

УДК 629.735

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НЕСУЩЕГО И РУЛЕВОГО ВИНТОВ ВЕРТОЛЕТА НА ОСОБЫХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТА

Ю.М. ИГНАТКИН, П.В. МАКЕЕВ, А.И. ШОМОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Ципенко В.Г.

Работа посвящена моделированию и исследованию аэродинамических характеристик комбинации несущего винта (НВ) и рулевого винта (РВ) вертолета классической одновинтовой схемы. Используется нелинейная лопастная вихревая модель винта со свободным диффундирующим вихревым следом, разработанная на кафедре проектирования вертолетов МАИ. Рассмотрен ряд особых режимов полета вертолета. Рассчитаны аэродинамические характеристики винтов.

Ключевые слова: численное исследование, интерференция, несущий винт, рулевой винт, особые режимы.

Вопросы обеспечения безопасности полета одновинтового вертолета с попаданием рулевого винта (РВ) в критические режимы работы, когда резко падает его тяга и эффективность как органа путевого управления, являются весьма актуальными, поскольку большой процент авиационных происшествий (АП) на вертолетах связан с ошибками экипажа при пилотировании вертолета в сложных ситуациях. Согласно представленному МАК [1] анализу АП на вертолетах за 2005-2010 гг. в гражданской авиации 73,5 % АП связано с ошибками экипажа. Европейская группа по безопасности полетов вертолетов в результате анализа АП выделила четыре ситуации, при попадании в которые летчики наиболее часто не смогли выбрать правильную стратегию управления:

- 1) дезориентация пилота в сложных метеорологических условиях;
- 2) попадание НВ в режим "вихревого кольца";
- 3) потеря эффективности РВ, включая его попадание в режим "вихревого кольца";
- 4) переворот вертолета при маневрировании на земле или вблизи препятствий.

Анализ сложных критических ситуаций резкого снижения эффективности работы РВ, полученных на основе результатов летных испытаний вертолетов, изложен в работах [2 – 6]. В работе [3] представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований интерференции НВ и РВ, выполненных на основе полей индуктивных скоростей, замеренных в эксперименте в месте расположения РВ.

Расчетные исследования интерференции НВ и РВ стали возможны при определенном развитии вычислительной техники, а также при разработке нелинейных лопастных вихревых моделей винтов. Результаты первых отечественных исследований в этом направлении выполнены на базе нелинейной нестационарной лопастной вихревой модели винта, разработанной в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского [7].

Интерференция НВ и РВ при малых поступательных скоростях горизонтального полета вертолета со скольжением связана с особенностями формирования вихревого следа за винтом, установленными как в результате экспериментальных [8 – 10], так и теоретических [7; 11; 12] исследований. М.Л. Миль и М.К. Сперанский на основе экспериментальных исследований, выполненных в аэродинамической трубе ЦАГИ [8], показали, что вихревая система НВ уже на малых скоростях полета преобразуется в систему, похожую на вихревую систему крыла, когда на краях образуются мощные вторичные вихревые жгуты. Формирование этих вихревых жгутов отмечено в работе В.Э. Баскина при расчете нелинейного вихревого следа за винтом [12]. В работе [11] определены основные параметры этих вторичных вихревых жгутов большой интенсивности для различных режимов работы винта. В частности, установлено, что углы наклона вихревых жгутов по

отношению к вектору скорости невозмущенного потока существенно меньше, чем углы наклона скошенного вихревого цилиндра в непосредственной близости от диска винта. Также установлено, что циркуляция этих вихревых жгутов интенсивно возрастает на малых скоростях полета и достигает максимума при относительной скорости $\tilde{V} \approx 1$ (соответствует $\mu \approx 0,05$ при $c_T \approx 0,01$), а затем, с ростом скорости, уменьшается (здесь $\tilde{V} = V/v_{yB}$, где v_{yB} – индуктивная скорость на режиме висения, вычисленная по теории идеального винта). Отмеченное свойство вихревой системы подтверждено результатами летных испытаний по визуализации вихревых систем вертолетов Ми-4 и Ми-8, выполненных в ЛИИ [10], а также результатами модельных экспериментальных исследований по замеру индуктивных скоростей в следе за винтом [9].

Данная статья посвящена численному исследованию индуктивного влияния нелинейного вихревого следа НВ на аэродинамические характеристики РВ на режиме крутого снижения НВ (когда НВ попадает в режим "вихревого кольца"), а также на режиме горизонтального полета вертолета с небольшими скоростями со скольжением. Численные исследования выполнены на основе программного комплекса, разработанного на базе нелинейной лопастной вихревой модели винта со свободным диффундирующим следом [13 – 15]. В качестве объекта исследования рассматривается модель комбинации НВ и РВ вертолета Ми-2 [16].

Расчетная модель несущего и рулевого винтов одновинтового вертолета

На рис. 1 показана расчетная модель комбинации несущего и рулевого винтов вертолета Ми-2 [16]. При проведении расчетов несущий винт моделировался с учетом колебаний лопастей относительно горизонтальных шарниров, а рулевой винт считался абсолютно жестким.

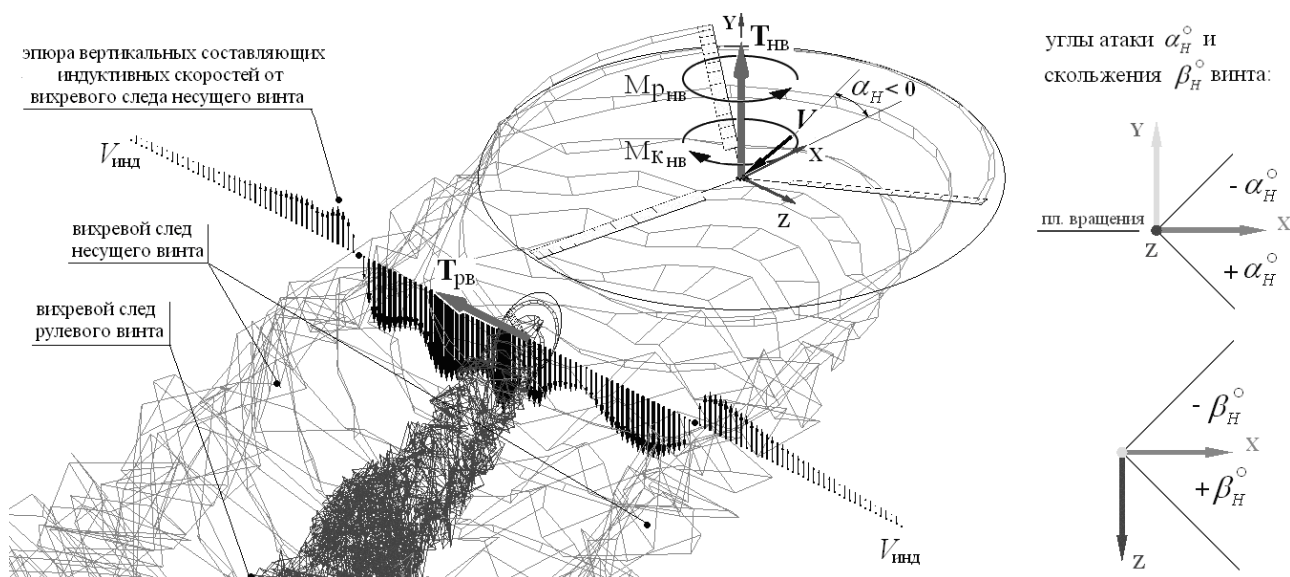


Рис. 1. Расчетная модель комбинации несущего и рулевого винтов

За время одного оборота РВ (360°) НВ проходит около 63° по азимуту. Таким образом, для совместного расчета двух винтов необходима увязка расчетного шага по времени, для чего в ходе расчета использовалось укрупнение сетки вихревого следа НВ. Для ускорения расчетов в случае совместного расчета винтов РВ начинал работу не с начала расчета, а с момента выхода НВ на устойчивый режим работы, когда за ним наблюдался устойчивый и протяженный вихревой след, а аэродинамические характеристики выходили "на полку". Далее производился совместный расчет комбинации винтов, который продолжался до получения достаточно протяженного вихревого следа от РВ, необходимого для анализа его аэродинамических характеристик (около 18 оборотов винта).

Расчет интерференции между НВ и РВ на режиме "вихревого кольца" НВ

Как показывает предварительный анализ векторного поля индуктивных скоростей, создаваемого НВ при работе на режиме "вихревого кольца", РВ может попасть в область неблагоприятного индуктивного влияния со стороны НВ [17].

На рис. 2а изображена картина обтекания изолированного НВ на режиме "вихревого кольца" (угол атаки винта $\alpha_n = 90^\circ$; скорость снижения $V_y = 7$ м/с) с помощью линий тока, построенных в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения лопастей винта и проходящей через вал винта [17]. Видно, что РВ приближается к ядру "вихревого кольца" НВ, в котором наблюдается мощное циркуляционное вращение с окружной скоростью до 35 м/с. Мощность, потребляемая НВ в этом случае ($\alpha_n = 90^\circ$; $V_y = 7$ м/с), близка к максимальной. Воздействие со стороны вихревого следа НВ на РВ на этом режиме проявляется не только в наличии окружной составляющей скорости, которая уменьшает или увеличивает окружную скорость вращения лопастей РВ в зависимости от направления его вращения, но также осевой составляющей индуктивной скорости, направленной вдоль оси "вихревого кольца".

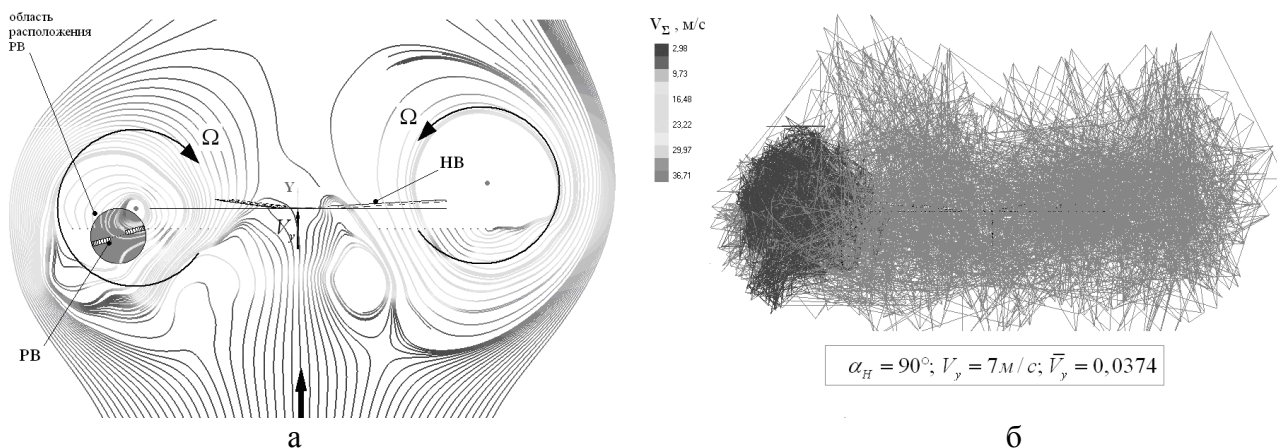


Рис. 2 а - линии тока в потоке, обтекающем изолированный несущий винт на режиме "вихревого кольца"; б - вихревой след несущего и рулевого винтов с учетом взаимной интерференции

При исследовании интерференции винтов сначала рассчитывался изолированный РВ и определялся угол установки его лопастей φ_7 , необходимый для обеспечения тяги, потребной для компенсации реактивного крутящего момента НВ, работающего на режиме "вихревого кольца". Затем при этом же значении угла φ_7 проводился совместный расчет НВ и РВ с учетом интерференции.

Форма вихревого следа НВ (светло-серый цвет) и РВ (темно-серый цвет), полученная на указанном режиме работы с учетом взаимной интерференции, представлена на рис. 2б. Видно, что вихревой след НВ оказывает значительное влияние на форму следа РВ.

На рис. 3 представлены зависимости тяги РВ от числа оборотов этого винта для случаев изолированной работы и работы с учетом интерференции (для двух направлений вращения РВ). Крутящий момент на данном режиме "вихревого кольца" НВ более чем на 50 % больше, чем на висении [17]. Потребная для уравнивания крутящего момента от НВ тяга РВ на данном режиме "вихревого кольца" НВ без учета интерференции составляет, как показали расчеты, около 324 кгс. Из графиков видно, что тяга РВ с учетом интерференции в среднем на 14 % меньше, чем для изолированного рулевого винта при равных значениях угла φ_7 при прямом направлении вращения РВ, когда верхняя лопасть движется вперед (вращение по часовой стрелке). При изменении направления вращения на обратное, когда верхняя лопасть движется назад (вращение против часовой стрелки), тяга РВ, напротив, становится на 8 % больше. Разница в тягах при различном направлении вращения РВ достигает 22 % (рис. 3).

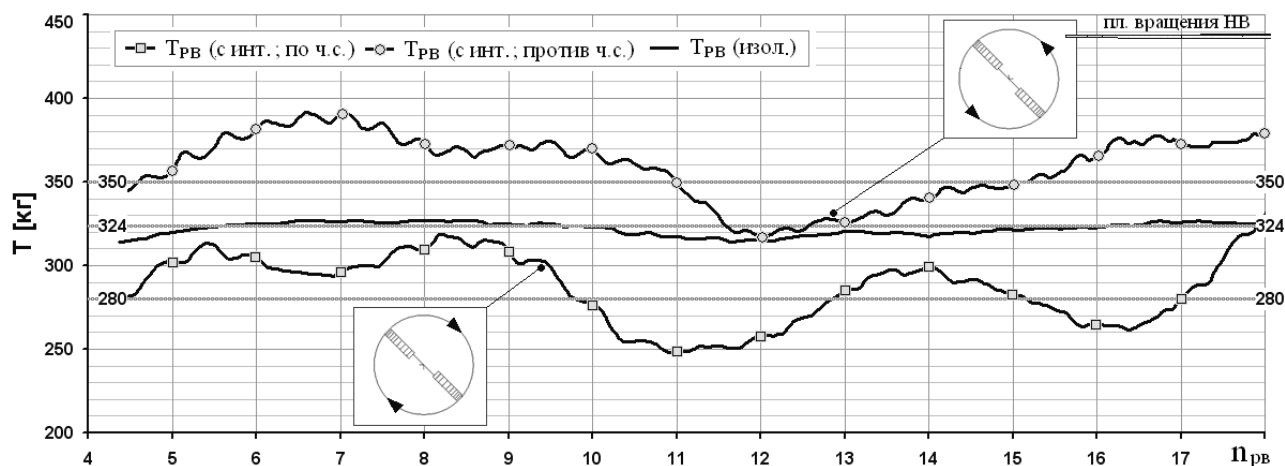


Рис. 3. Зависимость тяги изолированного РВ и РВ с учетом интерференции от НВ на режиме "вихревого кольца" ($\alpha_n = 90^\circ$; $V_y = 7$ м/с) от $n_{рв}$

Расчет интерференции между НВ и РВ на режиме горизонтального полета со скоростью $V = 10$ м/с со скольжением

На рис. 1 представлен вихревой след НВ на режиме горизонтального полета, показаны только вихри, сходящие с концевых частей лопастей. Хорошо видны мощные вторичные вихревые жгуты, в которые сворачиваются края вихревого следа. Из анализа эпюр вертикальных составляющих индуктивных скоростей от вихревого следа НВ можно судить о характере индуктивного воздействия вторичных вихревых жгутов НВ на РВ. Наблюдается небольшой восходящий поток во внешней части и интенсивный нисходящий поток во внутренней части (между жгутами). Непосредственно в районе вихревых жгутов этот поток при попадании в него РВ вызывает изменение окружной скорости вращения РВ. Также можно выделить мощный осевой индуктивный поток, направленный вдоль оси вихревого жгута, изменяющий суммарную скорость потока в направлении, перпендикулярном плоскости диска РВ.

Для расчета аэродинамических характеристик РВ с учетом интерференции НВ были выбраны угол скольжения $\beta_n = 0^\circ$, а также два угла скольжения $\beta_n = -50^\circ$; 50° , при которых РВ попадает непосредственно в зону левого или правого жгутов, соответственно. На рис. 4 показан вихревой след от НВ (светло-серый цвет) и РВ (темно-серый цвет), рассчитанный с учетом интерференции ($\beta_n = 0^\circ$). На рис. 5 представлены графики зависимости тяги РВ от числа его оборотов для случаев изолированного РВ и РВ с учетом интерференции при разных направлениях его вращения. Видно, что эффект интерференции оказывает положительный эффект на РВ, в обоих случаях увеличивая его тягу до 15 % при обратном направлении вращения РВ, и соответственно, уменьшая угол установки лопастей РВ, требуемый для компенсации реактивного момента от НВ. На рис. 6, 8 показан вихревой след от НВ и РВ, рассчитанный при $\beta_n = -50^\circ$ и $\beta_n = 50^\circ$. Вихревой след РВ с учетом интерференции значительно деформирован, что ведет к существенному изменению аэродинамических характеристик РВ и пульсациям тяги. На рис. 7, 9 представлены графики зависимости тяги РВ от $n_{рв}$ для случаев изолированного РВ и РВ с учетом интерференции при разном направлении вращения РВ. Видно, что при $\beta_n = -50^\circ$ интерференция оказывает отрицательный эффект на РВ, уменьшая его тягу на 22 % при прямом направлении вращения РВ. При изменении направления вращения этот эффект преодолевается, что дает уже прирост тяги до 14 %. Таким образом, разница в тягах при различном направлении вращения РВ достигает 36 %. При $\beta_n = 50^\circ$ тяга рулевого винта за счет эффекта интерференции увеличивается на 46 % при прямом направлении вращения РВ и на 26 % - при обратном направлении вращения РВ.

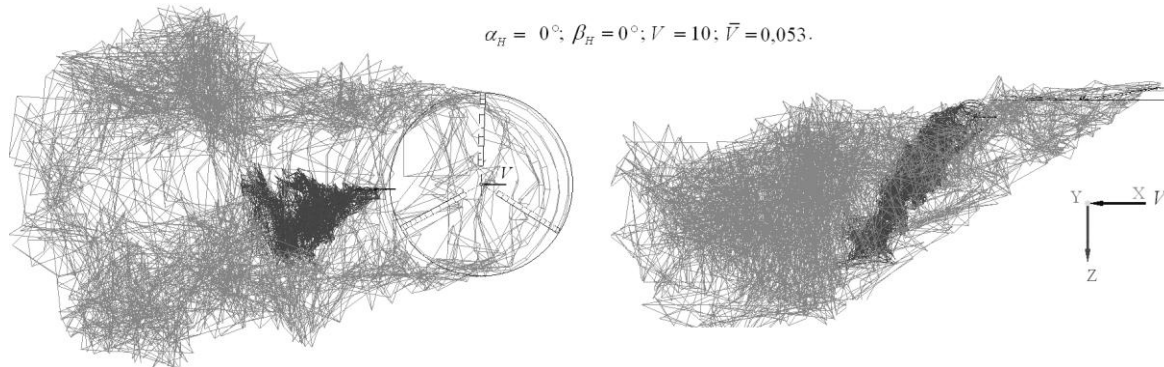


Рис. 4. Вихревой след НВ и РВ с учетом интерференции ($\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 0^\circ; V = 10$ м/с)

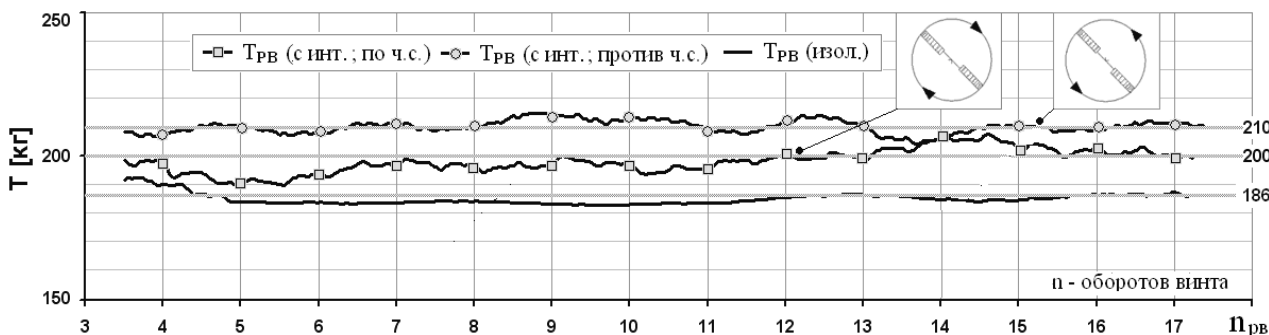


Рис. 5. Зависимость тяги изолированного РВ и РВ с учетом интерференции со стороны НВ ($\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = 0^\circ; V = 10$ м/с)

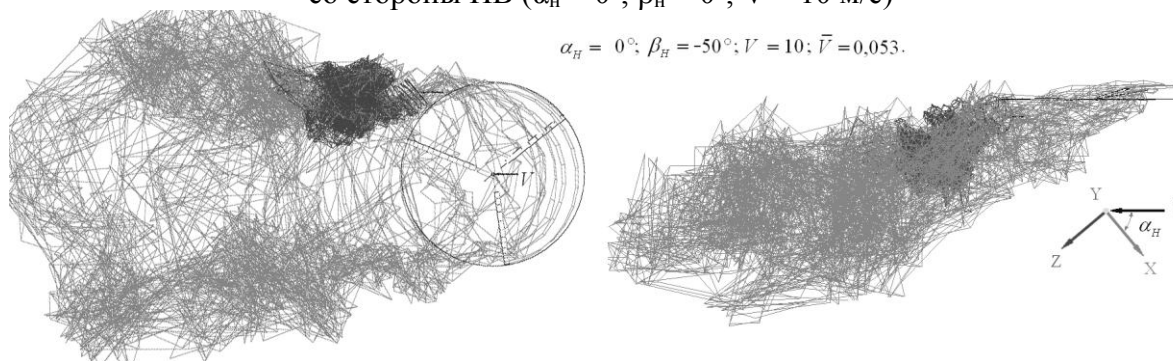


Рис. 6. Вихревой след НВ и РВ с учетом интерференции ($\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -50^\circ; V = 10$ м/с)

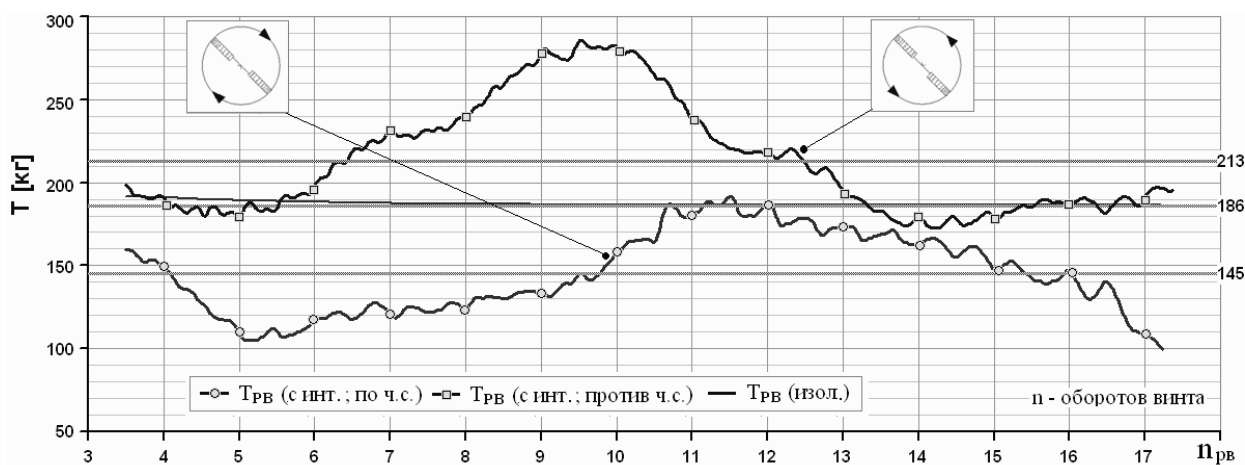


Рис. 7. Зависимость тяги изолированного РВ и РВ с учетом интерференции со стороны НВ ($\alpha_H = 0^\circ; \beta_H = -50^\circ; V = 10$ м/с)

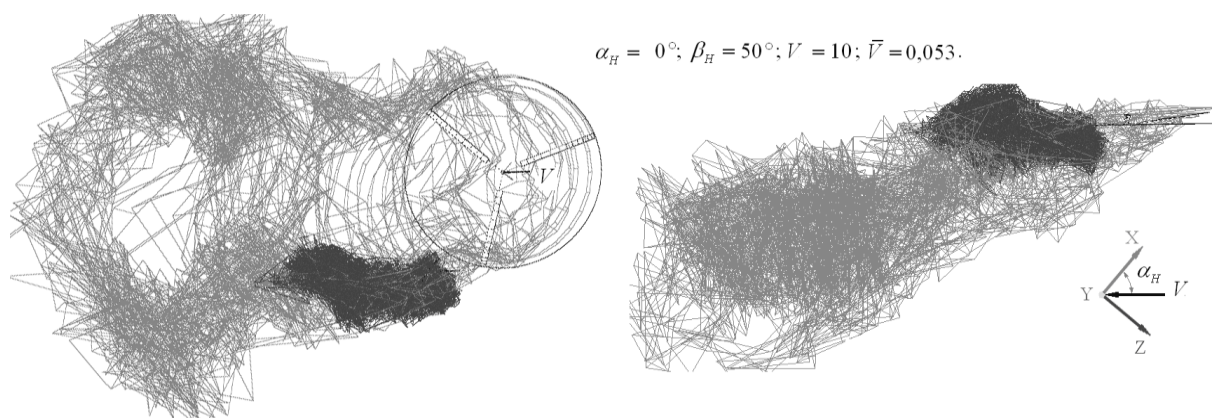


Рис. 8. Вихревой след НВ и РВ с учетом интерференции ($\alpha_H = 0^\circ$; $\beta_H = 50^\circ$; $V = 10$ м/с)

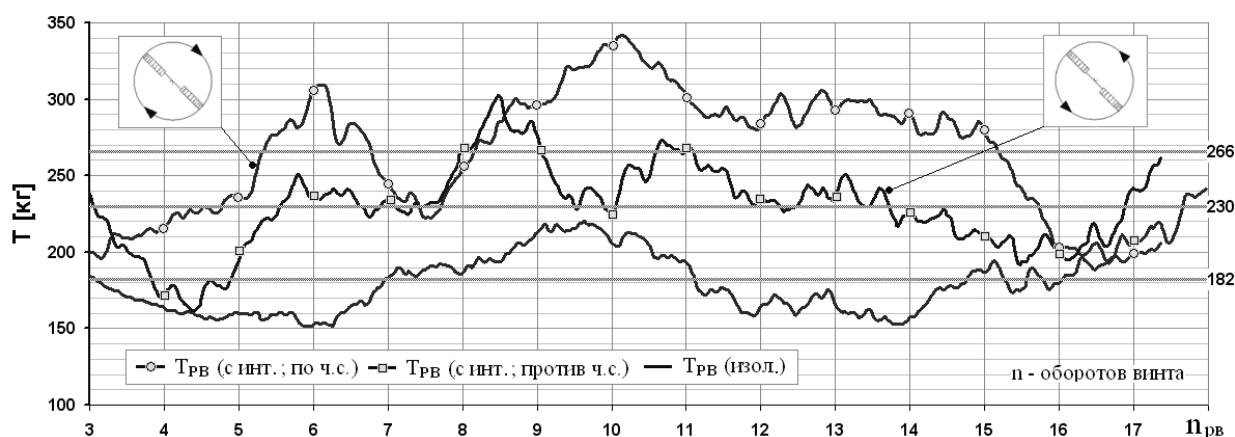


Рис. 9. Зависимость тяги изолированного РВ и РВ с учетом интерференции со стороны НВ ($\alpha_H = 0^\circ$; $\beta_H = 50^\circ$; $V = 10$ м/с)

Выводы

На базе нелинейной лопастной вихревой модели винта со свободным диффундирующим вихревым следом разработан метод совместного расчета аэродинамических характеристик НВ и РВ с учетом их интерференции.

В статье рассмотрены особые режимы полета вертолета, когда индуктивное воздействие НВ на РВ проявляется в значительной степени: режим отвесного снижения, когда НВ попадает в режим вихревого кольца, а РВ находится практически в ядре вихревого "бублика" ($V_y = 7$ м/с, $\alpha_H = 90^\circ$), и режимы горизонтального полета со снижением ($V = 10$ м/с, $\alpha_H = 90^\circ$, $\beta_H = -50^\circ$; 0° ; 50°).

Расчеты выполнены для двух направлений вращения РВ – прямого (против часовой стрелки), когда верхняя лопасть движется назад, и обратного (по часовой стрелке), когда верхняя лопасть движется вперед.

Установлено, что на режиме вихревого кольца НВ ($V_y = 7$ м/с, $\alpha_H = 90^\circ$) при прямом направлении вращения РВ его тяга увеличивается на 8 %, а при обратном направлении вращения РВ тяга уменьшается на 14 % по сравнению с тягой изолированного винта на этом же режиме работы.

В горизонтальном полете ($V = 10$ м/с, $\alpha_H = 90^\circ$) при $\beta_H = 50^\circ$ при прямом направлении вращения РВ его тяга возрастает на 46 % и на 26 % при обратном направлении вращения в сравнении с тягой изолированного РВ на том же режиме работы. При отрицательных углах скольжения $\beta_H = -50^\circ$ тяга РВ при прямом вращении увеличивается на 14 %, а при обратном уменьшается на 22 % по сравнению с его тягой при изолированной работе. При $\beta_H = 0^\circ$ индуктивное воздействие НВ на РВ приводит к увеличению тяги последнего при обоих направлениях вращения (до 13 % при прямом направлении вращения) по сравнению с тягой изолированного винта.

Во всех рассмотренных случаях воздействие РВ на НВ проявляется незначительно.

Разработанный расчетный метод позволяет рассчитать области режимов полета, где неблагоприятное воздействие НВ на РВ проявляется в наибольшей степени, и может привести к неуправляемому вращению вертолета.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.1836).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шибяев В., Фаворова Т., Аполлонов Д. Тренировки пилотов в расширенной области параметров движения воздушного судна как залог безопасности полетов // *Аэрокосмический курьер*. - 2011. - № 5. - С 48 – 49.
2. Браверманн А.С., Вайнтриб А.П. Динамика полета // *Предельные режимы полета*. - М.: Машиностроение, 1988.
3. Анимица В.А., Головкин В.А., Крайнов М.В., Новак В.Н., Тарасов Н.Н., Щеглова В.М. Расчетно-экспериментальные исследования влияния полей индуктивных скоростей за несущим винтом на аэродинамические характеристики рулевого винта на малых скоростях полета вертолета: труды 6-го форума Российского вертолетного общества. - М., 2004. - С. 49 – 64.
4. Анимица В.А., Леонтьев В.А. О "самопроизвольном" вращении одновинтовых вертолетов // *Научный Вестник МГТУ ГА*. - 2012. - № 172. - С. 96 – 102.
5. Володко А.М. Безопасность полета вертолетов. - М.: Транспорт, 1981.
6. Ромасевич В.Ф., Самойлов Г.А. Практическая аэродинамика вертолета. - М.: Воениздат, 1980.
7. Белоцерковский С.М., Локтев Б.Е., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамических и упругих характеристик винтов вертолета. - М.: Машиностроение, 1992.
8. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверманн А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты // *Расчет и проектирование // Аэродинамика*. - М.: Машиностроение, 1966. - Т 1.
9. Heyson H.H., Katzoff S. Induced Velocities Near a Lifting Rotor with No uniform Disc Loading. *NACA Report 1319*. 1957.
10. Бутов В.П. Структура, геометрия и интенсивность спутного вихревого следа несущих винтов одновинтовых и соосных вертолетов в реальных условиях полета: труды 4-го форума Российского вертолетного общества. - М., 2000. - С 19 - 34.
11. Шайдаков В.И., Игнаткин Ю.М. Методы расчета индуктивных скоростей за пределами диска несущего винта вертолета на базе приближенной модели вихревого следа // *Аэродинамика крыла и корпуса летательного аппарата*. - М.: МАИ, 1982.
12. Баскин В.Э., Вильдгрубе Л.С., Вожаев Е.С., Майкапар Г.И. Теория несущего винта. - М.: Машиностроение, 1973.
13. Игнаткин Ю.М., Гревцов Б.С., Макеев П.В., Шомов А.И. Метод расчета аэродинамических характеристик несущих винтов вертолета на режимах осевого и косоугольного обтекания на основе нелинейной лопастной вихревой модели: труды 8-го форума Российского вертолетного общества. - М, 2008. - С. 53 – 72.
14. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета на режиме "вихревое кольцо" на базе нелинейной лопастной вихревой теории // *Вестник МАИ*. - 2010. - Т. 16. - № 6. - С. 11 – 15.
15. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И. Программный комплекс для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолетов на базе нелинейной лопастной вихревой теории // *Труды МАИ*. - 2010. - № 38.
16. Зозуля В.Б. и др. Практическая аэродинамика вертолета Ми-2. - М.: Воздушный транспорт, 1984.
17. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И., Константинов С.Г. Моделирование режима "вихревое кольцо" несущего винта вертолета на базе нелинейной вихревой модели и методов CFD // *Труды МАИ*. - 2012. - № 59. - С. 1 – 20 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy>.

COMPUTATIONAL MODELING OF AERODYNAMIC INTERFERENCE OF HELICOPTER MAIN AND TAIL ROTORS AT THE SPECIAL FLIGHT REGIMES

Ignatkin Y.M., Makeev P.V., Shomov A.I.

This article is concentrated on modeling and researching of aerodynamic characteristics of main and tail rotors' combination of a single-rotor helicopter scheme. Non-linear free wake vortical model with diffusion of free wake is used. The model is constructed on the base of Helicopter Design Faculty, MAI. There was analyzed a number of special flight regimes of a helicopter. There were counted aerodynamic characteristics of rotors.

Key words: computational modeling, interference, main rotor, tail rotor, special flight regimes.

Сведения об авторах

Игнаткин Юрий Михайлович, 1941 г.р., окончил МАИ (1964), кандидат технических наук, заведующий кафедрой проектирования вертолетов МАИ, автор более 100 научных работ, область научных интересов – аэродинамика вертолета.

Макеев Павел Вячеславович, 1984 г.р., окончил МАИ (2007), кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования вертолетов МАИ, автор более 20 научных работ, область научных интересов – аэродинамика вертолета.

Шомов Александр Иванович, 1983 г.р., окончил МАИ (2007), аспирант МАИ, автор более 20 научных работ, область научных интересов – аэродинамика вертолета.