

На правах рукописи

Та Суан Тунг

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ И РАСЧЕТ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИРИЖАБЛЯ,
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ
СТРУЙНОГО ТИПА**

Специальность: 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Семенчиков Николай Витальевич**
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Аэродинамика летательных аппаратов» МАИ

Официальные оппоненты: **Головкин Михаил Алексеевич**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник,
Научный руководитель отделения №5 ГНЦ ФГУП
ЦАГИ имени профессора Н.Е. Жуковского

Головнев Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент, начальник
кафедры «Аэродинамики и безопасности полёта»
ФГКБОУ ВО Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет гражданской
авиации»

Защита состоится «___» марта 2018 года в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.22 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Отзывы, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5 стр.1, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.22.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Луценко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На полет дирижаблей большое влияние оказывают различные метеорологические явления. Во многих случаях это связано с попаданием дирижаблей в области атмосферы, где ее параметры значительно изменяются по пространству и во времени. К ним относятся течения струйного типа, сильный ветер (особенно боковой), его сдвиг и порывы, атмосферная турбулентность и т.п.

В этих областях аэродинамические характеристики дирижабля могут существенно отличаться от тех, которые он имеет при полете в спокойной атмосфере. При этом может произойти ухудшение устойчивости и 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 знание достоверных величин аэродинамических сил и моментов дирижаблей при их перемещении через указанные области является чрезвычайно важным.

Исследованию аэродинамических характеристик дирижаблей, движущихся в областях атмосферной неоднородности различного вида, посвящено небольшое число работ. В России этими вопросами занимались Ивченко Б.А., Кураев А.А., Саленко С.Д., Семенчиков Н.В., Чжоу Цзяньхуа и др. За рубежом их изучению посвящены работы Каллигероса и Макдевитта, Джонса, Делорье, Лагранжа, и др.

Было найдено существенное влияние неравномерности натекающего на дирижабль потока на аэродинамику дирижабля. Предпринимались попытки изучения аэродинамических характеристик дирижаблей при их взаимодействии с порывами ветра и при движении через области атмосферной турбулентности. Однако проверить эффективность предлагаемых подходов не представляется возможным, так как сравнение результатов расчетов аэродинамических сил и моментов с найденными численно или экспериментально не приводилось. Не были изучены и закономерности изменения аэродинамических характеристик дирижаблей при их перемещении, например, через потоки струйного типа.

В силу выше изложенного изучение закономерностей изменения аэродинамических характеристик дирижаблей при их перемещении, например, через атмосферные течения струйного типа, а также разработка «быстрых» и эффективных методов надежного определения величин аэродинамических сил и моментов, действующих на дирижабль в таких условиях, является актуальной задачей создания и эксплуатации дирижаблей.

Объектом исследования в настоящей работе являются малоразмерные пилотируемые дирижабли, имеющие корпуса (оболочки) как кругового, так и некругового поперечного сечения.

Целью диссертационной работы является численный анализ закономерностей изменения аэродинамических характеристик дирижабля по определяющим параметрам и разработка инженерного метода их расчета в случае перемещения дирижабля через области атмосферных течений струйного типа. Исходя из сказанного, в диссертации необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выбрать имеющееся и создать дополнительное программно - алгоритмическое обеспечение для моделирования пространственного обтекания и расчета аэродинамических характеристик дирижаблей при их перемещении через атмосферные течения струйного типа.
2. Определить условия моделирования атмосферных течений струйного типа без дирижабля и с дирижаблем в счетной области конечного размера; провести тестирование программного комплекса и выбрать модель турбулентности для систематических численных исследований.
3. Провести систематический численный эксперимент с целью изучения особенностей обтекания дирижаблей и установления закономерностей изменения аэродинамических характеристик дирижаблей при их перемещении через атмосферные течения струйного типа.
4. Выполнить анализ и обобщение результатов численных исследований и установить влияние геометрических и кинематических параметров дирижаблей и других факторов на аэродинамические характеристики дирижаблей.
5. Разработать быстрый и экономичный метод расчета стационарных аэродинамических нормальных сил и момента тангажа дирижаблей при их перемещении через области атмосферной неоднородности струйного типа.

Методами исследования в диссертационной работе являются численное моделирование обтекания дирижаблей при их взаимодействии с атмосферными течениями струйного типа, а также инженерный метод расчета аэродинамических характеристик дирижаблей в указанных условиях.

Достоверность полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации, гарантируется последовательным использованием при построении математических моделей обтекания дирижаблей основных уравнений механики сплошных сред, корректностью выбора исходных ограничений и допущений при постановке задач; согласованием отдельных результатов вычислительного эксперимента с данными экспериментов ЦАГИ.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Выявлены особенности обтекания движущихся через поток струйного типа дирижаблей и установлены закономерности изменения их аэродинамических характеристик в зависимости от определяющих параметров.
2. Обнаружены эффекты влияния кинематических и геометрических параметров дирижаблей, параметров потока струйного типа, расположения дирижабля относительно оси такого потока на аэродинамические характеристики дирижаблей.
3. Предложен новый приближенный метод расчета стационарных аэродинамических характеристик дирижаблей при их перемещении через течения струйного типа

Практическая значимость диссертационной работы. Получен большой объем новой научной информации о параметрах и особенностях обтекания, а также аэродинамических характеристиках дирижаблей при их взаимодействии с атмосферными течениями струйного типа. Разработан приближенный метод

расчета локальных и суммарных аэродинамических нормальной силы и момента тангажа дирижаблей в указанных условиях. Результаты исследований, диссертации используются в учебном процессе МАИ (НИУ) при подготовке бакалавров и магистров по направлению подготовки "Баллистика и гидроаэродинамика". Они могут быть рекомендованы для использования в практике проектирования и эксплуатации дирижаблей.

На защиту выносятся:

1. Результаты численных исследований, обнаруженные эффекты и закономерности влияния кинематических и геометрических параметров дирижаблей и других факторов на особенности обтекания и аэродинамические характеристики дирижаблей при их перемещении через течения струйного типа.
2. Приближенный метод расчета аэродинамических сил и моментов дирижаблей при их взаимодействии с течениями струйного типа.

Апробация основных результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2014, 2015, 2016 г.г.), Научных чтениях К.Э. Циолковского, секция «Авиация и воздухоплавание» (г. Калуга 2015, 2016 г.г. (2 доклада)), Конференции «Инновации в авиации и космонавтике» (г. Москва, 2015 г.), Конференциях «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2016, 2017 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ: 5 статей в рекомендованных ВАК РФ изданиях и 9 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 195 страниц. Работа включает 80 рисунков. Список литературы содержит 62 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется тема и цель работы, кратко анализируется состояние вопроса по теме диссертации, определяются задачи и методы исследования, отмечаются научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание работы по главам.

В первой главе рассмотрены основные положения подхода к численному моделированию аэродинамического взаимодействия дирижабля и атмосферного течения струйного типа.

Моделировалось прямое поступательное движение дирижабля, перемещающегося через течения струйного типа с распределением скорости в их начальном поперечном сечении, регламентируемыми Критериями летной годности для дирижаблей для атмосферных дискретных порывов и порывов с переменной по их поперечному сечению скоростью. Такие распределения были выбраны, исходя из того, что в определенной степени знание закономерностей взаимодействия дирижабля с этими течениями может быть использовано для анализа взаимодействия дирижабля и порыва при мгновенном полном или частичном охвате дирижабля порывом.

При моделировании были сделаны допущения: струйное течение не изменяет направление движения и модуль скорости дирижабля, дирижабль является абсолютно твёрдым телом, которое сохраняет свою форму под действием перерезывающих сил и изгибающих моментов, течение в струйном потоке и при обтекании элементов дирижабля является турбулентным.

Для решения поставленной задачи использовались записанные для пространственного течения осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье - Стокса, замкнутые двухпараметрической моделью турбулентности «*SST k- ω* », и метод контрольного объема. Применялись явная наветренная схема второго порядка точности, разделенный решатель, метод коррекции давления-скорости и неявный метод по времени. Реализация решения и обработка его результатов была осуществлена с помощью программного комплекса *Ansys Fluent 15* (лицензия № 00632255) и дополнительных программ автора.

Были проведены специальные исследования по выбору условий, которые должны ставиться на границах счетной области при моделировании течений струйного типа, обеспечивающих требуемое распределение скоростей в этих течениях, а вне их близкие к нулю. Найдены размеры счетной области, обеспечивающие приемлемую точность расчетов и экономию счетного времени.

Счетная область в окрестности дирижабля разбивалась на ряд подобластей: основную подобласть вблизи дирижабля, подобласть течения струйного типа; в расчетах, где учитывалось вращение винтов, в их окрестности выделялись подобласти, в которых уравнения записывались в подвижной вращающейся системе координат. Для перехода из одной подобласти в другую применялись специально созданные интерфейсы.

Разбиение счетной области на контрольные объемы осуществлялось с помощью построения расчетных сеток. В работе применялись трёхмерные нерегулярные комбинированные расчётные сетки, которые генерировались с помощью программного комплекса *Gambit* (лицензия № 00632255). Строились сетки для моделирования течения струйного типа, а также динамические сетки для моделирования прямого движения дирижабля через это течение (Рис. 1).

Для перестроения динамических сеток использовались способы сглаживания и перестроения. В связи со сложностью геометрии оперенного корпуса дирижабля вблизи него выделялся слой, состоящий из 22 рядов треугольных призм, двигавшегося вместе с корпусом дирижабля, не деформируясь. Область динамической сетки состояла из тетраэдров и была состыкована с примыкающим к поверхности дирижабля слоем «узел в узел». Расчётная сетка имела сгущения к носку и кормовой точке корпуса дирижабля. Было найдено, что для получения надежных результатов расчетов необходимо иметь не менее 2250000 тетраэдральных и призматических ячеек.

Расположение траектории движения дирижабля по счетной области было выбрано из условий близости поперечного размера и распределения скоростей на этом участке струи к поперечному размеру струи и распределению скоростей в начальном сечении. Вне струйного течения скорости должны быть близки к нулю (Рис. 2). Кроме того, было учтено, что влияние нижней границы счетной области

на аэродинамические характеристики дирижабля в этом случае должно быть пренебрежимо мало.

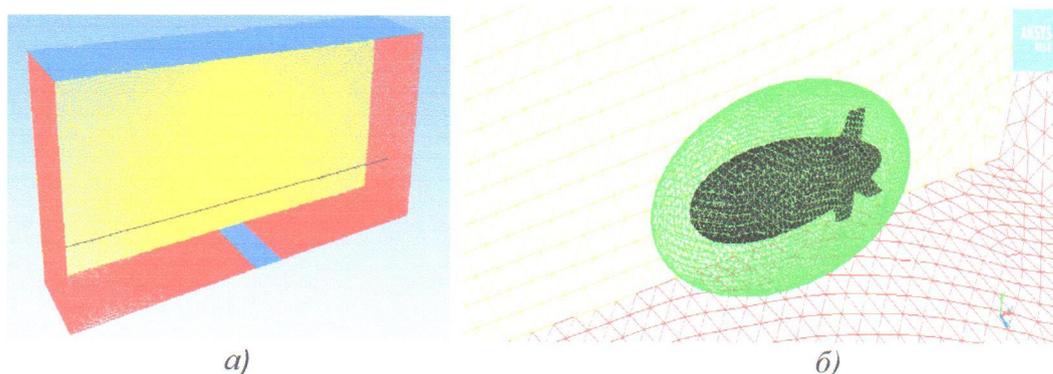


Рис. 1. Примеры сеток: а – сетка для моделирования струйного течения (на нижней границе показано сечение истечения); б – сетка близости дирижабля вместе с недеформируемой при движении дирижабля подобластью

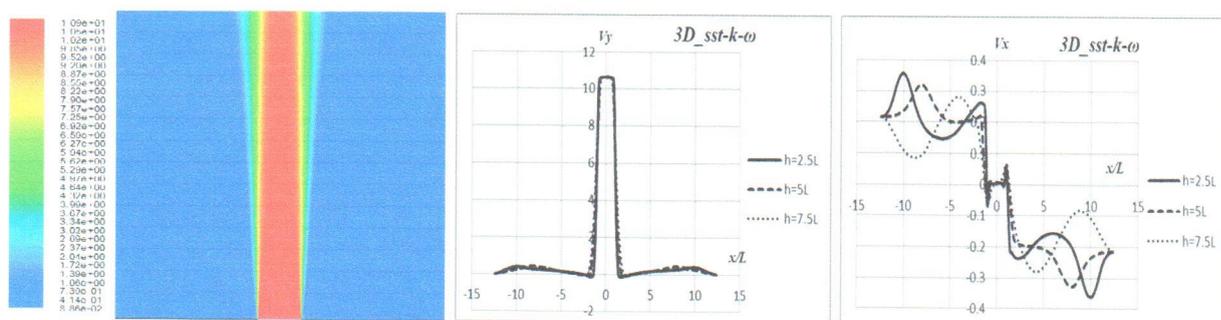


Рис. 2. Пример распределения скоростей (в м/с) в области с течением струйного типа (на графиках V_y и V_x параметр h отсчитывается от нижней границы области)

Было найдено, что шаг перемещения дирижабля по времени, обеспечивающий устойчивость расчетов и минимальные затраты расчётных ресурсов должен быть не более 0,025 с.

Для того, чтобы выбрать модель турбулентности и подтвердить достоверность получаемых в численном эксперименте результатов, были проведены тестовые расчеты, в которых для замыкания уравнений Рейнольдса использовались различные модели турбулентности, а также использованы данные известных работ. Было установлено, что когда эти уравнения замыкаются моделью «SST $k-\omega$ », результаты расчетов аэродинамических характеристик дирижабля вне струи наилучшим образом совпадают с данными экспериментов ЦАГИ. В связи с этим, весь численный эксперимент в данной работе был проведен с использованием этой модели турбулентности.

Глава 2 диссертации посвящена исследованию аэродинамических характеристик и установлению закономерностей их изменения в зависимости от определяющих параметров в случае неоперенных корпусов дирижаблей, перемещающихся поступательно через восходящие струйные течения.

Рассматривались корпуса дирижабля классической схемы без гондолы, винтовых движителей, носового усиления и консолей оперения. Расчеты проводились для корпусов с эллиптическим поперечным сечением с параметром эллиптичности $e = a/b$ (a – большая полуось эллипса, перпендикулярная оси струйного течения, b – его малая полуось), корпуса дирижабля «Атлант» (Россия) и корпуса дирижабля «Aeroscraft» (США). Обвод корпусов с $e = var$ задавался дугой с уравнением в плоскости xOy связанной с корпусом системы координат с началом в его вершине $y = 0,972D[\bar{x}(1 - \bar{x})(1,5 - \bar{x})]^{1/2}$ ($\bar{x} = x/L$, L – длина корпуса; D – линейный размер поперечного сечения корпуса в направлении оси Oz выбранной системы координат). При изменении поперечного сечения корпуса его объем оставался постоянным. Геометрические параметры корпусов «Атлант» и «Aeroscraft» выбирались из условия равенства длин корпусов этих дирижаблей и корпусов с $e = var$. Удлинения всех корпусов были равны $\lambda = 4,5$.

Исследование было проведено, прежде всего, для восходящего струйного течения с постоянной скоростью в поперечном сечении струи. Расчеты были выполнены при скорости движения корпусов $V = 5...18.056$ м/с, скорости в начальном сечении струи $U_m = 5...10.67$ м/с, числе Рейнольдса $Re = (1.43...5.3) \times 10^6$ (найденном по скорости V и длине L). Угол атаки корпуса оставался в расчетах неизменным. Ширина струи в ее начальном сечении на границе счетной области была равна nL , $n \geq 2$ (стандартная ширина дискретного порыва – $2L$). Коэффициенты суммарных аэродинамических сил дирижабля были отнесены к $W^{2/3}$, а коэффициенты его аэродинамического момента тангажа были подсчитаны относительно центра объема корпуса и отнесены к W , где W – объем неоперенного корпуса (оболочки) дирижабля.

В результате численного моделирования были получены параметры потока в расчетных точках, найдены коэффициенты давления и трения, определены коэффициенты локальных и суммарных аэродинамических сил и моментов, действующих на корпуса дирижабля.

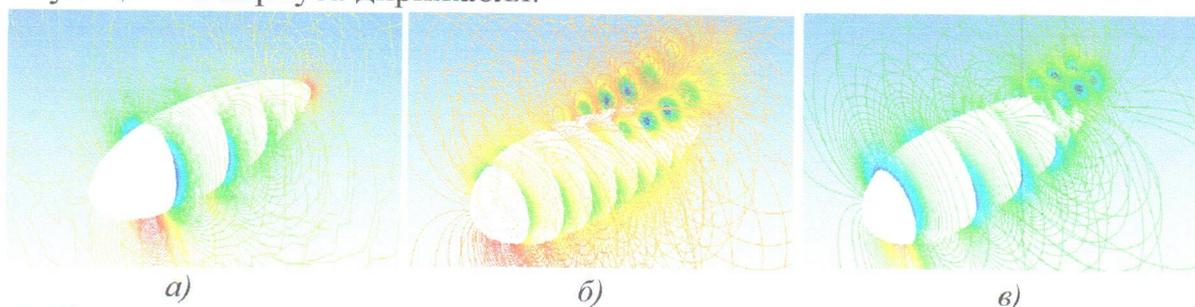


Рис. 3. Пример линий равного давления в окрестности неоперенного корпуса дирижабля, $e = 1$, $\alpha = 30^\circ$, $V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с, $Re = 5.3 \times 10^6$; а - $x_1/L = -0.8332$ (вход в струю); б - $x_1/L = 0.0696$ (корпус полностью в струе); в - $x_1/L = 0.9724$ (выход из струи)

На Рис. 3 показан пример линий равного давления в окрестности корпуса дирижабля без оперения. Видны (Рис. 3.б,в) характерные области вихревого движения в окрестности подветренной стороны корпуса.

На Рис. 4 приведены (в связанной системе координат, с началом в центре объема корпуса и осью Ox , направленной к его корме) зависимости

коэффициентов суммарных аэродинамических сил и момента тангажа неоперенных корпусов от параметра x_1/L , характеризующего положение носка корпуса относительно центра струйного течения. (Начало системы координат $Ox_1y_1z_1$ находится на оси струи; значения $x_1/L \leq 0$ соответствуют случаю, подходящего к струйному течению и вошедшего частично в него корпуса; при $x_1/L \geq 0$ корпус либо находится в струе, либо выходит из нее.).

Видно, что при перемещении корпуса дирижабля через струйное течение значения коэффициентов аэродинамических сил и момента тангажа корпуса существенно больше (в несколько раз) их значений для корпуса вне струйного течения. Расположение дирижабля относительно центра струйного течения

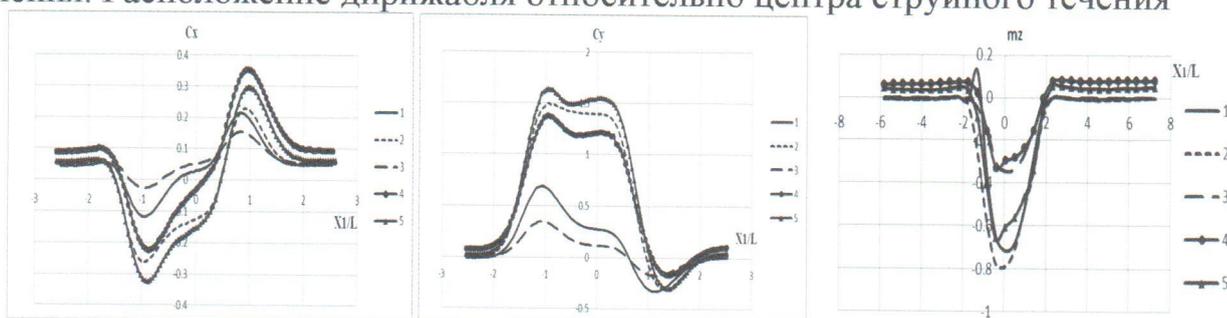


Рис. 4. Аэродинамические характеристики неоперенных корпусов при его перемещении через восходящую струю, $\alpha = 0$: 1 – корпус с круговым поперечным сечением, $e = 1$; 2 – корпус с эллиптическим поперечным сечением, $e = 2,0$; 3 – корпус с эллиптическим поперечным сечением, $e = 0,5$; 4 – корпус дирижабля «Атлант»; 5 - корпус дирижабля «Аерос»

определяет их величину и знак. Форма поперечного сечения корпуса не влияет на характер протекания коэффициентов C_x , C_y и m_z по x_1/L (Рис. 3). Но максимальные абсолютные значения этих коэффициентов зависят от формы поперечного сечения корпуса. Если корпус дирижабля будет некруговым, то будет наблюдаться существенная разница между величинами коэффициентов C_x , C_y и m_z в случае его охвата восходящим порывом по сравнению с величинами коэффициентов C_x , C_z и m_y при охвате горизонтальным порывом (см. Рис. 2, результаты для корпусов 2 и 3).

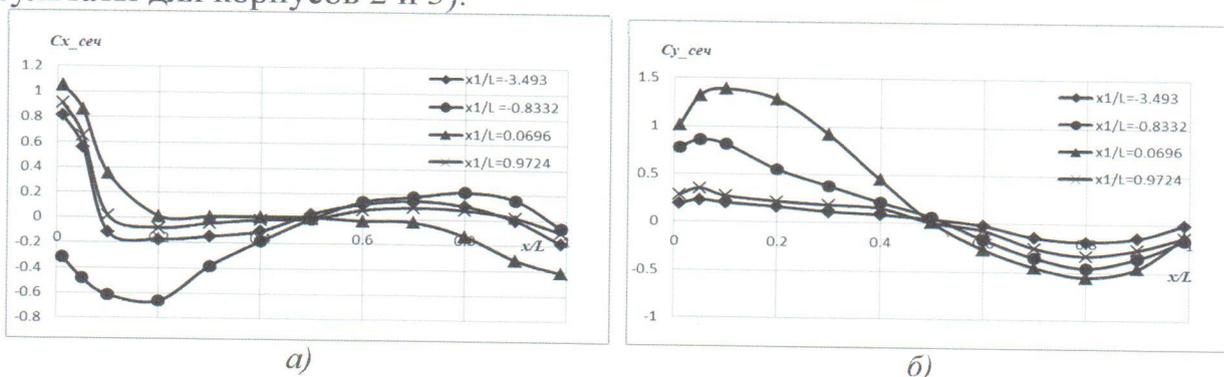


Рис. 5. Распределение коэффициентов продольной и нормальной (перерезывающей) сил по неоперенному корпусу, $e = 1$: а – продольная сила; б – нормальная сила; $\alpha = 30^\circ$; $V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с

На Рис. 5 приведены примеры распределения локальных продольных и нормальных (перерезывающих) сил по длине корпуса, объясняющее такое изменение C_x , C_y и m_z по параметру x_1/L . Максимальные перерезывающие силы наблюдаются при $x/L \approx 0,1$, когда корпус находится полностью в струе ($t = 14$ с).

При перемещении через струйное течение неоперенного корпуса с не изменяющимся в процессе движения углом атаки $\alpha \neq 0$ характерные особенности изменения коэффициентов C_x , C_y и m_z по параметру x_1/L сохраняются. С ростом угла атаки их максимальные абсолютные величины увеличиваются. Аналогичное влияние на коэффициенты C_x , C_y и m_z корпуса, движущегося с $\alpha = \text{const}$, наблюдается при увеличении скорости поступательного движения дирижабля V , уменьшении величины скорости в начальном сечении струйного течения U_m и увеличении удлинения корпуса.

При пересечении корпусом дирижабля струйного потока с большей, чем $2L$ начальной шириной, достигаемые максимальные величины модулей коэффициентов C_x , C_y и m_z неоперенного корпуса дирижабля почти не зависят от ширины потока. Для коэффициентов $|C_{x\text{max}}|$ и $|C_{y\text{max}}|$ они наблюдаются тогда, когда корпус пересекает границы струйного течения. Максимум $|m_{z\text{max}}|$ имеет место, когда корпус пересекает ось струйного течения.

Характер изменения коэффициентов аэродинамических сил и моментов неоперенного корпуса по параметру x_1/L мало зависит от закона распределения скорости по поперечному сечению струйного течения, натекающего на корпус. Это наблюдается для всех рассмотренных углов атаки корпуса. При одинаковой скорости на оси струйного течения с постоянной или переменной скоростью в начальном сечении, при переменной скорости в струе происходит уменьшение модулей величин коэффициентов $|C_{x\text{max}}|$, $|C_{y\text{max}}|$ и $|m_{z\text{max}}|$ корпуса дирижабля по сравнению со случаем постоянной скорости в струе (примерно до 15...20%).

В третьей главе работы приведены результаты исследования аэродинамических характеристик и выявлены закономерности их изменения по определяющим параметрам в случае оперенного корпуса дирижабля при его перемещении через атмосферное течение струйного типа. Расчеты проведены при указанных выше скоростях V и U_m . Так же, как и для неоперенных корпусов, были получены параметры потока в расчетных точках, найдены коэффициенты давления и трения, определены коэффициенты локальных и суммарных аэродинамических сил и моментов оперенных корпусов.

На Рис. 6 приведены примеры линий равного давления в окрестности оперенного корпуса, а на Рис. 7 распределения локальной нормальной силы по корпусу с круговым поперечным сечением ($e = 1$) при $\alpha = 0$. Максимальные перерезывающие силы наблюдаются тогда, когда корпус находится полностью в струе ($t = 14$ с, $x_1/L = 0.0696$).

На Рис. 8 в качестве примера приведены зависимости C_x , C_y , $m_z = f(x_1/L)$ для оперенного корпуса дирижабля, перемещающегося с постоянной скоростью $V = 18.056$ м/с и углом атаки $\alpha = 0$ через восходящее течение струйного типа с начальной шириной $2L$ и постоянной скоростью в начальном сечении $U_m = 10.67$ м/с.



вход ($x_1/L = -0.8332$) в струе ($x_1/L = 0.0696$) выход из струи ($x_1/L = 0.9724$)
 Рис. 6. Линии равного давления, $V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с

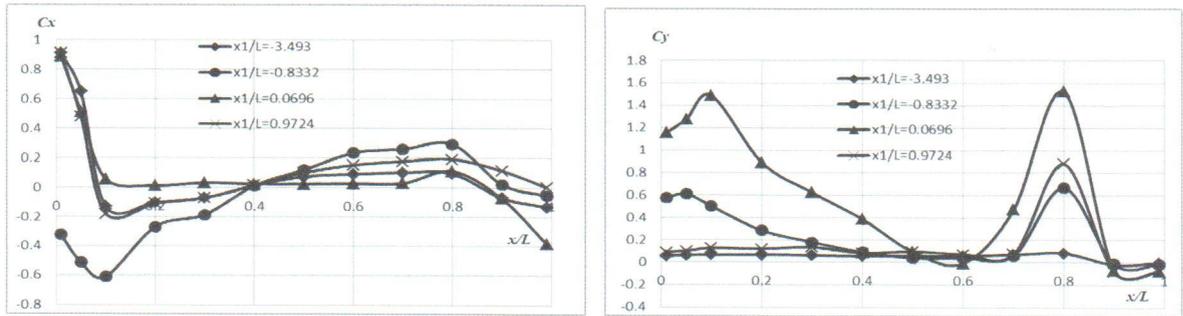


Рис. 7. Распределение коэффициентов продольной и нормальной силы по оперенному корпусу: а – продольная сила; б – нормальная сила; $V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с, $\alpha = 0$

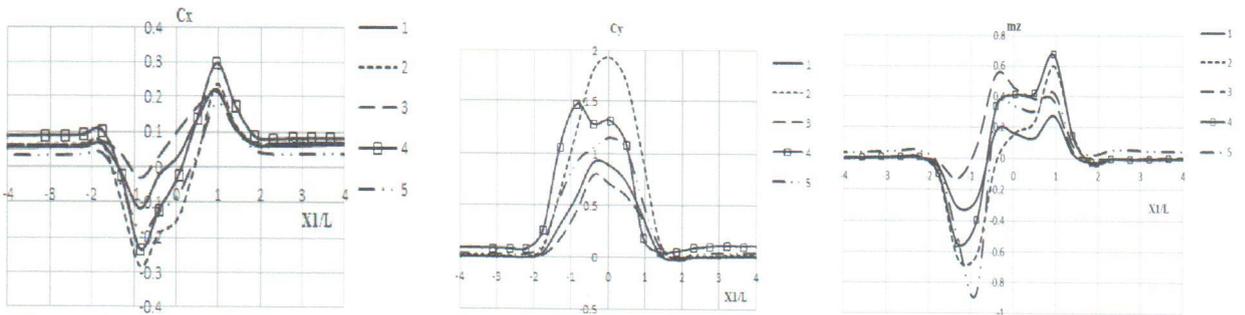


Рис. 8. Аэродинамические характеристики оперенного корпуса дирижабля при его перемещении через восходящее струйное течение: 1 – корпус с круговым поперечным сечением, $e = 1$; 2 – корпус с эллиптическим поперечным сечением, $e = 2$; 3 – корпус с эллиптическим поперечным сечением, $e = 0,5$; 4 – модель дирижабля «Атлант»; 5 - модель дирижабля компании «Aeros»

Как видим, основные особенности изменения коэффициентов C_x и C_y по параметру x_1/L остаются теми же, что и в случае неоперенного корпуса дирижабля. Наличие оперения сильно изменяет протекание по x_1/L коэффициента момента тангажа. Когда дирижабль пересекает границу струйного течения и входит в него на него действует момент на кабрирование, а когда выходит из него - момент тангажа на пикирование. Причем это характерно для всех вариантов рассмотренных корпусов независимо от формы их поперечного сечения и удлинения.

Если начальная ширина струи B с постоянной скоростью увеличивается, основные изменения аэродинамических сил и момента тангажа дирижабля

наблюдаются при пересечении его корпусом границ струи. Когда дирижабль находится в центральной части струи с постоянной скоростью, его аэродинамические характеристики изменяются слабо, а при большой ширине струи от ее изменения почти не зависят (Рис. 9).

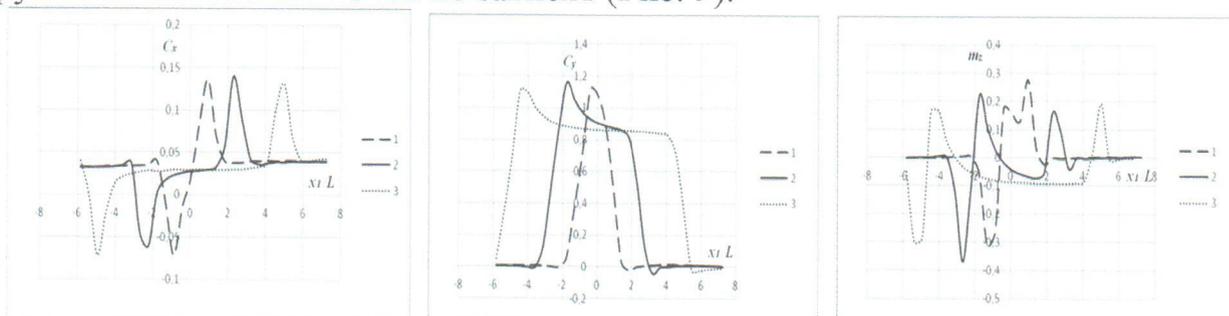


Рис. 9. Влияние изменения начальной ширины струи B на аэродинамические характеристики дирижабля с корпусом кругового поперечного сечения при перемещении дирижабля через струйное течение;

$$1 - B = 2L, 2 - B = 5L, 3 - B = 10L;$$

$$V = 18,056 \text{ м/с}; U_m = 10,67 \text{ м/с}; \text{Re} = 5.3 \times 10^6, \alpha = 0.$$

Было найдено, что при начальной ширине струи, равной $2L$, изменение угла атаки дирижабля, скорости его поступательного движения и скорости струи почти не влияет на характер протекания коэффициентов C_x , C_y и m_z по параметру x_1/L . Изменяются значения коэффициентов $|C_{x\max}|$, $|C_{y\max}|$ и $|m_{z\max}|$. Рост постоянной скорости поступательного движения дирижабля в диапазоне $V = 5 - 18,056$ м/с при $U_m = 10.67$ м/с и $\alpha = 0$ приводит к значительному уменьшению абсолютных значений аэродинамических коэффициентов дирижабля. Уменьшение величины скорости U_m от 10.67 м/с до 5 м/с при $V = 18,056$ м/с и $\alpha = 0$ также вызывает значительное падение значений коэффициентов $|C_{x\max}|$, $|C_{y\max}|$ и $|m_{z\max}|$ дирижабля.

Изменение схемы ориентации оперения с «+» - образной на «х» - образную почти не отражается на характере протекания коэффициентов аэродинамических сил и момента тангажа дирижабля при его перемещении через течение струйного типа с постоянной скоростью в поперечном сечении. Аналогичное замечание можно сделать и о достигаемых значениях коэффициентов $|C_{y\max}|$ и $|m_{z\max}|$. Следует отметить, что при входе течение струйного типа указанное выше изменение ориентации приводит к некоторому росту модуля $|C_{x\max}|$, при выходе – наоборот, к уменьшению.

Сказанное выше о влиянии закона изменения скорости по поперечному сечению струи на характер изменения коэффициентов C_x , C_y и m_z неоперенного корпуса дирижабля в струйном течении по параметру x_1/L относится и к оперенному корпусу. Но есть и различие. При малых углах атаки значения коэффициента $|m_{z\max}|$ оперенного корпуса в струе с постоянной скоростью в сечении оказываются примерно в 1,5 раза меньше, чем в струе с переменной скоростью в сечении. С ростом угла атаки это различие уменьшается. Наличие на корпусе дирижабля гондолы не изменяет характера зависимостей аэродинамических коэффициентов от параметра x_1/L и слабо отражается на

достигаемых значениях $|C_{y_{max}}|$ и $|m_{z_{max}}|$, заметно влияя на $|C_{x_{max}}|$, если дирижабль перемещается через восходящую струю, ось которой перпендикулярна продольной оси корпуса дирижабля (Рис. 9). Более значительное влияние на аэродинамические характеристики дирижабля гондола оказывает тогда, когда дирижабль перемещается через боковое струйное течение. Функции $C_x = f(x_1/L)$ почти не зависят от типа струйного течения. Но значения максимальных коэффициентов поперечной силы и момента рыскания при попадании дирижабля в поперечную боковую струю могут оказаться больше значений максимальных коэффициентов нормальной силы и момента тангажа дирижабля в восходящем струйном потоке. Изменение угла β , под которым поперечная струя натекает на дирижабль, оказывает значительное влияние на аэродинамические характеристики дирижабля с гондолой, когда дирижабль перемещается через струйное течение. Однако характер функций $C_x, C_y, C_z, m_z = f(x_1/L)$ почти не зависит от изменения величины угла β .

Если винты дирижабля работают, а дирижабль перемещается через восходящее струйное течение, влияние следа от винтов не изменяет характера протекания коэффициентов C_x, C_y и m_z по параметру x_1/L , но значения коэффициентов $|C_{x_{max}}|, |C_{y_{max}}|$ и $|m_{z_{max}}|$ растут (в среднем на 20%). При

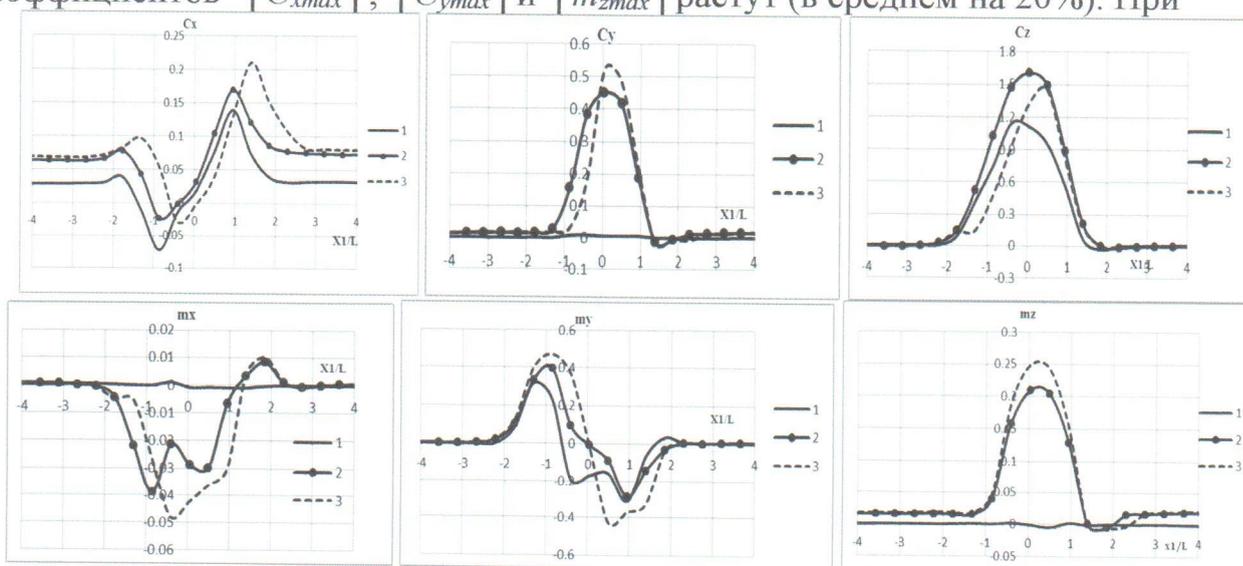


Рис. 10. Аэродинамические характеристики дирижабля с винтами, $V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с, число оборотов винтов $n = 3000$ об/мин, $Re = 5.3 \times 10^6$: 1 – без гондолы и винтов, 2 – с гондолой без винтов, 3 – с гондолой и винтами

перемещении дирижабля через боковую струю влияние следа от винтов на аэродинамические характеристики дирижабля оказывается более значительным. 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 (Рис.10).

Четвертая глава диссертации посвящена изложению приближенного метода расчета локальных и суммарных аэродинамических нормальной силы и

момента тангажа дирижабля, перемещающегося через атмосферное течение струйного типа.

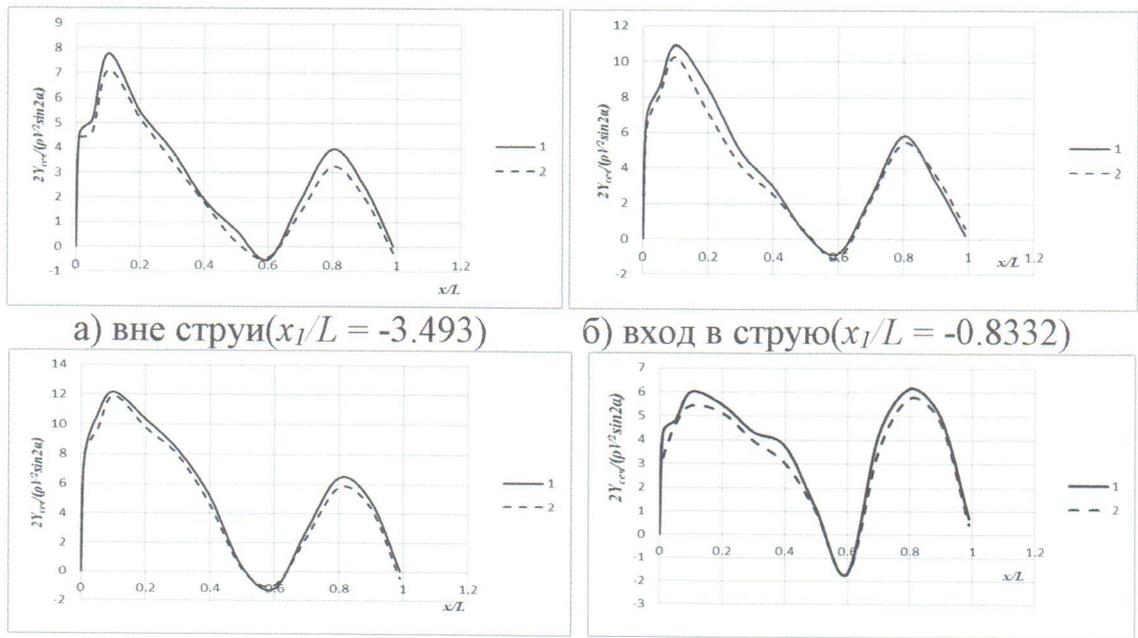
В предлагаемом методе как неоперенный, так и оперенный корпус дирижабля разбивается сечениями, перпендикулярными продольной оси корпуса дирижабля, на поперечные элементы шириной L/N , где N – число разбиений. Обтекание каждого поперечного элемента рассматривается независимо от соседнего элемента. Аэродинамическое взаимодействие элементов учитывается с помощью интерференционных коэффициентов, которые зависят от удлинения частей корпуса и параметров консолей оперения.

Результаты, приведенные в главах 2 и 3, позволяют сказать, что аэродинамические силы, действующие на каждый такой элемент в потоке, зависят от величины пространственного угла атаки $\alpha_{эфф}$ элемента. Угол $\alpha_{эфф}$ определяется величиной и направлением вектора скорости движения и ориентацией дирижабля, а также местными скоростями в сечении струйного течения, где в данный момент находится рассматриваемый элемент.

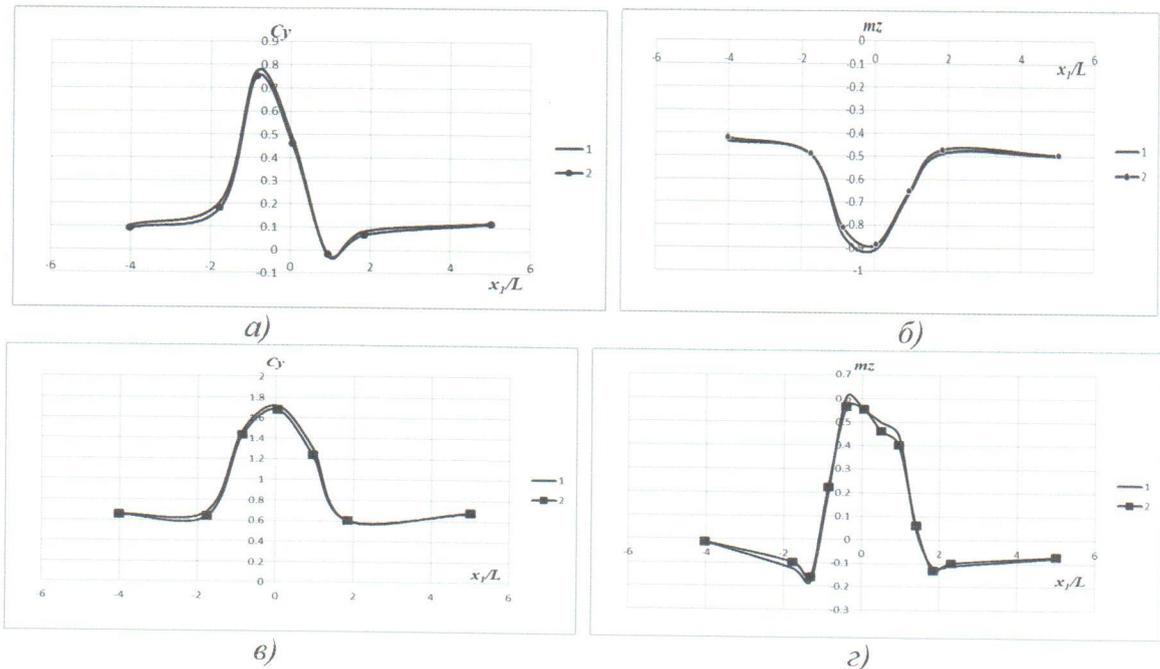
Аэродинамические силы, действующие на каждый элемент в потоке, представляются в виде суммы двух составляющих. Первая из них рассчитывается без учета влияния вихрей, которые могут сформироваться при отрывном обтекании корпуса и консолей. Вторая составляющая учитывает вихревое влияние. Если для данного элемента угол $\alpha_{эфф} \leq \alpha_{отр}(x_э)$, ($\alpha_{отр}$ – угол атаки, при котором вблизи элемента формируются вихри; $x_э$ – координата начала элемента, отсчитываемая от носка корпуса) влияние вихрей не учитывается. Углы $\alpha_{отр}$ зависят от геометрических и кинематических параметров корпусов и консолей оперения. Интегрированием сил, действующих на выделенные элементы, и их моментов относительно выбранной точки приведения (центра объема корпуса) определяются суммарные силы и моменты, действующие на дирижабль при координате x_1/L .

При вычислении нормальной силы элемента корпуса без консолей, определяемой без учета влияния вихрей, используется подход Мунка, согласно которому эта сила пропорциональна изменению площади поперечного сечения корпуса по его длине и $\sin 2\alpha_{эфф}$. Найденные таким путем силы уточняются с помощью специальных коэффициентов, зависящих от формы и удлинений головной и кормовой частей корпуса, а также его удлинения.

Аналогичная сила, действующая на элемент, содержащий части консолей оперения, также зависит от $\sin 2\alpha_{эфф}$, но определяется как сумма силы части элемента, принадлежащей корпусу, и частей элемента, принадлежащих консолям. При расчете первой используется идея эквивалентного тела вращения, а эффективная площадь поперечного сечения сегмента определяется с учетом площади поперечных сечений корпуса и консолей оперения. При расчете второй составляющей принято, что распределение перепада давления по консольной части элемента зависит от эквивалентного угла атаки и близко к эллиптическому распределению по размаху, а также используются данные теории тонкого тела с учетом поправок, зависящих от отношения размаха оперения и эквивалентного диаметра корпуса для рассматриваемого сегмента.



а) вне струи ($x_1/L = -3.493$) б) вход в струю ($x_1/L = -0.8332$)
 в) в струйном потоке ($x_1/L = 0.0696$) г) выход из струи $x_1/L = 0.9724$
 Рис. 11. Распределение локальных нормальных сил по оперенному корпусу,
 $e = 1, \lambda = 4,5; V = 18.056$ м/с, $U_m = 10.67$ м/с, $\alpha = 30^\circ$; струйное
 течение с постоянной скоростью в начальном сечении;
 1-численный расчет, 2 – приближённый метод



а) б)
 в) г)
 Рис. 12. Сравнение результатов расчетов суммарных коэффициентов C_y и m_z
 дирижабля ($e = 1$) по приближенному и численному методам: а,б –
 неоперенный корпус; в,г – оперенный корпус; струйное течение с
 постоянной скоростью в начальном сечении; $V = 18.056$ м/с,
 $U_m = 10.67$ м/с, $\alpha = 30^\circ$; 1-численный расчет, 2 – приближённый метод

При определении «вихревых» составляющих учитываются местоположение отрыва вихрей от корпуса и консолей оперения при эффективном угле атаки сегмента, а также зависимость коэффициента сопротивления поперечного сечения

корпуса от числа Рейнольдса в этом сечении. «Вихревые» составляющие нормальной силы пропорциональны $\sin^2\alpha_{\text{эфф}}$. Для их расчета используются специальные коэффициенты.

На Рис. 11 и Рис. 12 приведено сравнение расчетных (по предлагаемому методу) и численных результатов, позволяющее сделать вывод о том, что подход к определению локальных и суммарных аэродинамических характеристик дирижаблей, перемещающихся через потоки струйного типа, реализованный в предлагаемой инженерной методике, вполне работоспособен.

В заключении по работе сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Определены условия, которые должны ставиться на границах счетной области, необходимые для корректного моделирования течений струйного типа в счетной области ограниченных размеров. Выбрана модель турбулентности и определены размеры счетной области, обеспечивающие приемлемую точность расчетов и экономию расчетного времени. Для получения надежных результатов расчетов необходимо иметь в счетной области не менее 2250000 тетраэдральных и призматических ячеек, а шаг перемещения дирижабля по времени должен быть не более 0,25 с.
2. Проведено численное исследование изменения аэродинамических характеристик дирижаблей при перемещении через атмосферные течения струйного типа. Получен большой объем новой научной информации о параметрах течения и зависимостях локальных и суммарных коэффициентов аэродинамических сил и моментов корпусов дирижаблей в указанных условиях.
3. Выявлены закономерности влияния кинематических и геометрических параметров корпусов дирижаблей и других факторов на особенности обтекания и аэродинамические характеристики дирижаблей при их перемещении через атмосферные области струйного типа.
4. Найдено, что, когда дирижабль перемещается через струйное течение, абсолютные величины коэффициентов его аэродинамических сил и моментов, как без винтов, так и с вращающимися винтами, определяются положением дирижабля в струйном течении и сильно зависят углов атаки и скольжения дирижабля. Их значения в несколько раз превышают те, которые наблюдаются для дирижабля, находящегося в свободном от струйного течения пространстве. Наибольшее влияние работающих винтов на аэродинамику дирижабля наблюдается при перемещении дирижабля через горизонтальное струйное течение.
5. Предложен инженерный метод расчета локальной и суммарной нормальной силы и момента тангажа дирижабля без винтов, перемещающегося через атмосферные потоки струйного типа. Метод можно использовать при углах α до 50° , удлинениях корпуса $\lambda = 4...5$, числах Рейнольдса Re от 10^6 до 10^7 , а также для оценки боковой силы и момента рыскания дирижабля в горизонтальных струйных течениях. Результаты расчетов, проведенные по предложенному методу, имеют удовлетворительную сходимость с данными численных расчетов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В., Та Суан Тунг, Ле Ван Хоанг, Ле Куок Динь. Аэродинамические характеристики корпусов дирижаблей с поперечным эллиптическим сечением // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 177. С. 125 – 131. (0,7 п.л. / 0,2 п.л.).
2. Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В., Та Суан Тунг. Аэродинамические характеристики дирижабля при его движении через восходящий воздушный поток // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 211. С. 57 – 64. (0,9 п.л. / 0,3 п.л.).
3. Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В., Та Суан Тунг. Аэродинамические характеристики дирижабля при движении через область атмосферной неоднородности струйного типа // Полёт. 2015. № 4. С. 47 – 53. (1,05 п.л. / 0,35 п.л.).
4. Семенчиков Н.В., Та Суан Тунг. Численное исследование взаимодействия дирижабля с атмосферными струйными течениями // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 223(1). С. 57 – 64. (0,9 п.л. / 0,45 п.л.).
5. Семенчиков Н.В., Та Суан Тунг. Влияние винтов на аэродинамические характеристики дирижабля при его движении через атмосферные струйные течения // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 216(4). С. 149 – 155. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.).
6. Та Суан Тунг, Семенчиков Н.В. Исследование аэродинамических характеристик неоперённых корпусов дирижаблей при их движении через восходящую воздушную струю // Сборник тезисов «Авиация и космонавтика». 2014. С. 85 – 87. (0,11 п.л. / 0,06 п.л.).
7. Та Суан Тунг. Численное исследование влияния голдолы на аэродинамические характеристики дирижабля при его движении через область атмосферной неоднородности струйного типа // Сборник тезисов «Инновации в авиации и космонавтике». 2015. С. 51 – 52. (0,1 п.л.).
8. Та Суан Тунг, Семенчиков Н.В. Аэродинамические характеристики дирижабля при его движении через атмосферные струйные течения // Сборник тезисов «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники». 2015. С. 210 – 211. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).
9. Та Суан Тунг, Семенчиков Н.В. Аэродинамические характеристики дирижабля с вращающимися винтами при его движении через атмосферные струйные течения // Сборник тезисов «Авиация и космонавтика». 2015. С. 43 – 45. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).
10. Та Суан Тунг. Нагружение корпуса дирижабля при его перемещении через струйное течение // Сборник тезисов «Гагаринские чтения ». 2016. С. 340 – 341. (0,1 п.л.).
11. Та Суан Тунг, Семенчиков Н.В. Расчет аэродинамической нормальной и поперечной силы дирижабля при его движении через атмосферные струйные течения // Сборник тезисов «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники». 2016. С. 204 – 205. (0,1 п.л. / 0,05 п.л.).
12. Та Суан Тунг, Д.Д. Кииртхан, Семенчиков Н.В. Влияние распределения скорости по поперечному сечению струи на аэродинамические характеристики дирижабля при его перемещении через восходящее струйное течение //

- Сборник тезисов идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники. 2016. С. 203 – 204. (0,12 п.л. / 0,04 п.л.).
13. Та Суан Тунг, Семенчиков Н.В. Методика расчёта локальных и суммарных сил, действующих на дирижабль при его перемещении через струйные течения // Сборник тезисов «Авиация и космонавтика». 2016. С. 77 – 78. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).
14. Та Суан Тунг. Влияние формы поперечного сечения корпуса на нагружения корпуса дирижабля при поступательном движении // Сборник тезисов «Гагаринские чтения ». 2017. С. 21 – 22. (0,12 п.л.).