

П.В. БУЛАТ,
д-р физ.-мат. наук,
канд. экон. наук
(БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург;

ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный
университет», Севастополь),

П.Н. КУЗНЕЦОВ,
канд. техн. наук
(ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный
университет», Севастополь),

П.С. ЧЕРНЫШОВ,
аспирант
(БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург;
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный
университет», Севастополь)
pashachp8@gmail.com

Влияние радиального зазора между кольцом и законцовками винта на характеристики винтокольцевого движителя

Исследуется влияние зазора между законцовками винта и внутренней стенкой кольца на тягу и располагаемую мощность винтокольцевого движителя. Анализируется структура вихревого течения в тонком зазоре между торцевой поверхностью лопастей воздушного винта и воздушным кольцом винтокольцевого движителя, а также особенности обтекания лопастей воздушного винта на режимах форсирования.

Винт, винтокольцевой движитель, вихрь, движитель, зазор, численное моделирование

Объект исследования – винтокольцевой движитель – представлен на рис. 1. На рис. 1, *а* указаны основные характерные размеры винтокольцевого движителя. На рис. 1, *б* приведены составные элементы движителя: 1 – профилированное кольцо; 2 – винт; 3 – втулка винта. На рис. 1 также приняты следующие обозначения: D – внутренний диаметр кольца; D_p – внешний диаметр винта; h – зазор между законцовками винта и кольцом.

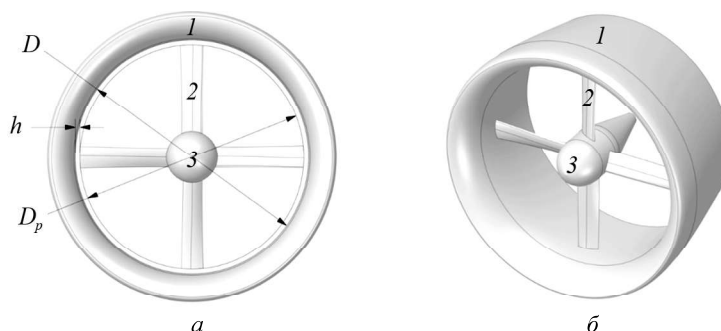


Рис. 1

Благодаря винту, помещенному в кольцо, увеличивается тяга винта до 40 % и уменьшаются индуктивные потери на концах лопастей, что приводит к увеличению КПД винта и снижению шума. Дополнительная тяга постепенно уменьшается по мере увеличения скорости набегающего потока. По этой причине винтокольцевой движитель как маршевый движитель используется в случае скоростей не более 150–180 км/ч. В связи с возможностью краткосрочно обеспечить форсированный режим с большой мощностью на ограниченной ометаемой винтом площади перспективно применение винтокольцевого движителя в составе подъемных двигателей воздушных судов с укороченным или вертикальным взлетом и посадкой.

Из-за большой нагрузки на площадь предъявляются многочисленные требования к геометрии и конструкции винта, кольца и их отдельным элементам [1]. Характер обтекания винтокольцевого движителя на маршевых режимах полета [2] и на режимах, близких к висению, различен, в связи с чем возникает необходимость исследования работы винтов при различных углах натекания и скорости внешнего потока [3]. Так, при влиянии поверхности земли на висящий на небольшой высоте летательный аппарат воздействуют крупные вихри, отражающиеся от поверхности, что приводит к ударным аperiодическим воздействиям на конструкцию воздушного судна [4].

Благодаря использованию двухрядных винтов в кольце, особенно с противоположным вращением, возможно реализовать на площади кольца режим с большей мощностью [5]. По результатам выполнен-

ных исследований, поведение винтов в винтокольцевом движителе при умеренной нагрузке (средняя величина угла установки лопастей – 16–25°) и большой нагрузке (35–42°) существенно отличается [6]. Работа тяжело нагруженных винтов сопровождается образованием срывных зон, крупных вихревых жгутов, а также повышенным уровнем шума [7], одним из источников которого являются вихри, образующиеся в области примыкания лопастей к внутренней поверхности кольца. Существование данных вихрей наблюдается на любых аэродинамических профилях конечного размера [8]. При этом наличие отрывных вихревых течений не всегда является негативным фактором с точки зрения влияния на аэродинамику объекта [9], в связи с чем невозможно однозначно оценить характер их взаимодействия со сложными конструкциями движителей, к которым относится винтокольцевой движитель.

Наиболее полное экспериментальное параметрическое исследование винтокольцевого движителя приведено в работе [10], где, в том числе, рассмотрено влияние относительной ширины зазора h (см. рис. 1) на безразмерные коэффициенты тяги и мощности винтокольцевого движителя.

Как было сказано, работа винтов при тяжелой и умеренной нагрузке на ометаемую площадь существенно отличается, в связи с чем необходимо исследовать применимость различных моделей турбулентности в зависимости от режима работы винтокольцевого движителя. Так, в работе [11] показано, что при угле установки лопасти на 75 % длины в пределах до 20...25° при использовании стандартных моделей турбулентности Спаларта – Аллмараса [12] и SST [13] получены такие же результаты, что и при применении гораздо более сложной модели $\gamma - Re_{\theta_l}$ [14], учитывающей ламинарно-турбулентный переход. Изначально $\gamma - Re_{\theta_l}$ -модель калибровалась [15] для расчетов плоскопараллельных течений, что обеспечивает ее высокую точность при расчете аэродинамических профилей и крыльев [16]. Позднее применение $\gamma - Re_{\theta_l}$ -модели было распространено на задачи с цилиндрической симметрией [17] и вентиляторы [18].

Выполненные исследования показали, что модели Спаларта – Аллмараса и SST неприменимы на тяжелых режимах работы винтов, поэтому в настоящем исследовании используется $\gamma - Re_{\theta_l}$ -модель.

В работе поставлена задача исследовать течение в окрестности щели, образованной законцовкой лопасти и внутренней поверхностью кольца, а также определить влияние ширины щели на тягу винтокольцевого движителя.

В исследуемом винтокольцевом движителе использован винт К184 [8]. Приведем геометрию лопастей данного винта: c – относительная толщина профиля в продольных сечениях лопасти (рис. 2, а); φ – крутка лопасти (рис. 2, б); f – относительная кривизна профиля в продольных сечениях лопасти (рис. 2, в); b – относительная ширина лопасти винта (рис. 2, г). Диаметр воздушного винта $D_p = 0,58$ м, длина воздушного кольца $L = 0,6D_p = 0,348$ м.

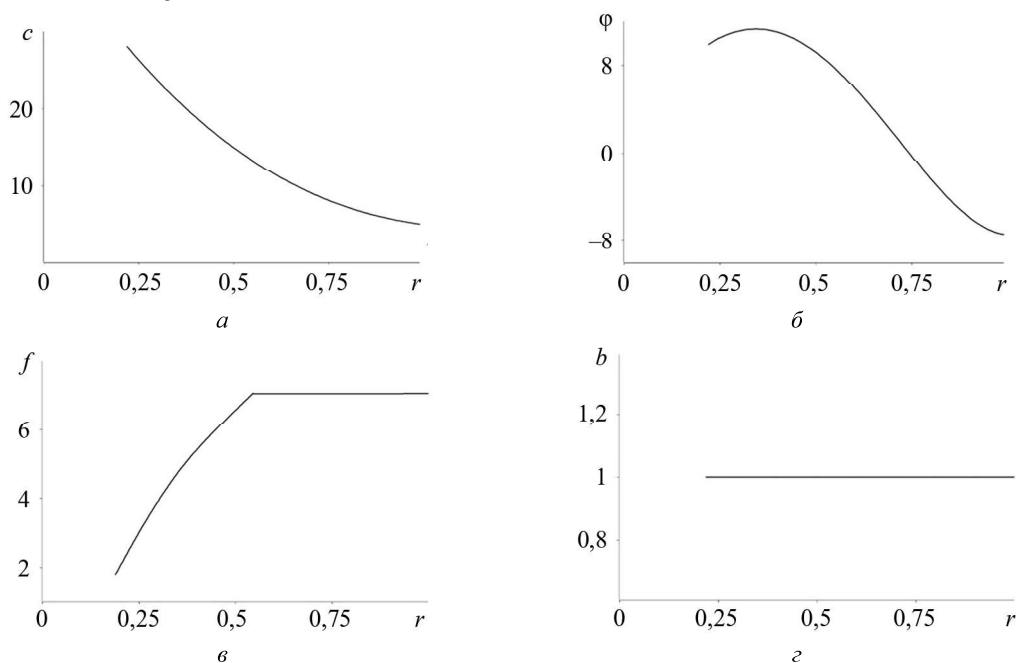


Рис. 2

Влияние зазора исследовалось в пределах его относительной величины $h/D = 0,02; 0,015; 0,008; 0$. В случае отсутствия зазора считается, что лопасти воздушного винта заделаны во внутреннюю поверхность воздушного кольца и вращаются вместе с кольцевым сегментом этой поверхности.

Исследование проводилось для углов установки лопастей 16 и 32° на 75% их длины. Профиль втулки винта и кольца показан на рис. 3, где показано сгущение разностной сетки в области торцевого зазора. Общий размер численной сетки – 3 млн ячеек.

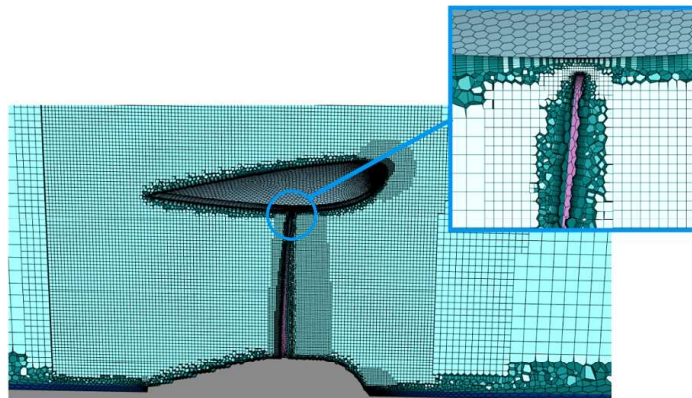


Рис. 3

Рассматриваемая геометрия четырехлопастного винтокольцевого движителя имеет круговую симметрию, поэтому численная область представляет собой цилиндрический сектор с центральным углом 90° .

Используется неструктурированная гексаэдрическая сетка с буферными переходными слоями полиэдрической формы (см. рис. 3). Внутри пространства воздушного кольца и на твердых поверхностях выполнено дополнительное сгущение элементов сетки. На поверхностях лопастей использовано адаптивное сгущение по критерию кривизны поверхности, что позволяет получить наивысшую точность кривизны поверхности на расчетной сетке.

Минимальное значение размеров ячеек при данном сгущении – $0,3$ мм, максимальный размер ячеек сетки внутри воздушного кольца – 6 мм. На твердых поверхностях также применено дополнительное сгущение сетки призматическими слоями, что позволяет моделировать пограничный слой потока без необходимости применения пристеночных функций, т. е. формировать профиль потока напрямую через расчетную сетку ($y^+ < 1$). Такой подход оптимален для точного моделирования течения в зазоре между лопастью и стенкой кольца. Образование в окрестности щели вихревых жгутов требует подробной сеточной модели и выбора адекватной модели турбулентности.

Математическая модель представляет собой систему уравнений, состоящую из уравнения неразрывности, осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений движения, уравнения энергии и уравнения состояния идеального газа. Для данной задачи не принято допущение о постоянстве плотности рабочей среды, поскольку на концах лопастей реализуется скорость потока, в которой проявляются эффекты сжимаемости. В качестве замыкающей модели турбулентности используется полуэмпирическая $\gamma - \text{Re}_{\theta t}$ -модель, где γ – параметр перемежаемости (1 – для турбулентного течения, 0 – для ламинарного, от 0 до 1 – для переходного). Данная модель турбулентности, в отличие от обычной модели SST, разделяет области течения на участки ламинарного, переходного и турбулентного течений. Классические модели турбулентности постулируют наличие турбулентности во всем поле течения. Это означает, что влияние областей ламинарного течения на аэродинамические характеристики при использовании данных моделей рассмотрено быть не может.

Применительно к задаче вращения воздушного винта винтокольцевого движителя использование модели турбулентности с учетом перемежаемости особенно актуально. В зазоре между лопастью воздушного винта и аэродинамического кольца происходит низкорейнольдсовое перетекание потока с нижней поверхности аэродинамического профиля лопасти на верхнюю, т. е. поток должен быть ламинарным. На лопастях воздушных винтов наблюдается обширная зона ламинарного пограничного слоя на подветренной стороне.

Таким образом, модель турбулентности должна учитывать наличие участков ламинарного течения, что позволяет сделать $\gamma - Re_{\theta r}$ -модель.

Вращение воздушного винта при наличии зазора сопровождается образованием вихревых жгутов разного размера и интенсивности на конце лопастей. Точная оценка влияния вихревых жгутов на аэродинамику воздушного винта подразумевает использование подходящей методики моделирования турбулентного потока за узким зазором в сочетании с подробной сеточной моделью. В этих областях течения применение $\gamma - Re_{\theta r}$ -модели полностью аналогично использованию стандартной SST-модели.

Точность численного моделирования напрямую зависит от корректной постановки граничных условий и методики задания вращения роторной части движителя. На внешних границах численной области выставлены условия стандартной атмосферы, т. е. полное давление воздуха – 101325 Па, полная температура – 300 К. Вращение винта задается вращением системы координат вокруг оси симметрии винтокольцевого движителя. На боковых поверхностях сектора 90° выставлены периодические граничные условия, что означает дублирование параметров газа с одной поверхности на другую.

Приведем результаты расчетов, демонстрирующие влияние величины зазора на тягу винтокольцевого движителя, момент и мощность на валу.

В табл. 1 приведены безразмерные коэффициенты тяги α и мощности β , позволяющие обобщить полученные результаты при расчетах любых размеров и частоты вращения винта. Данные коэффициенты находятся из соотношений

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

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

где P – сила тяги, Н; N – мощность привода, Вт; ρ – плотность воздуха, кг/м³; n_c – частота вращения, Гц; D – диаметр воздушного винта, м.

Таблица 1

Угол установки лопастей, град	h/D , %	α	β	M , Н·м	N , Вт	P , Н
16	0	0,2684	0,1802	5,672	1782	91,48
	0,8	0,2623	0,1353	4,258	1338	89,44
	1,5	0,2616	0,1299	4,089	1284	89,17
	2	0,2478	0,1355	4,264	1340	84,47
32	0	0,8406	0,5042	15,867	5051	286,56
	0,8	0,7016	0,3851	12,119	3838	239,17
	1,5	0,6199	0,4418	13,905	4368	211,32
	2	0,5940	0,4196	13,203	4148	202,51

Если при большом угле установки лопастей и тяжелой нагрузке на винт с увеличением зазора тяга ощутимо уменьшается, то при умеренной нагрузке ситуация иная. Значения тяги при зазорах $h/D = 0,8$ % и $h/D = 1,5$ % практически равны, т. е. стремиться бесконечно уменьшать зазор (что технологически сложно) нет необходимости. Отметим, что при исследовании умеренно нагруженных винтов с заданной мощностью на валу ($N = 3750$ Вт) получено оптимальное значение $h/D = 1,5$ % (табл. 2).

Таблица 2

Угол установки лопастей, град	h/D , %	α	β	n , об/мин	N , Вт	P , Н
16	0	0,2684	0,1803	3845	3750	150,28
	0,8	0,2623	0,1353	4230	3750	177,81
	1,5	0,2616	0,1299	4288	3750	182,17
	2	0,2478	0,1355	4228	3750	167,77
32	0	0,8406	0,5042	2728	3750	236,95
	0,8	0,7016	0,3851	2985	3750	236,78
	1,5	0,6199	0,4418	2851	3750	190,85
	2	0,5940	0,4196	2901	3750	189,37

У тяжелонагруженных винтов тяга ожидаемо уменьшается с увеличением зазора, но и в этом случае уменьшать величину зазора $h/D = 0,8 \%$ нет необходимости, тяга не увеличивается. Таким образом, выявлено наличие оптимального зазора, величина которого зависит от угла установки лопастей.

При угле установки 16° и зазоре $1,5 \%$ тяга практически такая же, как и при зазоре в $0,8 \%$, но мощность на валу меньше. При заданной мощности на валу винтокольцевой движитель с зазором $1,5 \%$ имеет максимальную тягу.

Было сделано предположение, что такое поведение связано с характером вихревого течения в окрестности щели. Для его исследования были построены изоповерхности Q -критерия потока, который позволяет идентифицировать ядра вихрей.

Q -критерий вычисляется по формулам

$$Q = |S^2 - \Omega^2|; \quad (3)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}; \quad (4)$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \quad (5)$$

где S – второй инвариант тензора завихренности (завихренность); Ω – второй инвариант тензора скоростей деформации; S_{ij} , Ω_{ij} – касательные компоненты тензора завихренности и тензора скоростей деформации. Изоповерхности построены для значения $Q = 10^6$.

Для угла установки 32° и зазора 2% характерна картина изоповерхностей Q -критерия (рис. 4, а), совмещенная с линиями тока (рис. 4, б).

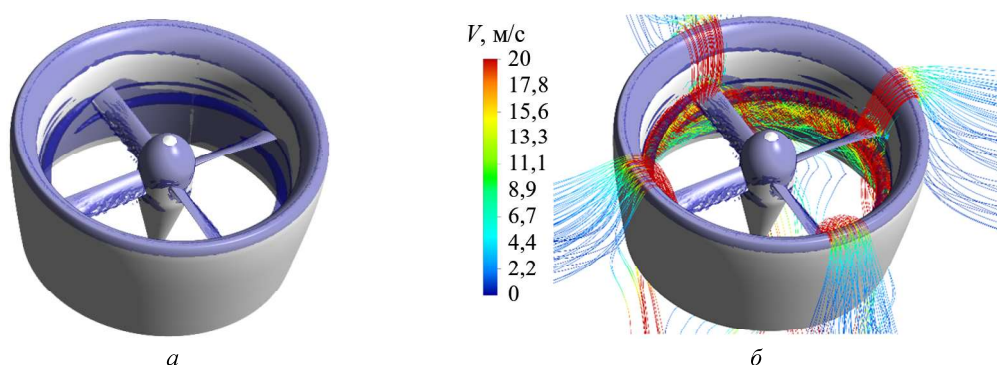


Рис. 4

На лопастях наблюдается переход от ламинарного течения (безвихревые области) к турбулентному (см. рис. 4). Концы лопастей оставляют за собой турбулентный вихревой след. Протяженность ядра вихря больше четверти окружности кольца винтокольцевого движителя.

По результатам анализа течения в окрестности зазора при угле установки лопастей 16° , на потери тяги влияют одновременно два фактора – перетекание потока из области высокого давления в область низкого давления и вихревой жгут, образующийся в зазоре. Чем больше величина h , тем больше потери тяги из-за перетекания потока. На интенсивность вихревых потерь ширина зазора влияет по-другому. При малом зазоре ($h/D = 0,8 \%$) образуется интенсивный тонкий вихревой жгут, который распространяется на значительное расстояние и сильно влияет на поток за винтом (рис. 5, а).

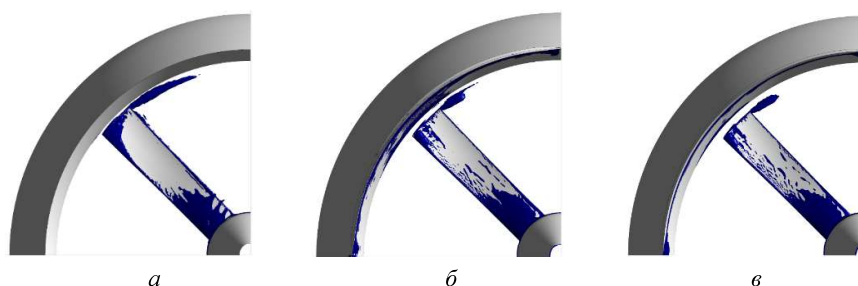


Рис. 5

При больших зазорах влияние зазора на образование вихря минимальное, но характер течения внутри кольца таков, что вихрь быстро размывается, поэтому обычно в винтокольцевом движителе концевые потери на вихреобразование меньше, чем в изолированных винтах. Формирование вихревого жгута на конце лопасти при зазоре 1,5 % показано на рис. 5, б, при зазоре 2 % – на рис. 5, в.

Для тяжело нагруженных винтов такая зависимость силы тяги от зазора h нехарактерна. В этом случае поперечные размеры вихревых жгутов существенно больше величины зазора, их длина больше четверти окружности. В результате вихри отдельных лопастей подпитывают вихри впереди идущей лопасти, и они сливаются в одно общее вихревое кольцо.

Исследование зависимости работы винтокольцевого движителя от величины зазора между концами лопастей и внутренней поверхностью кольца выявило сложное взаимодействие потока в щели и концевых вихрей лопастей винта. При умеренной нагрузке на винт и угле установки лопастей винта 16° можно определить оптимальный зазор, уменьшать который не имеет смысла, так как это не приводит к увеличению тяги. Для рассмотренного в настоящей работе винта такая оптимальная величина – 1,5 % от диаметра винта. Причина наличия оптимума заключается в разнонаправленном влиянии увеличения зазора на потери тяги. С одной стороны, увеличение зазора приводит к увеличению потерь тяги из-за перетекания потока из области высокого давления в область низкого давления. С другой стороны, при умеренной нагрузке на винт и малых зазорах в щели образуется тонкий интенсивный вихрь, который медленно размывается потоком за винтом, из-за чего возникают повышенные вихревые потери.

Расчеты также показали, что внутри винтокольцевого движителя, на поверхности кольца и лопастей, имеются обширные области с ламинарным течением, поэтому в расчетах необходимо использовать методы, учитывающие ламинарно-турбулентный переход.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта «Фундаментальные основы механики, систем контроля и управления беспилотных авиационных систем с формообразующими конструкциями, глубоко интегрированными с силовыми установками, и уникальными свойствами, неприменяемыми сегодня в пилотируемой авиации», № FEFM-2020-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Xin Xiang et al.* Numerical Investigations of a Tip Turbine Aerodynamic Design in a Propulsion System for VTOL Vehicles // *Energies*. 2019. № 12. Article № 3003.
2. *Гарипова Л.И. и др.* Определение аэродинамических характеристик модели несущего винта на режиме осевого обтекания // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2014. № 3. С. 7–13.
3. *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.
4. *Рыбаков Д.В. и др.* Численное моделирование вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата с винтокольцевыми движителями вихреразрешающими методами // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2020. № 4. С. 197–200.
5. *Дудников С.Ю. и др.* Математическое и компьютерное моделирование однорядных и двухрядных шестилопастных винтокольцевых движителей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. № 6. С. 1226–1236.
6. *Zhang T., Barakos G.N.* Review on Ducted Fans for Compound Rotorcraft // *The Aeronautical Journal*. 2020. Vol. 124. Iss. 1277. P. 941–974.
7. *Malgoezar A.M. et al.* Experimental Characterization of Noise Radiation from a Ducted Propeller of an Unmanned Aerial Vehicle // *International Journal of Aeroacoustics*. 2019. Vol. 18. № 4-5. P. 372–391.
8. *Степанов Р.П., Кусюмов А.Н., Баракос Дж.* О локализации ядра концевой вихря крыла // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2022. № 1. С. 131–136.
9. *Ципенко В.Г., Шевяков В.И.* Об использовании вихрегенераторов для улучшения аэродинамики самолетов // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2022. № 1. С. 145–151.
10. *Остроухов С.П.* Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. М.: Физматлит, 2014. 328 с.
11. *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.
12. *Spalart P.R., Allmaras S.R.* A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // *Proc. of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 6–9, 1992, Reno, USA. AIAA Paper № 1992-0439.
13. *Menter F.R.* Zonal Two-Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows // *Proc. of the 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, July 6–9, 1993, Orlando, USA. AIAA Paper № 1993-2906.

14. Menter F.R., Langtry R., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes // Flow, Turbulence and Combust. 2006. Vol. 77. P. 277–303.
15. Malan P., Suluksna K., Juntasaro E. Calibrating the Gamma-Re_Theta Transition Model for Commercial CFD // Proc. of the 47th AIAA Meeting, Jan. 5–8, 2009, Orlando, USA. AIAA Paper № 2009-1142.
16. Булат П.В., Продан Н.В., Курнухин А.А. О влиянии ламинарно-турбулентного перехода при численном моделировании профиля крыла // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 3. С. 89–98.
17. Кусюмов А.Н. и др. Моделирование обтекания неподвижного кругового цилиндра с учетом ламинарно-турбулентного перехода // Изв. вузов. Авиационная техника. 2012. № 3. С. 31–34.
18. Jiguo Zhang et al. Performance and Flow Evolution of Windmilling Utilizing a Combination of Semi-Empirical Speed and CFD Models during Mode Transition of the Wide-Chord Fan // Aerospace Science and Technology. 2022. Vol. 123. Article № 107468.

Поступила в редакцию 16.06.23

После доработки 22.06.23

Принята к публикации 25.06.23

Effect of Radial Gap between the Ring and Propeller Tips on the Performance of a Ducted Propeller

P.V. BULAT^{1,2}, P.N. KUZNETSOV², AND P.S. CHERNYSHOV^{1,2}

¹ Baltic State Technical University “Voenmeh”, Saint Petersburg

² Sevastopol State University, Sevastopol

The effect of the gap between the propeller tips and the inner wall of the duct ring on the thrust and available capacity of the ducted propeller propulsion system is investigated. The structure of vortex flow in a thin gap between the end surface of the propeller blades and the air ring of the ducted propeller propulsor is analyzed, as well as the features of the propeller blades flow at boost modes.

Propeller, ducted propeller, vortex, propulsion, gap, numerical modeling