

УДК 629.735.45.015.3.035.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ И ИНДУКТИВНЫХ СКОРОСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА НА РЕЖИМАХ ВИСЕНИЯ И КРУТОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В.С. КРЫМСКИЙ, В.М. ЩЕГЛОВА

Статья представлена доктором технических наук, профессором Крицким Б.С.

Объектом исследования является лопасть несущего винта вертолета и вихревые следы за ним. С помощью изложенных в [1] методов расчета для режимов горизонтального полета при $\mu = 0,01$ и крутого планирования с углом атаки несущего винта $\alpha_v \approx 80^\circ - 85^\circ$ исследованы вихревые следы за винтом и индуктивные скорости в следе за несущим винтом. Были рассмотрены и такие предельные режимы, как "вихревое кольцо".

Ключевые слова: аэродинамические нагрузки, индуктивные скорости, вихревой след, "вихревое кольцо".

В ЦАГИ разработана теория и развит весьма экономный по потребным ресурсам компьютера метод расчета формы вихревой пелены за несущим винтом вертолета [1]. Разработанная и совершенствовавшаяся в течение ряда лет в ЦАГИ программа расчета поля индуктивных скоростей несущего винта в косом потоке дает возможность расчета нелинейных деформаций свободного диффундирующего вихревого следа (для $|\mu| \geq 0,01$) с помощью специальной подпрограммы (Subroutine TsRFW).

В работе [1] излагаются основные положения указанного метода и процедуры расчета. В основе лежит представление пелены в поточной системе осей координат и последовательный учет деформаций в точках ряда "сечений", перпендикулярных скорости набегающего потока. В нулевом приближении форма пелены задается в линейном виде. Уточнение координат формы нелинейной системы вихрей производится по формулам Эйлера, при этом для экономии счета в "сечениях", лежащих выше расчетного, на данном шаге уточнения не вводятся, а в "сечениях", лежащих ниже расчетного, исправляются координаты на прирост их в расчетном по сравнению с предыдущим приближением. Программы приспособлены и для исследования режимов снижения, висения, а также и "вихревого кольца".

Исследования по визуализации на режимах висения свидетельствуют о том, что в реальных условиях полета практически невозможно получить идеальное висение относительно воздушной массы из-за разных причин. Горизонтальный полет с $\mu = 0,01$ практически можно считать висением. Полученные при параметрических расчетах результаты показывают то же самое. Принятые предположения и расчетные процедуры основывались на анализе свободного диффундирующего вихревого следа. Лопасть моделируется несущим вихрем, имеющим ядро малого конечного радиуса. Свободный вихревой след каждой лопасти представляется конечным числом дискретных вихрей, отходящих от лопастей.

Вектор индуктивной скорости Δv , индуцированный элементом вихря Δl , рассчитывается с помощью модифицированного закона Био-Савара [1]

$$d\vec{v} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{l} \times \vec{r}|^2 + d\vec{l}^2 \varepsilon^2} \left(\frac{d\vec{l} \times \vec{r}_A}{\sqrt{\vec{r}_A^2 + \varepsilon^2}} - \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_B}{\sqrt{\vec{r}_B^2 + \varepsilon^2}} \right) d\vec{l},$$

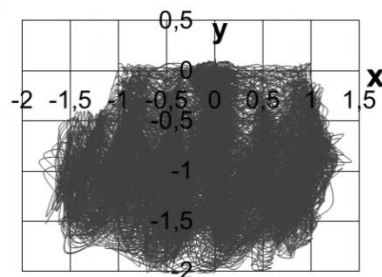
где $\vec{r}_A$ и $\vec{r}_B$ – радиус-векторы, соединяющие точки $A(x_1, y_1, z_1)$ и $B(x_2, y_2, z_2)$ начала и конца отрезка вихря с точкой приложения скорости с координатами x, y, z . Координаты точек A и B определяются из расчета переноса вихрей, где определяются траектории движения вихрей.

Методика апробирована на расчете махового движения шарнирно закрепленной лопасти четырехлопастного модельного несущего винта с радиусом 0,8 м, с коэффициентом подъемной силы, равным $C_l = 0,016$, и заполнением $\sigma = 0,138$. Лопасти имеют прямоугольную форму в плане с линейной круткой $-5,5^\circ$ и профиль NACA23010 по всему размаху.

Достоверность предлагаемой методики проверена тестированием модели и ее элементов на материалах экспериментов и методических численных расчетах и определяется удовлетворительным согласованием полученных результатов расчетных и экспериментальных исследований на режиме висения. Так как точного решения задачи не существует, говорить можно о качественном приближении расчетной вихревой пелены к экспериментальному следу.



а



б

Рис. 1

На рис. 1а представлена кинограмма визуализации воздушного потока вблизи несущего винта на режиме висения на высоте 200 м вертолета Ми-8 – данные В.П. Бутова. Видно, что концевые жгуты начинают размываться практически сразу же после схода вихрей с лопасти несущего винта. В местах очагов размывания (когда лопасть встречается с вихрем, сошедшим с предыдущей лопасти) образуются "сгустки" дыма. На рис. 1б отображена расчетная форма пелены на режиме висения, которая имеет много общего в своей структуре с материалами по визуализации вихрей дымом.

Для осредненных по времени индуктивных скоростей в вихревом следе винта для различных расстояний y/R от плоскости вращения результаты расчетов представлены на рис. 2.

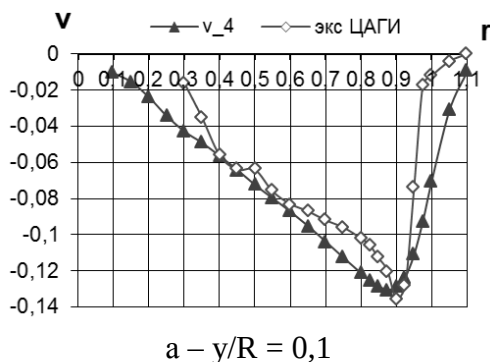
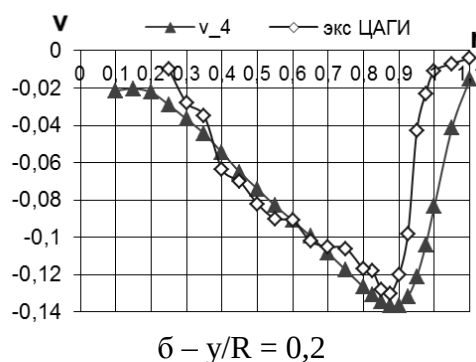
а – $y/R = 0,1$ б – $y/R = 0,2$

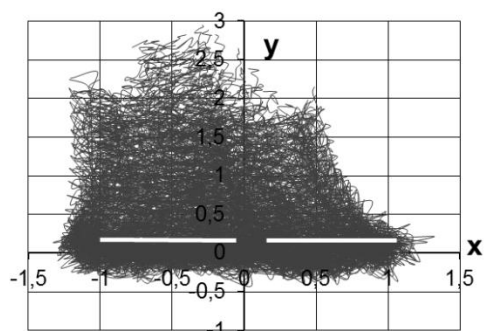
Рис. 2

Сопоставление расчетных и экспериментальных величин осевой компоненты $V_y/\omega R$ показывает, что их величины практически совпадают [2]. Некоторые несоответствия могут быть объяснены не совсем корректным учетом аэродинамических характеристик на конце лопасти, а также, что эксперимент был проведен для чистого висения, а расчет висения осуществлялся для горизонтального полета с малой характеристикой полета $\mu = 0,01$, что практически можно считать висением.

Скорость $V_y/\omega R$ перемещения точек вихревого следа в осевом направлении относительно винта $\bar{V}_y = \bar{V}_\infty - \bar{V}_B$, $\bar{V}_B < 0$ складывается из постоянной скорости $V_\infty/\omega R$ набегающего на винт невозмущенного потока и постоянной индуктивной $v_B/\omega R$, определяемой в соответствии с теоремой об импульсе количества движения по формуле

$$\bar{v}_B = \sqrt{C_{tB}/4}. \quad (1)$$

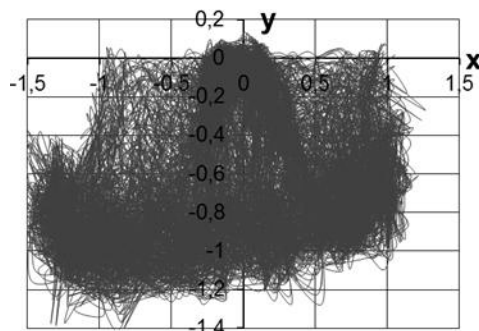
При достаточно большом значении $V_y/\omega R$ некоторая часть воздуха перетекает через несущий винт и создает тем самым режим, который называется "вихревое кольцо". В этом случае скорость снижения того же порядка, что и индуктивная скорость на режиме висения. Поток здесь неустойчив. Форма вихревого следа на режимах вихревого кольца (рис. 3а) – это наглядное представление о сложной картине обтекания несущего винта на этом режиме. В образовании циркуляционного движения на режимах вихревого кольца принимают участие все вихри, сходящие с лопасти. Ось вихревого кольца почти вплотную приближается к плоскости вращения. Вместе с основным циркуляционным движением концевых вихрей образуется вторичное циркуляционное течение противоположного вращения по отношению к основному вихревому кольцу, создаваемое вихрями, сходящими с комлевых частей. Часть спиралей этого вторичного образования вытянуты к центру винта и вверх.



а – $V_y/\omega R = -0,0621$



б – $V_y/\omega R \ll -0,0621$



в – $-0,0621 < V_y/\omega R < 0$

Рис. 3

На рис. 3б приведена расчетная траектория элементов вихрей на большой относительной скорости снижения ($V_y/\omega R \ll -0,0621$). На верхней поверхности диска образуется четко выделенная вихревая струя по типу цилиндрической вихревой системы. Взаимодействие вихрей, вследствие малости здесь индуктивных скоростей, является слабым. Расчетная пелена показывает, что здесь уже наблюдается зачаточное зарождение вихревого кольца в районе диска винта, появляется явная граница торможения.

Вид приведенного на рис. 3в вихревого следа уже приближается к вихревому следу на висении. Ось начинающихся завихрений лежит достаточно далеко от плоскости вращения. Рисунки показывают, что есть существенное изменение картины обтекания потоком несущего винта по сравнению с висением. Одним из отличий является то, что вихревой след смещен назад по потоку и охватывает переднюю половину диска несущего винта.

На рис. 4 приведены мгновенные индуктивные скорости на относительном расстоянии от плоскости вращения, равном $0,1R$. Взяты мгновенные индуктивные скорости для режимов висения, режимов вихревого кольца, когда скорости равны $V_y/\omega R = -0,112$, $V_y/\omega R = -0,0621$, $V_y/\omega R = -0,0271$. По сравнению с висением режимы вихревого кольца имеют колебания с большей амплитудой и небольшим сдвигом фаз. В колебаниях с $V_y/\omega R = -0,0621$ появляется вторая гармоника. Мгновенные индуктивные скорости при висении хорошо согласуются с результатами работы [2].

В практических расчетах в зоне режимов вихревого кольца используются зависимости изменения осредненной по диску относительной индуктивной скорости $\tilde{v} = \bar{v}/\bar{v}_B$ в функции ско-

рости снижения $\tilde{V}_y = \bar{V}_y / \bar{V}_B$, $\tilde{v} = f(\tilde{V}_y)$, где $\bar{V}_B$ – осредненная по диску индуктивная скорость на висении (1).

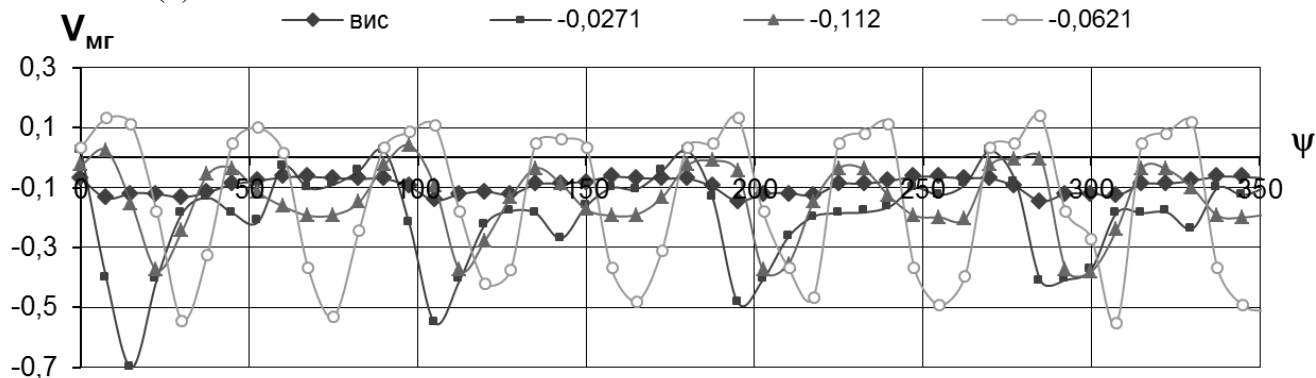


Рис. 4

Полученная в данных расчетах зависимость между индуктивными скоростями и скоростями снижения сравнивается с аналогичными расчетными и экспериментальными зависимостями из работы [4] (рис. 5).

На рис. 5 представлены расчетные кривые $\tilde{v} = f(\tilde{V}_y)$, которые получили Chang Chen и J.V.R. Prasad [4] моделированием вихревой системы несущего винта с помощью кольцевых вихрей (Vortex Ring Model). На рис. 5 это выделенные закрашенными маркерами точки. Экспериментальные кривые $\tilde{v} = f(\tilde{V}_y)$ трубного эксперимента (маркеры не закрашены) были получены Castles и Gray для винтов, аналогичных расчетным исследованиям.

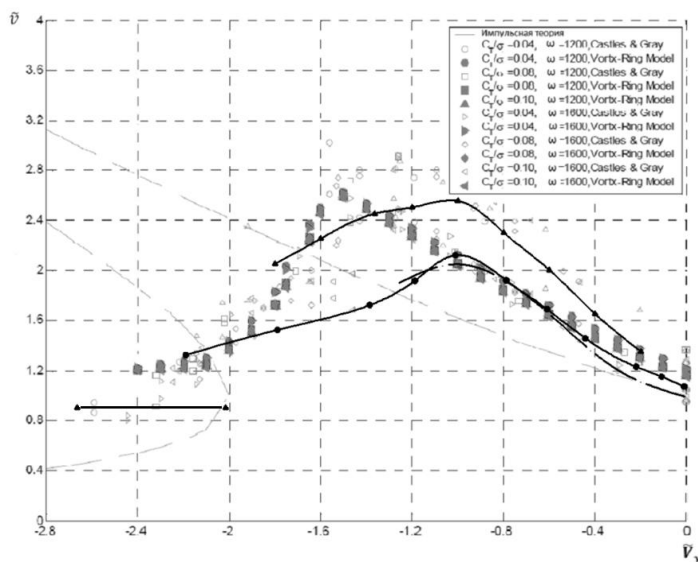


Рис. 5

Эксперимент и расчеты проводились для винтов с лопастями разной формы в плане, различными крутками и радиусами, коэффициентами силы тяги и заполнением, числом оборотов винта $n(\omega)$, что приводит к широкому диапазону зависимостей $\tilde{v} = f(\tilde{V}_y)$ и облегчает сопоставление разных данных.

Расчетные кривые данной работы (сплошная кривая с треугольными маркерами для рулевого винта и сплошная кривая с круглыми маркерами – для несущего) были получены при значениях $C_t/\sigma = 0,1160$ и $n = 1194$ об/мин для несущего винта (близких к C_t/σ и n из [4]) и $C_t/\sigma = 0,126$ и $n = 2123$ об/мин для рулевого. Сравнение этих материалов с материалами из [4] дает удовлетворительный результат. Также хорошо сопоставима с результатами расчетов и эксперимента из [4] кривая из трубного эксперимента Антропова в пределах скоростей снижения $-1,2 < \tilde{V}_y < 0$ (штрихпунктирная линия).

На основании летных испытаний (ONERA) и расчетных результатов [4] на рис. 6 нанесены графики кривых $\tilde{v} = f(\tilde{V}_y)$. Эксперимент проводился на вертолете SA 365N Dauphin 6075 с взлетной массой 3500 кг. Несущий винт имел радиус 5,965 м, заполнение $\sigma = 0,083$ и крутку лопастей – $10,2^\circ$. Расчетная кривая (сплошная линия с круглыми маркерами) для несущего винта, близкого по параметрам к вышеуказанному, неплохо совпадает с результатами летных испытаний (ONERA).

Экспериментальная кривая летного эксперимента Акимова (сплошная линия) также удовлетворительно согласуется с летным экспериментом (ONERA) в пределах скоростей снижения $-1,2 < \tilde{V}_y < 0$.

Результаты расчетов на осевых режимах при $\alpha_b = 85^\circ - 86^\circ$ позволяют сделать вывод, что проведенная серия расчетов с использованием методики [1] может быть применена с приемлемой точностью и степенью сходимости к режимам висения, снижения и вихревого кольца. На режимах вихревого кольца, при крутом планировании отмечены пульсации относительно некоторого среднего установившегося положения коэффициентов силы тяги и крутящего момента порядка 10 % – 15 %, являющиеся одним из признаков наличия вихревого кольца. Признаками возникновения вихревого кольца могут служить также и падение силы тяги, и возрастание крутящего момента при фиксированном значении угла установки лопасти. Полученное в расчетах увеличение индуктивной скорости более чем в два раза также является одним из основных признаков вихревого кольца.

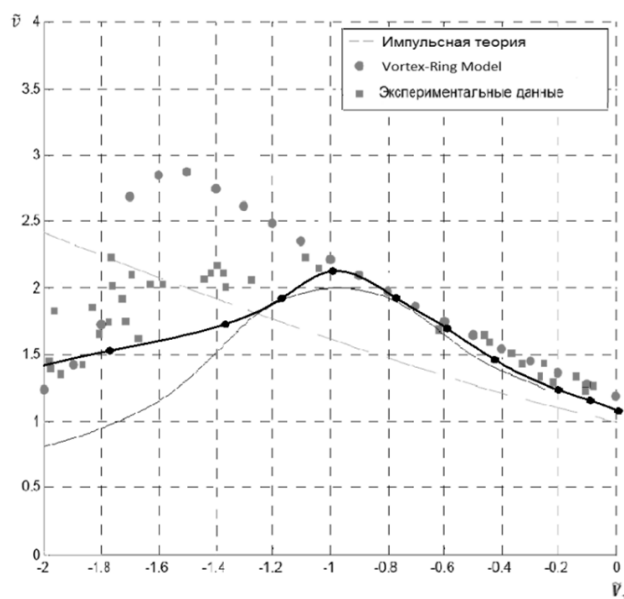


Рис. 6

ЛИТЕРАТУРА

1. Щеглова В.М. К расчету индуктивных скоростей за несущим винтом по нелинейной модели с учетом диффузии вихрей // Ученые записки ЦАГИ. - 2007. - Т. XXXVIII. - № 3 – 4. - С. 57 – 71.
2. E. Berton, D. Favier, C. Maresca, M. Nsi Mba and E.S. Vozhdayev, V.A. Golovkin, N.N. Tarasov, A.A. Maslennikov. Experimental and Numerical Obtained at LAMB and TsAGI. 29th European Rotorkraft Forum, 16 – 18 September 2003, Friedrichshafen, Germany.
3. У. Джонсон. Теория вертолета: в 2-х т. - М.: Мир, 1983.
4. Chang Chen, J.V.R. Pracad. Ring Vortex Model for Descent Flight. American Helicopter Society 61st Annual Forum, Grapevine, Texas, June 1 – 3, 2005.

THE INVESTIGATION OF ROTOR'S INFLOW AND MAIN ROTOR'S INDUCED VELOCITY AT HOVER AND AT STEEP DESCENTS

Krimskiy V.S., Shcheglova V.M.

An object of the research is the blade of the main rotor of the helicopter and the vortex wake behind the blade. The vortex wake behind the main rotor and the induced velocity in the wake were investigated by means of stated in [1] the methods of calculation for horizontal flight at $\mu=0,01$ and steep descent flight with $\alpha_b \approx 80 - 85^\circ$ (α_b – an angle of attack of the main rotor). The vortex ring state has been considered also.

Key words: aerodynamic loadings, induced velocity, vortex wake, vortex ring.

Сведения об авторах

Крымский Владимир Сергеевич, 1990 г.р., окончил МАИ (2013), инженер ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, область научных интересов – динамика полета вертолетов.

Щеглова Валентина Михайловна, окончила МАИ (1958), ведущий инженер ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, автор 60 научных работ, область научных интересов – аэроупругость и аэродинамика несущего винта, вихревые структуры за несущим винтом.