

Численное моделирование вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата с винтокольцевыми движителями вихреразрешающими методами

Д.В. РЫБАКОВ
(ТГУ им. Г.Р. Державина,
Тамбов),

П.С. ЧЕРНЫШОВ,
Л.О. ВОКИН,
Н.В. ПРОДАН

(БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург)
pashachp8@gmail.com

Рассмотрена задача работы беспилотного летательного аппарата с винтокольцевыми движителями в режиме зависания над плоской посадочной платформой. Проведены численные расчеты газодинамики с использованием традиционного подхода моделирования турбулентности на основе осредненных уравнений Навье – Стокса и вихреразрешающим методом крупных вихрей. Получены результаты, подтверждающие необходимость использования вихреразрешающих подходов.

Беспилотный летательный аппарат, винтокольцевой движитель, численное моделирование, вихреразрешающие подходы, метод крупных вихрей

В работе [1] даны материалы по методу расчета подъемной силы беспилотного летательного аппарата (БПЛА), испытывающего влияние экранного эффекта земли, а также представлен аналитический вывод расчетной формулы для винтокольцевого движителя (ВКД) через уравнение импульсов. Неменьший интерес вызывает влияние хаотических нестационарных вихревых турбулентных структур на контрольные поверхности ВКД при режиме посадки, что необходимо для точности ее реализации.

Объектом исследования является грузовой БПЛА с четырьмя ВКД для создания подъемной силы и плоская посадочная платформа конечного размера, образующие мобильную систему для автоматизированного взлета и посадки в непригодных для этого условиях.

Конструкция ВКД – это система из тяжелонагруженного воздушного винта и воздушного кольца, образованного вращением аэродинамического профиля. Применение воздушного кольца в условиях малой поступи воздушного винта позволяет существенно увеличить расход воздуха, проходящего через контур вращения винта, увеличить тягу и уменьшить мощность на воздушном винте. Конструкция ВКД известна и достаточно хорошо исследована в работах [1–3]. В сочетании с тяжелонагруженными винтами ВКД имеет достаточно высокие значения аэродинамических характеристик при высоком кпд [4, 5].

В силу предназначения рассматриваемого объекта для точной посадки и взлета БПЛА в непригодных для этого условиях необходимо обеспечение точности посадки на плоскую платформу с учетом оценки нестационарного влияния оторванных от ВКД вихрей. Оценку данного влияния целесообразно проводить при помощи методов численного моделирования с применением особых методов моделирования турбулентности.

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 моделирования турбулентных течений до сих пор актуальна, поскольку в силу сложной структуры произвольного турбулентного течения далеко не всегда удастся точно смоделировать его характеристики.

В инженерной практике численной газодинамики чаще применяется подход, основанный на осреднении уравнений Навье – Стокса (RANS) 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' :

$$f = \bar{f} + f'; \quad (1)$$

$$\bar{f}(x, t) = \overline{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, \tau) d\tau}. \quad (2)$$

С учетом данного 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, $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST 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 о существовании изотропной турбулентности, лежащее в основе процедуры осреднения уравнений Навье – Стокса, не позволяет получить достаточно точный результат для некоторых видов задач. Для таких задач рекомендуется применять особые вихреразрешающие подходы численного моделирования турбулентности.

Вихреразрешающие подходы непосредственно разрешают турбулентность через полные уравнения Навье – Стокса, которые имеют вид

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

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) 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 [6, 7] 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; влияние мелких вихрей исключается при помощи фильтрации. Отфильтрованные мелкие вихри, изотропные с универсальными характеристиками, моделируются с использованием специальных полуэмпирических подсеточных моделей [8, 9].

В связи с тем что при посадке грузового БПЛА на плоскую поверхность осуществляется нестационарное взаимодействие вихревых жгутов, образующихся на законцовках лопастей воздушных винтов ВКД, крайне важно рассмотрение режима посадки при помощи вихреразрешающих методов моделирования, позволяющих оценить данное нестационарное влияние, приводящее к возникновению мешающих посадке сил и моментов вращения. С этой целью задача посадки БПЛА на посадочную платформу была рассмотрена в двух разных постановках.

Для численного расчета была построена геометрия – наклонная неровная поверхность с расположенной над ней плоской платформой для автоматизированной посадки БПЛА, включая рассматриваемый грузовой БПЛА с четырьмя ВКД. Для расчета моделировался режим зависания БПЛА при посадке его на посадочную платформу.

Геометрия расчетной области с расположением БПЛА показана на рис. 1.

Задача была рассчитана на двух математических моделях: в одной был использован RANS-подход с SST-моделью, во второй – LES-подход с подсеточной моделью WALE. Обе системы уравнений дополнены уравнением состояния совершенного газа и уравнением энергии. При постановке задачи было установлено местоположение БПЛА (на расстоянии 1,5 м над посадочной платформой). Вращение воздушных винтов задавалось вращением твердых поверхностей винта со скоростью $n = 3000$ об./мин, что соответствует режиму оптимального вращения для данных ВКД при угле установки $\varphi_{0,75} = 35^\circ$. Посадка БПЛА рассчитывалась при нулевой скорости ветра $V = 0$ м/с.

Расчетом при помощи RANS-подхода была получена картина течения работы ВКД на режиме взлета/посадки с плоской платформы. Образующиеся линии тока практически не меняют своей конфигурации на всем промежутке расчета, поэтому можно условно принять данное течение установленным и стационарным.

При помощи расчета методом крупных вихрей были получены результаты, отличные от результатов расчета RANS-подходом. Оторванные от задних кромок ВКД свободные вихри, распространяясь в осевом направлении и взаимодействуя с поверхностью платформы, вносят значительные изменения в поле течения, что можно увидеть по существенным периодическим изменениям конфигурации линий тока течения (рис. 2).

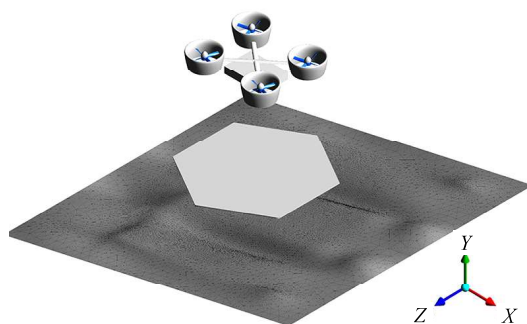


Рис. 1

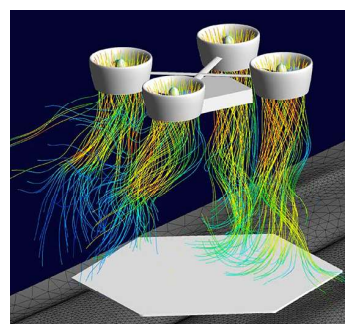


Рис. 2

На рис. 3 показано скоростное поле в трехмерной области расчетной геометрии, где непосредственно видны трехмерные вихревые структуры.

Подобные периодические изменения картины течения оказывают силовое воздействие на БПЛА, создавая на его поверхности дополнительные силы и моменты, которые могут привести не только к неточной посадке БПЛА, но и к аварийным режимам полета.

На рис. 4 представлены графики сил, возникающих на поверхности кольца и винта ВКД в проекции на ось X (см. рис. 1). Как видим, на воздушное кольцо ВКД оказывается кратковременное воздействие сил, которое было обнаружено при помощи моделирования турбулентности вихреразрешающим LES-методом (рис. 4, кривая 2), на кривой 1, соответствующей расчету RANS-методом, в силу гипотезы о существовании изотропной турбулентности при осреднении потока данных пульсаций не наблюдается.

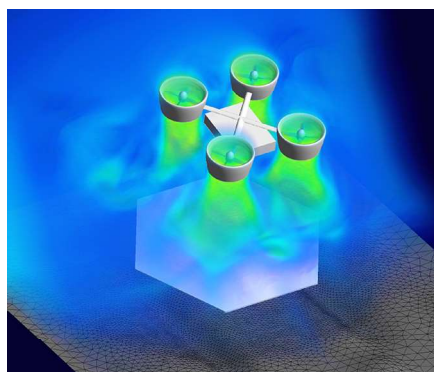


Рис. 3

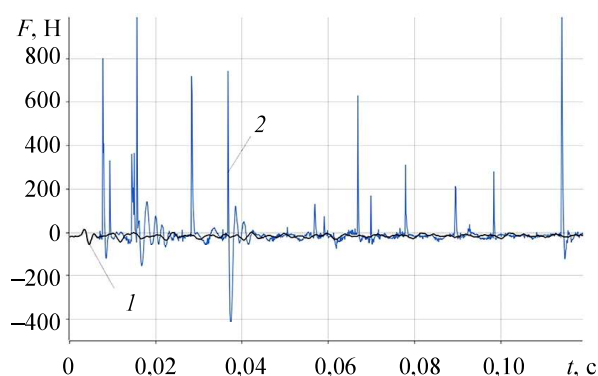


Рис. 4

Таким образом, моделирование турбулентности RANS-методом 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 БПЛА на плоскую платформу, данные процессы могут оказывать существенное влияние на динамику полета, что говорит о необходимости применения вихреразрешающих подходов в моделировании турбулентности.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайдаков В.И. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2011. № 49.

URL:<http://trudymai.ru/upload/iblock/228/vliyanie-blizosti-zemli-na-aerodinamicheskie-kharakteristiki-letatel'nogo-apparata-s-nesushchey-sistemoy-vint-v-koltse.pdf?lang=ru&issue=49> (дата обращения: 10.09.2020).

2. Мойзых Е.И., Завалов О.А., Кузнецов А.В. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик дистанционно-пилотируемого летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце» // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 50. http://trudymai.ru/upload/iblock/356/eksperimentalnye-issledovaniya-aerodinamicheskikh-kharakteristik-distantsionno_pilotiruемого-letatel'nogo-apparata-s-nesushchey-sistemoy-_vint-v-koltse_.pdf?lang=ru&issue=50 (дата обращения: 10.09.2020).
3. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. М.: Физматлит, 2014. 328 с.
4. Курочкин Ф.П. Проектирование и конструирование самолетов с вертикальным взлетом и посадкой. М.: Машиностроение, 1977. 244 с.
5. Обуховский А.Д. Аэродинамика воздушного винта. Новосибирск: НГТУ, 2009. 80 с.
6. Диизи Ф. и др. DES-моделирование обтекания несущего винта вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 40–46.
7. Кузьмина К.С. и др. Расчетная схема вихревых методов второго порядка точности для моделирования обтекания профилей несжимаемым потоком // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 73–80.
8. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М.: Мир, 1974. 278 с.
9. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. Турбулентные струи – статические модели и моделирование крупных вихрей. М.: Физматлит, 2014. 360 с.

Поступила в редакцию 17.09.20

После доработки 8.10.20

Принята к публикации 8.10.20

Numerical Simulation of the Vertical Landing of Unmanned Aerial Vehicle with Ducted Fan Propulsors by Vortex-Resolving Methods

D.V. RYBAKOV¹, P.S. CHERNYSHOV², L.O. VOKIN², AND N.V. PRODAN²

¹ Derzhavin Tambov State University, Tambov

² Ustinov Baltic State Technical University “Voenmekh”, St. Petersburg

The paper analyzes the problem of the operation of an unmanned aerial vehicle with ducted fan propulsors in hovering mode over a flat landing platform. Numerical calculations of gas dynamics were carried out using the traditional approach to modeling turbulence based on averaged Navier–Stokes equations and the eddy-resolving method of large eddies. The results, which confirm a need to use eddy-resolving approaches, were obtained.

Unmanned aerial vehicle, ducted fan propulsor, numerical simulation, vortex-resolving approaches, large eddy simulation