

УДК 533.601 (075.8)

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИРИЖАБЛЯ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВОСХОДЯЩИЙ ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

Н.В. СЕМЕНЧИКОВ, ТА СУАН ТУНГ, О.В. ЯКОВЛЕВСКИЙ

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

Приводятся результаты численного исследования аэродинамических характеристик неоперенного и оперенного корпуса дирижабля с различной формой его поперечного сечения при проходе дирижабля через восходящий воздушный поток ограниченного поперечного размера. Определено влияние взаимного расположения дирижабля и струи на величины аэродинамических коэффициентов дирижабля.

**Ключевые слова:** неоперенный и оперенный корпус дирижабля, аэродинамические коэффициенты, влияние взаимного расположения дирижабля и струи.

В настоящее время в России и других странах мира ведутся большие научные и проектные изыскания и изготавливаются дирижабли различного назначения и грузоподъемности.

Так как дирижабли обладают большими размерами и относительно небольшими скоростями движения, то они в значительной степени подвержены воздействию атмосферных неоднородностей, к числу которых относятся области с высокой интенсивностью турбулентности, порывы ветра, различные струйные течения и пр. При попадании дирижабля в такие области его аэродинамические характеристики могут сильно меняться. При этом может произойти ухудшение управляемости дирижабля. Могут появиться большие по абсолютной величине изгибающие моменты и перерезывающие силы, действующие на оболочку (корпус) дирижабля, которые могут вызвать её разрушение. В связи с этим исследование аэродинамических характеристик дирижаблей при попадании их в области атмосферной неоднородности является актуальной задачей.

Целью данной работы являлось исследование особенностей обтекания и изменения аэродинамических характеристик дирижабля при его проходе с постоянной скоростью через восходящий воздушный поток ограниченного поперечного размера – воздушную струю, вектор осевой скорости которой был перпендикулярен продольной оси корпуса дирижабля. Задача решалась в рамках предположения, что ориентация дирижабля в пространстве относительно оси струйного течения оставалась неизменной, а угол атаки дирижабля во все моменты времени был равен нулю. Хотя такая постановка задачи является весьма условной (реакция дирижабля на воздействие струи не учитывалась, истинные траектории дирижабля при воздействии струи не рассчитывались и т.д.), тем не менее определенные выводы о влиянии различных геометрических и других факторов на аэродинамические характеристики дирижабля при его проходе через струйное течение удается сделать.

В определенной степени это моделирует частичный или полный мгновенный охват дирижабля вертикальным порывом ветра, скорость в котором в поперечном направлении является постоянной. Отметим, что критериями лётной годности для дирижаблей [1] регламентируется взаимодействие дирижабля с атмосферными порывами двух основных видов: ступенчатым дискретным порывом с характерной постоянной скоростью  $U_m$  и порывом, распределение поперечной скорости в котором определяется соотношением

$$U = (U_m/2)[1 - \cos(\pi x/H)],$$

где  $U_m$  – характерная скорость порыва;  $x$  – поперечная координата рассматриваемой точки в порыве,  $0 \leq x \leq 2H$ ;  $H$  – длина градиента порыва,  $L/4 \leq H \leq 800$  фут. (244 м);  $L$  – длина дирижабля. В [1] указывается, что воздушные порывы могут воздействовать на дирижабль в любом направлении, в том числе параллельно оси дирижабля, при установке поверхностей управления

как в нейтральном положении, так и при максимальных эффективных углах, необходимых для противодействия воздушному порыву.

Имеется ряд работ по исследованию аэродинамического взаимодействия дирижабля с порывами ветра. Например, в работе [2] для анализа этого явления используется приближенный метод, основанный на гипотезе плоских сечений. С помощью такого метода можно исследовать аэродинамические характеристики дирижаблей с корпусами только большого удлинения ( $\lambda > 7,0$ ). Современные дирижабли (например, мягкого типа с круговым поперечным сечением корпуса) часто имеют удлинения корпуса, близкие к 4,0. Это позволяет минимизировать лобовое сопротивление дирижабля в крейсерском полёте. При таких удлинениях гипотеза плоских сечений неприменима, и её использование может привести к большим погрешностям при оценке аэродинамических характеристик дирижабля.

Для исследования обтекания и расчета аэродинамических характеристик дирижабля с произвольным удлинением корпуса при его взаимодействии с атмосферными неоднородностями более предпочтительными в настоящее время являются численные сеточные методы, в рамках которых решаются конечно-разностные аналоги системы уравнений Навье-Стокса. Они дают наибольший объем информации, необходимый для решения указанной выше задачи. Некоторые результаты такого исследования имеются в работе [3]. Этот же подход был использован в данной работе.

Решение поставленной задачи осуществлялось в предположении турбулентного обтекания элементов дирижабля потоком вязкого газа (воздуха). Использовались записанные для пространственного течения осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса [4; 5], замкнутые моделью турбулентности «*SST k- $\omega$* », и метод контрольного объема [6]. Сопоставление результатов определения на основании численных расчетов аэродинамических характеристик моделей дирижаблей с экспериментальными данными [7; 8] позволяет сделать вывод о том, что расчеты с помощью модели «*SST k- $\omega$* » наилучшим образом совпадают с данными эксперимента и описывают изменение аэродинамических коэффициентов по углу атаки. Кроме того, что в численном расчете правильно предсказывается изменение аэродинамических сил и моментов дирижабля по определяющим параметрам, также весьма удовлетворительно определяются значения их аэродинамических коэффициентов.

Расчеты были выполнены с помощью комплекса вычислительных программ, содержащего адаптированный авторами к поставленной задаче программный комплекс *ANSYS* (лицензия № 00632255), а также специальные дополнительные программы, разработанные авторами.

Счетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед со сторонами  $25L \times 10L \times 10L$ . Ее размеры и набор граничных условий, которые ставились на границах счетной области, были определены на основании результатов специальных исследований полей скоростей в окрестности струи, выдуваемой из щели с размерами  $2L \times 10L$ , расположенной на нижней грани параллелепипеда и имеющей постоянную величину скорости  $U_m$  в начальном сечении. Моделирование струйного течения в ограниченной области пространства имеет свои особенности. Они связаны, во-первых, с расширением по потоку дозвуковой струи, истекающей в затопленное пространство [9], а, во-вторых, с тем, что распространение затопленной струи в ограниченном пространстве существенно отличается от ее распространения в безграничном пространстве. При этом размеры объема, куда истекает дозвуковая струя, и то, какие условия имеют место на его границах, существенно влияют на распространение струи в ограниченном объеме и ее параметры, а также на распределение скоростей вне струи [9; 10].

Выбором размеров счетной области и постановкой соответствующих условий на ее границах (пример такого подхода имеется в [3]) удалось получить в заданном сечении струйного течения распределение скоростей, близкое к тому, что имеет место в дискретном порыве с заданной постоянной скоростью [1], а вне струйного течения – скорости течения, близкие к нулю. При этом расчетное сечение струи, по которому должен был перемещаться дирижабль, было выбрано следующим образом. С одной стороны, поперечный размер основного участка струи с

постоянной скоростью в этом сечении должен был быть близок к поперечному размеру струи в начальном сечении, а, с другой стороны, сечение должно было располагаться так, чтобы влиянием нижней границы счетной области на аэродинамические характеристики дирижабля можно было пренебречь [11].

Расчеты проводились с помощью метода динамических сеток, при котором тело движется относительно границ расчетной области (прямое движение), а расчетная сетка перестраивается определенным способом. При этом предполагалось, что струйное течение не изменяет своего первоначального направления, а движение дирижабля остаётся равномерным и прямолинейным. Предполагалось, что дирижабль является абсолютно твердым телом, сохраняющим свою форму под действием перерезывающих сил и изгибающих моментов. На поверхности дирижабля ставилось условие прилипания. Методология реализации численного решения в рамках метода динамических сеток изложена в [12].

Объектами исследований были модели неоперенных и оперенных оболочек (корпусов) дирижаблей различной формы и удлинения. Рассматривались три варианта оболочки дирижабля классической схемы без гондолы и винтовых движителей. Оболочки имели эллиптическое поперечное сечение с параметром эллиптичности  $e = a/b$  ( $a$  – большая полуось эллипса,  $b$  – его малая полуось). Обвод этих оболочек в меридиональном сечении задавался дугой, уравнение которой в плоскости  $x\theta$ , связанной с оболочкой системы координат с началом в вершине оболочки, определялось соотношением  $y = 0,972D[\bar{x}(1 - \bar{x})(1,5 - \bar{x})]^{1/2}$  ( $\bar{x} = x/L$ ,  $L$  – длина оболочки;  $D$  – линейный размер поперечного сечения оболочки в направлении оси  $\theta z$  выбранной системы координат). Удлинения оболочек были равны  $\lambda = 4,5$ . При изменении поперечного сечения оболочки ее объем оставался постоянным. Вариант таких оболочек показан на рис. 1.

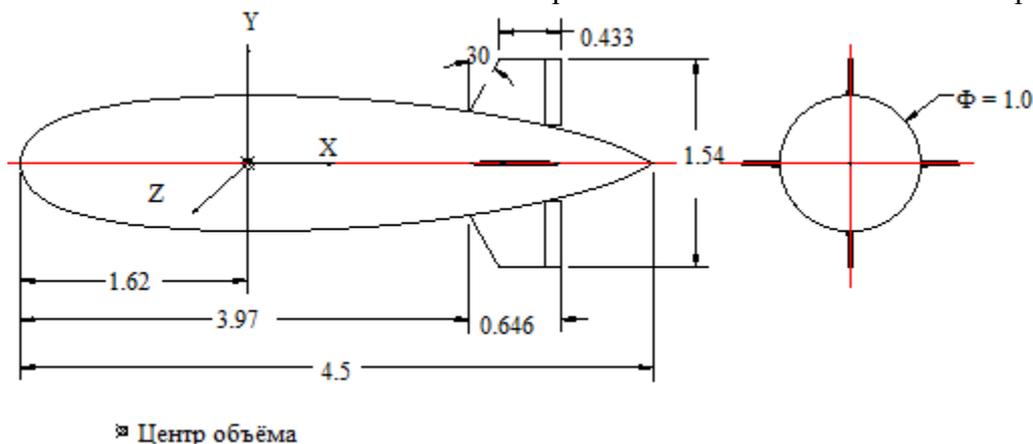


Рис. 1. Схема оперенной оболочки

Трапецевидные консоли оперения имели профиль НАСА 0006. В расчетах рули не отклонялись, носовое усиление оболочки не учитывалось. При  $e \neq 1$  расположение оперения на оболочке и размах его консолей оставались такими же, как и в случае  $e = 1$ .

Кроме того, были рассмотрены неоперенные модели дирижабля «Атлант» (проект, компания «Авгур», Россия) [13] и дирижабля «Aeroscraft» (летающая модель, компания «Aeros», США) [14]. Геометрические размеры оболочек этих дирижаблей выбирались из условия равенства длин оболочек данных дирижаблей и оболочек с эллиптическим поперечным сечением ( $e = var$ ).

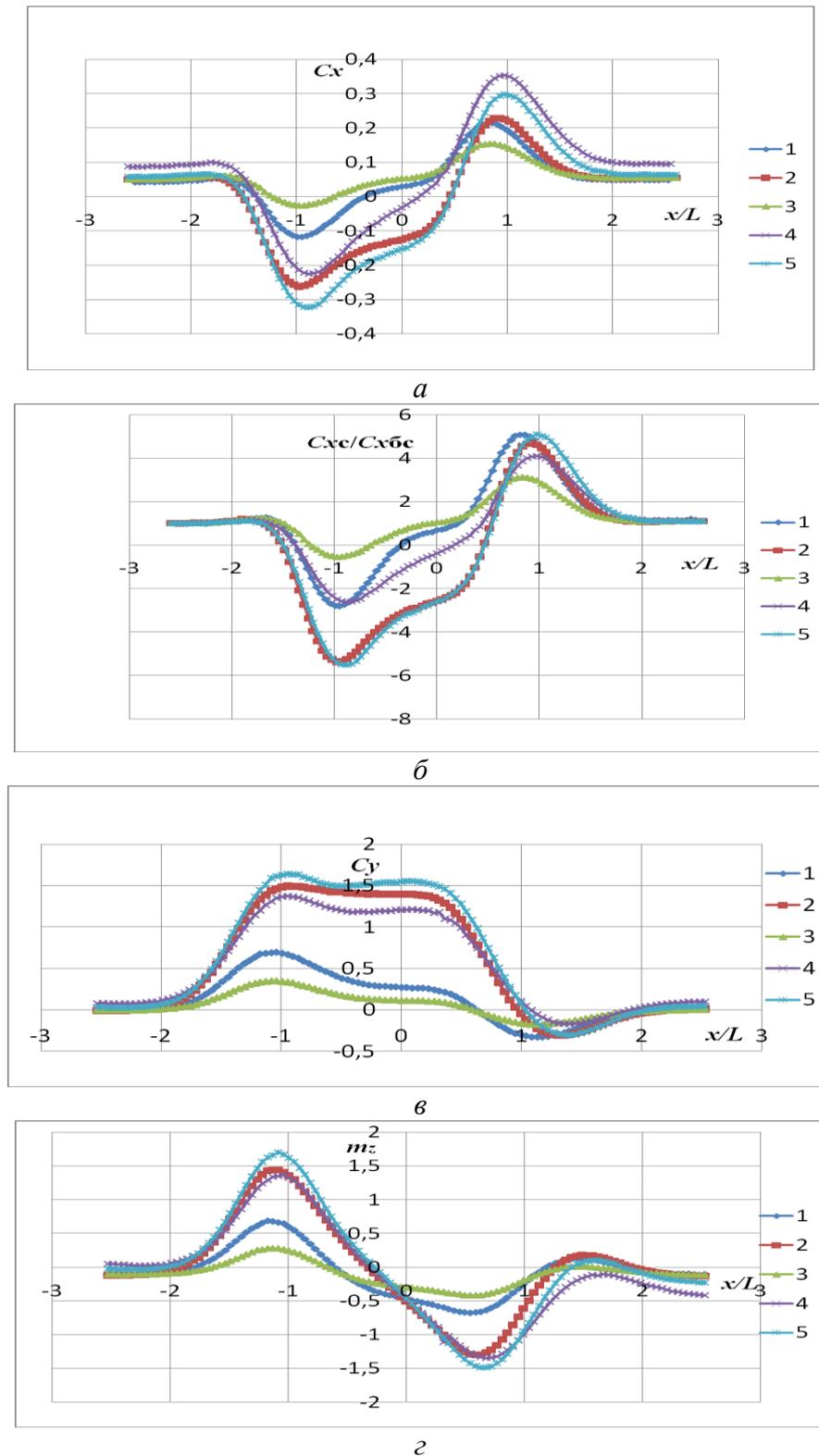
Расчеты были выполнены для скорости движения моделей дирижабля  $V = 18,056$  м/с, осевой скорости основного участка струи  $U_m = 10,67$  м/с, числа Рейнольдса  $Re = 5,6 \times 10^6$  (подсчитанном по скорости движения модели дирижабля и ее длине  $L$ ) и постоянном угле атаки корпуса  $\alpha = 0$ . Ширина струи в ее начальном сечении на границе счетной области была равна двойной длине корпуса дирижабля, что соответствовало стандартной ширине дискретного порыва [1].

В результате расчетов были получены параметры потока в расчетных точках, найдены коэффициенты давления и трения, определены в связанной системе координат коэффициенты аэродинамических сил и моментов, действующих на дирижабль. Коэффициенты давления и трения, а также аэродинамических сил и момента тангажа подсчитывались по общепринятым формулам [4; 6]. Коэффициенты суммарных аэродинамических сил дирижабля были отнесены к  $W^{2/3}$ , а коэффициенты его аэродинамического момента тангажа были подсчитаны относительно центра объема оболочки и отнесены к  $W$ , где  $W$  – объем оболочки дирижабля.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов суммарных аэродинамических сил и момента тангажа неоперенных оболочек от параметра  $x/L$ , характеризующего положение носика оболочки относительно центра струйного течения. Начало системы координат лежит на оси струи. Ось  $Ox$  направлена в сторону движения модели оболочки, так что значения  $x/L \leq 0$  соответствуют случаю, подходящей к струйному течению и вошедшей частично в него модели. При  $x/L \geq 0$  модель либо находится в струе, либо выходит из нее. Характерной особенностью всех зависимостей является то, что диапазон изменения параметра  $x/L$ , в котором коэффициенты аэродинамических сил и момента тангажа отличаются от их значений для дирижабля вне струйного потока, оказывается больше стандартной ширины порыва ( $-1 \leq x/L \leq 1$ ). Это связано с наличием при численном моделировании областей струйного пограничного слоя по обе стороны от ее основного участка с постоянной скоростью в его сечении.

На рис. 2а показано изменение величин коэффициента продольной силы при проходе оболочки через струйное течение. Видно, что, когда оболочка кругового поперечного сечения (модель 1) начинает входить в струйное течение, коэффициент ее продольной силы уменьшается по сравнению с его значением в пространстве вне струи. На оболочку действует отрицательная продольная сила, «втягивающая» оболочку в струю. В рассматриваемом варианте соотношений скоростей движения дирижабля и скорости в начальном сечении струи максимум абсолютной величины коэффициента этой силы имеет место вблизи границы основного участка струи и может более чем в два раза превышать его значение для случая, когда оболочка находится вне струйного течения. Это хорошо видно из графиков на рис. 2б, где представлены зависимости  $C_{xc}/C_{xc0} = f(x/L)$  для рассмотренных в работе оболочек ( $C_{xc}$  – коэффициент продольной силы оболочки, когда ее часть или она вся целиком находится в струйном течении;  $C_{xc0}$  – аналогичный коэффициент оболочки, находящейся вне струи). Наоборот, при выходе оболочки из струйного течения на оболочку действует положительная продольная сила. Ее максимум снова достигается для положения носка оболочки вблизи границы основного участка струи, но значение этой силы теперь более чем в пять раз превышает значение продольной силы оболочки вне струи (рис. 2б).

Из графиков на рис. 2а видно, что изменение формы поперечного сечения оболочки не влияет на характер зависимостей  $C_x = f(x/L)$  и  $C_{xc}/C_{xc0} = f(x/L)$ . Если оболочка имеет эллиптическое поперечное сечение, большая полуось которого перпендикулярна базовой плоскости дирижабля, или близкое к нему (на рис. 2а, б модели 2 и 5), максимумы абсолютных величин продольной силы при входе и выходе дирижабля из струи сильно растут по сравнению со случаем оболочки с круговым поперечным сечением (модель 1 на рис. 2а, б). Наоборот, если параметр эллиптичности  $e < 1$  (модель 3 на рис. 2а, б), они заметно уменьшаются.



**Рис. 2.** Аэродинамические характеристики неоперенных оболочек дирижабля при его проходе через восходящую воздушную струю: 1 – оболочка с круговым поперечным сечением,  $e = 1$ ; 2 – оболочка с эллиптическим поперечным сечением,  $e = 2,0$ ; 3 – оболочка с эллиптическим поперечным сечением,  $e = 0,5$ ; 4 – оболочка дирижабля «Атлант»; 5 – оболочка дирижабля компании «Aeros»

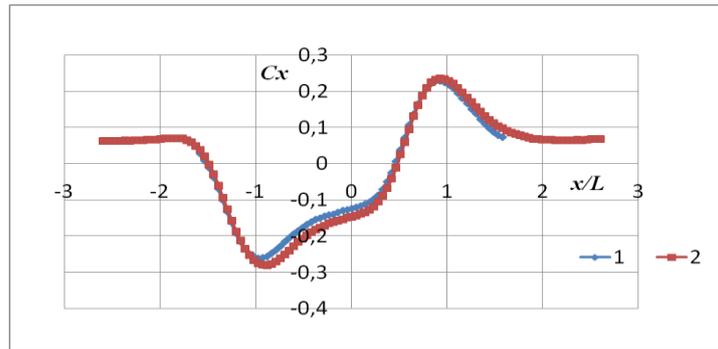
При проходе оболочки дирижабля через струйное течение при угле атаки  $\alpha = 0$  на оболочку действует аэродинамическая нормальная сила. Величина ее коэффициента существенно зависит от расположения оболочки относительно оси струйного течения и формы поперечного сечения оболочки (рис. 2в). Однако на характер зависимости  $C_y = f(x/L)$  изменение формы поперечного сечения оболочки практически не влияет. От этого фактора при  $x/L = \text{const}$  зависят абсолютные величины коэффициентов  $C_y$ . Как видим, в рассматриваемом примере взаимодействия оболочки и струйного течения максимальные значения коэффициентов нормальной силы  $C_y$  достигаются для моделей 2 и 5.

На рис. 2г приведены зависимости  $m_z = f(x/L)$ , характеризующие изменение момента тангажа оболочки при проходе через струйное течение. Видно, что коэффициенты момента тангажа сложным образом изменяются по параметру  $x/L$ . Характер зависимостей  $m_z = f(x/L)$  не зависит от формы поперечного сечения оболочки, которая определяет при  $x/L = \text{const}$  абсолютные значения коэффициента  $m_z$ . Увеличение параметра эллиптичности  $e$  приводит при  $x/L = \text{const}$  к их росту. Видно, что при входе в струйное течение на неоперенную оболочку действует момент на кабрирование, а при выходе – на пикирование. Причем это характерно для всех вариантов рассмотренных оболочек независимо от их формы и удлинения.

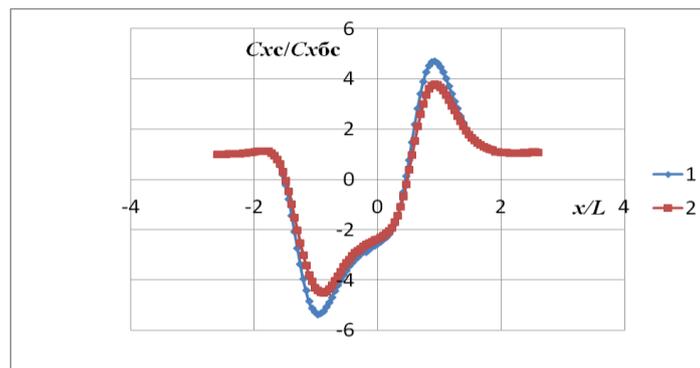
Из сказанного выше следует, что при мгновенном частичном или полном охвате оболочки дирижабля порывом величины аэродинамических сил и момента тангажа будут существенно отличаться от величин этих сил и момента для оболочки, не охваченной порывом, причем расположение дирижабля относительно центра порыва будет определять их величину и знак. Если оболочка дирижабля будет некруговой, что характерно для проектов современных дирижаблей [13; 14], то будет наблюдаться существенная разница между величинами указанных сил и момента дирижабля в случае его охвата вертикальным порывом по сравнению со случаем охвата горизонтальным порывом (рис. 2а, сопоставление результатов для моделей 2 и 3).

Примеры зависимостей  $C_x = f(x/L)$ ,  $C_y = f(x/L)$  и  $m_z = f(x/L)$ , полученные для оперенной оболочки с эллиптическим поперечным сечением ( $e = 2$ ), представлены на рис. 3 (расчеты были проведены для всех значений параметра  $e$ , рассмотренных в работе). Там же для сравнения даны аналогичные зависимости, полученные для неоперенной оболочки. Как видим, характер протекания коэффициентов  $C_x$  и  $m_z$  по параметру  $x/L$  у оперенной оболочки близок к тому, который имел место для неоперенной оболочки (рис. 3а, г). В большей степени при установке на оболочку оперения изменяется ее зависимость  $C_y = f(x/L)$  (рис. 3в). У нее наблюдается ярко выраженный максимум и почти исчезает область отрицательных коэффициентов  $C_y$ , имевшая место, когда только кормовая часть оболочки находилась в струйном течении. За счет влияния оперения максимальные абсолютные величины коэффициентов  $C_x$ ,  $C_y$  и  $m_z$  оперенной оболочки при взаимодействии со струей оказываются больше, чем эти же величины неоперенной оболочки. Особенно сильно растут значения коэффициентов  $C_{y\text{max}}$  и  $|m_{z\text{max}}|$  (в приведенном примере в  $\sim 1,3$  и  $\sim 1,9$  раза соответственно). Однако максимумы модуля относительного коэффициента продольной силы  $C_{xc}/C_{x\text{бс}}$  оперенной оболочки оказываются меньше, чем в случае неоперенной оболочки (в приведенном примере примерно на 20%, рис. 3б).

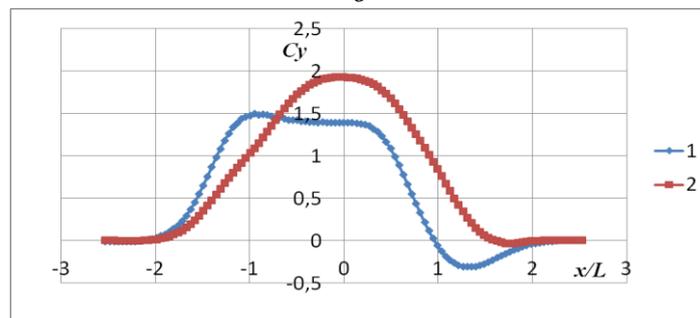
При изменении параметра эллиптичности  $e$  вклад оперения в образование аэродинамических сил и момента тангажа при  $x/L = \text{const}$ , естественно, меняется. Но описанные выше особенности протекания по параметру  $x/L$  коэффициентов аэродинамических сил и момента тангажа оказываются теми же самыми и при других значениях параметра эллиптичности  $e$ .



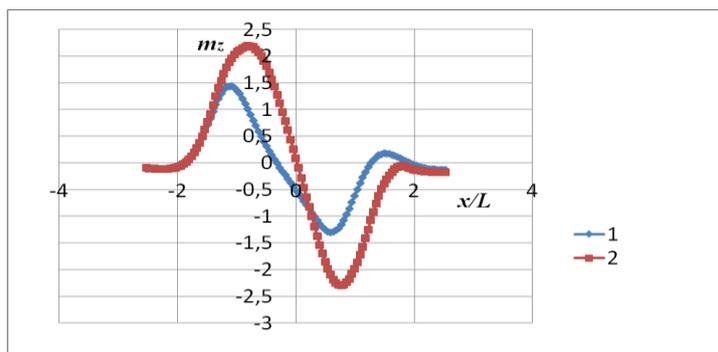
а



б



в



г

**Рис. 3.** Аэродинамические характеристики оперенной и неоперенной оболочек с эллиптическим поперечным сечением при прохождении через восходящую воздушную струю,  $\epsilon = 2$ : 1 – неоперенная оболочка; 2 – оперенная оболочка

## ЛИТЕРАТУРА

1. Критерии летной годности для дирижаблей. Авиареги́стр Межгосударственного Авиационного Комитета от 9 октября 1996 г. (На основе "Airship Design Criteria", FAA P-8110-2, 1992).
2. Динамика и аэродинамика дирижаблей. М., 1990. - 364 с. (Обзоры ЦАГИ, № 704).
3. Исследование взаимодействия дирижабля с атмосферным порывом. - М.: МАИ, 2012. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cae-expert.ru/sites/default/files/issledovanie\\_vzaimodeistviya\\_dirizhblya\\_s\\_atmosfernym\\_poryvom.pdf](http://www.cae-expert.ru/sites/default/files/issledovanie_vzaimodeistviya_dirizhblya_s_atmosfernym_poryvom.pdf).
4. Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т., Рыжов Ю.А. и др. Аэрогидромеханика. – М.: Машиностроение, 1993.
5. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009.
6. Аэродинамика / под ред. В.Т. Калугина. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
7. Чжоу Цзяньхуа. Разработка методики определения аэродинамических характеристик дирижаблей в неравномерном потоке вязкого газа: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2009.
8. Ле Куок Динь. Аэродинамическая интерференция винтовых движителей с оболочкой дирижабля. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2013.
9. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физматлит, 1960.
10. Дроздов В.Ф. Отопление и вентиляция. Часть 2. Вентиляция. – М.: Высшая школа, 1984.
11. Семенчиков Н.В., Чжоу Цзяньхуа, Яковлевский О.В. Аэродинамические характеристики дирижабля в неравномерном потоке вблизи экрана // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2010. - №151(1). - С. 55-62.
12. ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide – Parent Directory. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/flug.pdf>.
13. РосАэроСистемы, Атлант 100. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosaerosystems.ru>.
14. Томсон К. Небесный корабль мечты // Популярная механика. – 2014. - №5 (139). - С. 74-79.

## AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN AIRSHIP DURING ITS MOVEMENT THROUGH THE ASCENDING AIR STREAM

Semenchikov N.V., Та Xuan Tung, Yakovlevsky O.V.

Results of numerical research of aerodynamic characteristics of an airship with and without tail having various form of airship body cross-section when an airship passes through an ascending air stream of the limited cross-section size. Influence of a relative positioning of an airship and a stream on sizes of aerodynamic factors of an airship is determined.

**Keywords:** airship body with or without tail, aerodynamic factors, influence of a relative positioning of airship and a stream.

### Сведения об авторах

**Семенчиков Николай Витальевич**, 1941 г.р., окончил МАИ им. С. Орджоникидзе (1964), кандидат технических наук, профессор кафедры аэродинамики летательных аппаратов МАИ (Национального исследовательского университета), автор более 120 научных работ, область научных интересов – вихревые, струйные и отрывные течения, аэродинамика летательных аппаратов.

**Та Суан Тунг**, 1986 г.р., окончил МАИ (Национальный исследовательский университет) (2011), аспирант МАИ (Национального исследовательского университета), автор 1 научной работы, область научных интересов – аэродинамика летательных аппаратов.

**Яковлевский Олег Васильевич**, 1932 г.р., окончил МФТИ (1955), кандидат технических наук, профессор кафедры аэродинамики летательных аппаратов МАИ (Национального исследовательского университета), автор более 130 научных работ, область научных интересов – турбулентные струйные течения, аэроакустика, аэродинамика летательных аппаратов и промышленная аэродинамика.