УДК: 533.601 (075.8)

ВЛИЯНИЕ ВИНТОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИРИЖАБЛЯ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Н.В. СЕМЕНЧИКОВ, ТА СУАН ТУНГ

Представлены результаты численного моделирования обтекания и расчета аэродинамических характеристик дирижабля с вращающимися винтами и без винтов при его движении через атмосферные струйные течения различного типа. Исследования проведены для постоянных при движении дирижабля его угла атаки $\alpha = 0 \ldots 30°$, характеризующего положение дирижабля относительно оси струйного течения в горизонтальной плоскости, $\beta = 0 \ldots 175°$, скорости поступательного движения дирижабля V = 18,056 м/с, скорости участка струи с постоянной скоростью Um = 10,67 м/с, числе оборотов винтов – n = 3000 об/мин, числе Рейнольдса $Re = 5{,}3 \cdot 10^6$. Найдено, что при пересечении дирижаблем струйного течения абсолютные величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижабля как без винтов, так и с вращающимися винтами сложным образом зависят от положения дирижабля в струйном течении и его вида, углов α и β и в несколько раз превышают значения коэффициентов для дирижабля, находящегося в свободном от струйного течения пространстве. Показано, что при перемещении дирижабля через поперечную струю ее влияние на аэродинамические характеристики дирижабля с винтами оказывается более значительным, чем при перемещении дирижабля через восходящее струйное течение.

Ключевые слова: дирижабль, перемещение через струйное течение, коэффициенты аэродинамических сил и моментов, влияние винтов.

Известно [1–3], что аэродинамические характеристики дирижаблей могут в значительной степени изменяться, когда дирижабль попадает в область атмосферной неоднородности, например, когда он перемещается через границы атмосферного струйного течения или охватывается порывом ветра.

В данной работе приводятся результаты численных исследований изменения аэродинамических характеристик дирижабля вследствие влияния работы винтов при перемещении дирижабля через восходящую воздушную струю, натекающую на дирижабль со стороны гондолы и винтов, и при перемещении через боковую поперечную струю, натекающую на дирижабль под углом β к его базовой плоскости. Профиль скоростей в поперечном сечении струи, где перемещался дирижабль, был близок к прямоугольнику, что в определенной степени моделировало частичный или полный мгновенный охват дирижабля дискретным порывом с постоянной скоростью. В конкретном варианте расчета ориентация дирижабля по отношению к оси струйного течения не изменялась. Несмотря на условность такой постановки задачи, анализ результатов ее решения позволяет сделать определенное заключение о влиянии различных факторов на аэродинамические характеристики дирижабля при его перемещении через струйное течение.

В качестве объекта исследований использовалась модель оперенного дирижабля с гондолой, винтовыми движителями, корпусом кругового поперечного сечения и трапециевидными консолями оперения, ориентированными по схеме «+» (рис. 1). На рис. 1 все геометрические параметры элементов дирижабля отнесены к диаметру его корпуса.

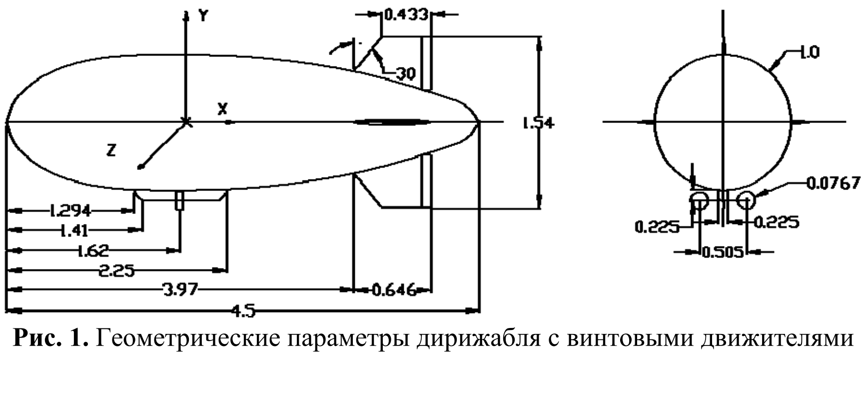


Рис. 1. Геометрические параметры дирижабля с винтовыми движителями

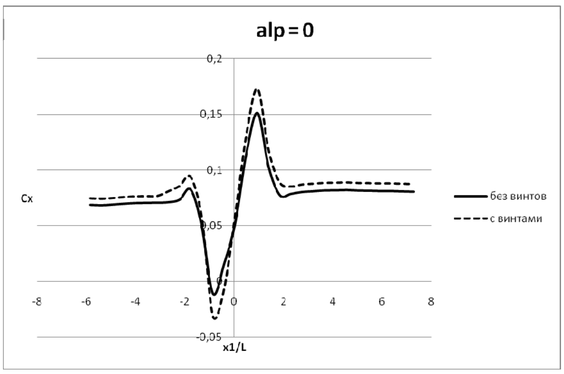
Уравнение обвода корпуса в его меридиональном сечении (в системе координат, начало которой совпадает с вершиной корпуса), имело вид $y = 0{,}972D[(x/L)(1 - x/L)(1{,}5 - x/L)]^{1/2}$. Профиль консолей оперения – симметричный профиль NACA 0006. Лопасти винтов были построены с помощью модифицированного профиля RAF – 6. Относительная ширина лопасти винта изменялась в пределах от 0.03 до 0.08, геометрическая крутка – от 10º до –4º, относительная толщина профиля – от 0.37 у комля лопасти до 0.13 у ее конца, относительная кривизна профиля – от 0.10 до 0.04. Рули дирижабля отклонены не были. Носовое усиление корпуса в расчетах не учитывалось.

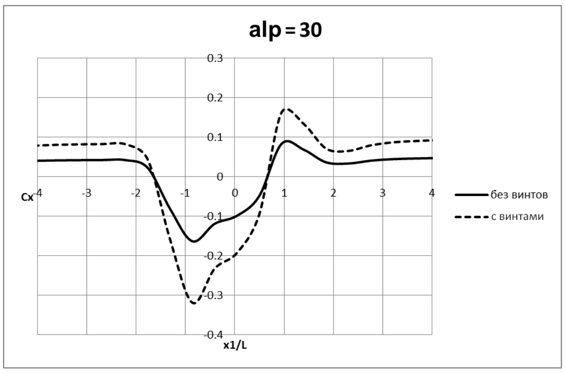
Задача аэродинамического взаимодействия дирижабля со струйным потоком решалась численно. Течение в окрестности корпуса и винтов предполагалось турбулентным. Основные положения использованного численного метода исследования и его численной реализации приведены в [1–3]. Коэффициенты аэродинамических сил дирижабля даны ниже в связанной системе координат (рис. 1), начало которой располагалось в центре объема корпуса, и отнесены к $W^{\frac{2}{3}}$, где W – объем корпуса дирижабля. Коэффициенты аэродинамических моментов дирижабля были подсчитаны относительно центра объема его корпуса и отнесены к W. Центр объема корпуса располагался на расстоянии $0.45L$ от вершины корпуса (L – длина корпуса дирижабля).

Расчеты были проведены для постоянных при движении дирижабля его угла атаки $\alpha = 0\ldots30°$, угла $\beta = 0\ldots175°$, скорости поступательного движения дирижабля $V = 18.056$ м/с, скорости участка струи с постоянной скоростью $Um = 10.67$ м/с, числе оборотов винтов – n = 3000 об/мин, числе Рейнольдса $\mathrm{Re} = VL/\nu = 5.3 \cdot 10^6$ (ν – кинематическая вязкость воздуха).

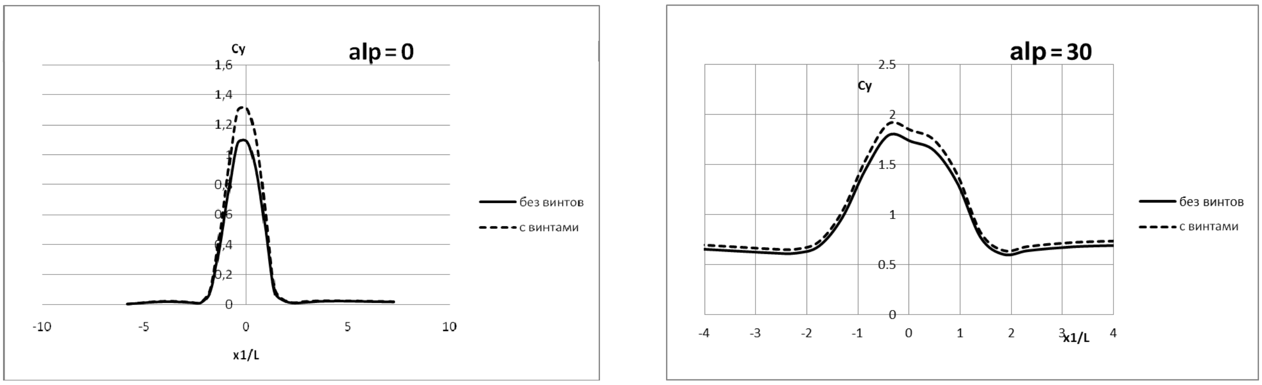
На рис. 2 для $b/L = 2$ (b – ширина струи в ее начальном сечении, $b/L = 2$ – относительная ширина стандартного порыва [4]) и $\alpha = 0$, 30º представлены примеры зависимости коэффициентов суммарных аэродинамических сил и момента тангажа различных вариантов дирижабля от параметра x_1/L, характеризующего положение носика корпуса дирижабля относительно центра восходящего струйного течения, натекающего на дирижабль со стороны гондолы (при $\alpha = 0$ угол между осью струйного течения и продольной осью корпуса дирижабля составлял 90º, а при $\alpha = 30°$ он был равен 60°). Начало выбранной системы координат лежит на оси струи. Ось $0x_1$ направлена в сторону движения дирижабля. При этом значения $x_1/L \le 0$ соответствуют случаю подходящего к струйному течению или частично вошедшего в него дирижабля. При $x_1/L \ge 0$ дирижабль либо находится в струе, либо выходит из нее.

Видно, что при перемещении дирижабля через восходящее струйное течение коэффициент аэродинамической осевой силы изменяется сложным образом по параметру x_1/L. Когда дирижабль начинает входить в струйное течение, коэффициент его продольной силы уменьшается по сравнению со значением этого коэффициента у дирижабля, находящегося вне струи. На дирижабль действует отрицательная продольная сила, «втягивающая» дирижабль в струю. Наоборот, при выходе дирижабля из струйного течения на дирижабль действует положительная продольная сила. Ее максимум снова достигается для положения носка дирижабля вблизи границы струи.

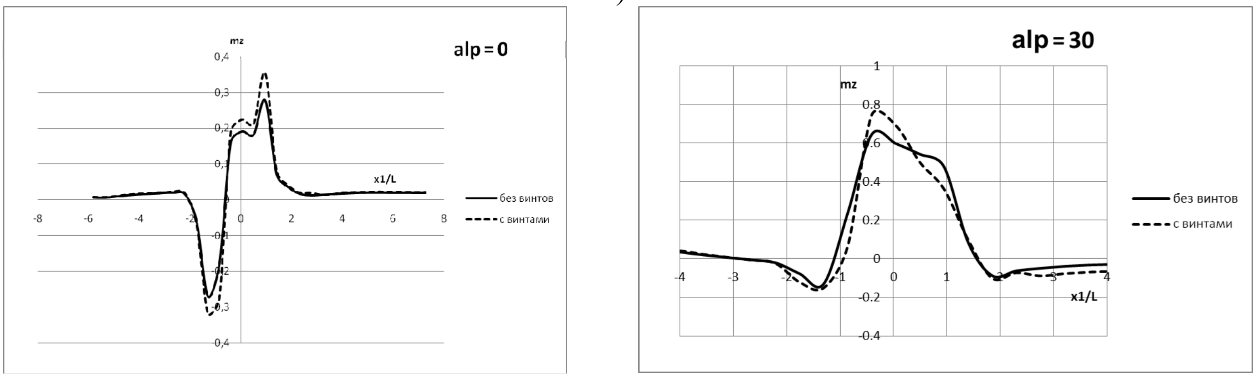




а)



б)



в)

Рис. 2. Аэродинамические характеристики дирижабля;
вертикальная струя натекает на дирижабль снизу со стороны гондолы:
1 – с вращающимися винтами, *2* – без винтов; *а* – $C_x = f(x_1/L)$, *б* – $C_y = f(x_1/L)$, *в* – $m_z = f(x_1/L)$

Работа винтов влияет на величины коэффициента C_x дирижабля, когда он находится как вне струи, так и частично или полностью внутри нее. Характер протекания коэффициента C_x по параметру x_1/L практически не зависит от того, вращаются винты или нет. При этом максимальные значения модуля коэффициента C_x как для дирижабля с неработающими винтами, так и с вращающимися винтами могут в несколько раз превышать их значения для дирижабля, находящегося вне струи.

Величины модуля коэффициента C_x дирижабля с вращающимися винтами при всех значениях параметра x_1/L оказываются больше, чем у дирижабля с неработающими винтами (например, при $\alpha = 30^\circ$ максимальные значения модуля C_x дирижабля с винтами почти в два раза больше их значений для дирижабля без винтов, рис. 2, *а*).

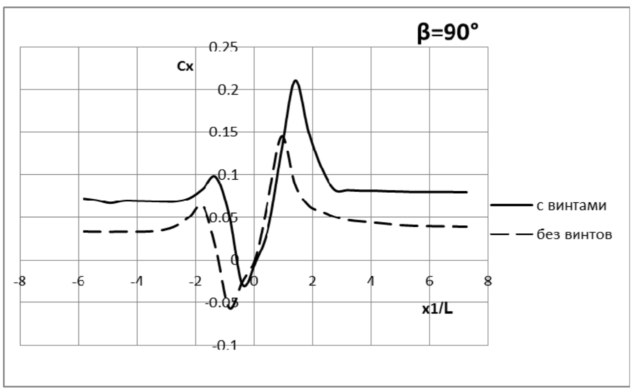
При попадании дирижабля с гондолой и винтами в восходящее струйное течение даже при $\alpha = 0$ на дирижабль действует нормальная сила, максимум которой наблюдается при любых α при расположении носика корпуса дирижабля вблизи центра струйного течения (рис. 2, *б*). У дирижабля с вращающимися винтами, перемещающегося через восходящее вертикальное струйное течение, величины коэффициента C_y растут по сравнению со случаем отсутствия вращения винтов. Работа винтов слабо влияет на характер зависимости коэффициента нормальной силы дирижабля C_y от параметра x_1/L. С увеличением угла α влияние вращения винтов на нормальную силу дирижабля, частично или полностью находящегося в восходящем струйном течении, уменьшается (например, вращение винтов вызывает рост максимальной величины коэффициента C_y дирижабля примерно на 20 % при $\alpha = 0$ и около 10 % при $\alpha = 30^\circ$.

Взаимодействие дирижабля и восходящего струйного потока в значительной степени сказывается на величинах коэффициента момента тангажа дирижабля как в случае не вращающихся, так и вращающихся винтов. Величины коэффициента m_z в значительной степени зависят от положения дирижабля в вертикальной струе и изменяются сложным образом по параметру x_1/L (рис. 2, *в*). Характер протекания коэффициента m_z по параметру x_1/L определяется величиной угла, характеризующего положение продольной оси корпуса дирижабля по отношению к оси струйного течения, но слабо зависит от того, работают винты или нет. При частичном или полном охвате дирижабля вертикальным струйным течением значения модуля коэффициента m_z резко растут по сравнению с их значениями для дирижабля, находящегося вне струи. С ростом угла α влияние вращения винтов на коэффициенты m_z ослабевает. Так, при α = 0 максимум модуля коэффициента m_z дирижабля с вращающимися винтами увеличивается примерно на 35 % по сравнению с его величиной для дирижабля без винтов, и только примерно на 12 % при α = 30º.

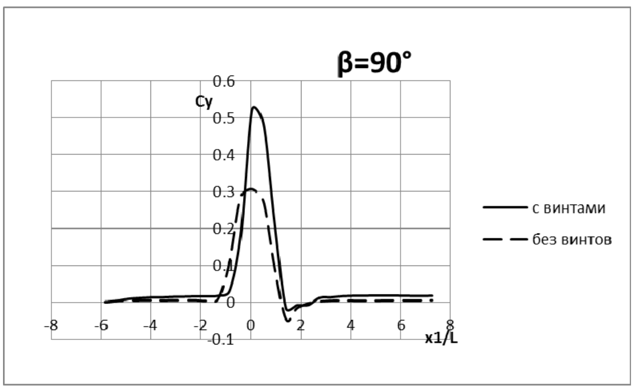
На рис. 3 представлен пример изменения аэродинамических характеристик дирижабля с вращающимися винтами и без них в случае перемещения дирижабля через горизонтальную поперечную струю, натекающую на дирижабль сбоку, когда угол β между продольной осью корпуса дирижабля и осью струи равен 90º.

На величины коэффициента продольной силы C_x дирижабля, перемещающегося через поперечную боковую струю, работа винтов влияет таким же образом, что и при попадании дирижабля в восходящую вертикальную струю. Характер изменения коэффициента C_x по параметру x_1/L остается таким же, как и в случае перемещения дирижабля через вертикальную восходящую струю (см. рис. 3, *а* и рис. 2, *а*). В диапазоне углов β = 10… 60º работа винтов вызывает уменьшение величины максимума модуля коэффициента продольной силы $|C_{xmax}|$ до 20 %, а при β = 90…175° его увеличение. При этом максимум $|C_x|$ имеет место при β = 90º, в то время как наибольшее увеличение $|C_{xmax}|$ дирижабля с работающими винтами по сравнению со случаем, когда винты не вращаются, наблюдается при β = 150º (более чем в 2 раза).

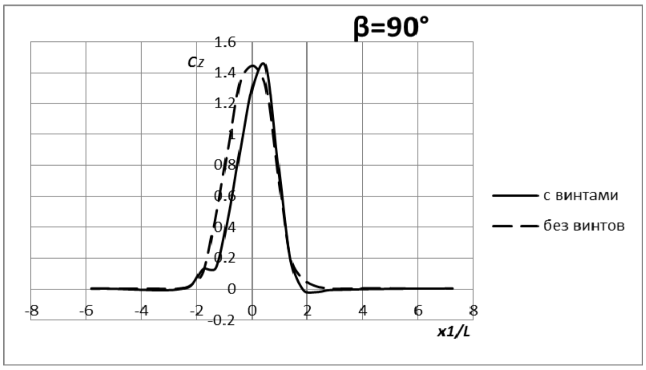
При перемещении дирижабля через боковую горизонтальную струю на дирижабль действуют поперечная сила и момент рыскания. Величины коэффициентов поперечной силы C_z и момента рыскания m_y зависят от положения дирижабля в струе в данный момент времени (рис. 3, *в* и 3, *д*) и величины угла β. При β = Const работа винтов не изменяет характера протекания коэффициентов C_z и m_y по параметру x_1/L. Максимальная величина коэффициента C_z имеет место при β ≈ 120º как для дирижабля без винтов, так и для дирижабля с вращающимися винтами. При β < 30º работа винтов может незначительно уменьшить величину C_{zmax}, а при β ≥ 30º, наоборот, увеличить. Наибольший прирост C_{zmax} дирижабля за счет работы винтов достигается при β = 150º и составляет около 17 %. Максимальное значение модуля коэффициента момента рыскания дирижабля как с вращающимися винтами, так и без них, имеет место при β ≈ 150º, а максимальный прирост $|m_{ymax}|$ при β ≈ 175º и составляет примерно 26 % от аналогичного коэффициента дирижабля без винтов. Максимальные величины модуля коэффициента m_y дирижабля с винтами оказываются при любых β больше, чем у дирижабля без винтов.



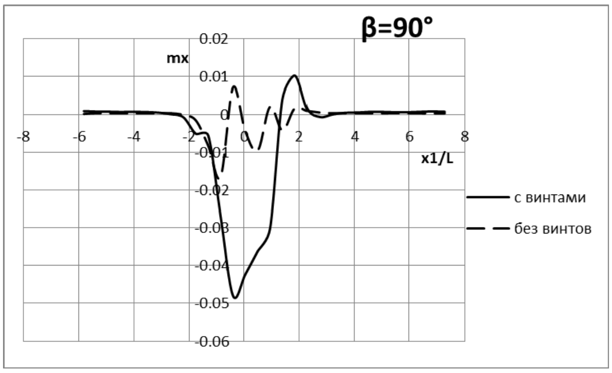
а)



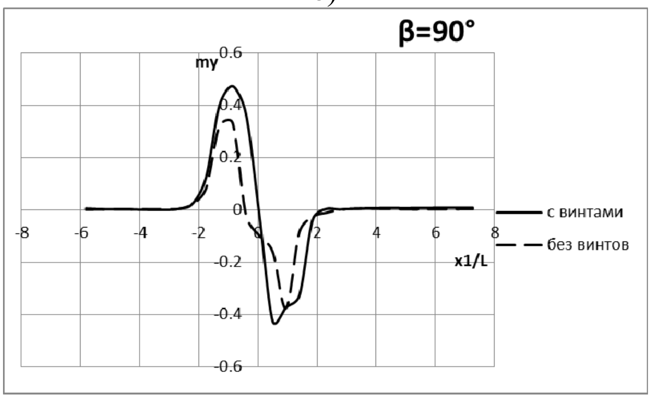
б)



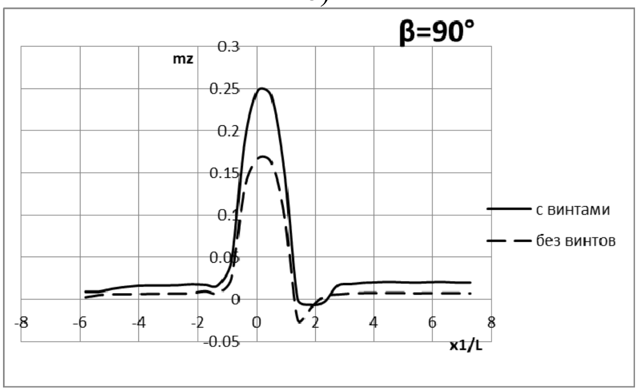
в)



г)



д)



е)

Рис. 3. Аэродинамические характеристики дирижабля;
горизонтальная струя натекает на дирижабль сбоку, β = 90º

Когда дирижабль с гондолой и винтами частично или полностью оказывается в поперечной горизонтальной струе, на дирижабль действуют нормальная сила и момент тангажа, а также момент крена. Протекание коэффициентов C_y и m_z по параметру x_1/L является таким же, как и коэффициента C_z. Характер изменения этих коэффициентов по указанному параметру не зависит от того, вращаются винты или нет.

Максимум величины коэффициента C_y наблюдается при β = 90º как для дирижабля без винтов, так и с вращающимися винтами. При этом же угле β имеет место и максимальный прирост величины C_{ymax} за счет вращения винтов. Этот прирост составляет около 80 % величины коэффициента C_{ymax} дирижабля без винтов. Отметим, что максимальные абсолютные величины коэффициентов C_y у дирижабля с работающими винтами при любых β оказываются больше, чем у дирижабля без винтов.

Работа винтов может привести как к уменьшению величин коэффициента $|m_{zmax}|$, так и к их росту. Например, при β < 30º вращение винтов вызывает уменьшение величины этого коэффициента (примерно на 20 % по сравнению со значением $|m_{zmax}|$ для дирижабля без винтов), а при β ≥ 90º – ее рост. Максимальное значение коэффициентов $|m_z|$ имеет место при β = 90º как для дирижабля с вращающимися винтами, так и дирижабля без них. Но Максимальный прирост величины коэффициента $|m_{zmax}|$ за счет работы винтов имеет место при β = 150º.

Коэффициент момента крена m_x изменяется сложным образом по параметру x_1/L (рис. 3, *г*). Характер протекания m_x по x_1/L зависит от величины угла β, а также того, вращаются ли винты или они отсутствуют. В основном работа винтов вызывает рост величин коэффициента $|m_{xmax}|$, причем максимальный прирост этого коэффициента за счет работы винтов наблюдается при β = 90º. В этом случае величина коэффициента $|m_{xmax}|$ дирижабля с вращающимися винтами почти в 5 раз больше величины $|m_{xmax}|$ дирижабля без винтов (рис. 3, *г*). Однако работа винтов может вызывать и уменьшение величины коэффициента $|m_{xmax}|$ при перемещении дирижабля через поперечную струю. Например, при β = 60º величина $|m_{xmax}|$ дирижабля с вращающимися винтами почти в 1,8 раза меньше величины аналогичного коэффициента без винтов.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. При пересечении дирижаблем струйного течения абсолютные величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижабля, как без винтов, так и с вращающимися винтами могут сложным образом зависеть от положения дирижабля в струйном течении, углов α и β, и в несколько раз превышать их значения для дирижабля, находящегося в свободном от струйного течения пространстве.

2. Когда дирижабль перемещается через вертикальную струю, влияние следа от винтов не изменяет характера протекания коэффициентов продольной и нормальной сил, а также момента тангажа дирижабля по параметру, определяющему расположение дирижабля относительно центра струйного течения, но приводит к увеличению максимальных абсолютных величин этих коэффициентов в среднем на 20 %.

3. При перемещении дирижабля через поперечную струю влияние следа от винтов на аэродинамические характеристики дирижабля оказывается более значительным, чем при попадании дирижабля в восходящую струю. Изменяются (в ряде случаев в разы) не только максимальные абсолютные величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижабля по сравнению со случаем, когда вращение винтов не учитывается, но для некоторых коэффициентов и характер их протекания по определяющему положение дирижабля в струе параметру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование взаимодействия дирижабля с атмосферным порывом. Исполнитель Пашков О.А. Научный руководитель Семенчиков Н.В. [Электронный ресурс] М., 2012. URL: http://www.cae-expert.ru/sites/default/files/issledovanie_vzaimodeistviya_dirizhblya_s_atmosfernym_poryvom.pdf

2. Семенчиков Н.В., Та Суан Тунг, Яковлевский О.В. Аэродинамические характеристики дирижабля при его движении через восходящий воздушный поток // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 57–64.

3. Семенчиков Н.В., Та Суан Тунг, Яковлевский О.В. Аэродинамические характеристики дирижабля при движении через область атмосферной неоднородности струйного типа // Полет. 2015. № 4. С. 47–53.

4. Критерии летной годности для дирижаблей. Авиарегистр Межгосударственного Авиационного Комитета от 9 октября 1996 г. (На основе “Airship Design Criteria”, FAA P-8110-2, 1992).

INFLUENCE OF SCREWS ON AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIRSHIP AT ITS MOVEMENT THROUGH ATMOSPHERIC JET FLOWS

Semenchikov N.V., Tha Suan Tung

Results of numerical simulation of flow and calculation of aerodynamic characteristics of an airship with and without rotating propellers during motion through the atmospheric jet streams of various types are presented. Research was carried out during motion of the airship for constant angle of attack α = 0…30°, as well as angle characterizing the position of the airship relatively the axis of the jet flow in the horizontal plane, β = 0…175°, velocity of translational motion of airship V = 18.056 m/s, velocity of the jet area with constant velocity Um = 10.67 m/s, propeller revolutions – n = 3000 rev/min, Reynolds number Re = 5.3×10^6. It was found that while airship passing the jet stream, the absolute values of the coefficients of aerodynamic forces and moments of the airship, both without and as well as with rotating propellers depend considerably on the position of the airship in the jet stream and type of jet stream, the angles α and β, and are several times higher than the coefficient values for the airship, located in the space free of the jet stream. It is demonstrated that during the airship's motion through transverse stream its influence on the aerodynamic characteristics of the airship with propellers is more considerable than during motion through updraft.

Key words: airship, movement through the jet stream, coefficients of aerodynamic forces and moments, influence of propellers.

REFERENCES

1. Research of interaction of an airsip with an atmospheric gust. The executor Pashkov O.A. Supervisor of studies Semenchikov N.V. Moscow, 2012. URL: http://www.cae-expert.ru/sites/default/files/issledovanie_vzaimodeistviya_dirizhblya_s_atmosfernym_poryvom.pdf

2. Semenchikov N.V., Ta Suan Tung, Jakovlevsky O.V. The aerodynamic characteristics of the airship as it moves trough updraft airstream. The MSTUCA Scientific Bulletin. Moscow, 2015. Issue 211. Pp. 57–64.

3. Semenchikov N.V., Ta Suan Tung, Jakovlevsky O.V. The aerodynamic characteristics of the airship at motion through the atmospheric inhomogeneities of jet type. All-Russian magazine Flight. Moscow, 2015. No. 4. Pp. 47–53.

4. Aviation Register of Interstate Aviation Committee of 9 October 1996 (On the basis of "Airship Design Criteria", FAA P-8110-2, 1992).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенчиков Николай Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «аэродинамика летательных аппаратов» МАИ (НИУ), электронный адрес: k105@mai.ru.

Та Суан Тунг, аспирант кафедры «аэродинамика летательных аппаратов» МАИ (НИУ), электронный адрес: k105@mai.ru.