

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-410-417

УДК 553.662.2

Исследование численных подходов к моделированию крупномасштабных турбулентных вихревых течений на режиме вертикального взлета и посадки летательного аппарата

Дмитрий Владимирович Рыбаков¹, Сергей Юрьевич Дудников²,
Павел Викторович Булат³, Павел Сергеевич Чернышов⁴✉, Леонид Олегович Вокин⁵¹ ФГБОУ ВО «Гамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», Тамбов, 392000, Российская Федерация^{2,3,4} Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299053, Российская Федерация^{3,4,5} Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация¹ RDmitryV@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-6026>² sdudnikov@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1955-4313>³ pavelbulat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>⁴ pashachp8@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-1433-4194>⁵ leonidvokin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2944-1822>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена задача работы беспилотного летательного аппарата в режиме зависания над плоской посадочной платформой. В качестве силовой установки использованы винто-кольцевые движители, которые представляют собой систему из воздушного винта, вращающегося внутри воздушного кольца. Воздушное кольцо является телом вращения с аэродинамическим профилем в сечении. В работе исследован эффект нестационарного взаимодействия вихревых потоков с конструкцией летательного аппарата двумя альтернативными численными методами, один из которых — вихререзающий. **Метод.** Выполнены численные расчеты с использованием традиционного подхода моделирования турбулентности на основе осредненных уравнений Навье–Стокса (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes), где турбулентность принимается изотропной, и вихререзающего метода крупных вихрей. Главная особенность метода крупных вихрей в том, что при его реализации турбулентный поток представляется как наложение движения крупно- и мелкомасштабной турбулентностей. После дискретизации потока при помощи операции фильтрации, крупномасштабная турбулентность, зависящая напрямую от граничных условий, решается в рамках полных уравнений Навье–Стокса. Мелкомасштабная турбулентность имеет изотропные свойства и моделируется подобно полуэмпирическим RANS-методам. Методика позволяет точно рассчитать вихревую структуру любого течения напрямую из уравнений движения с использованием относительно малых вычислительных мощностей, в отличие от моделей RANS, которые моделируют течение по упрощенной математической модели и могут обеспечить удовлетворительную точность только для ограниченного круга задач. **Основные результаты.** Полученные результаты указывают на то, что вихререзающие методы моделирования турбулентности, в отличие от методов, основанных на осредненных уравнениях Навье–Стокса, позволяют оценить влияние аperiodических возмущений на конструкцию летательных аппаратов, возникающих в результате взаимодействия крупных вихрей между собой и с подстилающей поверхностью. Подобные явления сопровождаются боковыми воздействиями ударного характера на кольца винто-кольцевых движителей, что может привести к потере устойчивости летательных аппаратов. **Практическая значимость.** Применение воздушного кольца в условиях малой поступи воздушного винта позволяет существенно увеличить расход воздуха, проходящего через контур вращения винта, увеличить тягу за счет создания циркуляции потока вокруг аэродинамического профиля кольца и уменьшить мощность на воздушном винте. Несмотря на то, что эффект от использования воздушного кольца исчезает при большом набегающем потоке, данная конструкция считается весьма перспективной для применения на летательных аппаратах с вертикальным взлетом и посадкой. Данный режим работы является наиболее энергозатратным и обуславливает наибольшие требования к подъемной силе силовой установки. Результаты

настоящей работы продемонстрировали, что численные методы, основанные на осреднении уравнений Навье–Стокса и применении классических моделей турбулентности типа $k-\omega$ или $k-\varepsilon$, повсеместно применяемые при численном моделировании винтов, на взлетно-посадочных режимах не позволяют выявлять аperiodические нестационарные явления, связанные со взаимодействием крупных вихрей, в отличие от вихреразрешающих методов моделирования турбулентности.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, винто-кольцевой движитель, численное моделирование, вихреразрешающие подходы, метод крупных вихрей

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения от 18 июня 2019 г. № 14.577.21.0284 (уникальный идентификатор проекта – RFMEFI57717X0284).

Ссылка для цитирования: Рыбаков Д.В., Дудников С.Ю., Булат П.В., Чернышов П.С., Вокин Л.О. Исследование численных подходов к моделированию крупномасштабных турбулентных вихревых течений на режиме вертикального взлета и посадки летательного аппарата // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 410–417. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-410-417

Investigation of numerical approaches to modeling large-scale turbulent vortex flows in the mode of vertical take-off and landing of an aircraft

Dmitriy V. Rybakov¹, Sergey Yu. Dudnikov², Pavel V. Bulat³, Pavel S. Chernyshov⁴✉, Leonid O. Vokin⁵

¹ Derzhavin Tambov State University, Tambov, 392000, Russian Federation

^{2,3,4} Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russian Federation

^{3,4,5} Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ RDmitryV@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-6026>

² sdudnikov@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1955-4313>

³ pavelbulat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>

⁴ pashachp8@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-1433-4194>

⁵ leonidvokin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2944-1822>

Abstract

The study considers the operation of an unmanned aerial vehicle in hovering mode over a flat landing platform. As a propulsion system, impellers are used, which are a system of a propeller rotating inside an air ring. The air ring is a body of revolution with an aerodynamic profile in cross section. The paper investigates the effect of unsteady interaction of vortex flows with the design of an aircraft by two alternative numerical methods, one of which is vortex-resolving. Numerical calculations are performed using the traditional turbulence modeling approach based on the averaged Navier–Stokes equations (RANS, Reynolds Averaged Navier–Stokes), where the turbulence is assumed to be isotropic, and the eddy-resolving Large Eddy Simulation method. The main feature of the latter is as follows: a turbulent flow is represented as the superposition of the motion of large-scale and small-scale turbulences. After discretizing the flow using a filtering operation, large-scale turbulence, which depends directly on the boundary conditions, is solved from the full Navier–Stokes equations. Small-scale turbulence has isotropic properties and is modeled similarly to semi-empirical RANS methods. The technique allows one to accurately calculate the vortex structure of any flow directly from the equations of motion using relatively low computing power, in contrast to the RANS models, which simulate the flow using a simplified mathematical model and can provide satisfactory accuracy only for a limited range of problems. The results indicate that eddy-resolving methods for modeling turbulence, in contrast to the methods based on averaged Navier–Stokes equations, make it possible to estimate the effect of aperiodic perturbations on the design of aircraft arising from the interaction of large eddies with each other and with the underlying surface. Such phenomena are accompanied by side impacts of a shock nature on the impeller rings, which can lead to loss of aircraft stability. Under conditions of a small propeller step, the use of an air ring results in a significant increase in the air flow passing through the rotor rotation loop, an increase in thrust due to the creation of flow circulation around the airfoil of the ring, and a decrease in the power on the propeller. Even though the effect of using an air ring disappears with a large incoming flow, this design is considered very promising for use on aircraft with vertical takeoff and landing. This mode of operation is the most energy-consuming and determines the greatest requirements for the lifting force of the power plant. The results of this work have demonstrated that numerical methods based on averaging the Navier–Stokes equations and the use of classical turbulence models of the $k-\omega$ or $k-\varepsilon$ type, which are widely used in numerical modeling of propellers, in takeoff and landing modes fail to detect aperiodic unsteady phenomena associated with the interaction of large eddies, in contrast to eddy-resolving methods for modeling turbulence.

Keywords

unmanned aerial vehicle, impeller, numerical modeling, eddy-resolving approaches, large eddy simulation

Acknowledgements

This study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Agreement of June 18, 2019 No. 14.577.21.0284 (Unique project identifier is RFMEFI57717X0284).

For citation: Rybakov D.V., Dudnikov S.Y., Bulat P.V., Chernyshov P.S., Vokin L.O. Investigation of numerical approaches to modeling large-scale turbulent vortex flows in the mode of vertical take-off and landing of an aircraft. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 410–417 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-410-417

Введение

Объект исследования — грузовой беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с четырьмя винто-кольцевыми двигателями (ВКД) и плоская посадочная платформа конечного размера, которые вместе образуют мобильную систему для автоматизированного взлета и посадки.

Конструкция ВКД представляет систему из тяжело-нагруженного воздушного винта и воздушного кольца, образованного вращением аэродинамического профиля. Применение воздушного кольца в условиях малой поступи воздушного винта (малой скорости набегающего на винт потока) позволяет: увеличить расход воздуха, проходящего через контур вращения винта; увеличить тягу за счет создания циркуляции воздуха вокруг аэродинамического профиля кольца ВКД; уменьшить мощность, потребляемую приводом воздушного винта. Конструкция ВКД известна и исследована в работах [1–8]. В сочетании с тяжело нагруженными винтами ВКД имеет высокие аэродинамические характеристики [5, 6].

В настоящей работе исследуется возможность точной посадки на плоскую платформу с учетом оценки нестационарного влияния вихрей на конструкцию ВКД.

В работе [1] выполнен анализ метода расчета подъемной силы БПЛА, который испытывает влияние экранного эффекта земли. Приведен аналитический вывод расчетной формулы для ВКД через уравнение импульсов. Немалый интерес представляет влияние хаотических и аperiodических нестационарных вихревых турбулентных структур на поверхности ВКД при посадке. Аналитические модели такого рода явлений неизвестны.

В [7] рассмотрено изменение аэродинамических качеств одиночного ВКД в присутствии экрана, который представлял собой твердую плоскую непроницаемую поверхность и поверхность воды. В результате исследования показано влияние экрана на аэродинамические характеристики воздушного винта. Однако, в силу использования полуэмпирической модели турбулентности, данный расчет не позволил оценить аperiodическое силовое воздействие вихревых структур на конструкцию двигателя.

В [8] проведено экспериментальное исследование ВКД и влияния высоты подъема ВКД над твердой поверхностью на аэродинамические характеристики. Визуализация потока осуществлялась при помощи метода PIV (Particle Image Velocimetry). В результате данного исследования определены зависимости аэродинамической эффективности ВКД при разных режимах полета, однако измерению подвергались лишь силовые характеристики и значения газодинамических параметров в выбранных точках. Нестационарное силовое воздействие на конструкцию не рассматривалось, хотя оно и фиксировалось в экспериментах.

Оценку данного влияния целесообразно проводить при помощи методов численного моделирования с применением особых методов моделирования турбулентности, которые позволяют выявлять взаимодействие крупных вихрей.

Постановка численной задачи

Для численного расчета была построена геометрия, представляющая собой наклонную неровную поверхность и расположенную над ней плоскую платформу для автоматизированной посадки БПЛА. Для расчета смоделирован режим зависания беспилотного дрона с четырьмя ВКД при посадке на посадочную платформу. Геометрия расчетной области с расположением БПЛА показана на рис. 1. Под платформой помещена рельефная поверхность, имитировавшая неровный грунт.

В качестве граничных условий для данной задачи выбраны следующие условия на входе: полное давление $p = 101325$ Па, скорость потока $V = 2$ м/с в направлении склона ландшафта, температура $T = 300$ К. На выходных границах принято: полное давление $p = 101325$ Па, температура $T = 300$ К. Такие граничные условия соответствуют нормальным атмосферным условиям среды при наличии набегающего потока ветра малого скоростного напора. На всех твердых поверхностях, представленных как конструкцией двигателя и взлетно-посадочной платформы, так и поверхностью окружающего пространства, установлено граничное условие непротекания и прилипания.

Сеточная область вблизи ВКД представляет проточную часть внутри воздушного кольца, разделенную интерфейсными проницаемыми границами. Вся расчетная область состоит из вращающейся (ротор) и стационарной (статор) подобластей. Для согласования результатов, полученных на каждой расчетной сетке, применена технология скользящих сеток. Ротор, под которым для данной задачи понимается воздушный винт внутри воздушного кольца, рассчитывается во вращающейся системе координат, а статор — в стационарной.

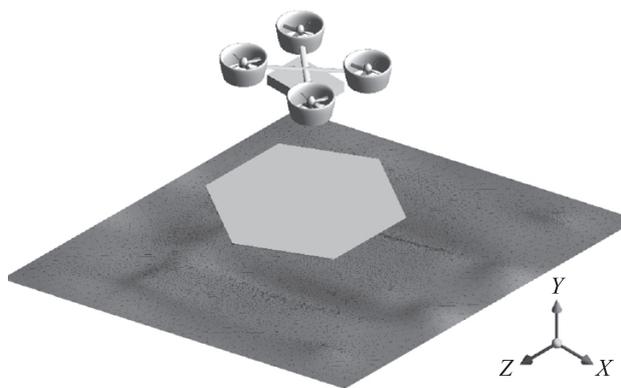


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Fig. 1. Computational domain geometry

Интерфейсная граница разбиения между ротором и статором представляет собой вспомогательную поверхность вращения, разделяющую расчетную сетку на несколько частей и интерполирующую параметры потока между двумя сеточными областями. При таком подходе к решению задачи перестроения расчетной сетки при изменении положения вращающегося тела не происходит, поскольку сетка в роторе вращается за подвижными деталями устройства.

При постановке задачи местоположение БПЛА было установлено на расстоянии 1,5 м над посадочной платформой. Вращение воздушных винтов задавалось со скоростью $n = 3000$ об/мин, что соответствует реализации максимальной силы тяги для данной конструкции ВКД при угле установки лопастей $\varphi_{0,75} = 35^\circ$.

Математическая модель

В связи с тем, что при посадке грузового дрона на плоскую поверхность осуществляется нестационарное взаимодействие вихревых жгутов, образующихся на законцовках лопастей воздушных винтов винто-кольцевых движителей, крайне важным видится рассмотрение режима посадки при помощи вихреразрешающих методов моделирования турбулентности, способных уловить и оценить данное нестационарное влияние, приводящее к возникновению препятствующих посадке сил и моментов вращения.

Турбулентность — это трехмерное нестационарное движение, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение пульсаций скорости в интервале длин волн от минимальных, определяемых вязкими силами, до максимальных, определяемых граничными условиями течения. Проблема совершенствования и верификации методов моделирования турбулентных течений до сих пор актуальна, поскольку, в силу сложной структуры произвольного турбулентного течения, далеко не всегда удается точно смоделировать его характеристики.

В инженерной практике чаще применяется подход, основанный на осреднении уравнений Навье–Стокса (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes) по времени методом Рейнольдса или Фавра. Осреднение по времени согласно подходу Рейнольдса осуществляется представлением каждого газодинамического параметра f в виде суммы его среднего значения (математического ожидания) \bar{f} и пульсационной части f' :

$$f = \bar{f} + f';$$

$$\bar{f}(\mathbf{x}, t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\mathbf{x}, \tau) d\tau,$$

где \mathbf{x} — вектор пространственных координат; t — время; T — период осреднения по времени.

С учетом рейнольдсовского представления газодинамических параметров замкнутость уравнений Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости нарушается. Для замыкания системы необходимо добавить дополнительные соотношения, связывающие тензор напряжений Рейнольдса с параметрами осредненного движения, что определяет большое многообразие существующих моделей турбулентностей, включая SA

(Spalart-Allmaras), $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST (Shear Stress Transport) и др. Каждая RANS-модель турбулентности имеет свои отличительные особенности, поэтому при некоторых видах течений какая-то из моделей может быть более предпочтительна. Однако само допущение изотропного характера турбулентности, лежащее в основе процедуры осреднения уравнений Навье–Стокса, не позволяет получить достаточно точный результат для некоторых видов задач, где имеются крупные нестационарные вихревые структуры. Для таких задач рекомендуется применять особые вихреразрешающие подходы численного моделирования.

Вихреразрешающие подходы непосредственно разрешают турбулентность через полные уравнения Навье–Стокса, которые в консервативной формулировке имеют вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0;$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho V_x \\ \rho V_y \\ \rho V_z \end{pmatrix}; F_x = \begin{pmatrix} \rho V_x \\ \rho V_x V_x + p - \tau_{xx} \\ \rho V_x V_y - \tau_{xy} \\ \rho V_x V_z - \tau_{xz} \end{pmatrix}; F_y = \begin{pmatrix} \rho V_y \\ \rho V_y V_x + p - \tau_{yx} \\ \rho V_y V_y - \tau_{yy} \\ \rho V_y V_z - \tau_{yz} \end{pmatrix};$$

$$F_z = \begin{pmatrix} \rho V_z \\ \rho V_z V_x + p - \tau_{zx} \\ \rho V_z V_y - \tau_{zy} \\ \rho V_z V_z - \tau_{zz} \end{pmatrix};$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right),$$

где t — время; ρ — плотность; V_x, V_y, V_z — составляющие скорости в координатных направлениях x, y, z ; p — давление; τ_{ij} — компоненты тензора вязких напряжений; μ — эффективная вязкость; δ_{ij} — символ Кронекера.

Это позволяет с высокой точностью рассчитать течение любого вида, хотя данные подходы требуют больших вычислительных ресурсов.

С практической точки зрения наиболее интересен метод крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) с относительно низкими требованиями к вычислительным ресурсам, с помощью которого возможно исследовать вихревую структуру течения. Существует много исследований, где в качестве расчетных моделей используются вихреразрешающие подходы или гибридные методы, основанные на них. В работах [9, 10] вихреразрешающие методы используются для моделирования обтекания профилей и несущего винта вертолета.

В LES-методе уравнения Навье–Стокса рассчитываются только для крупных вихрей с максимальными рейнольдсовыми напряжениями, находящихся под прямым воздействием граничных условий, тогда как влияние мелких вихрей исключается при помощи фильтрации. Отфильтрованные изотропные с универсальными характеристиками мелкие вихри моделируются с использованием специальных полуэмпирических подсчетных моделей [11].

В настоящей работе выполнено исследование двух математических моделей, примененных с одинаковой расчетной сеткой и граничными условиями. Отличие моделей заключается в подходах при моделировании турбулентности воздушного потока. В одной из постановок задачи использована система уравнений, включающая нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, замкнутые гибридной моделью турбулентности $k-\omega$ SST. Во второй — система уравнений, состоящая из трехмерных нестационарных уравнений Навье–Стокса в формулировке метода крупных вихрей с использованием модели подсеточной вязкости WALE (Wall Adaptive Large Eddy) [12, 13].

Для дискретизации основных уравнений использован метод конечных объемов на неструктурированной сетке и среднемерный контрольный объем [14]. Интегрирование по времени проведено методом Рунге–Кутты 3-го порядка. Дискретизация невязких потоков осуществлена при помощи схемы MUSCL (Monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws, монотонная противопоточная схема для законов сохранения), а вязких потоков — центральной схемы 2-го порядка точности. Схема MUSCL повысила порядок аппроксимации по пространственным переменным без потери монотонности решения, выполнила условие TVD (Total Variation Diminishing) и представляет собой комбинацию центральных конечных разностей 2-го порядка и диссипативного члена, для переключения между которыми служит ограничитель потока, построенный на основе характеристических переменных. Нахождение градиента и псевдолапласиана в средин-

ной точке грани контрольного объема произведено на основе соотношений, приспособленных для расчетов на сильно растянутых сетках, используемых в пограничном слое. Для решения системы разностных уравнений применен геометрический многосеточный метод [15]. Система сеток различной разрешающей способности построена при помощи метода схлопывающихся граней (Edge-Collapsing Method).

Результаты численных расчетов

В результате расчета получена картина нестационарного течения, т. е. значения газодинамических параметров в каждый момент времени расчетного периода. На рис. 2 приведена картина вихревых жгутов за винто-кольцевыми движителями, которые возникают при использовании вихререзающего метода LES. На рис. 2, *b* показана внезапная потеря устойчивости вихревой системы с выбросом вихрей в сторону. Анализ данной нестационарной картины течения показал, что в вихревой структуре постепенно накапливаются возмущения, которые приводят к внезапным боковым выбросам вихрей, следующих с периодом порядка 0,1 с. При этом на винты и кольца действует мгновенная ударная сила, направленная в боковом направлении. Таким образом, спонтанная потеря устойчивости вихрей приводит к боковой «болтанке».

Расчеты методом RANS не позволяют смоделировать данные выбросы вихрей. Течение вихрей хотя и является нестационарным, но сопровождается лишь слабыми периодическими флуктуациями поля скоростей и давлений.

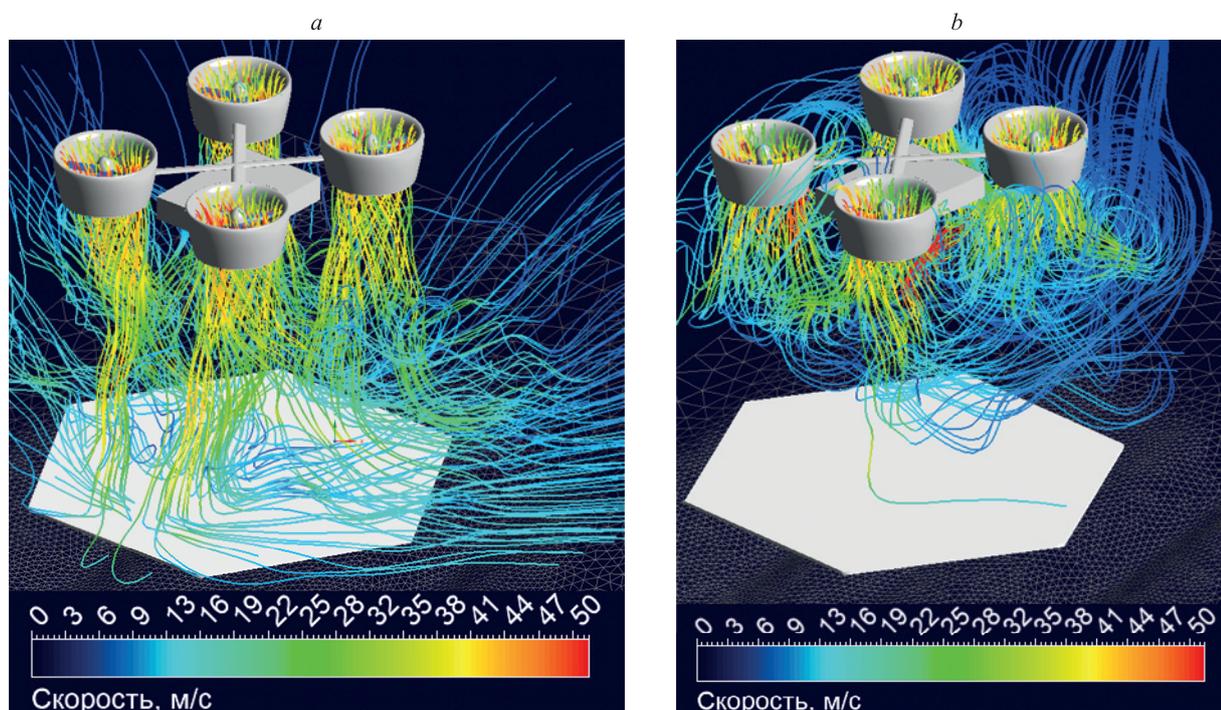


Рис. 2. Результаты расчетов зависания при посадке беспилотного летательного аппарата вихререзающим методом: квазистационарное течение в промежутке между выбросами вихря (*a*); боковой выброс вихря (*b*)

Fig. 2. Results of calculations of hovering during the landing of an unmanned aerial vehicle by the vortex-resolving method: quasi-stationary flow in the interval between the vortex ejections (*a*); lateral vortex ejection (*b*)

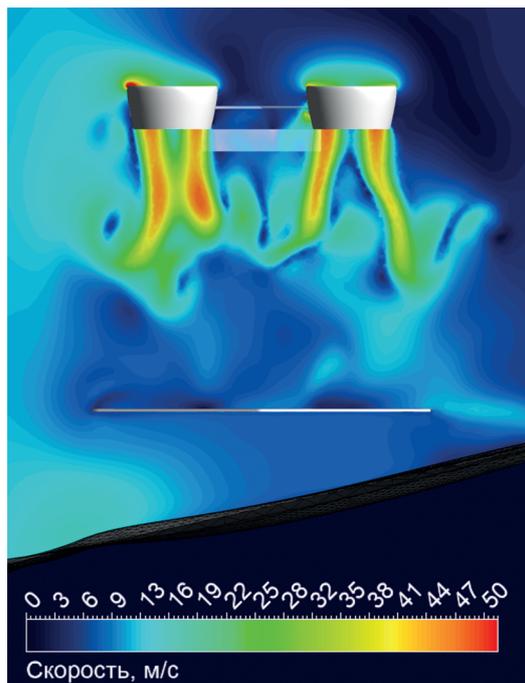


Рис. 3. Поле скоростей, возникающих при посадке беспилотного летательного аппарата в LES-постановке, в плоскости, проходящей через оси вращения воздушных винтов

Fig. 3. Velocity contours during UAV landing, calculated by the LES method, in a plane passing through the axis of rotation

На рис. 3 представлено поле скоростей, которое демонстрирует структуру течения в момент выброса вихря.

В промежутках между моментами выброса вихрей (рис. 2, а) картина течения в целом подобна картине, получающейся при расчете методом RANS. Отличия заметны только на поверхности посадочной платформы. На рис. 4 показаны силы (F), действующие на всю конструкцию БПЛА в поперечном направлении, определенные по результатам расчета. Видно, что пульса-

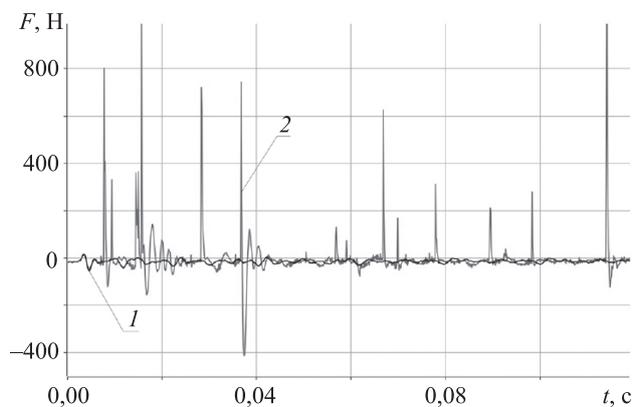


Рис. 4. Боковые нагрузки на винто-кольцевые движители, полученные в результате расчета методом RANS (1) и вихререзающим методом (2)

Fig. 4. Side loads on the impeller obtained as a result of the calculation by the RANS method (1) and the vortex-resolving method (2)

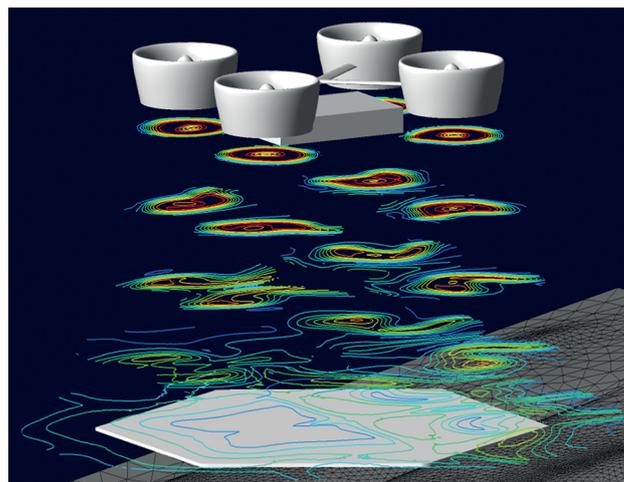


Рис. 5. Изолинии скорости в плоскостях, параллельных плоскости вращения винтов, рассчитанные вихререзающим методом

Fig. 5. Isolines of the velocity in planes parallel to the plane of rotation of the propellers, calculated by the vortex-resolving method

ции силы, рассчитанные методом RANS, соответствуют уровню турбулентных пульсаций. Вихререзающий метод демонстрирует импульсное воздействие на винт.

Для изучения данного феномена выполнен анализ линий тока в плоскостях, параллельных плоскостям вращения винтов (рис. 5). Видно, что форма изолиний на небольшом расстоянии от винтов близка к форме окружности. По мере удаления от винтов форма изолиний теряет устойчивость, получает множество перегибов и смещается от оси вращения винта в сторону.

В определенные моменты времени вихревые жгуты подходят друг к другу на близкое расстояние. Поскольку скорость увеличивается обратно пропорционально расстоянию до вихревого жгута, то в момент такого сближения один из вихрей (более слабый) отбрасывает в сторону. Это и вызывает импульсное воздействие на винты.

Заключение

Выполнено численное исследование зависимости беспилотного летательного аппарата с винто-кольцевыми движителями над посадочной платформой при помощи разных методов моделирования турбулентности. Результаты численных расчетов показали, что моделирование турбулентности методом RANS не позволяет улавливать нестационарные процессы и качественные изменения картины течения, которые возникают при взаимодействии вихревых структур с твердыми поверхностями или друг с другом. При этом в некоторых задачах, как в случае задачи посадки дрона на плоскую платформу, данные процессы могут иметь существенное влияние, что говорит о необходимости применения вихререзающих подходов в моделировании вихревого течения на взлетно-посадочных режимах.

Лишь вихререзающие методы позволяют зафиксировать и оценить влияние вихревых турбулентных структур, возникающих на взлетно-посадочном

режиме полета и оказывающих силовое воздействие на конструкцию летательного аппарата. Описанный эффект носит существенно нестационарный и хаотический характер, поэтому его воздействие необхо-

димо учитывать при проектировании несущей системы, системы управления беспилотного летательного аппарата, а также при проектировании посадочной платформы.

Литература

1. Шайдаков В.И. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Труды МАИ. 2011. № 49. С. 24 [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26562>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 23.03.2021).
2. Мойзыш Е.И., Завалов О.А., Кузнецов А.В. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик дистанционно-пилотируемого летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Труды МАИ. 2012. № 50. С. 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26557>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 23.03.2021).
3. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. М.: Физматлит, 2014. 328 с.
4. Zhang T., Barakos G.N. Review on ducted fans for compound rotorcraft // *Aeronautical Journal*. 2020. V. 124. N 1277. P. 941–974. doi: 10.1017/aer.2019.164
5. Курочкин Ф.П. Проектирование и конструирование самолетов с вертикальным взлетом и посадкой. М.: Машиностроение, 1977. 224 с.
6. Обуховский А.Д. Аэродинамика воздушного винта: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 80 с.
7. Mi B. Numerical investigation on aerodynamic performance of a ducted fan under interferences from the ground, static water and dynamic waves // *Aerospace Science and Technology*. 2020. V. 100. P. 105821. doi: 10.1016/j.ast.2020.105821
8. Deng S., Wang S., Zhang Z. Aerodynamic performance assessment of a ducted fan UAV for VTOL applications // *Aerospace Science and Technology*. 2020. V. 103. P. 105895. doi: 10.1016/j.ast.2020.105895
9. Диизи Ф., Баракос Дж., Кусюмов А.Н., Кусюмов С.А., Михайлов С.А. DES-моделирование обтекания несущего винта вертолета // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2018. № 1. С. 40–46.
10. Кузьмина К.С., Марчевский И.К., Морева В.С., Рятина Е.П. Расчетная схема вихревых методов второго порядка точности для моделирования обтекания профилей несжимаемым потоком // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2017. № 3. С. 73–80.
11. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974. 278 с.
12. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. Турбулентные струи — статические модели и моделирование крупных вихрей. М.: Физматлит, 2013. 360 с.
13. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
14. Volkov K. Numerical analysis of Navier-Stokes equations on unstructured meshes // *Handbook on Navier-Stokes Equations: Theory and Analysis*. Nova Science Publ., 2016. P. 365–442.
15. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications // *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. Springer, 2018. P. 83–149. doi: 10.1007/978-3-319-70945-1_6

Авторы

Рыбаков Дмитрий Владимирович — директор Технопарка «Державинский», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», Тамбов, 392000, Российская Федерация, [sc 57222385435](https://orcid.org/0000-0003-3455-6026), <https://orcid.org/0000-0003-3455-6026>, RDmitryV@mail.ru

Дудников Сергей Юрьевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299053, Российская Федерация, [sc 23992474600](https://orcid.org/0000-0003-1955-4313), <https://orcid.org/0000-0003-1955-4313>, sdudnikov@internet.ru

Булат Павел Викторович — доктор физико-математических наук, кандидат экономических наук, главный научный сотрудник, Балтийский государственный технический уни-

References

1. Shydakov V. I. Ground effect on aerodynamic characteristics of aerial vehicle with lifted system of shrouded rotor. *Trudy MAI*, 2011, no. 49, pp. 24. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26562> (accessed: 23.03.2021). (in Russian)
2. Mojzyh E.I., Zavalov O.A., Kuznetsov A.V. Experimental investigation of aerodynamic characteristics of unmanned aerial vehicle with lifted system of shrouded rotor. *Trudy MAI*, 2012, no. 50, pp. 11. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26557> (accessed: 23.03.2021). (in Russian)
3. Ostroukhov S.P. *Aerodynamics of Airscrews and Fans*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 328 p. (in Russian)
4. Zhang T., Barakos G.N. Review on ducted fans for compound rotorcraft. *Aeronautical Journal*, 2020, vol. 124, no. 1277, pp. 941–974. doi: 10.1017/aer.2019.164
5. Kurochkin F.P. *Design and Construction of Aircraft with Vertical Take-Off and Landing*. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 224 p. (in Russian)
6. Obukhovskii A.D. *Airscrew Aerodynamics*. Novosibirsk, NETI Publ., 2009, 80 p. (in Russian)
7. Mi B. Numerical investigation on aerodynamic performance of a ducted fan under interferences from the ground, static water and dynamic waves. *Aerospace Science and Technology*, 2020, vol. 100, pp. 105821. doi: 10.1016/j.ast.2020.105821
8. Deng S., Wang S., Zhang Z. Aerodynamic performance assessment of a ducted fan UAV for VTOL applications. *Aerospace Science and Technology*, 2020, vol. 103, pp. 105895. doi: 10.1016/j.ast.2020.105895
9. Dehaeze F., Barakos G.N., Kuyumov A.N., Kuyumov S.A., Mikhailov S.A. Exploring the detached-eddy simulation for main rotor flows. *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 40–47. doi: 10.3103/S1068799818010063
10. Kuz'mina K.S., Marchevskii I.K., Moreva V.S., Ryatina E.P. Numerical scheme of the second order of accuracy for vortex methods for incompressible flow simulation around airfoils. *Russian Aeronautics*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 398–405. doi: 10.3103/S1068799816030114
11. Bradshaw P. *An Introduction to Turbulence and Its Measurement*. Elsevier Science & Technology, 1971, 218 p.
12. Volkov K.N., Emelianov V.N., Zazimko V.A. *Turbulent Jets — Statistical Models and Large Vortex Modeling*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 360 p. (in Russian)
13. Volkov K.N., Emelyanov V.M. *Modeling of Large Vortices in Calculations of Turbulent Flows*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 368 p. (in Russian)
14. Volkov K. Numerical analysis of Navier-Stokes equations on unstructured meshes. *Handbook on Navier-Stokes Equations: Theory and Applied Analysis*. Nova Science Publ., 2016, pp. 365–442.
15. Volkov K. Multigrid and preconditioning techniques in CFD applications. *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. Springer, 2018, pp. 83–149. doi: 10.1007/978-3-319-70945-1_6

Authors

Dmitriy V. Rybakov — Chief Executive Officer of Technology Park “Derzhavinsky”, Derzhavin Tambov State University, Tambov, 392000, Russian Federation, [sc 57222385435](https://orcid.org/0000-0003-3455-6026), <https://orcid.org/0000-0003-3455-6026>, RDmitryV@mail.ru

Sergey Yu. Dudnikov — PhD, Leading Researcher, Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russian Federation, [sc 23992474600](https://orcid.org/0000-0003-1955-4313), <https://orcid.org/0000-0003-1955-4313>, sdudnikov@internet.ru

Pavel V. Bulat — D.Sc., PhD, Chief Researcher, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; Chief Researcher, Sevastopol State

верситет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация; главный научный сотрудник, Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299053, Российская Федерация, [sc 55969578400](https://orcid.org/0000-0003-0099-9953), <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>, pavelbulat@mail.ru

Чернышов Павел Сергеевич — младший научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299053, Российская Федерация, [sc 57215086432](https://orcid.org/0000-0003-1433-4194), <https://orcid.org/0000-0003-1433-4194>, pashachp8@gmail.com

Вокин Леонид Олегович — младший научный сотрудник, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 57222385381](https://orcid.org/0000-0003-2944-1822), <https://orcid.org/0000-0003-2944-1822>, leonidvokin@mail.ru

University, Sevastopol, 299053, Russian Federation, [sc 55969578400](https://orcid.org/0000-0003-0099-9953), <https://orcid.org/0000-0003-0099-9953>, pavelbulat@mail.ru

Pavel S. Chernyshov — Junior Researcher, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; Junior Researcher, Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russian Federation, [sc 57215086432](https://orcid.org/0000-0003-1433-4194), <https://orcid.org/0000-0003-1433-4194>, pashachp8@gmail.com

Leonid O. Vokin — Junior Researcher, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 57222385381](https://orcid.org/0000-0003-2944-1822), <https://orcid.org/0000-0003-2944-1822>, leonidvokin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2021
Одобрена после рецензирования 31.03.2021
Принята к печати 29.05.2021

Received 09.03.2021
Approved after reviewing 31.03.2021
Accepted 29.05.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»