	-
20	0,535	0,329	1,626	0,430	0,217	1,982	0,637	0,324	1,966
25	0,665	0,437	1,522	0,545	0,320	1,703	-	-	-
30	0,809	0,563	1,437	0,640	0,438	1,233	0,913	0,567	1,610

Угол установки, град	К6М-4			К6М-8			К184В		
	α	β	α/β	α	β	α/β	α	β	α/β
35	-	-	-	0,708	0,578	1,225	-	-	-
37	1,024	0,857	1,195	0,701	0,603	1,163	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	1,140	0,901	1,265
45	-	-	-	0,422	0,762	0,554	-	-	-

Вследствие большей крутки воздушных винтов отрывной режим работы достигается при меньших углах установки лопастей φ , что негативно влияет на аэродинамические характеристики и энергоэффективность на больших углах установки лопастей φ . За счет этого воздушный винт К184В при аналогичном покрытии более эффективен при больших значениях коэффициента мощности β , чем винты серии К6М.

Увеличение покрытия воздушного винта за счет увеличения количества лопастей приводит к заметному ухудшению аэродинамических характеристик. Так как хорда аэродинамического профиля в сечении лопасти меньше, чем в случае увеличения ширины лопасти, локальное число Рейнольдса при натекании на переднюю кромку лопасти имеет более низкие значения. В результате реализации режима с пониженным числом Рейнольдса поток менее турбулизирован по сравнению с потоком, реализующимся при работе воздушного винта с широкими лопастями, в связи с чем более склонен к отрыву при увеличении угла атаки на элементарные сегменты лопасти. Данная картина демонстрируется на рис. 9, где явно видны отрывные режимы на умеренных и высоких значениях коэффициента мощности для воздушного винта К6М-8.

Таким образом, прототип воздушного винта К184В в случае применения в винтокольцевых движителях беспилотных летательных аппаратов отличается при умеренных и больших нагрузках мощностью на ометаемую площадь более высокой эффективностью, чем винты серии К6М. Отметим, что критерий α/β неполностью отражает работу винтов на различных скоростях вращения, в дальнейшем требуется исследовать эффективность показателя T/N при различных скоростях вращения и числах Рейнольдса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Фундаментальные основы аэродинамики, динамики полета и управления транспортных беспилотных авиационных систем нового поколения с распределенной силовой установкой», № FEFM-2024-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Остроухов С.П.* Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. М.: Физматлит, 2014. 328 с.
2. *Zhang T., Barakos G.N.* Review on Ducted Fans for Compound Rotorcraft // *The Aeronautical Journal*. 2020. Vol. 124. Iss. 1277. P. 941–974.
3. *Biava M., Barakos G.N.* Optimisation of Ducted Propellers for Hybrid Air Vehicles Using High-Fidelity CFD // *The Aeronautical Journal*. 2016. Vol. 120. Iss. 1232. P. 941–974.
4. *Булат П.В., Продан Н.В., Вокин Л.О.* Сравнение моделей турбулентности при расчете модельного винтокольцевого движителя // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2022. № 4. С. 74–80.
5. *Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н., Мельникова А.И.* Исследование винтокольцевых движителей. Сравнение биротативного двухрядного винта с четырехлопастным и восьмиллопастными винтами // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2023. № 2. С. 60–66.
6. *Menter F.R.* Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. № 8. P. 1598–1605.
7. *Menter F.R., Langtry R., Volker S.* Transition Modelling for General Purpose CFD Codes // *Flow, Turbulence, and Combustion*. 2006. Vol. 77. P. 277–303.
8. *Volkov K.* Multigrid and Preconditioning Techniques in CFD Applications // *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications* / Eds. Z. Driss, B. Necib, H.-C. Zhang. Springer, 2018. P. 83–149.
9. *Volkov K.* Numerical Analysis of Navier–Stokes Equations on Unstructured Meshes // *Handbook on Navier–Stokes Equations: Theory and Analysis* / Ed. D. Campos. N.Y: Nova Science, 2017. P. 365–442.

10. Денисенко П.В. и др. Численное моделирование обтекания винтокольцевого движителя квадрокоптера и определение его тяговых характеристик на различных режимах полета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 49–56.

Поступила в редакцию 12.08.24

После доработки 25.09.24

Принята к публикации 25.09.24

Numerical Study of the Efficiency of Single-Row Ducted Propellers with Equal Solidity and a Different Number of Blades

N.V. PRODAN^{1,2} AND A.I. MEL'NIKOVA^{1,2}

¹ Baltic State Technical University “Voenmeh”, Saint Petersburg

² Sevastopol State University, Sevastopol

This paper compares efficiency of various approaches to changing the design shape of propellers to meet strict requirements for the overall dimensions of the propulsion unit on an aircraft. Propeller solidity ratio is considered and a method for increasing its value to reduce the dimensions of the propulsion unit without significant loss of aerodynamic properties, is proposed. According to the results of the study, it was found that, in terms of aerodynamics and specific thrust per unit of power, the most effective way to increase a propeller solidity ratio is through an increase in the chord value of the blade. The nature of the change in aerodynamic properties when changing the propeller solidity ratio also significantly depends on the shape of the blade profile.

Propeller, ducted propeller, propeller blade, solidity ratio, numerical simulation