

УДК: 533.601 (075.8)

Численное исследование влияния движителей на аэродинамические характеристики дирижабля

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 движителями вдали от экрана (земной поверхности). Получены данные о зависимости коэффициентов его аэродинамических сил и моментов от углов атаки α и скольжения β , числа оборотов винтов дирижабля и величины скорости набегающего на дирижабль потока.

Ключевые слова: дирижабль; работающие винты; аэродинамические характеристики.

В настоящее время в России, США, Великобритании и других странах уделяется большое внимание созданию и использованию для различных целей управляемых летательных аппаратов легче воздуха - дирижаблей. Дирижабли имеют специальные движители с винтами для создания силы тяги.

Известно, что аэродинамические характеристики летательных аппаратов (ЛА) изменяются, если в окрестности планера летательного аппарата формируются струи от движителей (см., например, [1,2]). Однако, несмотря на то, что исследования аэродинамики дирижаблей продолжаются многие десятилетия, ощущается недостаток данных о влиянии работающих винтов на аэродинамику дирижабля.

В связи с этим целью данной работы являлось изучение влияния работающих винтов и образующихся за ними струй на особенности обтекания воздухом и аэродинамические характеристики дирижабля вдали от экрана (земной поверхности).

В качестве объекта исследований был выбран малоразмерный дирижабль мягкого типа с двумя двухлопастными винтами, установленными на гондоле симметрично относительно базовой плоскости дирижабля. Исследования проведены при углах атаки дирижабля $\alpha = -50^\circ \dots 50^\circ$, углах скольжения $\beta = 0 \dots 50^\circ$ и скорости невозмущенного потока

$V_\infty = 5...25$ м/с. Числа Рейнольдса, подсчитанные по длине оболочки (корпуса) дирижабля, изменялись в пределах $Re = (1,36..6,50) \times 10^7$. Число оборотов винтов n_s изменялось от 500 до 3000 об/мин.

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

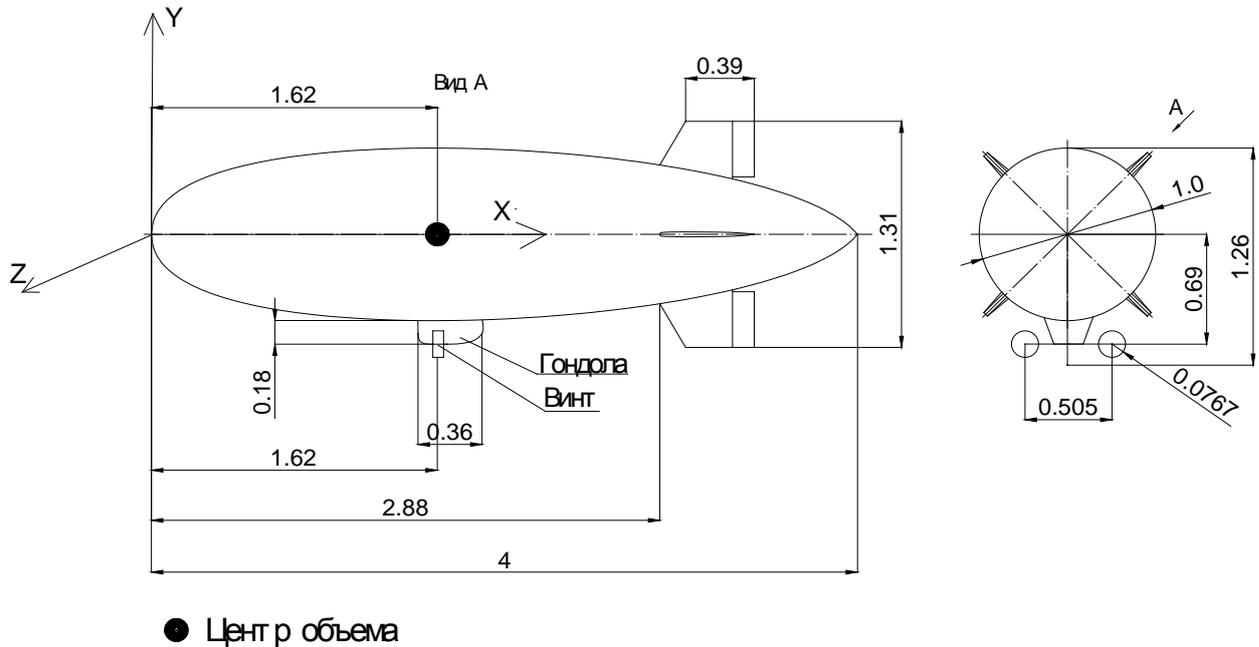
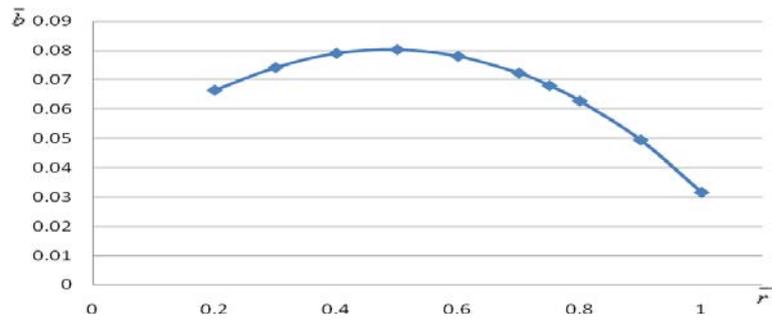


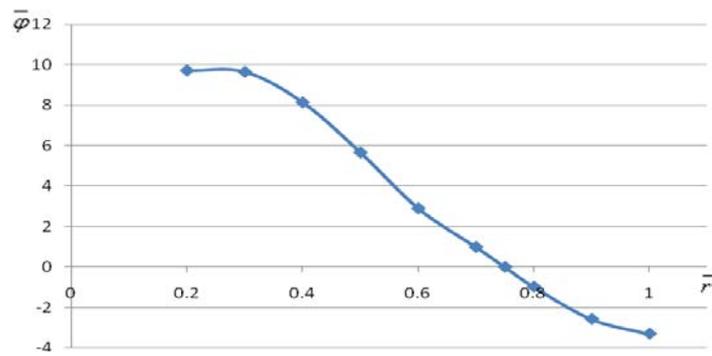
Рис. 1. Схема дирижабля

классической схеме, его оболочка (корпус), имела обвод Парсевалья и удлинение $\lambda = 4$. Конпоновка дирижабля также включала гондолу, трапециевидные консоли оперения с профилем $NACA\ 0006$ и два двухлопастных винта. Плоскость вращения винтов была перпендикулярна продольной оси оболочки. 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.

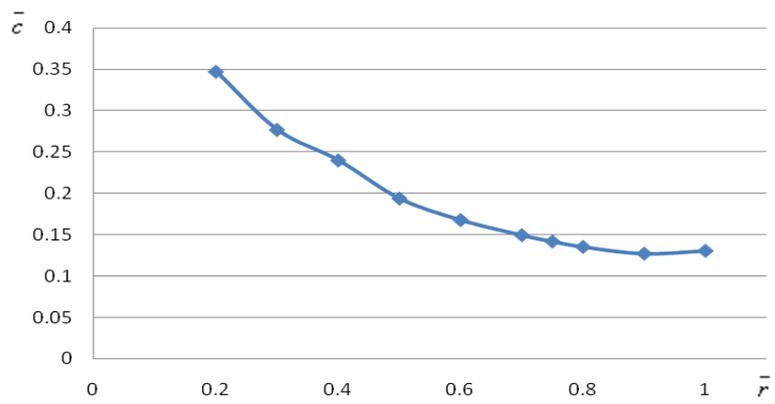
В работе в сечениях лопастей винта использовался модифицированный профиль $RAF-6$. Геометрические параметры винта в виде зависимостей крутки $\bar{\varphi} = \varphi - \varphi_{0,75}$, относительной ширины лопасти $\bar{b} = b/D_B$, толщины $\bar{c} = c/b$ и кривизны $\bar{f} = f/b$ от относительного 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.



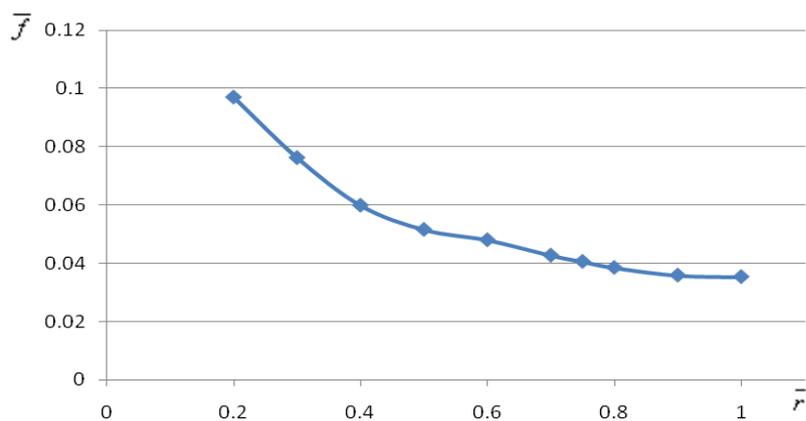
a)



b)



B)



г)

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

Для численного решения задачи использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, записанные для пространственного течения [3] и замкнутые моделью турбулентности «SST $k-\omega$ » [4]. На поверхности элементов дирижабля и винтов выполнялось условие прилипания. На входе в счетную область задавалась скорость невозмущенного потока.

Численное решение задачи осуществлялось с помощью метода контрольного объема [4,5]. Счетная область представляла собой круговой цилиндр, длина и диаметр которого оставляли двадцать длин оболочки 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 исследуемой компоновки.

Расчеты проведены с помощью комплекса вычислительных программ, содержащих адаптированный к условиям задачи программный комплекс ANSYS 12.0 (лицензия № 00241d277c88), и специальные разработанные авторами программы для проведения, обработки и обобщения результатов численных расчетов.

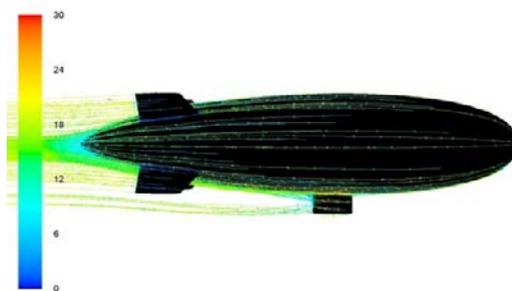
В результате вычислений были получены параметры потока в расчетных точках. В связанной системе координат, показанной на рис.1, были найдены коэффициенты локальных и суммарных сил и моментов, действующих на модель дирижабля. Коэффициенты

суммарных сил дирижабля были отнесены к $W^{2/3}$; коэффициенты моментов подсчитаны относительно центра объема оболочки и отнесены к W , где W - объем оболочки дирижабля.

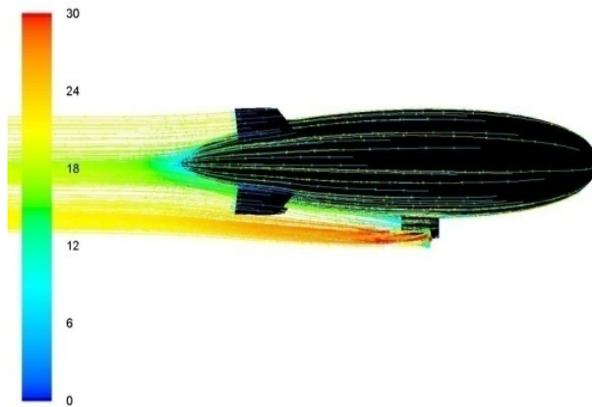
Для оценки возможности применения указанных вычислительных комплексов и программ к решению поставленной задачи и выяснения достоверности получаемых результатов было проведено сравнение результатов расчетов обтекания оперенной и неоперенной оболочки с экспериментальными данными ЦАГИ [6]. Их сходимость оказалась вполне удовлетворительной.

Основные расчеты были проведены для "обращенного" движения, когда равномерный поток натекал на корпус дирижабля с винтами с заданной скоростью. Сопоставление этих результатов с аналогичными результатами для "прямого" движения, когда дирижабль с винтами двигался в спокойной атмосфере с поступательной скоростью, равной скорости потока в "обращенном" движении, показало их практическую идентичность.

На рис. 3...5 приведены картины линий тока в окрестности дирижабля. Видно, что при отсутствии скольжения ($\beta = 0$) область следа за дирижаблем с работающими винтами существенно шире, чем при отсутствии винтов. Струи от винтов проходят вблизи консолей оперения. В то же время, картина линий тока вблизи оболочки почти не зависит от того, работают винты или нет. Кроме того, видно, что обтекание консолей оперения, расположенных на наветренной стороне корпуса, улучшается. При поступательном движении дирижабля со скольжением и нулевым углом атаки струи от винтов становятся асимметричными относительно плоскости изменения углов скольжения и могут оказывать существенное влияние на обтекание той части корпуса дирижабля, которая расположена позади винтов, оперения и гондолы, почти не изменяя картину течения около корпуса перед винтами.

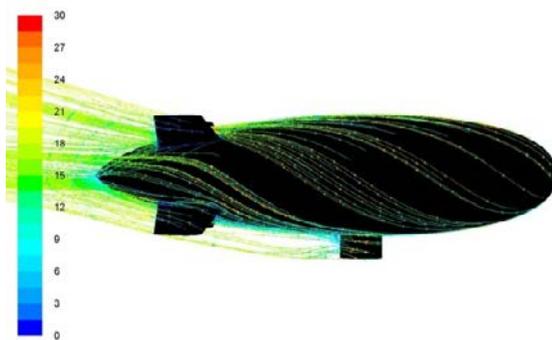


а)

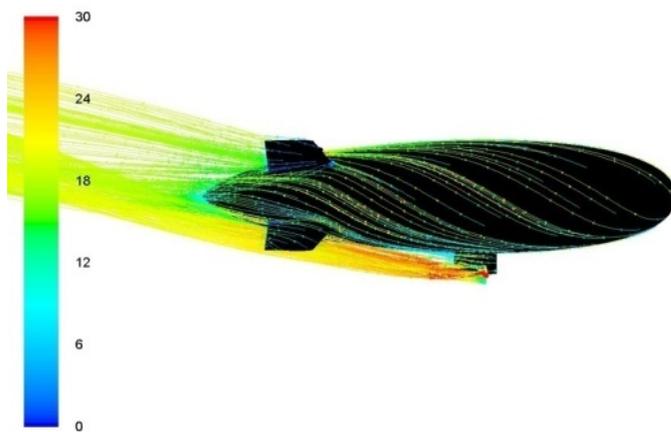


б)

Рис.3. Картины линий тока в окрестности дирижабля при $\alpha = 0$, $\beta = 0$; $V_\infty = 20$ м/с;
 $n_s = 3000$ об/мин; а) - без винтов; б) – с винтами

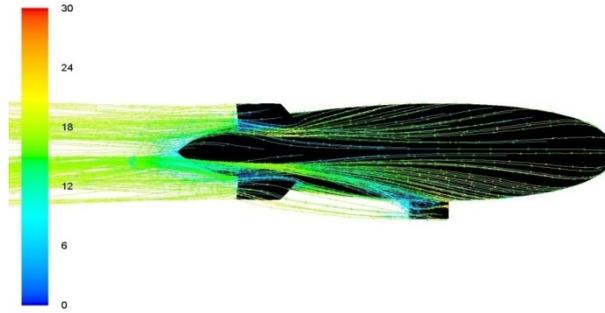


а)

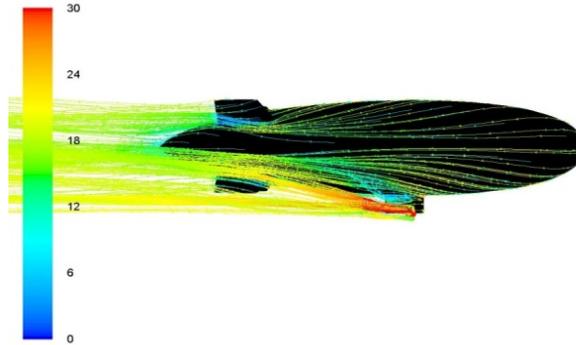


б)

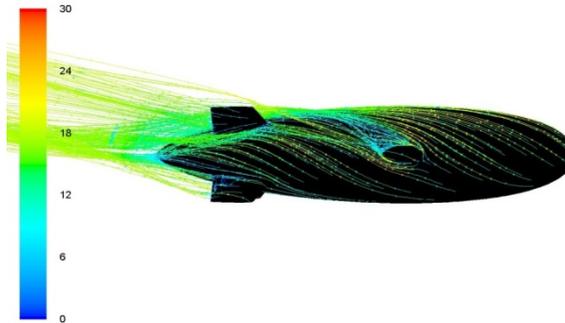
Рис. 4. Картины линий тока в окрестности дирижабля при $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0$; $V_\infty = 20$ м/с;
 $n_s = 3000$ об/мин; а) - без винтов; б) – с винтами



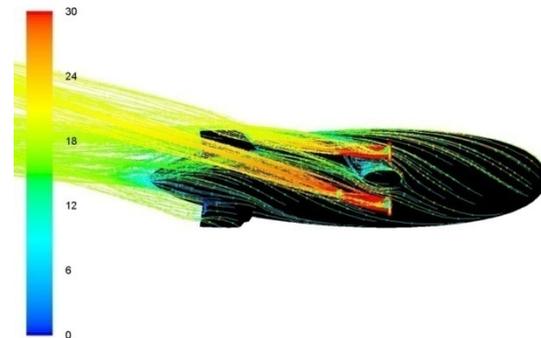
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Картины линий тока в окрестности дирижабля при $\alpha = 0$, $\beta = 20^\circ$; $V_\infty = 20$ м/с; $n_s = 3000$ об/мин; а, б - в плоскости изменения углов атаки, а – без винтов, б – с винтами; в, г – в плоскости изменения угла скольжения, в – без винтов, г – с винтами

На рис. 6 - 7 представлены результаты исследований влияния работающих винтов на суммарные аэродинамические характеристики дирижабля при изменении углов атаки и различных значениях скоростей набегающего на дирижабль потока при $n_s = 3000$ об/мин.

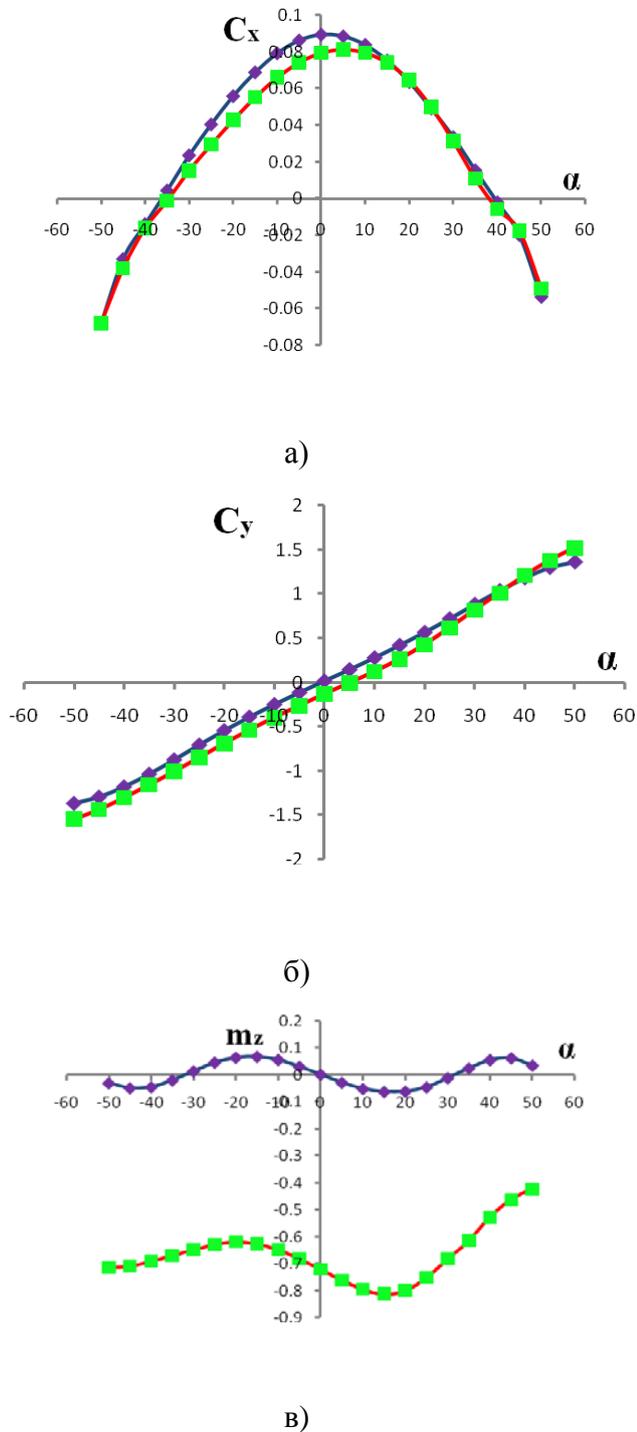


Рис. 6. Зависимости аэродинамических характеристик дирижабля от угла атаки при $\beta=0$;
 $V_\infty=5$ м/с; $n_s = 3000$ об/мин; ; \blacklozenge - без винтов, \blacksquare - с винтами

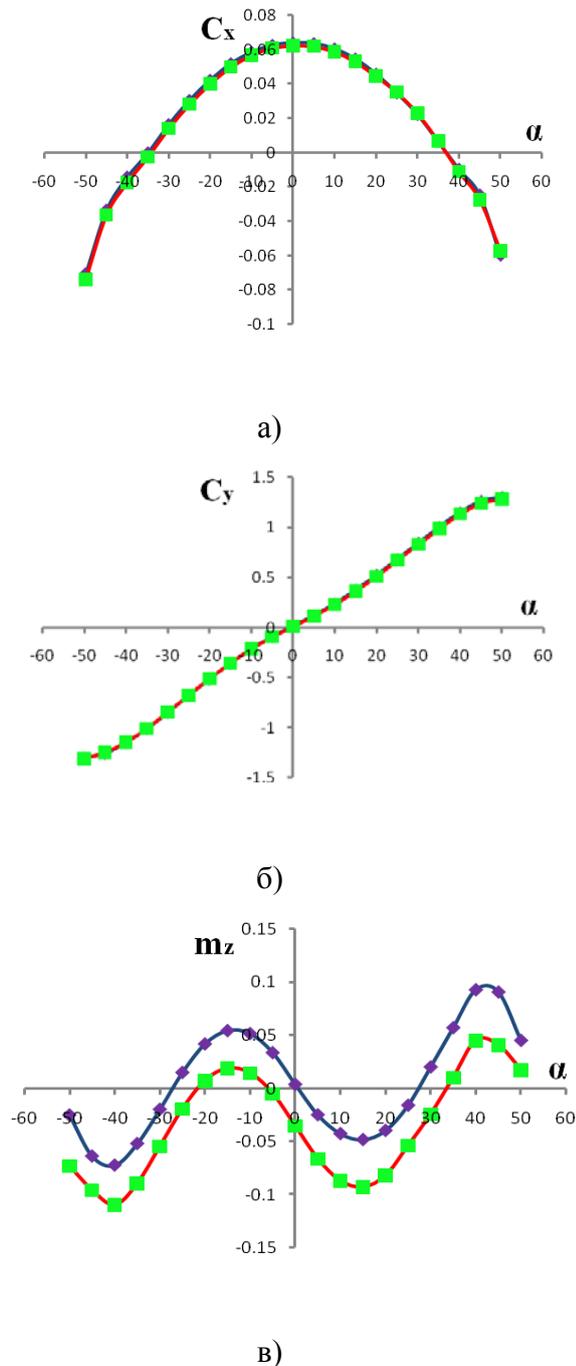


Рис. 7. Зависимости аэродинамических характеристик дирижабля от угла атаки α при $\beta=0$;
 $V_\infty=20$ м/с; $n_s = 3000$ об/мин; —◆— без винтов, —■— с винтами

Видно, что характер изменения по углу атаки коэффициентов продольной и нормальной сил, а также момента тангажа почти не зависит от числа оборотов и величины скорости невозмущенного потока. При минимальном в данных расчетах числе оборотов винтов $n_s = 500$ об/мин рост скорости невозмущенного потока от 5 м/с до 20 м/с практически не отразился на величинах и зависимостях по углу атаки коэффициентов продольной и

нормальной сил дирижабля и привел к уменьшению влияния винтов на величины моментов тангажа.

Влияние работы винтов на коэффициенты продольной и нормальной сил заметно при небольшой скорости невозмущенного потока в случае максимального числа оборотов $n_s = 3000$ об/мин (рис. 6). Оно существенно ослабевает, если скорость невозмущенного потока растет (см. рис. 7). Влияние струй от винтов на коэффициенты момента тангажа при таких числах оборотов также уменьшается с ростом скорости невозмущенного потока.

Из сказанного следует, что если скорость натекания потока на дирижабль близка по величине к той скорости полета, при которой ускорение дирижабля равно нулю (при равенстве тяги и продольной силы при нулевых углах атаки и скольжения), то влияние струй на суммарные аэродинамические характеристики дирижабля незначительно. Наоборот, в случае их существенной разницы влияние струй может оказаться заметным, нелинейным и в определенном диапазоне углов атаки нерегулярным. Об этом свидетельствуют графики на рисунках рис. 6 - 7.

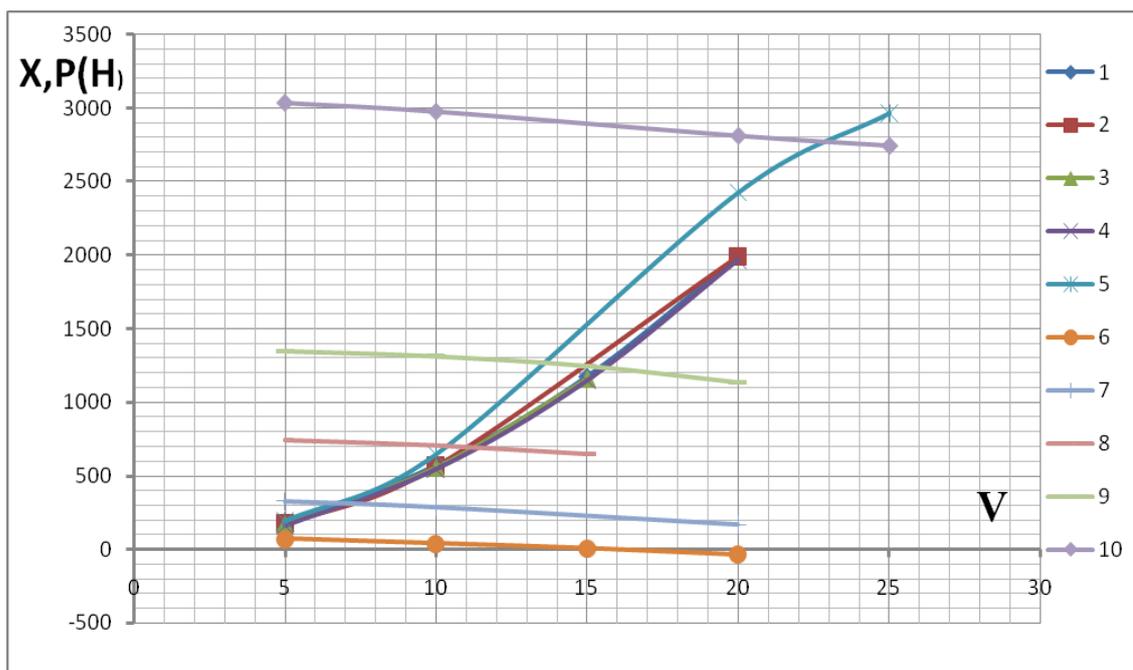


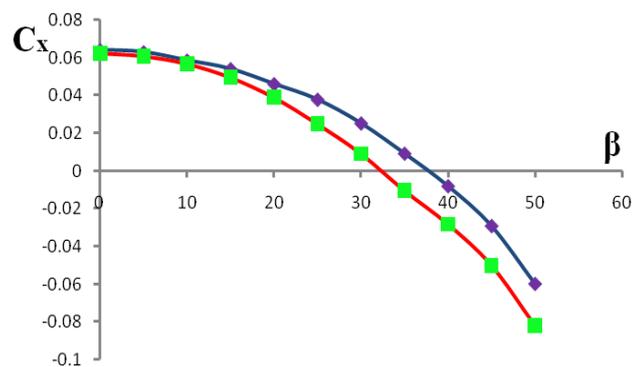
Рис. 8. Зависимости тяги двух винтов и продольной силы дирижабля с работающими винтами от величины скорости потока при $n_s = var$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$; высота полета $H = 1$ км; 1,2,3,4,5 - продольная сила дирижабля, 6,7,8,9,10 - тяга винтов при $n_s = 500, 1000, 1500, 2000, 3000$ об/мин, соответственно;

Определить указанные выше скорости можно, используя представленные на рис. 8 и рассчитанные для данной модели дирижабля зависимости силы тяги (полученной

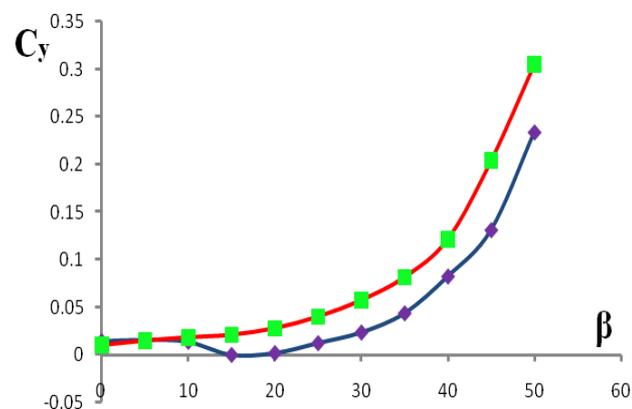
интегрированием давления и сил трения по поверхности лопастей винтов) и аэродинамической продольной силы от скорости полета и числа оборотов винтов.

Кроме того, следует отметить, что для исследованной модели дирижабля при определенном соотношении числа оборотов винтов и скорости невозмущенного потока работа движителей (создаваемое винтами течение) приводит к некоторому уменьшению значений коэффициентов продольной и нормальной сил и расширению диапазона углов атаки, в котором модель является статически неустойчивой.

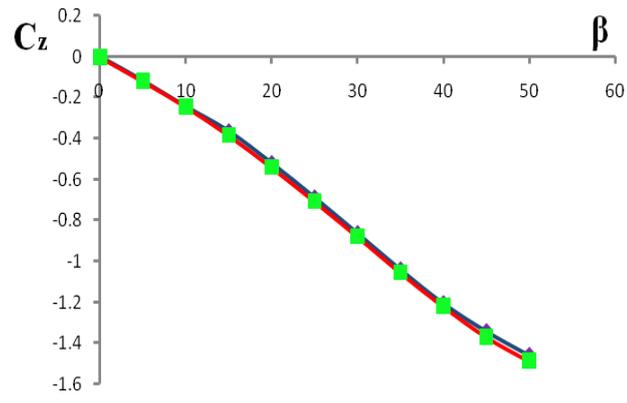
Отмеченные закономерности влияния сочетания числа оборотов и величины скорости невозмущенного потока имеют место и в случае обтекания дирижабля при наличии скольжения. Из графиков на рис. 9, полученных для максимального числа оборотов винтов в данной работе $n_s = 3000$ об/мин, видно, что влияние струй от винтов на аэродинамические характеристики дирижабля становится существенно меньше, если скорость полета растет и приближается к скорости, соответствующей нулевому ускорению дирижабля.



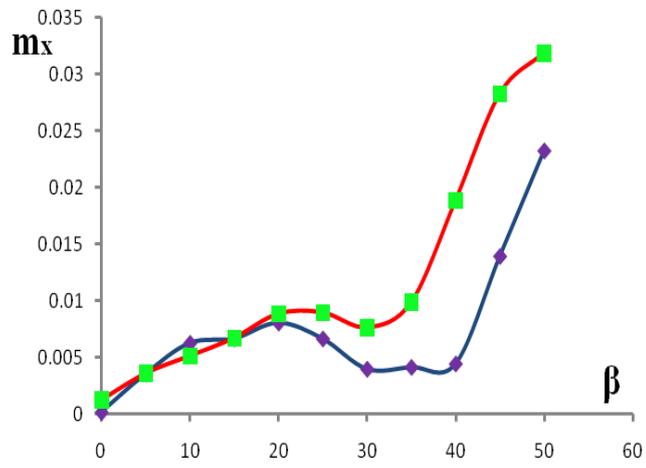
а)



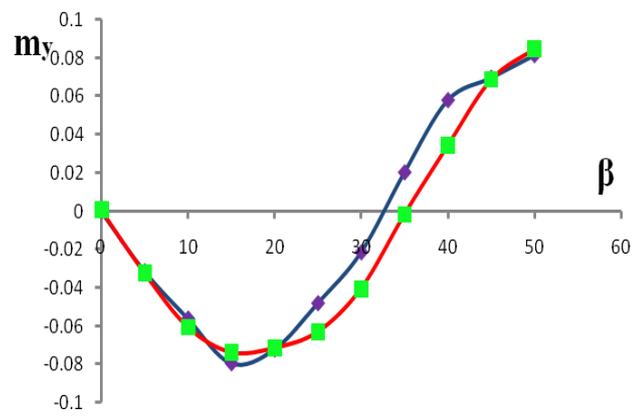
б)



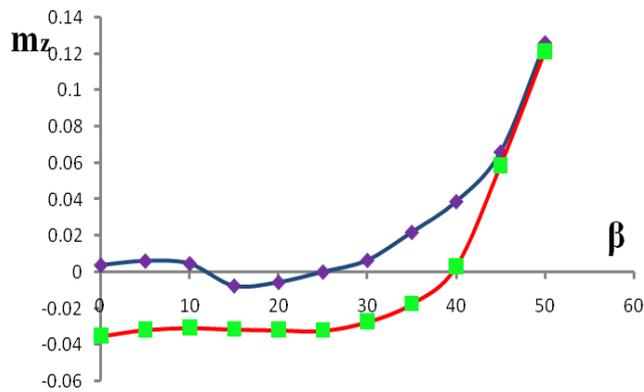
В)



Г)



Д)



е)

Рис. 9. Влияние изменения угла скольжения на аэродинамические характеристики дирижабля при $\alpha = 0$; $V_\infty = 20$ м/с; $n_s = 3000$ об/мин;

—◆— без винтов, —■— с винтами

Следует отметить, что при наличии скольжения влияние работы винтов на аэродинамические характеристики дирижабля проявляется сильнее, чем это наблюдалось при изменении углов атаки дирижабля.

Присоединенная к оболочке гондола и снос набегающим на дирижабль потоком струй от винтов движителей приводят к асимметрии распределения давления и сил трения по поверхности дирижабля относительно плоскости изменения его углов скольжения. В этих условиях на дирижабль и без работающих винтов действуют нормальная сила и момент тангажа, нелинейно возрастающие с увеличением угла скольжения (рис. 9). Работа винтов вызывает рост их абсолютных величин при всех рассмотренных углах скольжения. Из графиков на рис. 9 видно, что струи от винтов увеличивают диапазон углов скольжения, в котором модель неустойчива по тангажу. То же самое можно сказать и о путевой статической устойчивости при большой скорости невозмущенного потока. Наоборот, при малой скорости этот диапазон существенно сокращается.

Найденные закономерности влияния струй от винтов на аэродинамические характеристики дирижаблей необходимо учитывать при выборе их проектных параметров.

Таким образом, в результате численного исследования обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтовыми движителями вдали от экрана (земной поверхности) получены данные о влиянии на коэффициенты аэродинамических сил и моментов дирижабля углов атаки α и скольжения β при изменении числа оборотов винтов движителя и скорости набегающего потока. Показано, что если скорость натекания потока на

дирижабль близка к той скорости полета, при которой дирижабль движется без ускорения, то влияние двигателя на суммарные аэродинамические характеристики дирижабля сравнительно невелико. Наоборот, при значительной разнице указанных скоростей влияние течения, создаваемого при работе двигателя, на аэродинамические характеристики дирижабля может оказаться весьма заметным. Это течение может вызвать их нелинейное и немонотонное изменение по определяющим параметрам.

Библиографический список

1. Гуляев В.В., Желанников А.И., Русаков В.И. Метод расчета на ЭВМ аэродинамических характеристик самолета с учетом работы силовой установки // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, вып. 1313, 1986, с. 304-311.
2. Shollenberger S.A. A three – dimensional wing/jet interaction analysis including jet distortion influences. AIAA Paper No. 73-655.
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. 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.