

УДК: 533.601 (075.8)

Влияние струй от винтов на аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана

Ле Куок Динь, Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В., Чан Куанг Дык

Приводятся результаты численного исследования особенностей обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтовыми двигателями вблизи экрана (земной поверхности). Изучены закономерности изменения коэффициента тяги винтов дирижабля, а также коэффициентов его аэродинамических сил и моментов в зависимости от изменения величин безразмерного расстояния дирижабля от экрана \bar{H} , числа оборотов винтов и угла натекания ветрового потока на дирижабль β .

Ключевые слова: дирижабль; работающие винты; аэродинамические характеристики; ветровой поток.

Обеспечение безопасности взлета дирижаблей с отрицательной плавучестью, когда для взлета используется сила тяги, создаваемая поворотными двигателями дирижабля и совпадающая по направлению с его подъемной аэростатической силой, является актуальной задачей проектирования и эксплуатации дирижаблей. Чтобы надежно решать эту задачу, необходимо иметь аэродинамические характеристики дирижабля с работающими вблизи экрана винтами.

Исследование аэродинамических характеристик подъемных винтов и летательных аппаратов с такими винтами вблизи экрана проводятся в течение многих лет (см., например, [1 – 2]). Однако особенности изменения аэродинамических характеристик дирижабля с винтами, работающими «на подъем» вблизи экрана, в особенности в условиях натекания на дирижабль ветрового потока, рассмотрены пока недостаточно. Целью настоящего исследования являлось восполнение в определенной степени этого пробела.

В качестве объекта исследований был выбран малоразмерный дирижабль мягкого типа с двумя двухлопастными винтами, установленными на гондole дирижабля симметрично относительно его базовой плоскости.

Исследования проведены при угле атаки дирижабля $\alpha = 0$, углах, характеризующих направление ветра по отношению к продольной оси дирижабля, $\beta = 0 \dots 180^\circ$, относительных расстояниях плоскости вращения винтов дирижабля до экрана $\bar{H} = H/D = 0,071 \dots 5$, где D - диаметр миделевого сечения оболочки (корпуса) дирижабля. Число оборотов винтов n_s варьировалось от 500 до 3000 об/мин. Число Рейнольдса $Re = 1,36 \times 10^7$ было подсчитано по характерному линейному размеру, равному длине корпуса L , и условной скорости ветрового потока на высоте 10 м $V_{10} = 5$ м/с.

При обдувке дирижабля ветровым потоком изучалось только влияние постоянной составляющей ветра, изменяющейся по высоте над экраном по степенному закону.

На рис. 1 показан внешний вид модели дирижабля. Дирижабль был сконструирован по

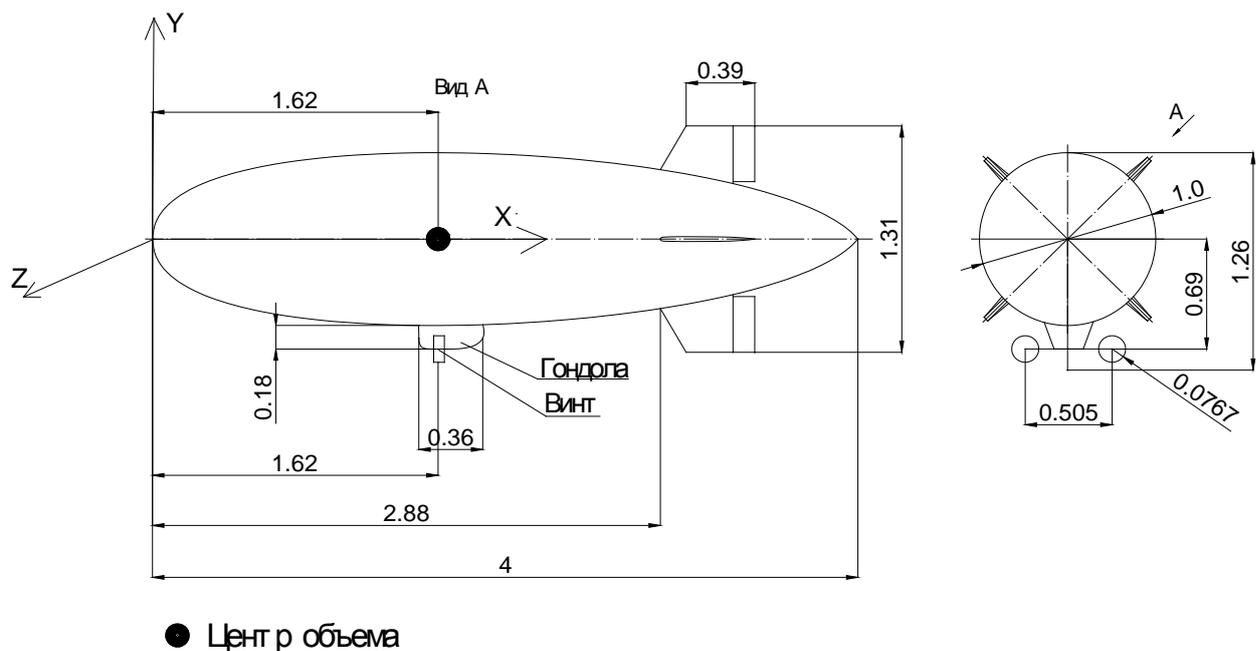
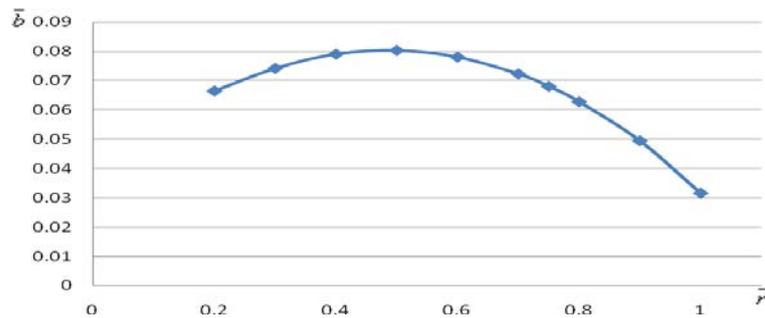


Рис. 1. Схема дирижабля

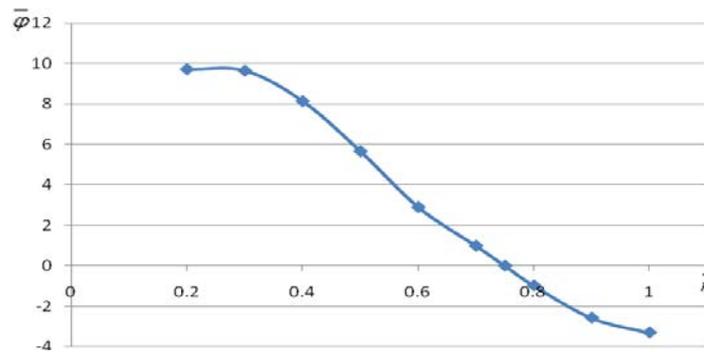
классической схеме, имел оболочку, определяемую обводом Парсеваля, с удлинением $\lambda = 4$, гондолу, трапециевидные консоли оперения с профилем NACA 0006 и два двухлопастных винта. В исследованиях плоскость вращения винтов была параллельна продольной оси дирижабля и экрану. На рис. 1 все размеры даны в долях диаметра миделевого сечения

дирижабля. Консоли оперения дирижабля были ориентированы относительно его базовой плоскости по схеме «х»; рули находились в не отклоненном положении.

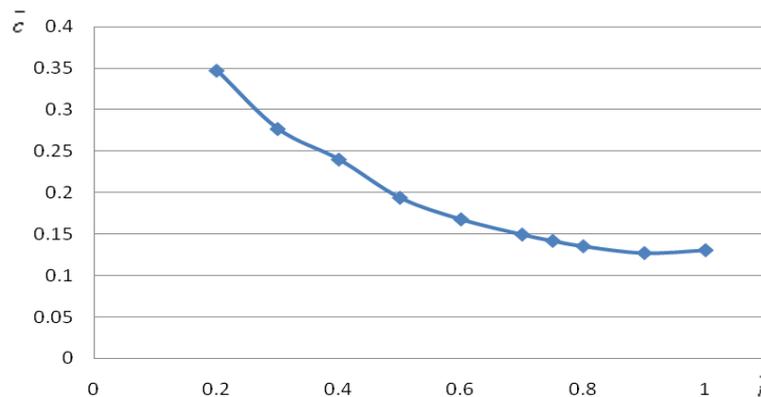
В данной работе в сечениях лопастей винта использовался модифицированный профиль RAF-6 . Геометрические параметры винта в виде зависимостей крутки $\bar{\varphi} = \varphi - \varphi_{0.75}$, относительной ширины лопасти $\bar{b} = b/D_B$, толщины $\bar{c} = c/b$ и кривизны $\bar{f} = f/b$ от относительного радиуса $\bar{r} = 2r/D_B$ показаны на рис. 2. Здесь D_B – диаметр винта; r – радиус сечения лопасти; φ - угол ее установки; $\varphi_{0.75}$ - угол установки при $\bar{r} = 0,75$; b, c, f – хорда, толщина и кривизна средней линии профиля.



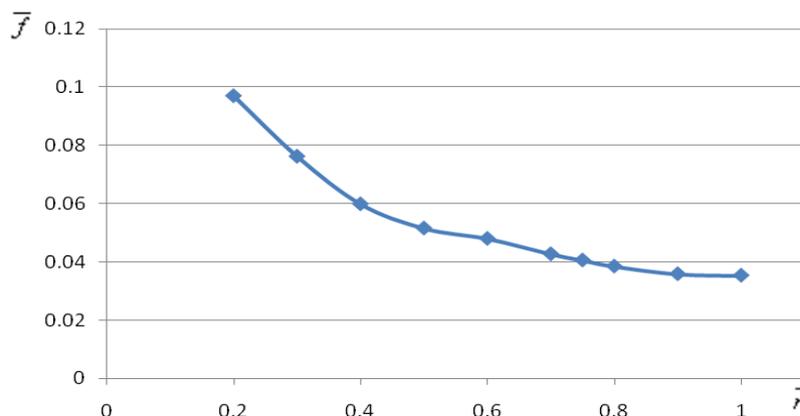
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Зависимости относительной ширины (а), крутки (б) лопасти винта, толщины (в) и кривизны (г) ее профиля от относительного радиуса

Исследования были выполнены численно. Для решения задачи использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, записанные для пространственного течения [3] и замкнутые моделью турбулентности «*SST k- ω* » [4]. На поверхности элементов дирижабля, винтов и экране ставилось условие прилипания. При обдувке модели дирижабля ветровым потоком на входе в счетную область задавалась осредненная скорость этого потока, изменяющаяся по высоте над экраном по степенному закону, показатель степени которого $\alpha = 0,16$ соответствовал открытой ровной местности [6].

Задача решалась численно с помощью метода контрольного объема [4,5]. Расчетная область представляла собой полуцилиндр, опирающийся на экран и имеющий одинаковые длину и диаметр, равные двадцати длинам корпуса модели дирижабля. Расчетная сетка имела блочную структуру. Структура счетной области выбиралась из условия минимизации количества ячеек, форма которых ухудшала сходимость и аппроксимацию дифференциальных уравнений. Для достоверного определения газодинамических параметров сетка была адаптирована к особенностям течения и имела сгущение вблизи поверхности тела.

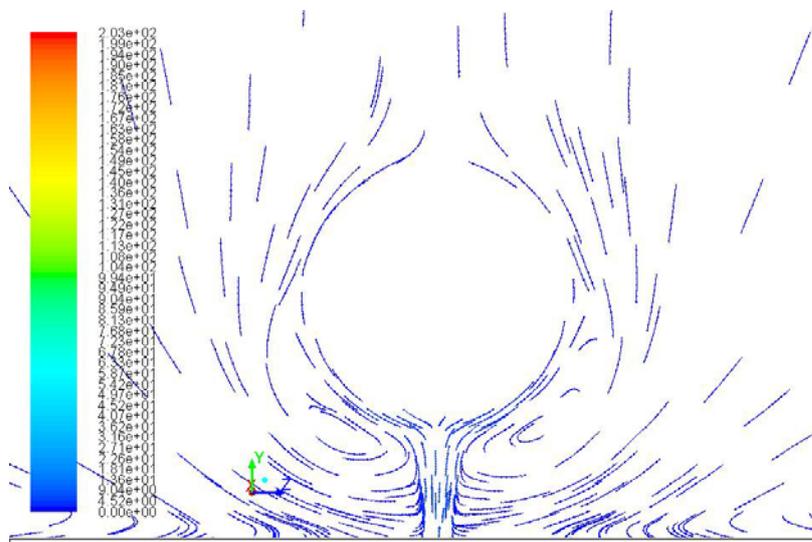
Для расчетов использовался комплекс вычислительных программ, содержащий адаптированный авторами к поставленной задаче программный комплекс ANSYS 12.0 (лицензия № 00241d277c88), а также специальные программы, разработанные авторами для

выполнения, обработки и обобщения результатов численных расчетов. В работе использовалась показанная на рис. 1 связанная с корпусом система координат с началом в вершине корпуса.

В результате расчетов были получены параметры потока в расчетных точках, найдены коэффициенты тяги винтов, коэффициенты локальных и суммарных сил и моментов, действующих на модель дирижабля. Коэффициенты суммарных сил дирижабля были отнесены к $W^{2/3}$; коэффициенты момента тангажа подсчитаны относительно центра объема корпуса и отнесены к W , где W - объем корпуса. Коэффициенты тяги подсчитывались по числу оборотов, диаметру винта и плотности атмосферы.

Для оценки применимости указанных выше комплексов и программ к решению поставленной задачи и выяснения достоверности получаемых при этом результатов было проведено сравнение результатов расчета аэродинамических характеристик неоперенных корпусов дирижаблей кругового и эллиптического поперечного сечения в безграничном потоке воздуха с экспериментальными данными ЦАГИ [7]. Оказалось, что расчеты с использованием модели турбулентности «SST $k-\omega$ » [4] наилучшим образом совпадают с данными эксперимента и описывают изменение аэродинамических коэффициентов по углу атаки дирижабля. В численном расчете правильно предсказывается изменение аэродинамических сил и моментов корпуса дирижабля по определяющим параметрам, а также весьма удовлетворительно определяются значения их аэродинамических коэффициентов.

На рис. 3 приведены примеры картин линий тока в окрестности дирижабля с работающими винтами вблизи экрана в спокойной атмосфере.



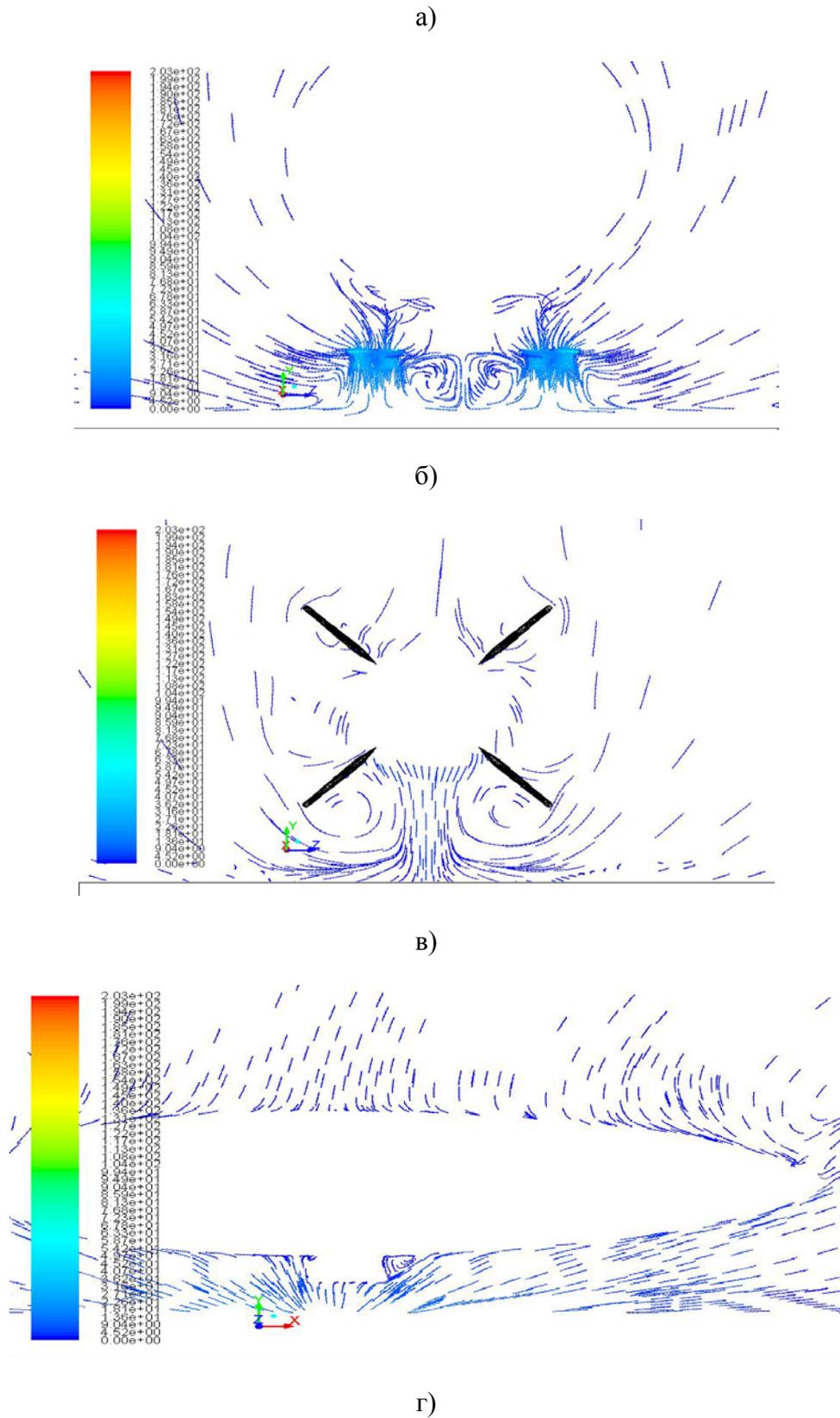


Рис. 3. Картины линий тока в перпендикулярных к оси корпуса плоскостях (а, б, в) и в продольной плоскости $z = 0$ (г); $\overline{H} = 0,2$; $n_s = 2000$ об/мин; а – $x = 0,2L$, б – $x = 0,405L$;

$$b - x = 0,8L$$

Видно, что корпус и другие элементы компоновки дирижабля обтекаются поперечным вязким потоком, индуцированным вращающимися винтами и направленным к экрану. Структура течения около поверхности дирижабля существенно зависит от высоты расположения дирижабля над экраном и числа оборотов винтов. Обращает на себя внимание

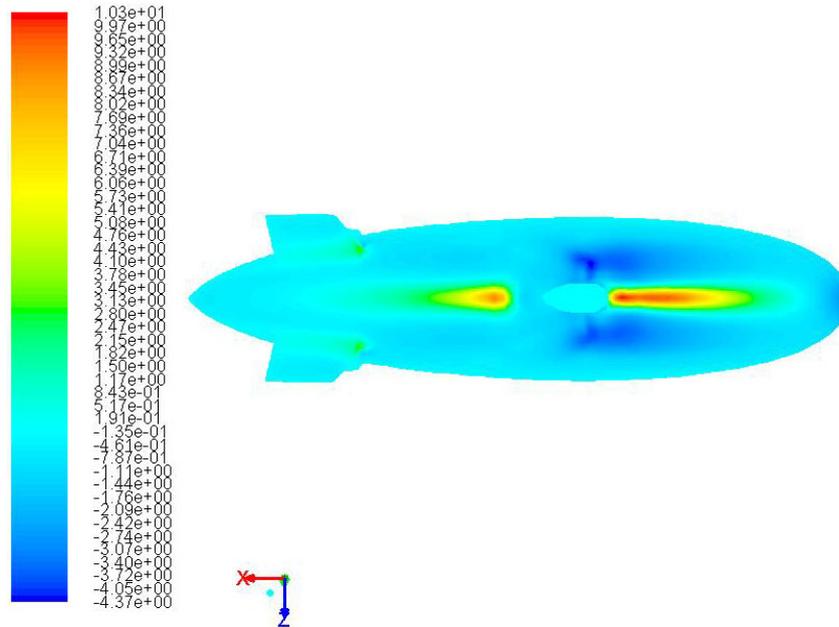


Рис. 4. Распределение давления по нижней, обращенной к экрану стороне корпуса с гондолой при $\bar{H} = 0,2$; $n_s = 2000$ об/мин

формирование циркуляционных зон как вблизи носовой части корпуса, так и в окрестности консолей оперения дирижабля. Видна пара вихрей, сформировавшихся в области между вращающимися винтами, и растекание струй от винтов по экрану. Течение несимметрично относительно плоскости, перпендикулярной к оси корпуса и проходящей через центр его объема. Это неизбежно вызывает и асимметрию относительно этой плоскости распределенных по поверхности корпуса и другим элементам дирижабля локальных сил давления и сил трения, что хорошо прослеживается по рис. 4, на котором представлено распределение давления по оболочке. Асимметрия локальных сил относительно центра объема оболочки вызывает появление момента тангажа, действующего на дирижабль вблизи экрана. С увеличением безразмерного расстояния \bar{H} и изменением числа оборотов винтов происходит заметная трансформация течения.

Расчеты показали, что при $\bar{H} < 0,2$ коэффициент тяги одного винта $\bar{\alpha} = T/2\rho n_s^2 D_B^4$, где T - тяга винта, ρ - плотность воздуха на данной высоте полета, n_s - число оборотов винта. D_B - диаметр винта, с приближением корпуса дирижабля к экрану незначительно возрастает и при $\bar{H} \leq 0,1$ его значение увеличивается не более, чем на 2% по сравнению с коэффициентом тяги при $\bar{H} = 1$. При $\bar{H} > 0,2$ влияние расстояния от плоскости вращения винтов до экрана на коэффициенты тяги одного винта практически исчезает.

Создаваемый вращающимися вблизи экрана винтами поток воздуха индуцирует на корпусе и оперении дирижабля нормальную силу, направление которой противоположно направлению аэростатической всплывной силы. Изменение коэффициента C_{yk} этой нормальной силы в зависимости от высоты подъема дирижабля над экраном \bar{H} показано на рис. 5. Видно, что модуль C_{yk} быстро растет с увеличением числа оборотов винта и уменьшением расстояния до экрана \bar{H} .

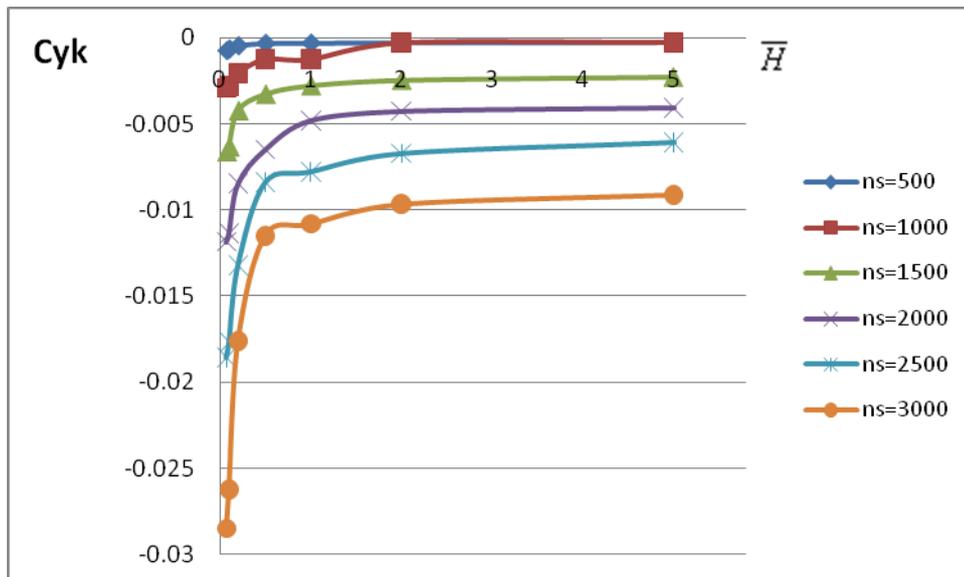


Рис. 5. Зависимость коэффициента аэродинамической нормальной силы корпуса дирижабля (без учета тяги винтов) C_{yk} от относительного расстояния до экрана \bar{H} и числа оборотов винтов n_s

Зависимости коэффициента суммарной нормальной силы дирижабля (с учетом тяги винтов) C_{y0} от относительного расстояния плоскости вращения винтов от экрана \bar{H} и числа оборотов винтов n_s представлено на рис. 6. С ростом числа оборотов n_s при любых значениях параметра \bar{H} величина коэффициента C_{y0} быстро растет. При $n_s \leq 1000$

коэффициент C_{y0} практически не зависит от \bar{H} . При $n_s > 1000$ величина C_{y0} с удалением дирижабля от экрана возрастает.

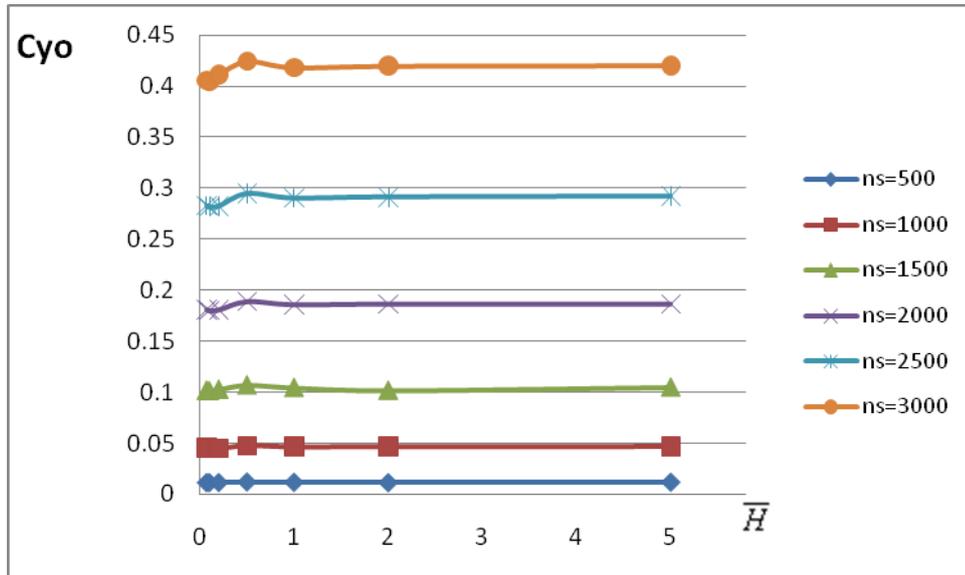


Рис. 6. Зависимость коэффициента нормальной силы дирижабля C_{y0} (с учетом тяги винтов) от расстояния до экрана \bar{H} и числа оборотов винтов n_s

Так как распределение сил давления и трения, индуцированных винтами на оболочке и консолях оперения дирижабля, асимметрично относительно центра объема оболочки

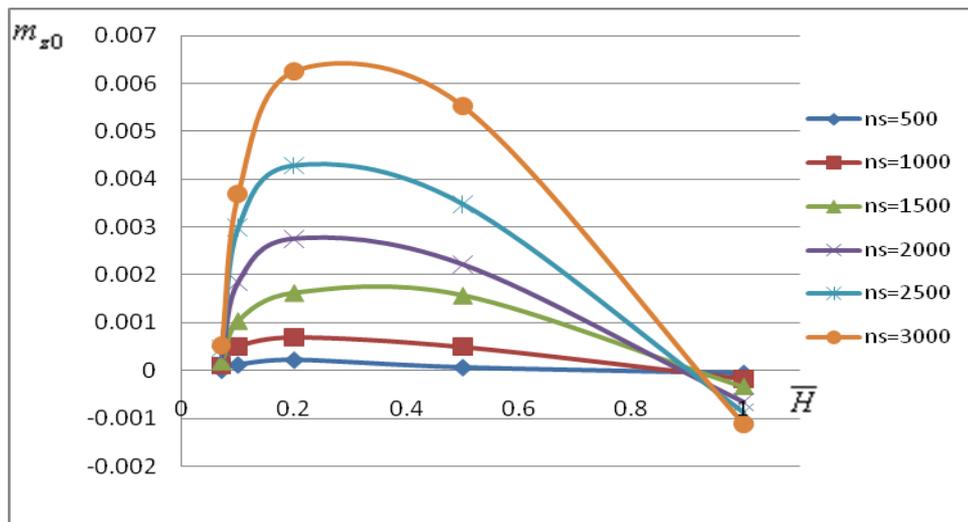


Рис. 7. Зависимость коэффициента момента тангажа дирижабля m_{z0} с учетом тяги винтов от числа оборотов n_s и относительного расстояния до экрана \bar{H}

(см. рис. 4), где приложена аэростатическая всплывная сила, то на дирижабль при его обдувке потоком от винтов в присутствии экрана действует и момент тангажа. Из графиков на рис. 7 видно, что его наибольшие величины достигаются при $\bar{H} \approx 0,2...0,3$. С увеличением числа оборотов винтов коэффициенты момента тангажа растут. Видно, что при $\bar{H} \leq 0,9$ на данную модель дирижабля действует момент на пикирование, а при $\bar{H} > 0,9$ - на кабрирование, то есть момент оказывается знакопеременным при удалении от экрана.

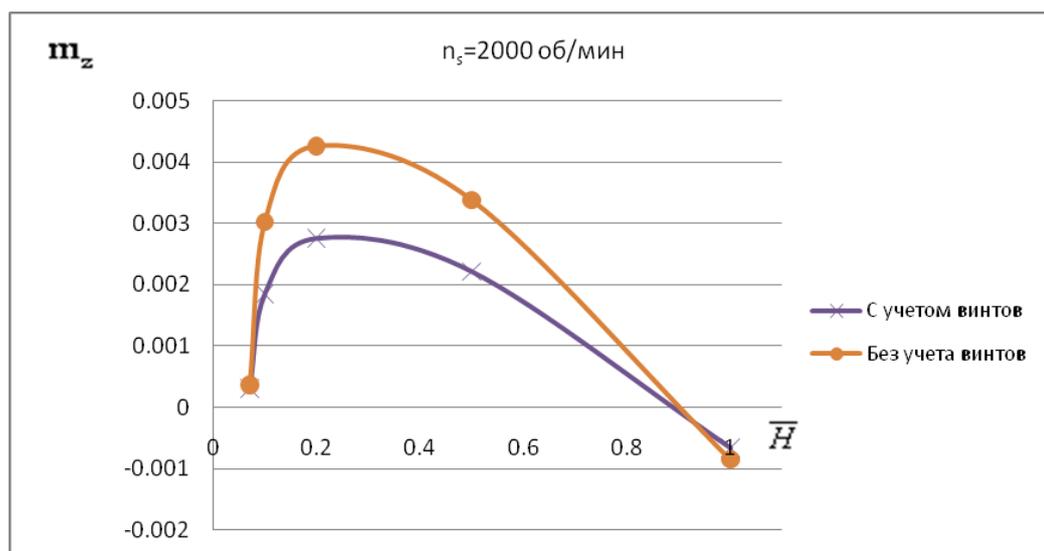


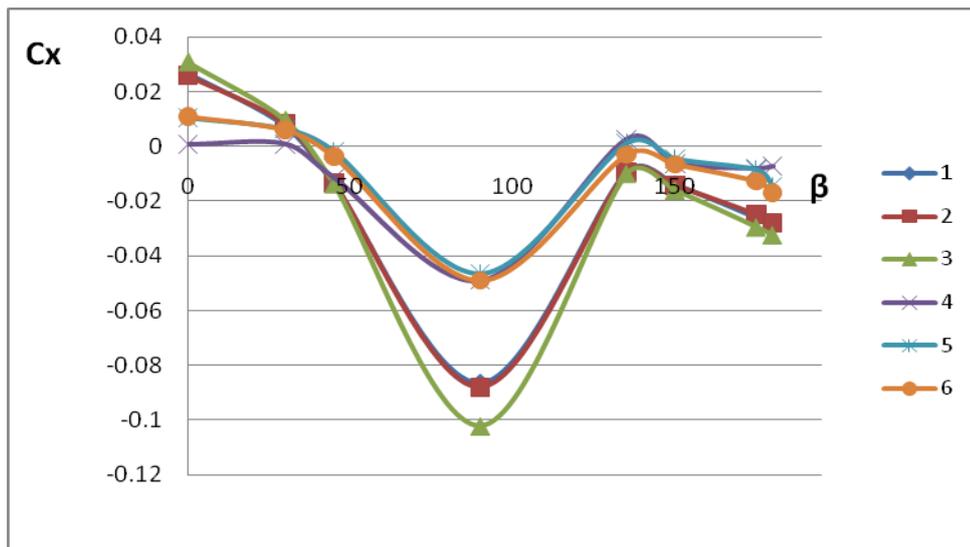
Рис. 8. Зависимость коэффициента момента тангажа дирижабля m_z без учета и с учетом тяги винтов от расстояния до экрана \bar{H}

Как видно из графиков на рис. 8, аэродинамический момент тангажа, индуцируемый вращающимися винтами непосредственно на дирижабле, оказывается больше, чем момент тангажа дирижабля с винтами. Это означает, что собственный момент тангажа винтов не равен нулю, и, следовательно, точка приложения суммарной аэродинамической силы винтов лежит вне плоскости, содержащей оси винтов и проходящей через центр объема корпуса. В этом, в частности, проявляется влияние обдувки корпуса дирижабля на работу винтов.

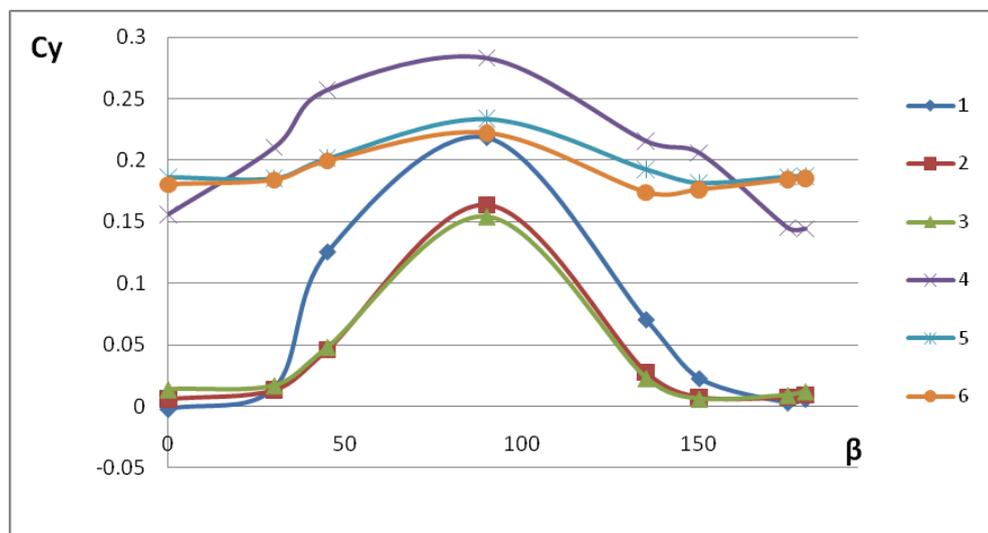
Ветровой поток вдоль экрана может существенно изменить аэродинамические характеристики дирижабля с винтами, работающими "на подъем". Для изучения этого вопроса было проведено исследование обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля без винтов и с винтами в ветровом потоке вблизи экрана. Расчеты обтекания неравномерным потоком оперенного корпуса дирижабля вблизи земли были проведены с использованием зависимости $V_z = V_{10} (z/10)^\alpha$ [6]. Здесь V_z — скорость потока на высоте,

равной z , V_{10} - скорость потока на высоте 10м; z_c - высота центра объема корпуса дирижабля над земной поверхностью; α - параметр, зависящий от типа поверхности. Для открытой местности без строений и деревьев принимается $\alpha = 0,16$ [6].

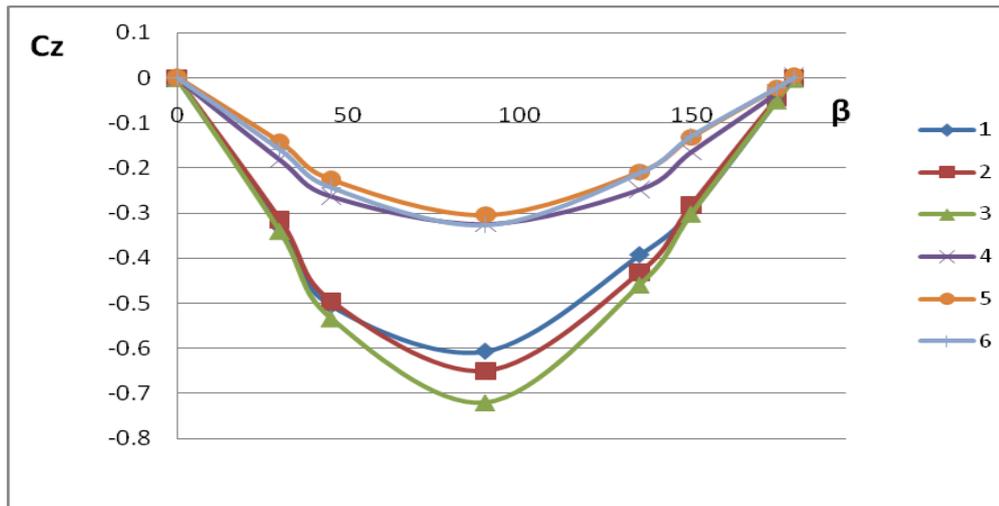
На рис. 9 представлены зависимости коэффициентов суммарных аэродинамических сил и моментов дирижабля с работающими винтами и без винтов вблизи экрана в ветровом потоке от азимутального угла β , характеризующего направление потока



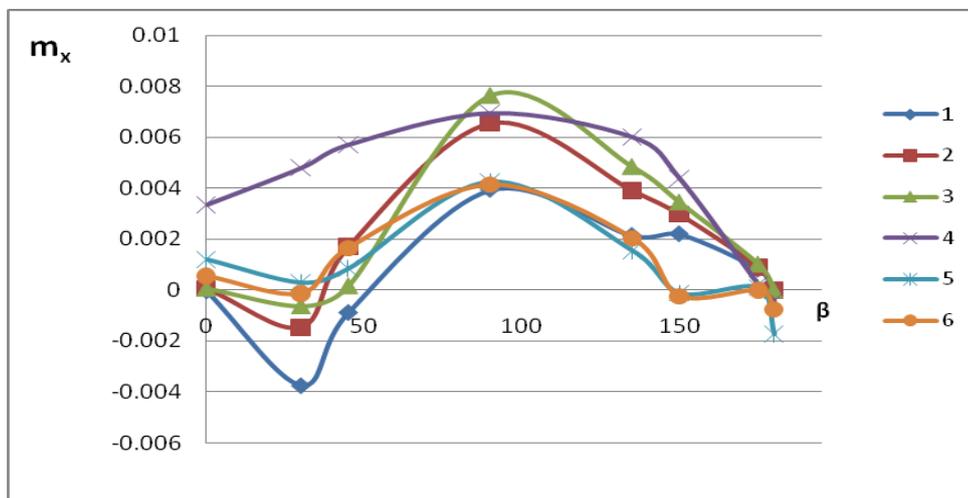
а)



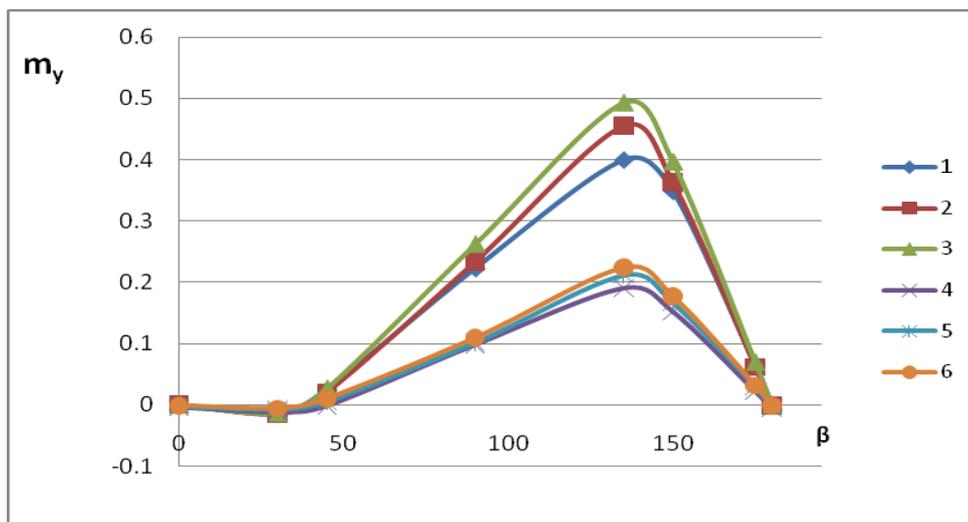
б)



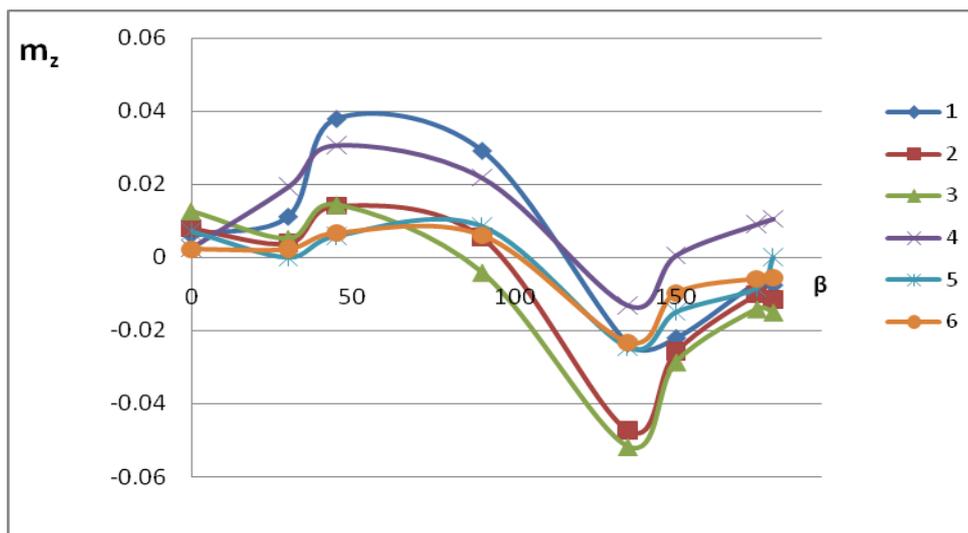
в)



г)



д)



е)

Рис. 9. Зависимости коэффициентов суммарных аэродинамических сил и моментов дирижабля с работающими винтами (4, 5, 6) и без винтов (1, 2, 3) вблизи экрана в ветровом потоке от угла β при различных значениях параметра \bar{H} : 1, 4 - $\bar{H} = 0,071$;

$$2, 5 - \bar{H} = 0,5; 3, 6 - \bar{H} = 1,0$$

ветра по отношению к продольной оси корпуса дирижабля при различных значениях параметра \bar{H} . Расчеты проведены при $V_{10} = 5$ м/с.

Из графиков на рис. 9 видно, что при обдувке ветром на дирижабль вблизи экрана действуют не только ожидаемые поперечная сила и момент рыскания, но и обусловленные асимметрией дирижабля относительно плоскости изменения углов β нормальная сила и момент тангажа.

При отсутствии работающих винтов максимальные значения коэффициентов нормальной и поперечной сил, а также модуля продольной силы наблюдаются при $\beta = 90^\circ$. Максимум момента рыскания имеет место при $\beta = 135^\circ$, а модуля момента тангажа - при минимальном расстоянии от экрана - при $\beta = 45^\circ$, а на удалении от экрана при $\beta = 135^\circ$. При этом момент тангажа изменяет свой знак при дальнейшем увеличении угла β . С удалением от экрана модуль поперечной силы и момент рыскания увеличиваются при всех значениях угла β , а нормальная сила уменьшается. Влияние удаления от экрана на коэффициенты момента тангажа сложнее. Видно, что при $\beta < 90^\circ$ рост параметра \bar{H} вызывает уменьшение этого момента, а при $\beta > 90^\circ$, наоборот, увеличение его модуля.

Закономерности изменения аэродинамических характеристик дирижабля вблизи экрана по параметрам \bar{H} и β остаются, в основном, такими же и при отсутствии работающих винтов (см. рис. 9).

Видно, что при $\beta < 45^\circ$ коэффициенты продольной силы дирижабля с работающими винтами оказываются меньше, чем дирижабля без винтов, а при $\beta > 45^\circ$, наоборот - больше. Минимум коэффициентов продольной силы дирижабля с работающими винтами наблюдается по-прежнему при $\beta = 90^\circ$.

При наличии в ветровом потоке струй от винтов величины коэффициентов нормальной силы растут, а коэффициентов поперечной силы и момента рыскания уменьшаются. При этом их максимальные значения наблюдаются при тех же самых углах β , что и в случае дирижабля без винтов.

Благодаря влиянию винтов максимальные значения модулей коэффициентов продольной и поперечной силы, моментов рыскания и тангажа уменьшаются, а максимальные значения коэффициентов нормальной силы растут.

Выводы

1. В результате численного исследования особенностей обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтовыми двигателями вблизи экрана (земной поверхности) получены данные о влиянии на коэффициенты тяги винтов и аэродинамических сил и моментов дирижабля относительного расстояния дирижабля от экрана \bar{H} , числа оборотов винтов и угла натекания ветрового потока на дирижабль β .

2. Найдено, что в спокойной атмосфере при приближении дирижабля к экрану на его корпусе индуцируется нормальная сила, направление которой противоположно направлению аэростатической всплывной силы. Модуль этой нормальной силы корпуса быстро растет с увеличением числа оборотов винта и уменьшением расстояния до экрана \bar{H} .

3. Показано, что в спокойной атмосфере на дирижабль при его обдувке потоком от винтов вблизи экрана действует момент тангажа. Его наибольшие величины достигаются при относительном расстоянии $\bar{H} \approx 0,2...0,3$. С увеличением числа оборотов винтов коэффициенты момента тангажа растут.

4. Установлено, что в ветровом потоке вблизи экрана наряду с естественно возникающими поперечной силой и моментом рыскания появляются нормальная сила,

моменты тангажа и крена. Закономерности изменения аэродинамических характеристик дирижабля вблизи экрана по параметрам \bar{H} и β остаются, в основном, такими же и при неработающих винтах. Значения коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижабля в ветровом потоке вблизи экрана являются сложными функциями параметров β , \bar{H} и числа оборотов винтов n_s .

5. При обдувке ветром при $\beta < 45^\circ$ коэффициенты продольной силы дирижабля с работающими винтами оказываются меньше, чем у дирижабля без винтов, а при $\beta > 45^\circ$, наоборот - больше. При наличии в ветровом потоке вблизи экрана струй от винтов коэффициенты нормальной силы дирижабля растут, а коэффициенты поперечной силы и момента рыскания, наоборот, уменьшаются.

Библиографический список

1. Артамонов Б.Л. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики несущего винта вертолета // Труды МАИ, вып. 406, 1977.
2. Артамонов Б.Л. Исследование взаимодействия между несущим винтом и корпусом вертолета // Темат. Сборник научных трудов «Проблемы проектирования винтокрылых ЛА». – М.: Изд-во МАИ, 1992, с. 72-83.
3. Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т., Рыжов Ю.А., Свирщевский С.Б., Семенчиков Н.В. Аэрогидромеханика. – М.: Машиностроение, 1993. - 603 с.
4. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. - 272 с.
5. Аэродинамика. Под ред. В.Т. Калугина. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 687 с.
6. Динамический расчет зданий и сооружений. / Под ред Б. Г. Коренева и И. М.Рабиновича, М.: Стройздат, 1984. - 303 с.
7. Засолов Р.А. Аэродинамические характеристики моделей дирижаблей. // Труды ЦАГИ, вып. 2268, 1985, - 22 с.

Сведения об авторах

Ле Куок Динь, аспирант Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), тел.: (926) 435-68-13, e-mail: duhblq@yahoo.com

Семенчиков Николай Витальевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (916) 687-05-30;
e-mail: nikolaisemenchikov@mail.ru

Чан Куанг Дык, студент – дипломник Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: (903) 167-53-17.

Яковлевский Олег Васильевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (916) 067-41-52.