

Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

ИНФОРМАТИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 629.7.035

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185111>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LFBYQC>

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ВИНТОКОЛЬЦЕВОГО ДВИЖИТЕЛЯ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПЕРЕДНЕЙ ЧАСТЬЮ КОЛЬЦЕВОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Андрей Сергеевич Батраков¹, Ляйсан Ильдусовна Гарипова²

^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, Республика Татарстан

¹batrakov_a.c@mail.ru

²lyaysan_garipova@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматривается возможность расширения диапазона эффективного режима работы винтокольцевого движителя за счет механизации кольцевого обтекателя. Под механизацией подразумевается управление передней частью кольцевого обтекателя по аналогии с предкрылком крыла летательного аппарата. Исследование выполнено на базе численного решения системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS). Результаты исследования показали, что увеличение угла раскрытия носовой части кольцевого обтекателя позволяет увеличить коэффициент тяги движителя при работе на месте. На режиме обтекания с большой скоростью предпочтительнее уменьшать угол раскрытия носовой части.

Ключевые слова: вычислительная аэродинамика, винтокольцевой движитель, аэродинамические характеристики

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01110, <https://rscf.ru/project/23-79-01110/>.

Для цитирования: Батраков А.С., Гарипова Л.И. Численное исследование обтекания винтокольцевого движителя с управляемой передней частью кольцевого обтекателя // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185111>

COMPUTER SCIENCE, MODELING AND MANAGEMENT

Original article

NUMERICAL STUDY OF THE FLOW AROUND THE DUCTED ROTOR PROPULSION WITH CONTROLLED LEADING PART OF THE RING FAIRING

Andrey S. Batrakov¹, Lyaysan I. Garipova²

^{1,2}Kazan state technical university named after A.N. Tupolev,
Kazan, Republic of Tatarstan

¹batrakov_a.c@mail.ru

²lyaysan_garipova@mail.ru✉

Abstract: In this paper, numerical simulation of the flow around a ducted rotor propulsor is performed. The cylindrical duct allows to significantly increase the efficiency of the rotor in the hover mode. With increasing axial flight speed, the efficiency of the

cylindrical duct decreases. At high axial flight speed, the cylindrical duct creates additional drag. The VK1-K184V ducted rotor propulsor, for which experimental data are available, is considered as the base object of simulation. Numerical simulation is carried out in the ANSYS FLUENT software package based on the solution of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations in a steady-state statement. The steady-state statement is applicable to the problem under consideration due to the presence of a periodic flow pattern. The Spalart-Allmaras turbulence model is used to close the system of equations. The results of numerical simulation showed good agreement with the experimental data. In this paper, a modification of the ducted rotor propulsor in the form of mechanization of the duct is considered. By mechanization we mean ensuring the possibility of controlling the position of the front part of the cylindrical duct, by analogy with the slat on the wing of an aircraft. The following control options were studied: slat extension to increase the chord of the cylindrical duct with the formation of an aerodynamic gap; slat extension to increase the chord of cylindrical duct with the overlap of the aerodynamic gap using a sliding surface; slat deflection leading to a change in the opening coefficient of the cylindrical duct (the ratio of the duct diameter along the leading edge of the cross-section to the inner diameter of the duct). It is shown that a promising direction is the use of mechanization that allows regulating the opening coefficient of the duct. In the hover mode, a high opening coefficient of the duct provides additional thrust due to an increase in the area of vacuum in the front part of the fairing, and at a high axial flight speed, a decrease in the opening coefficient of the duct allows to reduce the area of flow stagnation, thereby reducing aerodynamic drag. The obtained data indicate that by using rational control of the

cylindrical duct mechanization it is possible to increase the thrust of the propeller by 3% and reduce the required torque by 5%.

Keywords: computational aerodynamics, ducted rotor propulsor, aerodynamic characteristics

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01110, <https://rscf.ru/project/23-79-01110/>.

For citation: Batrakov A.S., Garipova L.I. Numerical study of the flow around the ducted rotor propulsion with controlled leading part of the ring fairing. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185111>

Введение

В настоящее время активно развивающимся направлением является разработка беспилотных летательных аппаратов. Такие летательные аппараты имеют широкий круг применения. Перспективные летательные аппараты должны обладать высокими аэродинамическими характеристиками в широком диапазоне режимов работы: вертикальный взлет и посадка, высокие скорости полета, высокая продолжительность полета, высокая грузоподъемность.

Обеспечение высоких показателей беспилотного летательного аппарата во многом определяется совершенством движителей. В качестве движителя традиционно используется воздушный винт [1, 2]. Также распространённым решением является применение компоновки воздушного винта с профилированным кольцевым обтекателем, или винтокольцевого движителя (ВКД). Летательные аппараты с применением данного типа движителя могут иметь различную

аэродинамическую схему: самолетный тип [3], летающее крыло [4, 5], квадрокоптеры [6, 7] и другие. В зависимости от компоновки летательного аппарата на работу ВКД может влиять аэродинамическая интерференция [8].

Аэродинамические характеристики винтокольцевых двигателей исследовались в работах [9, 10].

В настоящее время сохранилась актуальность исследования аэродинамики винтокольцевого двигателя. В частности, проводятся параметрические исследования о влиянии различных параметров компоновки на аэродинамические характеристики. В работе [11] рассмотрено влияние радиального зазора между кольцом и законцовками винта ВКД. В работах [12, 13] проведен сравнительный анализ различных типов винтов для ВКД.

Современным методом исследования аэродинамики винтокольцевого двигателя является применение численного моделирования на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса [14-17]. Обобщенные результаты по параметрическим исследованиям с рекомендациями по проектированию винтокольцевых двигателей представлены в работе [18].

Результаты исследований показали, что кольцевой обтекатель уменьшает концевые потери воздушного винта и создает дополнительную тягу за счет пониженного давления в области передней кромки кольца. Следует отметить, что эффективность кольцевого обтекателя существенно зависит от режима работы винта. Максимальный прирост по тяге наблюдается на режиме работы винта на месте. Причем чем выше нагруженность винта, тем выше тяга, создаваемая кольцевым обтекателем. С увеличением скорости полета давление на передней

кромке обтекателя увеличивается и соответственно уменьшается его тяга. При высокой скорости полета обтекатель перестает создавать положительную тягу и создает дополнительное сопротивление. Таким образом, область целесообразного применения ВКД ограничена. По некоторым оценкам Область целесообразного применения ВКД находится в области от 0 до 0.4 коэффициент режима работы винта [19]. Актуальной задачей является расширение рационального диапазона применения ВКД. В настоящей работе рассматривается возможность применения кольцевого обтекателя с предкрылком для повышения эффективности ВКД.

Объект исследования

В качестве базовой модели рассматривается модель ВК1-К184В [20]. Данная модель ВКД выбрана ввиду того, что имеются экспериментальные данные. К тому же эту модель используют в качестве базовой другие исследователи в современных работах [21]. Винтокольцевой движитель состоит из воздушного винта К184В. Лопasti данного винта прямоугольной формы в плане в концевой части имеют относительно небольшую толщину $\bar{c} \leq 12\%$ и высокую кривизну $\bar{f} = 7\%$. Геометрические характеристики лопасти винта К184В представленные в графическом виде в работе [20] аппроксимированы с помощью системы уравнений 1.

$$\bar{c} = -5,71\bar{r}^{-4} - 1,88\bar{r}^{-3} + 48,31\bar{r}^{-2} - 78,36\bar{r} + 41,94$$

$$\bar{f} = 396,77\bar{r}^{-4} - 583,43\bar{r}^{-3} + 293,58\bar{r}^{-2} - 44,01\bar{r} + 3,17, \text{ при } \bar{r} < 0,6$$

$$\bar{f} = 7, \text{ при } \bar{r} \geq 0,6$$

$$2\frac{y_{\text{сим}}}{c} = -3,84\bar{x}^{-4} + 10,03\bar{x}^{-3} - 11,96\bar{x}^{-2} + 5,63\bar{x} + 0,12 \quad (1)$$

$$\frac{\overline{y_{cp.l}}}{\overline{f}} = -3,74\overline{x}^{-4} + 9,3\overline{x}^{-3} - 11,28\overline{x}^{-2} + 5,75\overline{x}$$

$$\overline{\varphi} = 156,17\overline{r}^{-4} - 266,75\overline{r}^{-3} + 89,01\overline{r}^{-2} + 7,5\overline{r} + 6,87$$

Кольцевой обтекатель, используемый в установке ВК1-К184В, имеет следующие основные параметры (Рисунок 1). Относительная ширина кольца

$\overline{b}_k = \frac{b_k}{D_k} = 0,6$, где D_k – наименьший внутренний диаметр кольца. Профиль сечения

кольца серии Р-П П. П. Красильщикова с максимальной относительной толщиной $\overline{c}_k = 18\%$ и максимальной относительной кривизной $\overline{f}_k = 4\%$. Угол наклона хорды

профиля кольца к оси винта $\gamma = -7^\circ$. Плоскость вращения винта расположена на расстоянии $\lambda_g = 0,4b_k$ от носика профиля кольца. Коэффициент раствора кольца

$\overline{F}_1 = \frac{D_1^2}{D_k^2} = 1,45$, а коэффициент расширения $\overline{F}_2 = \frac{D_2^2}{D_k^2} = 1,1$; где D_1 и D_2 диаметры

входного и выходного сечения кольца, соответственно.

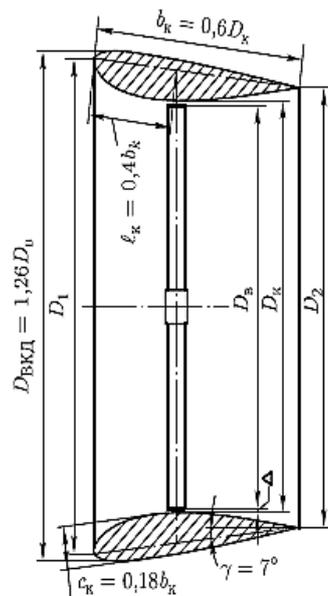


Рисунок 1 – Геометрические параметры кольцевого обтекателя

Для выполнения численного моделирования аэродинамики была построена CAD-модель в программном комплексе ICEM CFD (Рисунок 2). В центре винта располагается упрощенная геометрия двигателя и втулки винта.

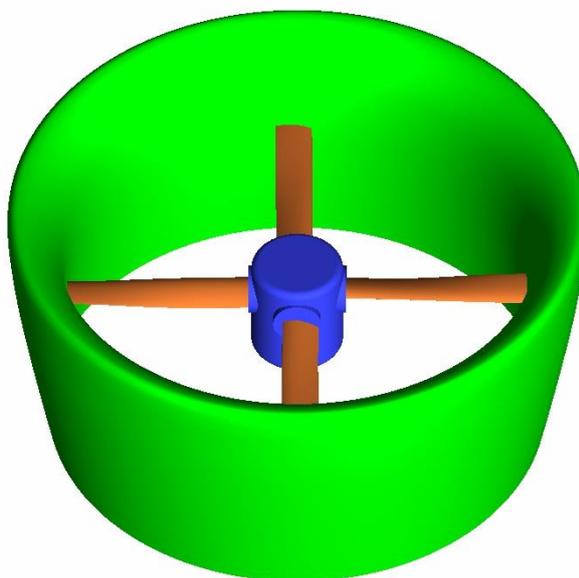


Рисунок 2 – CAD-модель винтокольцевого движителя

Численный метод

В настоящей работе рассматривается осевое обтекание винтокольцевого движителя – основной режим для судов на воздушной подушке. Особенностью осевого обтекания является периодичность потока. Период соответствует количеству лопастей винта. Учитывая данную особенность расчеты можно проводить только для одной лопасти винта применяя соответствующие граничные условия. Расчетная область представляет собой цилиндрический сектор (Рисунок 3.а).

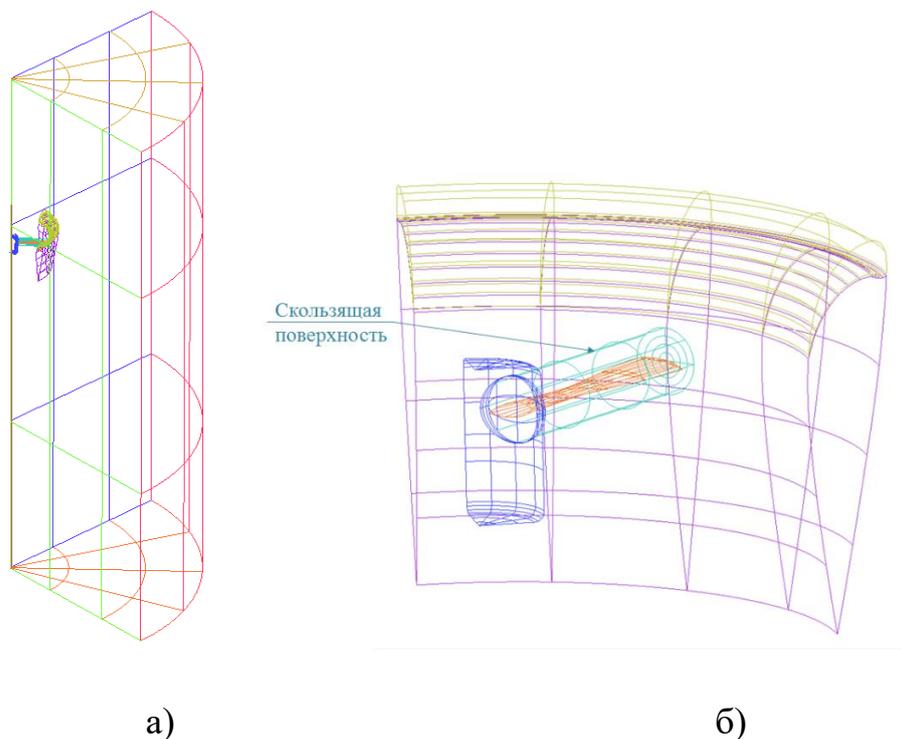


Рисунок 3 – Расчетная область возле ВКД (а); разделение расчетной области на две части (б)

Границы расчетной области удалены вверх по потоку на расстоянии $5 R$ винта, вниз по потоку – на расстоянии $10 R$ винта. Боковая граница удалена на расстояние $5 R$ винта. Расчетная сетка построена в программном комплексе ICEM CFD по многоблочной технологии. Для реализации изменения угла установки лопасти винта расчетная область разделена на 2 части: одна часть содержит лопасть винта, а другая – всю остальную область. Сопряжение зон осуществляется по технологии скользящих сеток (Рисунок 3.б). Во внутренней области многоблочная структура состоит из 124 блоков (Рисунок 4.а). Для разрешения пограничного слоя выполнено сгущение сетки до 0.002 мм около стенки. Фактор роста ячеек не более 1.2. Также выполнены сгущения к концевой и корневой частям лопасти, и к передней и задней кромкам лопасти. Количество ячеек в данной области составило 1.7 млн.

Внешняя область состоит из 3.9 млн ячеек (Рисунок 4.б). Возле профиля обтекателя выполнены сгущения так же, как и для профиля лопасти винта. Таким образом, общий объем расчетной сетки составляет 5.6 млн. ячеек.

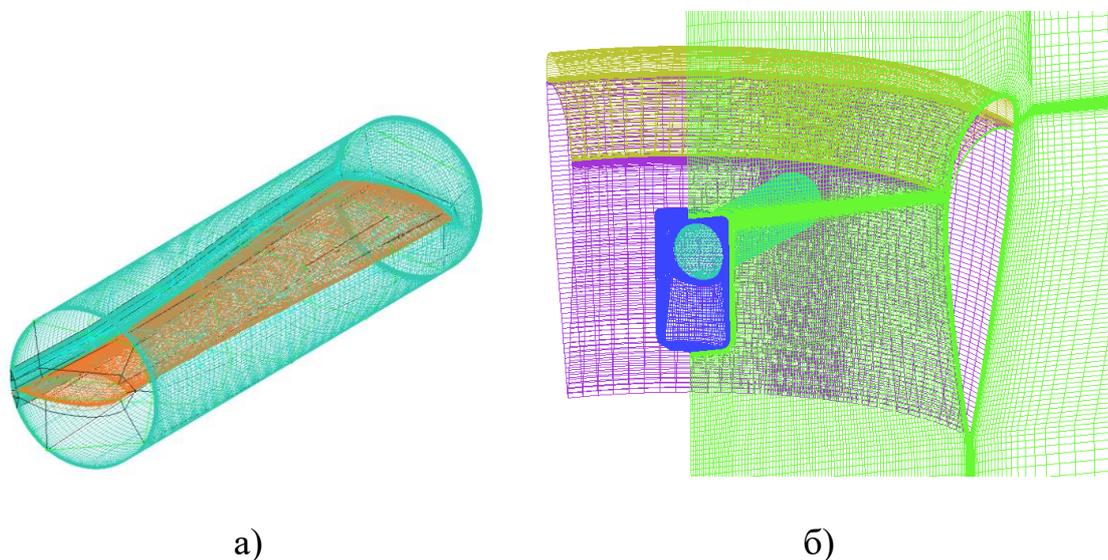


Рисунок 4 – Элементы расчетной сетки: а) расчетная сетка возле лопасти винта; б) расчетная сетка возле обтекателя

Численное моделирование проводится в программном комплексе ANSYS FLUENT на базе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса в стационарной постановке. Стационарная постановка применима для рассматриваемой задачи ввиду наличия периодической картины потока. Для замыкания системы уравнений используется модель турбулентности Спаларта-Аллараса. Выбор модели турбулентности обоснован тем, что модель не требует высоких вычислительных затрат, а также тем, что она успешно применялась другими авторами для решения подобных задач. В качестве среды обтекания используется модель идеального газа с учетом сжимаемости потока. На верхней поверхности расчетной области используется граничное условие входа

потока (Velocity inlet). Для моделирования работы ВКД на месте в качестве граничного условия задавалось малое значение скорости (0.05 м/с), что позволяет избежать проблемы с расчетным алгоритмом. Поверхности лопасти винта, двигателя и обтекателя моделировались в виде твердых сеток без проскальзывания. На нижней границе используется условие с возможностью выхода потока (Pressure-outlet). На боковых поверхностях сектора цилиндрической области задавалось условие периодичности.

Для моделирования потока использовался решатель на основе коррекции давления с использованием связанного алгоритма. Дискретизация по пространству для уравнений основных переменных выполняется по схеме второго порядка точности. Для определения градиентов параметров потока используется схема наименьших квадратов (Least-squares cell based).

Апробация построенной численной модели выполнена на основе экспериментальных данных для прототипа. На рисунке 5 представлено сравнение полученных данных для режима работы на месте ВКД ВК1-К184В с экспериментальными данными. На графике представлены такие характеристики как коэффициент тяги α и коэффициент мощности винта β , вычисляемые по формулам:

$$\alpha = \frac{P_{эфф}}{\rho n_c^2 D_e^4}, \quad \beta = \frac{2\pi M}{\rho n_c^2 D_e^5},$$

где $P_{эфф}$ – эффективная тяга винта или ВКД, ρ – плотность воздуха на высоте H , n_c – частота вращения винта об/с, D_e – диаметр винта, M – момент на валу винта, измеряемый динамометром винтового прибора.

Эффективная тяга винта или ВКД, определяется по формуле:

$$P_{эфф} = (P_в + P_к - X) + X_0.$$

Здесь $P_в$ – сила тяги винта в присутствии кольца, $P_к$ – сила тяги кольца при работающем винте, X – лобовое сопротивление винтового прибора с обдувкой его винтом, измеренные аэродинамическими весами, и X_0 – сопротивление винтового прибора при его продувке без винта и кольца.

Для построения поляры ВКД проведены расчеты для серии углов установки лопастей от 10^0 до 40^0 с шагом 10^0 . Характеристики ВКД существенно зависят от параметра μ – относительная поступь винта, определяемая соотношением:

$$\mu = \frac{V}{n_c D_в},$$

где V – скорость движения аппарата.

Из рисунка 5 видно, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными во всем диапазоне рационального применения кольцевого обтекателя, в широком диапазоне углов установки лопастей винта вплоть до наступления срыва потока. Соответственно, построенная математическая модель вполне применима для проведения численных исследований обтекания модернизированного ВКД.

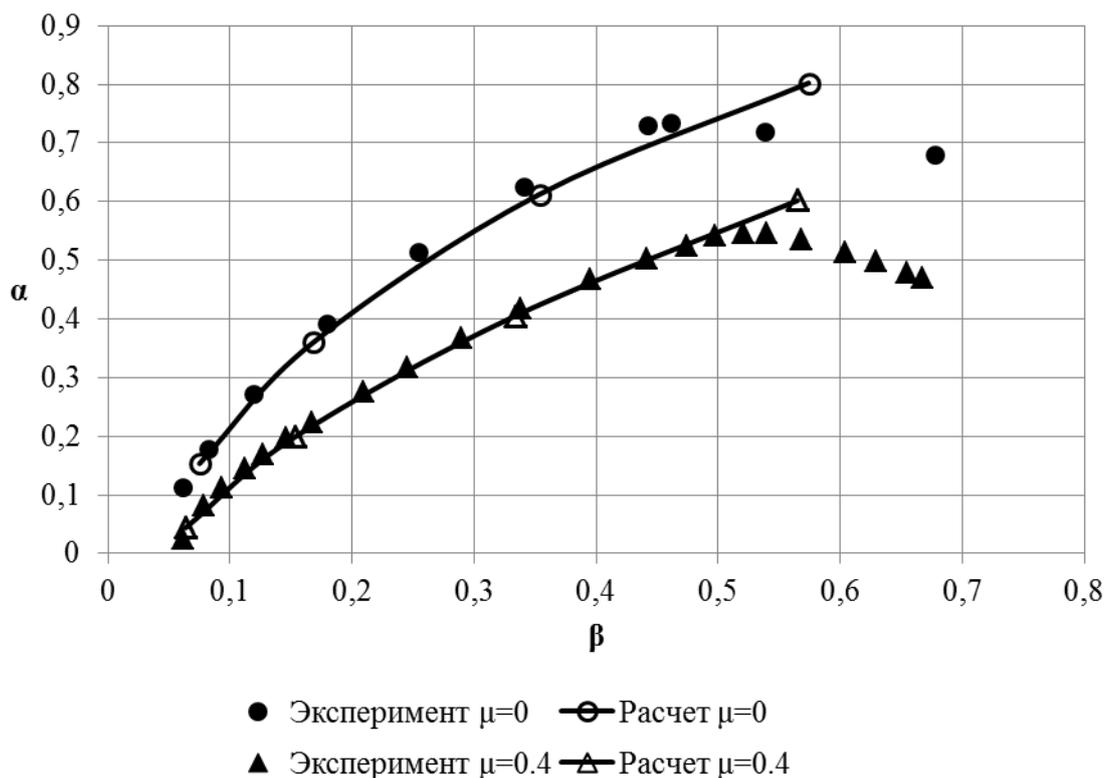


Рисунок 5 – Аэродинамические характеристики ВКД ВК1-К184В

Численное моделирование обтекания ВКД с предкрылком

Эффективность винтокольцевого движителя зависит от множества параметров, в том числе и от геометрических параметров кольцевого обтекателя. В настоящей работе было принято решение рассмотреть изменение аэродинамических характеристик ВКД за счет использования предкрылка. В качестве предкрылка рассматривается носовая часть кольцевого обтекателя, положение которой относительно основной части обтекателя изменялось в ходе исследования.

На первом этапе рассмотрено простое выдвигание носовой части с образованием аэродинамической щели (Рисунок 6). Численное моделирование обтекания данной конфигурации показало, что при существенном увеличении аэродинамической щели эффективность кольцевого обтекателя резко падает.

Следовательно, конфигурация кольцевого обтекателя с образованием аэродинамической щели не позволяет решить поставленную задачу о расширении диапазона эффективного использования ВКД.

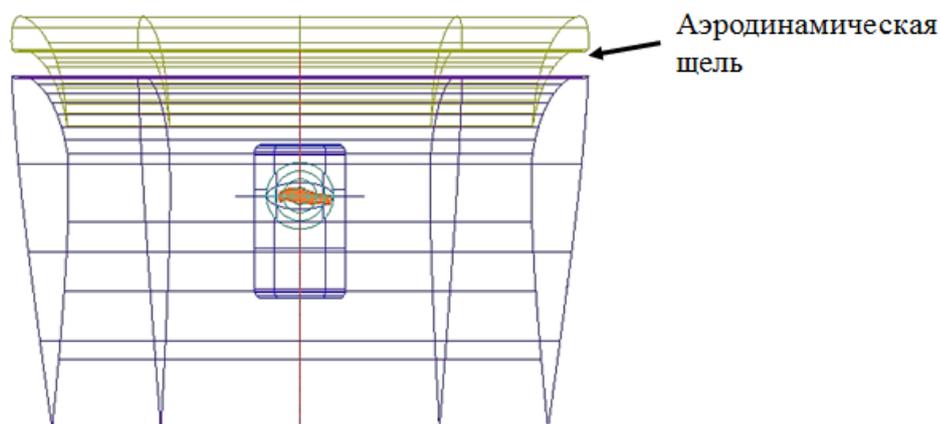


Рисунок 6– Модель ВКД с выдвигной носовой частью

Для предотвращения перетекания воздуха необходимо закрыть аэродинамическую щель. На практике это возможно реализовать с помощью двух цилиндрических стенок, скользящих относительно друг друга. В расчетной CAD – модели аэродинамическая щель закрывалась простой твердой стенкой (Рисунок 7)

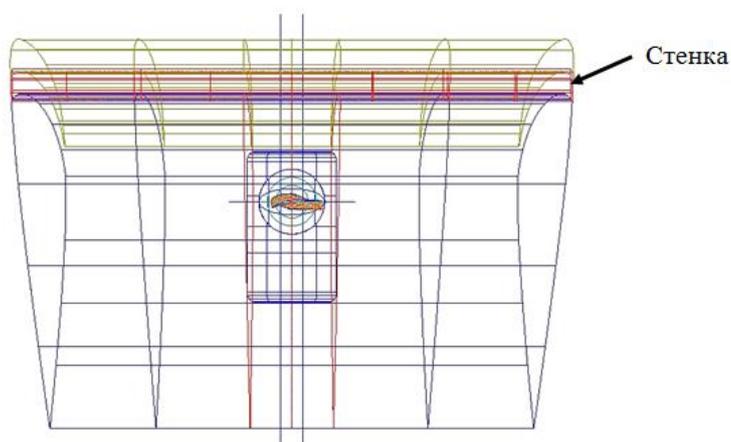


Рисунок 7 – Модель ВКД с переменной хордой кольцевого обтекателя

Для проведения анализа выполнено численное моделирование обтекания при различном значении выдвижении носовой части обтекателя (1, 2.5, 5 и 10 см) при различных углах установки лопастей воздушного винта (10°, 20°, 30°, 40°) и различной скорости набегающего потока (10, 20, 30, 40 и 50 м/с). Расчеты показали, что установка перегородки позволяет сохранить эффективность кольцевого обтекателя. На рисунке 8 представлено, как меняется коэффициент тяги двигателя от выдвижения носовой части обтекателя на максимальное рассматриваемое расстояние при различной скорости обтекания. Увеличение хорды приводит к незначительному увеличению тяги двигателя на режимах с малой скоростью потока (до 10 м/с). При большой скорости потока увеличение хорды приводит к повышению сопротивления и снижению тяги двигателя. С учетом того, что при увеличении хорды кольцевого обтекателя увеличивается потребный крутящий момент, можно сделать заключение, что рассмотренная конфигурация механизации не является рациональной.

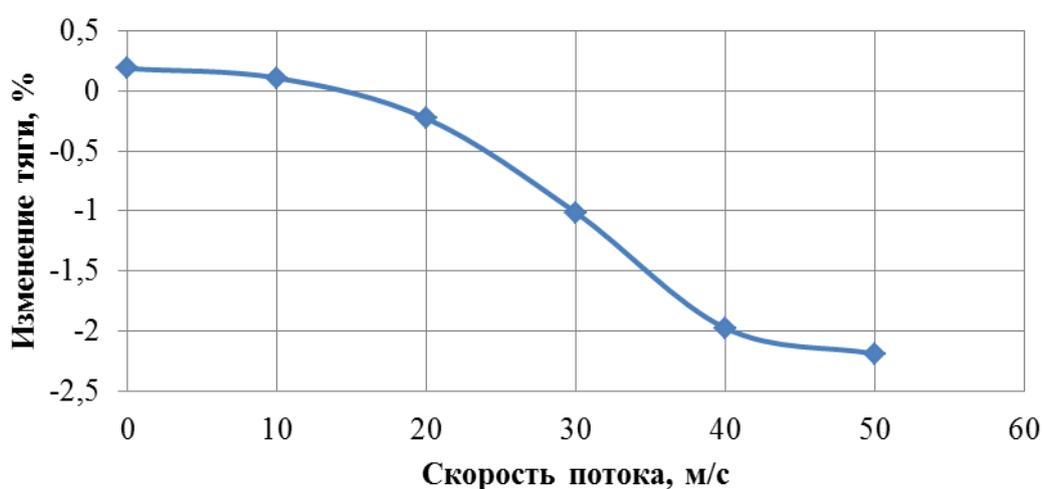


Рисунок 8 – Изменение тяги двигателя с выдвинутой носовой частью обтекателя на 10см в зависимости от осевой скорости потока

Численное моделирование влияния изменения угла раскрытия кольцевого обтекателя на характеристики ВКД

Альтернативным подходом к модификации геометрии обтекателя движителя является изменение угла раскрытия носовой части. Для исследования был построен ряд CAD-моделей ВКД отличающихся углом раскрытия носовой части (Рисунок 9). Рассмотренные модификации могут быть реализованы путем установки шарнирного соединения вблизи внутренней поверхности кольцевого обтекателя. Управление носовой частью может осуществляться за счет привода на внешней стороне кольцевого обтекателя. При таком подходе будет оказано минимальное влияние на качество внутренней аэродинамической поверхности кольцевого обтекателя.

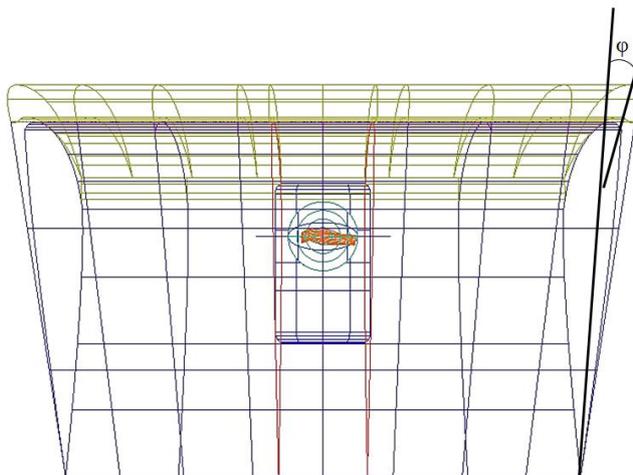


Рисунок 9 – Модификация угла раскрытия носовой части кольцевого обтекателя

Выполнено численное моделирование обтекания винтокольцевого движителя с учетом изменения угла раскрытия носовой части кольцевого обтекателя. Результат представлен на рисунке 10. Из анализа полученных данных следует, что на режиме

работы на месте увеличение угла раскрытия приводит к повышению тяги движителя. Что может объясняться увеличением эффективной площади движителя, что приводит к увеличению объема захватываемого движителем воздуха. При высокой осевой скорости потока увеличение угла раскрытия приводит к снижению тяги движителя за счет более высокого аэродинамического сопротивления кольцевого обтекателя. Можно сделать вывод, что с увеличением скорости движения рационально уменьшать угол раскрытия кольцевого обтекателя. Таким образом, результаты численного моделирования подтвердили гипотезу о том, что механизированный кольцевой обтекатель позволит расширить диапазон эффективного использования ВКД. Следует отметить, что рассмотренная модификация кольцевого движителя приводит к уменьшению требуемого крутящего момента на 3-5%.

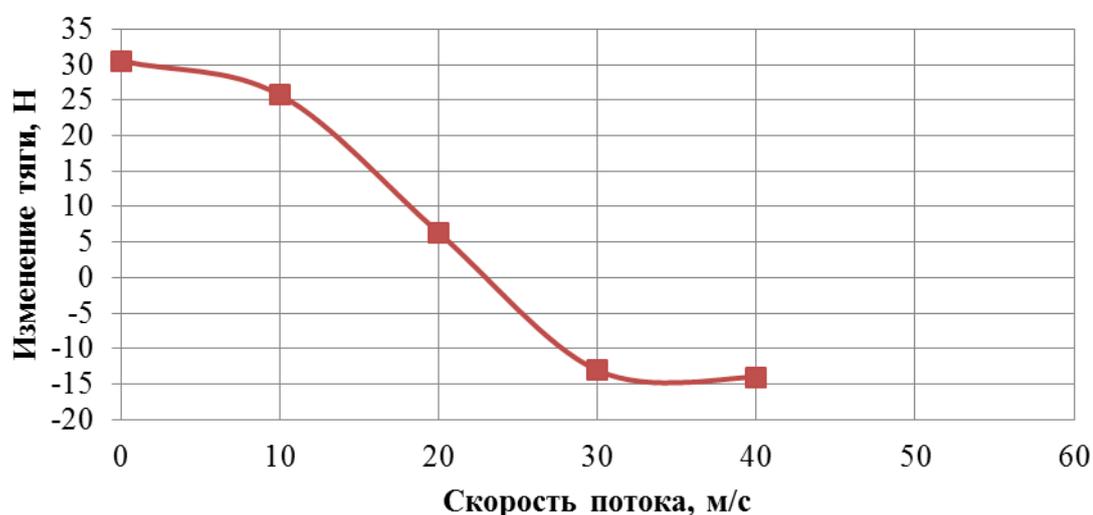


Рисунок 10 – Изменения тяги ВКД с увеличенным коэффициентом раскрытия в зависимости от скорости потока

Заключение

В работе с помощью численного моделирования проведена оценка влияния положения предкрылка на аэродинамические характеристики винтокольцевого движителя. Из проведенного исследования следует, что при работе работы на месте эффективнее кольцевой обтекатель с большим углом раскрытия. Увеличение угла раскрытия приводит к увеличению площади кольца с пониженным давлением. А при высокой скорости полета, необходимо уменьшить зону торможения потока, следовательно, эффективнее применять кольцо с малым углом раскрытия. Таким образом, перспективным направлением является использование винтокольцевого движителя с регулируемым коэффициентом раскрытия кольцевого обтекателя.

Список источников

1. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Мустаев Э.И., Уразбахтин Р.Р., Кильметов Р.А. Оценка определения аэродинамических характеристик воздушного винта для беспилотного летательного аппарата посредством численного моделирования и 3D сканирования // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182662>
2. Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Мустаев Э.И., Уразбахтин Р.Р. Численное исследование винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата с интегрированным в двигатель воздушным винтом // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175917>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-11](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-11)
3. Самохин В.Ф., Остроухов С.П., Мошков П.А. Экспериментальное исследование источников шумности беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевым

двигателем в толкающей компоновке // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=44459>

4. Шевченко А.В., Муравицкая Л.А. Численное моделирование аэродинамических характеристик беспилотных летательных аппаратов на дозвуковых скоростях // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182661>

5. Лемко О.Л. Оценка эффективности органов продольного управления беспилотного летательного аппарата схемы «Летающее крыло» // Информационные системы, механика и управление. 2011. № 6. С. 108-115.

6. Архипов М.Е. Проектирование кольца винтокольцевого двигателя многороторного микро-беспилотного летательного аппарата коптерного типа // Материалы XXXIV научно-технической конференции по аэродинамике (Жуковский, 28 февраля – 01 марта 2024): сборник трудов. – Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2024. С. 14-15.

7. Денисенко П.В., Булат П.В., Чернышов П.С., Волков К.Н. Аэроакустические характеристики винтокольцевого двигателя квадрокоптера на режиме вертикального взлета и посадки // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 66-73.

8. Алесин В.С., Губский В.В., Павленко О.В. Влияние интерференции фюзеляжа и кольца на максимальную тягу воздушного толкающего винтокольцевого двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 1. С. 7-18.

9. Гришанов В.В. Исследование характеристик винтокольцевых (вентиляторных) двигателей БПЛА ВВП // XXVI научно-техническая конференция по аэродинамике

(Жуковский, 26–27 февраля 2015): сборник трудов. – Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2015. С. 99-100.

10. Гришанов В.В., Тарасенко М.М. Исследование характеристик винтокольцевого движителя, направленные на его использование для БПЛА вертикального взлета // XXV научно-техническая конференция по аэродинамике (п. Володарского, 27–28 февраля 2014): сборник трудов. – Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2014. С. 114.

11. Булат П.В., Кузнецов П.Н., Чернышов П.С. Влияние радиального зазора между кольцом и законцовками винта на характеристики винтокольцевого движителя // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 73-79.

12. Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н., Мельникова А.И. Исследование винтокольцевых движителей. Сравнение биротативного двухрядного винта с четырехлопастным и восьмиллопастными винтами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 60-66.

13. Булат М.П., Вокин Л.О., Волобуев И.А. Исследование винтокольцевых движителей. Сравнение винтокольцевых движителей с обычными однорядными и Х-образными двухрядными винтами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 2. С. 44-48.

14. Булат П.В., Продан Н.В., Вокин Л.О. Сравнение моделей турбулентности при расчете модельного винтокольцевого движителя // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 74-80.

15. Дудников С.Ю., Булат М.П., Вокин Л.О., Кузнецов П.Н., Чернышов П.С. Математическое и компьютерное моделирование однорядных и двухрядных

шестилопастных винтокольцевых движителей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1226-1236.

16. Денисенко П.В., Чернышов П.С., Волков К.Н., Вокин Л.О. Численное моделирование обтекания винтокольцевого движителя квадрокоптера и определение его тяговых характеристик на различных режимах полета // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 2. С. 49-56.

17. Рыбаков Д.В., Чернышов П.С., Вокин Л.О., Продан Н.В. Численное моделирование вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата с винтокольцевыми движителями вихререзающими методами // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 197-200.

18. Булат П.В., Чернышов П.С., Мельникова А.И. Итоги разработки методики проектирования линейки винтокольцевых движителей с умеренной и большой нагрузкой мощностью на площадь для беспилотных воздушных судов транспортного назначения // Аэрокосмическая техника и технологии. 2024. Т. 2, № 3. С. 125-151.

19. Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н. и др. Проектирование винтокольцевого движителя беспилотного воздушного судна. Часть I: – М.: Изд-во «Спутник +», 2022. – 104 с.

20. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 328 с.

21. Булат П.В., Кузнецов П.Н., Чернышов П.С. Влияние радиального зазора между кольцом и законцовками винта на характеристики винтокольцевого движителя // Известия вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 73-79.

References

1. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Mustaev E.I., Urazbakhtin R.R., Kil'metov R.A. Evaluation of the determination of the aerodynamic characteristics of the propeller for an unmanned aerial vehicle through numerical modeling and 3D scanning. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182662>
2. Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Mustaev E.I., Urazbakhtin R.R. Numerical study of the engine-propeller combination of the unmanned aerial vehicle with the propeller integrated into the engine. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175917>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-11](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-11)
3. Samokhin V.F., Ostroukhov S.P., Moshkov P.A. Experimental Research of Pilotless Vehicle Noise Sources with a Pusher Ducted Propeller. *Trudy MAI*. 2013. No. 70. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=44459>
4. Shevchenko A.V., Muravitskaya L.A. Computational and experimental studies of aerodynamic characteristics of unmanned aerial vehicles at subsonic speeds. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182661>
5. Lemko O.L. Evaluation of the efficiency of longitudinal controls of the unmanned aerial vehicle of the scheme «Flying Wing». *Informatsionnye sistemy, mekhanika i upravlenie*. 2011. No. 6. P. 108-115. (In Russ.)
6. Arkhipov M.E. Designing of the rotor-ring propeller of the multi-rotor micro-unmanned flying machine of the copter type. *XXXIV nauchno-tehnicheskaya konferentsiya po aerodinamike sbornik trudov. Zhukovskii: TSAGI im. N.E. Zhukovskogo Publ.*, 2024. P. 14-15. (In Russ.)

7. Denisenko P.V., Bulat P.V., Chernyshov P.S., Volkov K.N. Aeroacoustic characteristics of the quadrocopter propeller on the vertical take-off and landing mode *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2021. No. 4. P. 66-73. (In Russ.)
8. Alesin V.S., Gubskii V.V., Pavlenko O.V. Influence of the fuselage and ring interference on the maximum thrust of the air pusher propeller-ring mover. *Aerospace MAI Journal*. 2020. V. 27, No. 1. P. 7-18. (In Russ.)
9. Grishanov V.V. Investigation of the characteristics of propeller-ring (fan) propulsors of UAV GDP. *XXVI nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po aerodinamike: sbornik trudov. Zhukovskii: TSAGI im. N.E. Zhukovskogo Publ.*, 2015. P. 99-100. (In Russ.)
10. Grishanov V.V., Tarasenko M.M. Investigation of the characteristics of the rotor-ring propulsor, aimed at its use for UAV vertical takeoff. *XXV nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po aerodinamike: sbornik trudov. Zhukovskii: TSAGI im. N.E. Zhukovskogo Publ.*, 2014. P. 114. (In Russ.)
11. Bulat P.V., Kuznetsov P.N., Chernyshov P.S. Influence of the radial clearance between the ring and the propeller ends on the propeller ring propulsor characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2023. No. 4. P. 73-79. (In Russ.)
12. Dudnikov S.Yu., Kuznetsov P.N., Mel'nikova A.I. Research of propeller-ring propulsors. Comparison of a birorotative two-row propeller with four-bladed and eight-bladed propellers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2023. No. 2. P. 60-66. (In Russ.)
13. Bulat M.P., Vokin L.O., Volobuev I.A. Research of the propeller-ring propulsors. Comparison of the propeller-ring propulsors with the usual single-row and X-shaped

double-row propellers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2023. No. 2. P. 44-48. (In Russ.)

14. Bulat P.V., Prodan N.V., Vokin L.O. Comparison of the turbulence models at calculation of a model propeller-ring propulsor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2022. No. 4. P. 74-80. (In Russ.)

15. Dudnikov S.Yu., Bulat M.P., Vokin L.O., Kuznetsov P.N., Chernyshov P.S. Mathematical and computer modeling of the single-row and double-row six-bladed propellers. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2022. V. 22, No. 6. P. 1226-1236. (In Russ.)

16. Denisenko P.V., Chernyshov P.S., Volkov K.N., Vokin L.O. Numerical modeling of the quadcopter rotor-ring propulsor streamline and determination of its thrust characteristics at different flight modes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2021. No. 2. P. 49-56. (In Russ.)

17. Rybakov D.V., Chernyshov P.S., Vokin L.O., Prodan N.V. Numerical modeling of the vertical landing of an unmanned aerial vehicle with the rotor-ring propulsors by the vortex-resolving methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2020. No. 4. P. 197-200. (In Russ.)

18. Bulat P.V., Chernyshov P.S., Mel'nikova A.I. Results of the development of a methodology for designing a line of propeller-ring propulsors with moderate and high-power load per area for unmanned aerial vehicles for transport purposes. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2024. V. 2, No. 3. P. 125-151. (In Russ.)

19. Bulat P.V., Dudnikov S.Yu., Kuznetsov P.N. et al. *Proektirovanie vinto-kol'tsevogo dvizhitelya bespilotnogo vozdušnogo sudna. Chast' I*. (Design of a propeller-ring

propulsor of an unmanned aerial vehicle. Part I.). Moscow: Izd-vo «Sputnik +» Publ., 2022. 104 p. (In Russ.)

20. Ostroukhov S.P. *Aerodinamika vozdukhnykh vintov i vinto-kol'tsevykh dvizhitelei* (Aerodynamics of propellers and propeller-ring propulsors). Moscow: FIZMATLIT Publ., 2014. 328 p. (In Russ.)

21. Bulat P.V., Kuznetsov P.N., Chernyshov P.S. Influence of the radial clearance between the ring and the tips of the propeller on the characteristics of the propeller-ring propulsor. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*. 2023. No. 4. P. 73-79. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 19.01.2025

Одобрена после рецензирования 07.02.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 19.01.2025; approved after reviewing on 07.02.2025; accepted for publication on 25.06.2025