

На правах рукописи

**Ле Куок Динь**

**АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВИНТОВЫХ  
ДВИЖИТЕЛЕЙ С ОБОЛОЧКОЙ ДИРИЖАБЛЯ**

Специальность: 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообме-  
на летательных аппаратов

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена на кафедре «Аэродинамика летательных аппаратов» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета).

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент  
**Семенчиков Николай Витальевич**

Официальные оппоненты: - Доктор технических наук  
**Ципенко Антон Владимирович**  
Заведующий кафедры «Физика» МАИ (НИУ)

- Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Лапыгин Владимир Иванович**  
Заместитель начальника центра ФГУП  
ЦНИИМаш теплообмена и аэро-газодинамики

Ведущая организация: - **МГТУ им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),**  
г. Москва

Защита диссертации состоится «26» июня 2013 года в 10.00 часов на заседании Диссертационного совета ДС 212.005.02 в Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4, МАИ, в аудитории 302<sup>ГАК</sup>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института.

Автореферат разослан «24» мая 2013 г.

Ваш отзыв в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4, МАИ, учёному секретарю Диссертационного совета ДС 212.005.02.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

**Семенчиков Н.В.**

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Дирижабли и другие летательные аппараты с аэростатической разгрузкой в ряде случаев имеют преимущества перед самолетами и вертолетами. Решение многих важных задач с использованием дирижаблей оказывается более эффективным и экономичным по сравнению с тем, когда для тех же целей применяются самолеты и вертолеты.

Для осуществления полета и маневрирования, а для также управления дирижаблем и других целей (например, для обеспечения взлета дирижабля с отрицательной плавучестью) у современных дирижаблей в качестве движителей используются винты, плоскость вращения которых может иметь различные углы наклона по отношению к продольной оси оболочки (корпуса) дирижабля. Работа винтов, установленных вблизи оболочки дирижабля, осуществляется в условиях аэродинамической интерференции между винтами и оболочкой. Эта интерференция изменяет как аэродинамические характеристики винтов, так и параметры обтекания, локальные и суммарные аэродинамические силы и моменты оперенной оболочки дирижабля с вращающимися винтами. Особенно сложным взаимодействие винтов и оперенной оболочки может оказаться при попадании дирижабля в неравномерный воздушный поток вблизи земной поверхности (экрана).

Знание достоверных величин коэффициентов аэродинамических сил и моментов дирижаблей в различных условиях полета является решающим фактором для повышения возможностей функционирования дирижаблей, обеспечения безопасности их полетов и безаварийной эксплуатации. Поэтому определение аэродинамических характеристик дирижаблей с работающими винтами вблизи и вдали от земной поверхности (экрана) и разработка экономичных и эффективных методов расчета этих характеристик является актуальной задачей проектирования и безопасной эксплуатации дирижаблей.

**Целью диссертационной работы** является исследование особенностей и количественных характеристик аэродинамической интерференции винтовых движителей и оперенной оболочки дирижаблей в условиях обтекания потоком вязкого газа вблизи и вдали от земной поверхности (экрана).

Исходя из этого, 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 с работающими винтами в равномерном и неравномерном потоке вязкого газа; провести тестирование программного комплекса и выбрать модель турбулентности для систематических численных исследований.
2. Провести систематический численный эксперимент с целью получения аэродинамических характеристик и выявления особенностей обтекания дирижаблей с работающими винтами вблизи и вдали от экрана.

3. Выполнить анализ и обобщение результатов численных исследований, изучить особенности обтекания дирижаблей характерных компоновок с винтами и без винтов.
4. Выявить влияние геометрических и кинематических параметров дирижаблей и винтов, расстояния дирижабля от экрана и других факторов на аэродинамические характеристики винтов, установленных на корпусе дирижабля, и дирижаблей с работающими винтами; выработать рекомендации для аэродинамического проектирования дирижаблей.
5. Разработать инженерный метод расчета АДХ дирижаблей с работающими винтами, в том числе, вблизи земной поверхности (экрана), а также рекомендации по аэродинамическому проектированию дирижаблей.

**Методами исследования** в работе являются численное моделирование обтекания дирижаблей с вращающимися винтами пространственным потоком вязкого газа с использованием метода контрольного объема, а также инженерный метод расчета аэродинамических характеристик дирижаблей с вращающимися винтами.

**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 и ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского.

**Научная новизна результатов** диссертационной работы состоит в следующем:

1. Выявлены особенности обтекания дирижаблей с вращающимися винтами потоком вязкого газа без учета и с учетом влияния экранирующей поверхности.
2. Установлены закономерности изменения аэродинамических характеристик дирижаблей с вращающимися винтами потоком вязкого газа вблизи и вдали от экрана.
3. Обнаружены эффекты влияния кинематических и геометрических параметров дирижабля и винтов, параметров потока вязкого газа, расстояния дирижабля от экранирующей поверхности на аэродинамические характеристики дирижаблей с работающими винтами вблизи и вдали от экрана.

**Практическая значимость диссертационной работы.** Получен большой объем новой научной информации о параметрах и особенностях обтекания, аэродинамических характеристиках дирижаблей с вращающимися винтами в пространственном потоке вязкого газа. Разработан инженерный метод расчета аэродинамических характеристик дирижаблей с винтами, а также рекомендации для аэродинамического проектирования дирижаблей. Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, используются в учебном процессе МАИ при подготовке инженеров по специальности "Гидроаэродинамика" и

могут быть рекомендованы для применения в аэродинамическом проектировании дирижаблей и для обеспечения их безопасной эксплуатации.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты численного исследования, обнаруженные эффекты и закономерности влияния кинематических и геометрических параметров винтов и дирижаблей с работающими винтами, расстояния от экрана, других факторов на особенности обтекания и аэродинамические характеристики дирижаблей с винтами в равномерном и неравномерном пространственном потоке вязкого газа.
2. Инженерный метод расчета аэродинамических характеристик дирижаблей с работающими винтами в потоке вязкого газа вблизи и вдали от экрана.
3. Рекомендации по выбору проектных параметров дирижаблей.

**Апробация основных результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных конференциях «Авиация и космонавтика – 2011, 2012» (г. Москва, 2011, 2012 г.г.), XLVII Научных чтениях К.Э. Циолковского, секция «Авиация и воздухоплавание» (г. Калуга, 2012 г.), Седьмом Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'12 (г. Москва, 2012 г.), Десятом Форуме Российского Вертолетного Общества (г. Москва, 2012г); конференциях «Инновации в авиации и космонавтике» (г. Москва, 2012, 2013 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ. Основное содержание диссертационного исследования отражено в 4 опубликованных статьях (из них 4 в рекомендованных ВАК РФ изданиях) и 8 тезисах докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 202 страниц. Работа включает 88 рисунков. Список литературы содержит 139 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 метода расчета параметров пространственного течения вязкого газа вблизи дирижабля с работающими винтами. Метод основан на использовании системы уравнений, включающей уравнение неразрывности, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замкнутые одной из известных моделей турбулентности, уравнение переноса полной энергии и уравнение состояния. Численное решение этой системы уравнений осуществлялось с помощью метода контрольного объема.

Счетная область в окрестности дирижабля с винтами разбивалась на ряд подобластей. Выделялась основная подобласть вблизи оболочки, где уравнения записывались в неподвижной относительно оболочки ортогональной системе координат с началом, помещенным в центр объема оболочки, и с осью  $OX$ , направленной в сторону кормовой части оболочки. Кроме того, выделялись подобласти в окрестности вращающихся винтов, в которых уравнения записывались в подвижной вращающейся системе координат, перемещающейся в пространстве с линейной скоростью  $V_t$  и вращающейся относительно неподвижной системы с угловой скоростью  $\omega$ . Для перехода из одной подобласти в другую применялись специальные поверхностные интерфейсы.

При решении задачи использовались начальные и граничные условия. В качестве начальных параметров во всех точках временной плоскости  $t_0 = const$  использовались параметры невозмущенного потока. На границах счетных областей ставились граничные условия. В частности, на границе расчетной области «вход» параметры течения считались известными. На границе «выход» ставилось условие продолжения решения, а на обтекаемой поверхности тела или на экране - условие прилипания.

Разбиение на контрольные объемы счетной области, окружающей обтекаемое тело, осуществлялось с помощью построения расчетных сеток. Сетки строились с использованием адаптированного к задаче программного комплекса ANSYS 12.0 (лицензия № 00241d277c88) и были структурированными. В областях, где значения физических величин изменяются очень быстро, сетки имели сгущение.

Система уравнений записывалась в конечных разностях. Для ее решения использовалась явная наветренная схема второго порядка точности. Численная реализация решения осуществлялась с помощью комплекса вычислительных программ, содержащего программы адаптированного автором к поставленной задаче комплекса ANSYS 12 (лицензия № 00241d277c88), а также специальные программы автора для проведения, обработки, анализа и обобщения результатов численных расчетов.

Расчеты осуществлялись с помощью установления по времени. В расчетах принималось, что когда значения коэффициентов аэродинамических сил и моментов, действующих на обтекаемое тело, изменяются от итерации к итерации по времени в пределах 0,5%, процесс сходимости решения по времени можно считать установившимся. Полученные значения аэродинамических сил и моментов тела принимались за их стационарные величины.

Были проведены специальные исследования по выявлению влияния количества итераций по времени, размеров счетной области и минимально допустимых количеств конечных объемов в различных подобластях на результаты расчетов. Для того, чтобы выбрать модель турбулентности и проверить достоверность получаемых в численном эксперименте результатов, были проведены тестовые расчеты, в которых для замыкания уравнений Рейнольд-

са использовались различные однопараметрические и двухпараметрические модели турбулентности.

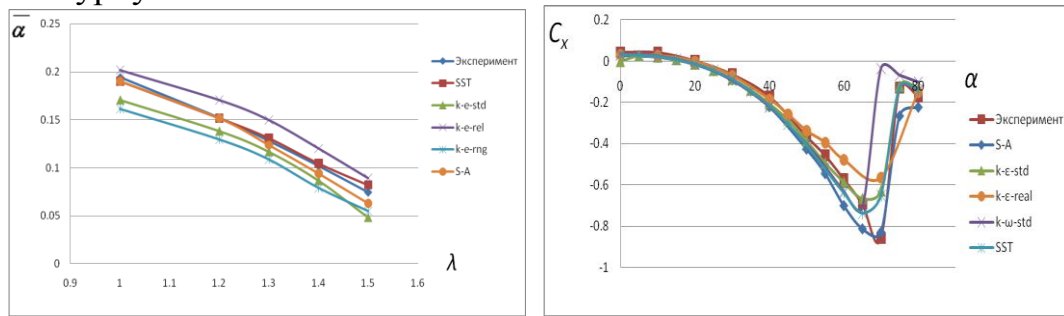


Рис. 1. Сравнение результатов тестовых расчетов с данными эксперимента: а - зависимость коэффициента силы тяги винта от относительной поступи винта (эксперимент ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского); б – коэффициент продольной силы неоперенной оболочки,  $\lambda = 4,5$ ;  $Re = 4 \times 10^6$  (эксперимент ЦАГИ)

Из графиков, приведенных в качестве примера на рис. 1, видно, что результаты расчетов, в которых уравнения Рейнольдса замыкались двухпараметрической моделью турбулентности Ментера «SST k- $\omega$ », наилучшим образом совпадают с данными экспериментов. В связи с этим весь численный эксперимент в работе был проведен с использованием этой модели турбулентности.

**Во второй главе** рассмотрено аэродинамическое взаимодействие движителей (воздушных винтов) и оперенной оболочки дирижабля вдали от экрана. Сначала приводятся основные аэродинамические параметры воздушных винтов, анализируется подобие при обтекании ЛА с винтовыми движителями, даются геометрические и кинематические параметры винтов и моделей дирижаблей в численном моделировании.

Объектом исследований был малоразмерный дирижабль классической схемы с двумя воздушными винтами, расположенными симметрично относительно базовой плоскости дирижабля. Дирижабль с винтами был скомпонован по классической схеме, имел оболочку (корпус), определяемую обводом Парсеваля, с удлинением  $\lambda = 4$ , гондолу, трапециевидные консоли оперения с профилем НАСА 0006 и два воздушных винта, расположенные симметрично относительно базовой плоскости дирижабля вблизи его гондолы. В целях создания расчетного метода в работе также рассматривались оперенные оболочки дирижаблей различного удлинения с эллиптическим поперечным сечением без винтов и гондолы.

Лопастные винты, рассмотренных в работе, были образованы с помощью модифицированного профиля RAF-6. Основные исследования проведены для винтов с двумя одинаковыми лопастями. Часть исследований была выполнена с 3-х и 4-х лопастными винтами. Геометрические параметры лопастей этих винтов были такими же, как и в случае 2-х лопастных винтов.

В исследованиях главы 2 основная расчетная область представляла собой цилиндр, имеющий длину в направлении оси  $ox$ , равную  $11L$ ,  $L$  – длина оболочки дирижабля. Диаметр этого цилиндра был равен  $10.25L$ . Дирижабль находился в центре расчетной области. В окрестности вращающихся винтов

выделялись расчетные подобласти, в которых использовалась вращающаяся система координат.

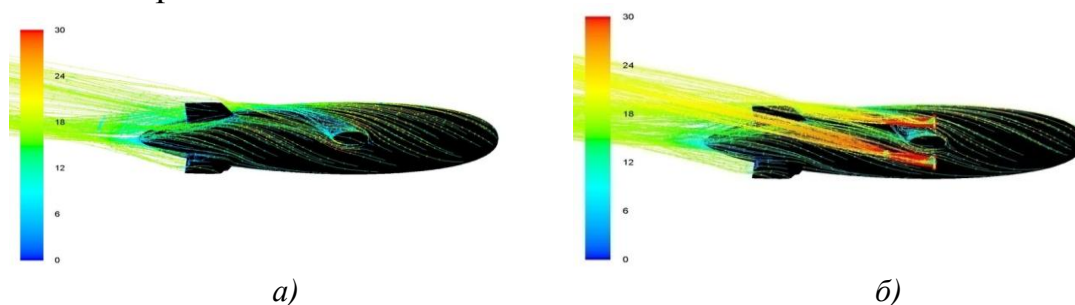


Рис. 2. Картины линий тока в окрестности дирижабля при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 20^\circ$  в плоскости изменения угла скольжения:  $V_\infty = 20$  м/с;  $\lambda = 0.263$ ; а – без винтов; б – с винтами

Картина линий тока вблизи оболочки вдали от экрана при  $\alpha > 0$  почти не зависит от того, работают винты или нет. При поступательном движении дирижабля со скольжением при нулевом угле атаки струи от винтов становятся асимметричными относительно плоскости изменения углов скольжения (рис. 2) и могут оказывать существенное влияние на обтекание части оболочки дирижабля, расположенной позади винтов, на обтекание оперения и гондолы, почти не изменяя картину течения около оболочки перед винтами.

При  $\alpha = 0$  работа винтов, установленных вблизи гондолы, слабо влияет на распределение давления и сил трения по оболочке. Характер изменения этих коэффициентов по обводу оболочки определяется ее формой и наличием на ней гондолы и оперения. Он является типичным для оболочек дирижаблей с затупленной носовой частью и суживающейся кормовой

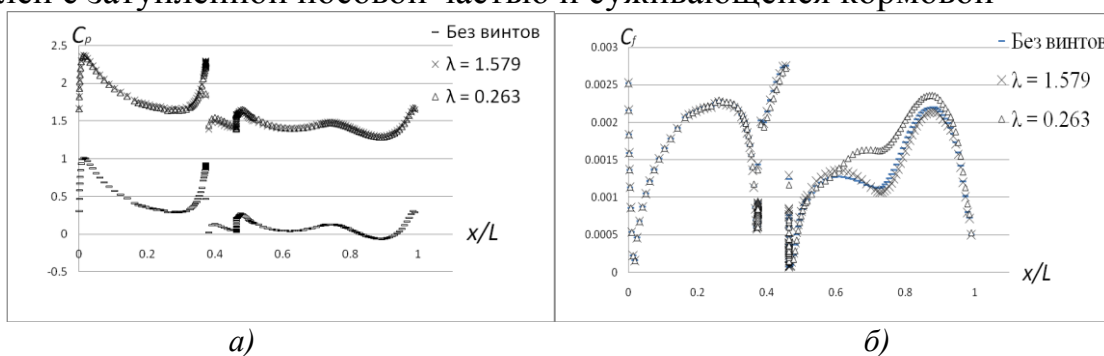


Рис. 3. Распределение коэффициента давления (а) и коэффициента трения (б) по поверхности оболочки:  $V_\infty = 20$  м/с,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\psi = 180^\circ$  ( $\psi = 180^\circ$  соответствует нижней (наветренной) стороне) оболочки;  $M_0 = 0$  – случай отсутствия винтов,  $M_0 > 0$  – винты вращаются)

частью. При углах атаки  $\alpha > 0$  винты влияют как на распределение давления, так и на распределение сил трения по оболочке, особенно по ее наветренной стороне. При увеличении местного числа Маха  $M_0$  винтов их влияние на распределение давления по оболочке распространяется на всю оболочку (см. рис. 3а), в то время как коэффициенты трения значительно изменяются лишь в области за самими винтами (рис. 3б).



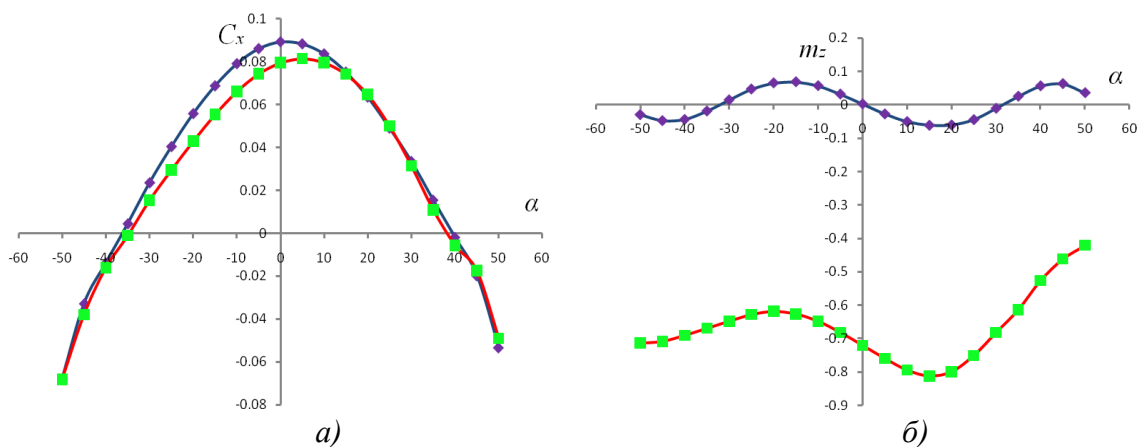


Рис. 4. Зависимости аэродинамических характеристик дирижабля от угла атаки  $\alpha$  при  $\beta=0$  при значительном рассогласовании тяги винтов и продольной силы ( $V_\infty=5$  м/с;  $n_s = 3000$  об/мин;  $\lambda = 0.066$ ); —  $\blacklozenge$  — без винтов, —  $\blacksquare$  — с винтами

Характер изменения по углу атаки коэффициентов продольной и нормальной сил, а также момента тангажа слабо зависит от величины скорости невозмущенного потока и относительной поступи винтов (числа оборотов винтов) (рис. 4). Было найдено, что если скорость натекания потока на дирижабль близка по величине к той скорости полета, при которой ускорение дирижабля равно нулю, то влияние струй на суммарные аэродинамические характеристики дирижабля незначительно. В случае их существенной разницы влияние струй может оказаться заметным, нелинейным и в определенном диапазоне углов атаки нерегулярным (рис. 4а,б).

При наличии скольжения влияние работы винтов на аэродинамические характеристики дирижабля проявляется сильнее, чем это наблюдается при изменении углов атаки дирижабля (рис. 5). Отмеченные выше закономерности влияния сочетания числа оборотов и величины скорости невозмущенного потока имеют место и в этом случае. Присоединенная к оболочке гондола и снос набегающим на дирижабль потоком струй от винтов двигателей приводят к асимметрии распределения давления и сил трения по поверхности дирижабля относительно плоскости изменения его углов скольжения. В этих

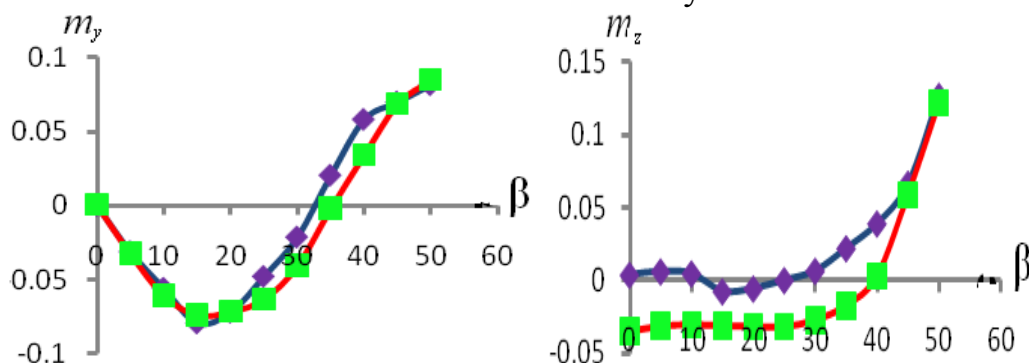


Рис. 5. Влияние изменения угла скольжения на аэродинамические характеристики дирижабля при  $\alpha = 0$ ;  $V_\infty=20$  м/с;  $n_s = 3000$  об/мин;  $\lambda = 0.263$  —  $\blacklozenge$  — без винтов, —  $\blacksquare$  — с винтами

условиях на дирижабль и без работающих винтов действуют нормальная сила и момент тангажа, нелинейно возрастающие с увеличением угла скольже-

ния (рис. 5б). 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.

Изучение влияния оболочки дирижабля на аэродинамические характеристики воздушных винтов вдали от экрана показало, что винт в присутствии оболочки дирижабля имеет при всех исследованных углах атаки коэффициенты тяги, меньшие, чем у изолированного винта. Однако различие в величинах коэффициентов тяги винтов в присутствии оболочки дирижабля и изолированных винтов не превышает во всех рассмотренных случаях 4%. Увеличение угла атаки дирижабля вызывает уменьшение разницы в величинах коэффициента тяги изолированного винта и винта в присутствии оболочки. Рост

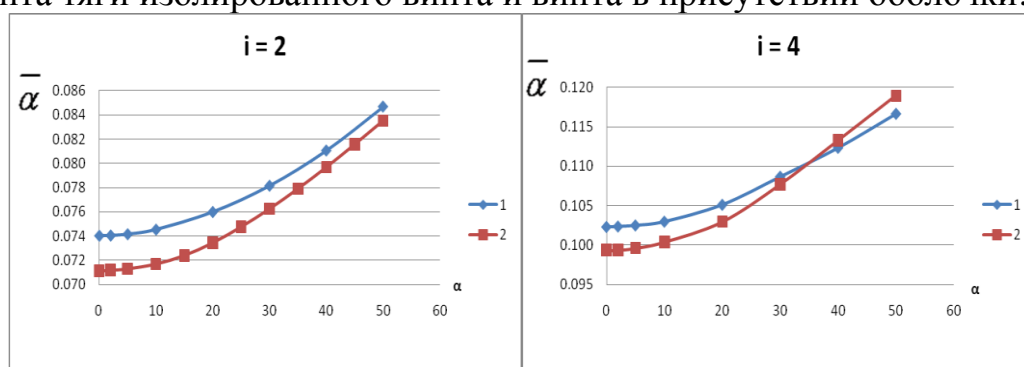


Рис. 6. Зависимость коэффициента тяги винта от угла атаки и числа лопастей винта  $i$ : 1) - изолированный винт, 2) - винт в присутствии корпуса дирижабля.

числа лопастей винта (более двух) приводит (начиная с некоторого значения угла атаки) к увеличению коэффициентов тяги винта в присутствии оболочки по сравнению с их значениями для изолированного винта (рис. 6).

**Глава 3** посвящена изложению результатов численного моделирования обтекания и расчета аэродинамических характеристик дирижаблей с вращающимися винтами и без винтов вблизи экрана. Рассмотрены случаи взаимодействия винтов и оболочки дирижабля в спокойной атмосфере и при обтекании дирижабля с работающими винтами вблизи экрана неравномерным потоком вязкого газа.

Исследование особенностей обтекания и аэродинамических характеристик оперенной оболочки вблизи экрана при наличии струй от винтов, когда плоскость вращения винтов параллельна продольной оси оболочки дирижабля и экрану, показало, что оболочка и другие элементы конструкции дирижабля обтекаются поперечным потоком вязкого газа, индуцированным вращающимися винтами и направленным к экрану. Структура течения в окрестности поверхности оболочки дирижабля сильно зависит от высоты расположения дирижабля над экраном и местного числа Маха винта  $M_0$ . Течение несимметрично относительно плоскости, перпендикулярной оси оболочки и проходящей через центр ее объема. В этой плоскости лежат оси вращения винтов. Вблизи носовой и кормовой частей оболочки формируются циркуляционные зоны, между вращающимися винтами могут иметь место вихри.

Распределение давления и сил трения по различным меридиональным сечениям оболочки оказывается по своему характеру очень сложным, несимметричным относительно центра объема оболочки и сильно зависит от относительного расстояния дирижабля до экрана  $\bar{H}$ , угла наклона меридиональной плоскости  $\psi$  и относительной координаты  $x/L$ . Чем ближе экран, тем большими оказываются максимальные значения давления и силы трения, которые достигаются вблизи вершины оболочки дирижабля при  $\psi \leq 90^\circ$  и в ее центре при  $\psi = 180^\circ$ .

Создаваемый работающими вблизи экрана винтами поток вязкого газа индуцирует на оболочке и оперении дирижабля нормальную и продольную силу, а также момент тангажа (рис. 7). Величина коэффициентов этих сил и момента сильно зависит от относительного расстояния  $\bar{H}$  и местного числа Маха винтов  $M_0$ . Нормальная сила направлена в противоположную сторону от аэростатической всплывной силы дирижабля (рис. 7а). Модуль коэффициента данной силы быстро растет с увеличением местного числа Маха винта и уменьшением относительного расстояния плоскости вращения винтов до экрана  $\bar{H}$ . В то же время, величина коэффициента суммарной нормальной силы дирижабля с учетом тяги винтов  $C_{y0}$  слабо зависит от относительного расстояния плоскости вращения винтов до экрана  $\bar{H}$  и в основном определяется местным числом Маха  $M_0$  винта. Видно, что момент тангажа, обусловленный течением, созданным винтами, оказывается знакопеременным при удалении от экрана (рис. 7б). Модули коэффициента продольной силы, индуцируемой на оболочке винтами, малы, а сама сила направлена от кормы оболочки к ее носу.

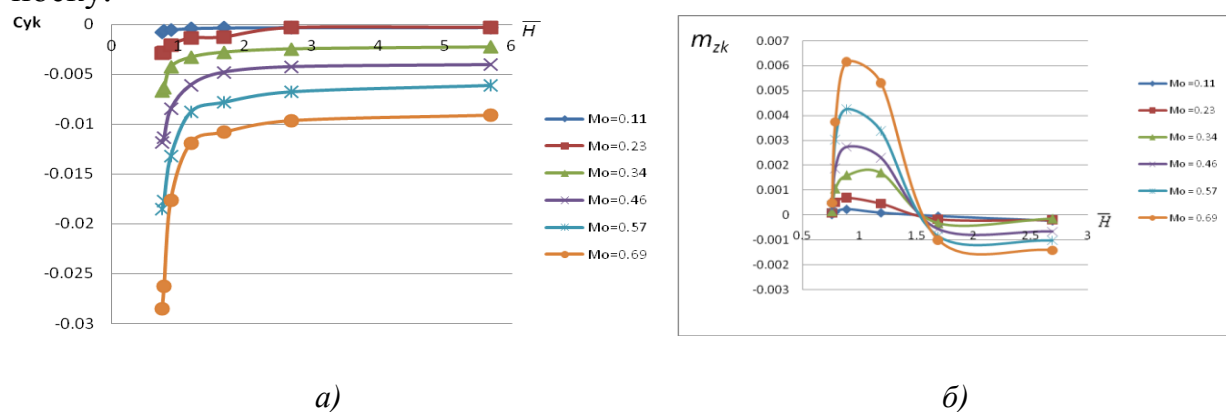


Рис. 7. Изменение аэродинамических характеристик оболочки дирижабля в зависимости от относительного расстояния до экрана  $\bar{H}$  и значения местного числа Маха винта  $M_0$ : а – коэффициент нормальной силы, б – коэффициент момента тангажа, в – коэффициент продольной силы

Неравномерный поток, натекающий на дирижабль вблизи экрана, может существенно изменить аэродинамические характеристики дирижабля с винтами, работающими вблизи экрана "на подъем". Чтобы изучить этот вопрос, были проведены численные исследования обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля без винтов и с винтами в неравномерном потоке вязкого газа вблизи экрана. Расчеты были выполнены с использованием

зависимости  $V_z = V_{10} (z/10)^\alpha$ , характеризующей распределение скорости потока по нормали к экрану. Здесь  $V_z$  – скорость потока на высоте  $z$  над экраном,  $V_{10}$  – скорость потока на высоте 10м над экраном;  $z$  – высота центра объема оболочки дирижабля над экраном (земной поверхностью);  $\alpha$  – параметр, зависящий от типа поверхности экрана. Например, для открытой местности без строений и деревьев применяется  $\alpha = 0,16$ .

Работа винтов вызывает заметное изменение величин коэффициентов давления и трения при  $x/L = \text{const}$  в рассматриваемой точке обвода оболочки. Наиболее сильно работа винтов отражается на распределении сил трения по оболочке за гондолой и винтами. Влияние работы винтов на распределения этих коэффициентов зависит от азимутального угла  $\beta$ , под которым поток натекает на дирижабль. При  $\beta < 90^\circ$  наибольшее влияние работы винтов имеет место за гондолой и винтами, а при  $\beta > 90^\circ$  – впереди. Эти особенности распределения давления и сил трения по оболочке определяют изменение суммарных аэродинамических сил и моментов дирижабля под влиянием работы винтов по сравнению со случаем отсутствия винтов (рис. 8).

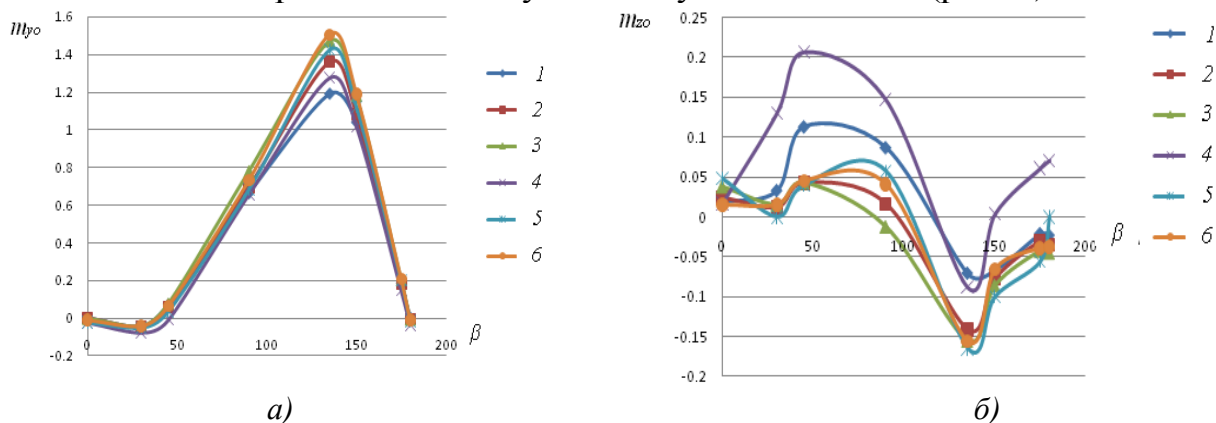


Рис. 8. Зависимости от угла  $\beta$  коэффициентов суммарных аэродинамических моментов дирижабля с работающими винтами и без винтов вблизи экрана в неравномерном потоке:  $V_{10} = 5$  м/с,  $\bar{H} = \text{var}; 1,4 - \bar{H} = 0,76; 2,5 - \bar{H} = 1,2; 3,6 - \bar{H} = 1,69; 1,2,3$  – без винтов;  $4,5,6$  – с винтами

Закономерности изменения аэродинамических характеристик дирижабля вблизи экрана по параметрам  $\bar{H}$  и  $\beta$  остаются, в основном, такими же и в случае отсутствия работающих винтов.

Изменение скорости на высоте  $z = 10$ м  $V_{10}$  отражается на величинах рассмотренных выше аэродинамических коэффициентов оболочки дирижабля в присутствии работающих винтов. В наибольшей степени оно сказывается на коэффициентах  $C_{y_k}$ ,  $C_{x_k}$  при  $\beta < 30^\circ$  и  $\beta > 120^\circ$ ,  $C_{z_k}$ ,  $m_{z_k}$  и  $m_{x_k}$  во всем диапазоне изменения углов  $\beta$ . Величины коэффициентов  $m_{y_k}$  слабо зависят от изменения скорости  $V_{10}$ . С ростом относительного расстояния дирижабля до экрана  $\bar{H}$  влияние изменения скорости  $V_{10}$  на величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов оболочки быстро уменьшается. Это объясняется тем, что при удалении дирижабля от экрана неравномерность набегающего на дирижабль потока уменьшается. Отметим, что при увеличении объема оболоч-

ки дирижабля (размерности дирижабля) значения коэффициентов аэродинамических сил и моментов оболочки дирижабля вблизи экрана в неравномерном потоке при  $\bar{H} = \text{const}$  и  $\beta = \text{const}$  изменятся. Однако принципиальная сторона вопроса о влиянии неравномерности набегающего на оболочку в присутствии работающих винтов потока останется прежней.

Наклон плоскости вращения винтов относительно продольной оси оболочки влияет на аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана (рис. 9). Характер протекания аэродинамических коэффициентов сил и моментов, действующих как на оболочку, так и на дирижабль с

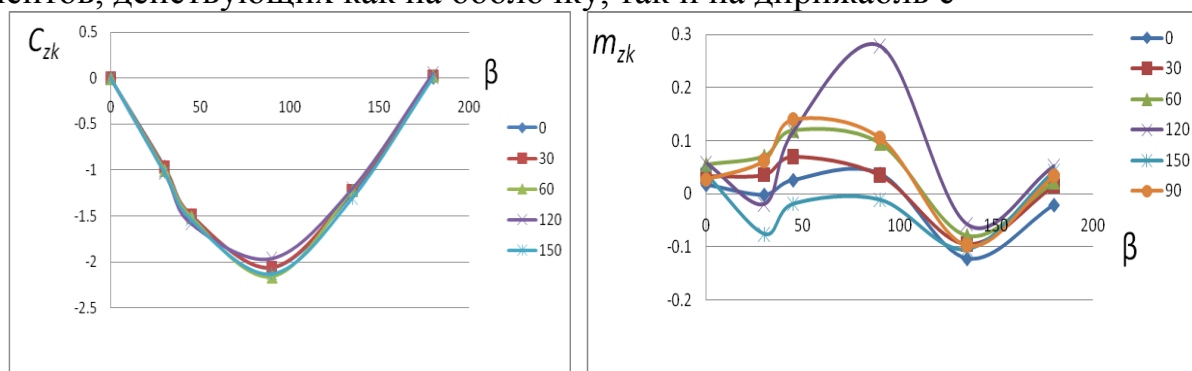


Рис. 9. Влияние наклона плоскости вращения винтов относительно продольной оси оболочки на аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана:  $\bar{H} = H/D = 1,19$ ,  $M_0 = 0,69$ ,  $V_{10} = 10$  м/с

работающими винтами в целом слабо зависит от изменения этого наклона. Но абсолютные величины коэффициентов аэродинамических сил и моментов при  $\beta = \text{const}$  могут при этом сильно изменяться, причем по-разному для разных углов  $\beta$  и различных коэффициентов сил и моментов, действующих на оболочку в присутствии работающих винтов и для коэффициентов сил и моментов дирижабля с учетом тяги винтов. В наибольшей степени изменение наклона плоскости вращения винтов отражается на абсолютных величинах коэффициентов нормальной  $C_y$  и продольной  $C_x$  сил, моментов тангажа  $m_z$  и крена  $m_x$  оболочки и дирижабля в целом. Коэффициенты поперечной силы

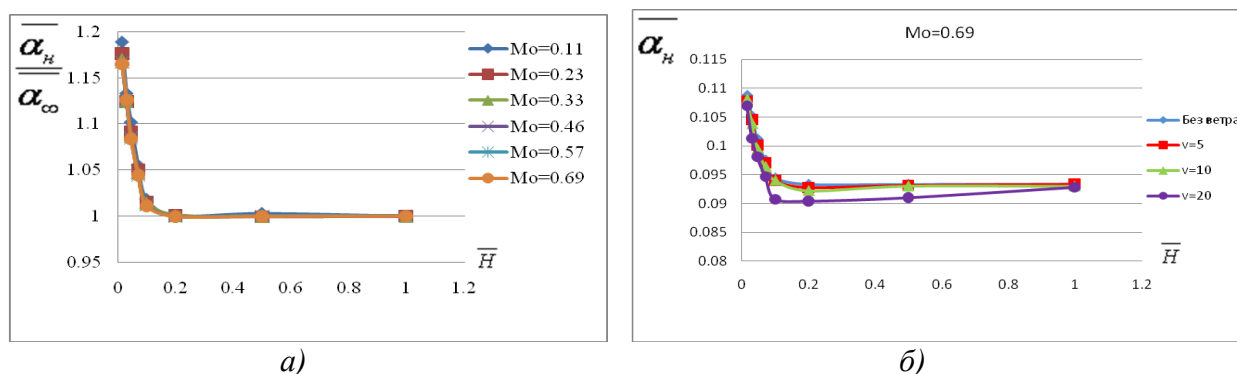


Рис. 10. Коэффициенты тяги изолированного винта вблизи экрана: а - зависимость отношения модуля коэффициента тяги винта вблизи экрана к коэффициенту тяги винта при отсутствии экрана от  $\bar{H}$  и  $M_0$ ; б - влияние величины скорости  $V_{10}$  неравномерного потока и параметров  $\bar{H}$  и  $M_0$ , на коэффициент тяги изолированного винта

оболочки  $C_z$  слабо зависят от величины угла наклона  $\varphi_B$ . Существеннее, чем  $C_z$ , изменяются по  $\varphi_B$  при  $\beta = \text{const}$  коэффициенты момента рыскания  $m_y$ .

Аэродинамические характеристики винтов зависят от относительного расстояния винтов до экрана  $\bar{H}$ . При приближении к экрану коэффициент тяги изолированного винта растет (рис. 10) и может увеличиться более, чем на 20% (в зависимости от величины местного числа Маха винта  $M_0$ ) (рис. 10а). Если изолированные винты, работающие "на подъем", подвергаются воздействию неравномерного потока, натекающего на винты вдоль экрана, то характерные особенности изменения коэффициента их тяги по параметру  $\bar{H}$  остаются теми же, что и при отсутствии этого потока (рис 10б).

Оболочка с гондолой влияют на параметры обтекания и аэродинамические характеристики винтов в спокойной атмосфере вблизи экрана. При удалении от экрана падение величин коэффициента тяги винтов в присутствии гондолы и оболочки дирижабля существенно меньше того, что наблюдалось для изолированных винтов. Оно не превышает 2,5% от величин коэффициента тяги винтов в присутствии оболочки, когда влияние экрана на винты отсутствует. Отношение коэффициента тяги винта в присутствии оболочки дирижабля вблизи экрана к коэффициенту тяги винта вблизи оболочки при отсутствии экрана зависит теперь не только от относительного расстояния плоскости вращения винта до экрана  $\bar{H}$ , но и местного числа Маха винта  $M_0$  (рис. 10б). Влияние изменения скорости неравномерного потока  $V_{10}$  при  $\beta = 0$  на протекание по  $\bar{H}$  коэффициента тяги винтов в присутствии гондолы и корпуса дирижабля оказывается незначительным и не превышает 2% (рис. 11а). Влияние угла  $\beta$  на коэффициент тяги винтов в присутствии оболочки и экрана оказывается более существенным (рис. 11б). Величины коэффициента

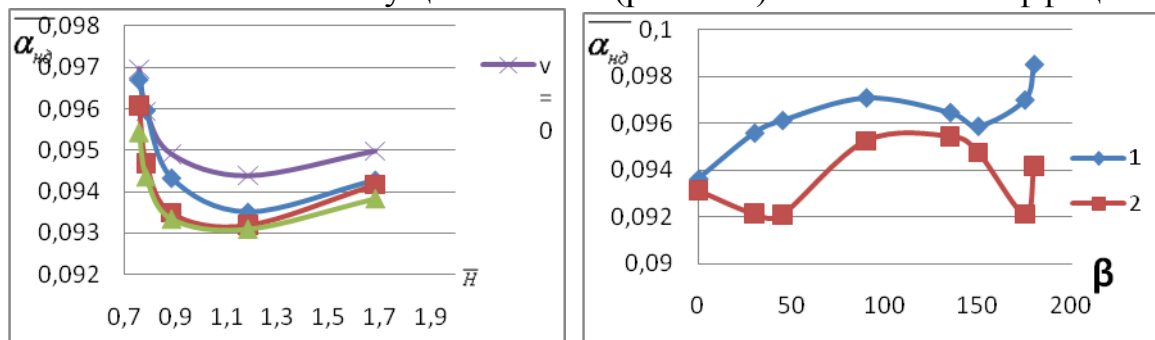


Рис. 11. Коэффициенты тяги винта в присутствии оболочки и экрана, 1 – правый винт, 2 – левый винт

тяги винтов могут измениться примерно на 6%. При этом характер изменения по углу  $\beta$  коэффициента тяги винта сильно зависит от расстояния плоскости вращения винтов до экрана  $\bar{H}$ .

**В четвертой главе** приведен инженерный метод расчета стационарных аэродинамических характеристик дирижаблей с некруговым поперечным сечением их оболочек, как без винтов, так и с вращающимися винтами для оболочек с круговым поперечным сечением вблизи и вдали от экрана. Метод основан на разделении аэродинамических характеристик на различ-



ные составляющие. Первые из них - это аэродинамические силы и моменты оперенной оболочки дирижабля при отсутствии винтов. Вторые учитывают силы и моменты, обусловленные влиянием на оперенную оболочку работающих винтов. Третьи составляющие – это проекции тяги изолированных винтов (найденной без учета взаимного влияния винтов и оболочки) на оси выбранной системы координат. Четвертые учитывают проекции на оси системы координат дополнительной составляющей тяги винтов, возникающей вследствие влияния оболочки и экрана на винты. Для определения составляющих аэродинамических сил и моментов были использованы общепринятые подходы для расчета аэродинамических характеристик оперенных и неоперенных тел и винтов. Кроме того, был проведен специальный численный эксперимент, направленный на получение количественных зависимостей для учета влияния формы поперечного сечения оболочки на аэродинамические характеристики изолированных оболочек, параметры взаимодействия оболочки и консолей оперения.

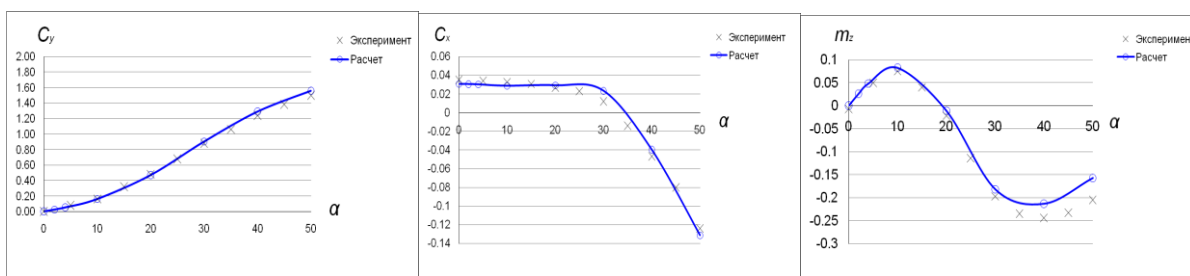


Рис. 12. Сравнение результатов расчета и эксперимента (ЦАГИ) для оперенной оболочки без винтов ( $a/b = 1$ ),  $Re = 2.4 \times 10^6$

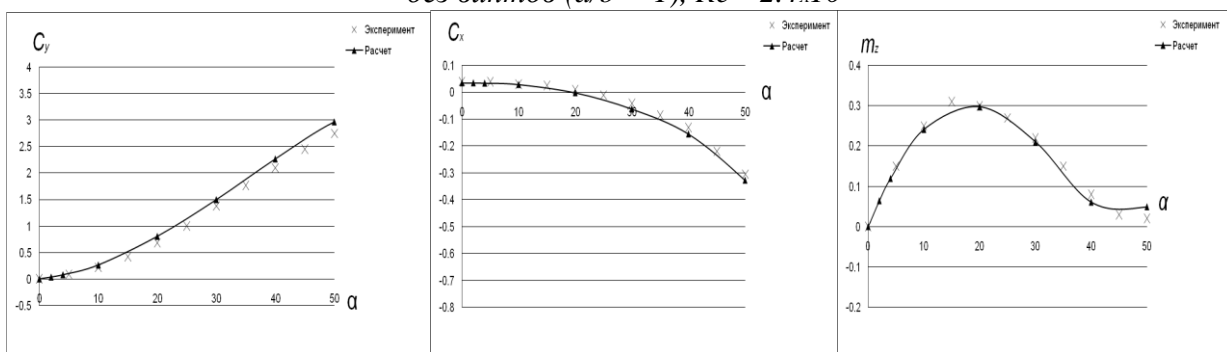


Рис. 13. Сравнение результатов расчета и эксперимента (ЦАГИ) для оперенной оболочки без винтов ( $a/b = 2$ ),  $Re = 4 \times 10^6$

Сравнение результатов расчета по данному методу с результатами эксперимента показало их удовлетворительную сходимость (рис. 12 и рис. 13).

Инженерный метод расчета аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтами был распространен случай обтекания дирижабля неравномерным потоком вязкого газа вблизи экрана. Расчеты показывают, что предложенный инженерный метод дает надежные результаты также и в этом случае.

Кроме того в главе 4 представлены разработанные рекомендации по выбору удлинения оболочек с некруговым поперечным сечением и параметров оперения дирижаблей с учетом влияния работы винтов.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертации.

### **Основные результаты и выводы**

1. Проведено численное исследование аэродинамического взаимодействия оперенной оболочки и винтов малоразмерного дирижабля вблизи и вдали от экрана в равномерном и неравномерном потоке вязкого газа. Получен большой объем новой информации о характере обтекания, распределении давления и сил трения по лопастям винтов и поверхности оболочки дирижабля, влиянии на коэффициенты аэродинамических сил и моментов дирижабля и тягу винтов углов атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$ , изменения относительной поступи винтов, числа их лопастей и скорости набегающего на дирижабль потока.

2. Обнаружено, что если скорость натекания потока на дирижабль вдали от экрана близка к скорости полета, при которой дирижабль движется без ускорения, влияние движителей на суммарные аэродинамические характеристики дирижабля сравнительно невелико. При значительной разнице указанных скоростей влияние течения, создаваемого при работе движителя, на аэродинамические характеристики дирижабля вдали от экрана может оказаться весьма заметным и составлять от 5% до 40%.

3. Найдено, что винт в присутствии оболочки дирижабля вдали от экрана имеет при всех исследованных углах атаки коэффициенты тяги, меньшие, чем у изолированного винта. Однако это различие не превышает во всех рассмотренных случаях 4%. Увеличение угла атаки оболочки вызывает его уменьшение. Рост числа лопастей винта (более двух) вызывает, начиная с некоторого значения угла атаки, увеличение коэффициентов тяги винта в присутствии дирижабля по сравнению с их значениями для изолированного винта.

4. Установлены закономерности обтекания и изменения аэродинамических характеристик дирижаблей с работающими винтами вблизи экрана в зависимости от относительного расстояния  $\bar{H}$ , местного числа Маха винтов  $M_0$ , других факторов в спокойной атмосфере и при обдувке дирижабля неравномерным потоком. Показано, что нормальная сила дирижабля, создаваемого работающими винтами вблизи экрана, имеет противоположное направление по отношению к силе Архимеда и тяге винтов во взлетном режиме. Из-за этого потеря тяги винтов может достигать до 18% по сравнению с тягой изолированных винтов вдали от экрана.

5. Изучены особенности изменения аэродинамических характеристик винтовых движителей дирижабля вблизи экрана. Найдено, что при приближении к экрану коэффициент тяги изолированного винта растет и может увеличиться более, чем на 20% (в зависимости от величины местного числа Маха винта  $M_0$ ). Если изолированные винты, работающие "на подъем", подвергаются воздействию неравномерного потока, натекающего на винты вдоль



экрана, то характерные особенности изменения коэффициента их тяги по параметру  $\bar{H}$  остаются теми же, что и при отсутствии этого потока. Показано, что при удалении от экрана падение величин коэффициента тяги винтов в присутствии гондолы и оболочки дирижабля существенно меньше того, что наблюдается для изолированных винтов. Оно не превышает 2,5% от величин коэффициента тяги винтов в присутствии оболочки, когда влияние экрана на винты отсутствует. Изменение скорости неравномерного потока  $V_{10}$  при  $\beta = 0$  на протекание по  $\bar{H}$  коэффициента тяги винтов в присутствии гондолы и оболочки дирижабля оказывается незначительным и не превышает 2%. Влияние угла  $\beta$  на коэффициент тяги винтов в присутствии оболочки и экрана оказывается более существенным. Величины коэффициента тяги винтов могут измениться примерно на 6%. При этом характер изменения по углу  $\beta$  коэффициента тяги винта сильно зависит от расстояния плоскости вращения винтов до экрана.

6. Предложен метод расчета коэффициентов нормальной и продольной сил, а также момента тангажа дирижабля без винтов вдали от экрана. Метод применим в диапазоне углов атаки  $\alpha = 0 \dots 50^\circ$ , при числах Рейнольдса  $Re = 10^5 \dots 10^7$ , удлинениях корпусов  $\lambda = 4 \dots 6$ , параметре эллиптичности поперечных сечений оболочки  $e = 0,5 \dots 2$ . Расчеты, проведенные по предложенному методу, показали их удовлетворительную сходимость с результатами известных экспериментов для неоперенных и оперенных корпусов дирижаблей без винтов при углах атаки  $\alpha = 0 \dots 50^\circ$ .

7. Предложен метод оценки коэффициентов нормальной и продольной сил, а также момента тангажа дирижабля с работающими винтами вдали от экрана и вблизи него, а также методика оценки коэффициентов тяги изолированного винта и винта в присутствии корпуса дирижабля с учетом влияния экранирующей поверхности  $\alpha = 0 \dots 50^\circ$ .

8. Разработаны рекомендации по выбору удлинения оболочек с некруговым поперечным сечением и параметров оперения дирижаблей с учетом влияния работы винтов.

#### **Публикации по теме диссертации:**

1. Ле Куок Динь, Семенчиков Н.В., Чан Ван Вьет, Яковлевский О.В. Аэродинамические характеристики гладких тел вращения в дозвуковом потоке // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2009. № 141(4). С. 165- 169.

2. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В., Чан Куанг Дык, Яковлевский О. В. Численное исследование влияния движителей на аэродинамические характеристики дирижабля// Электронный журнал “Труды МАИ”. 2012. № 52. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29414>

3. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В., Чан Куанг Дык, Яковлевский О. В. Влияние струй от винтов на аэродинамические характеристики дирижабля вблизи экрана // Электронный журнал “Труды МАИ”. 2012. № 52. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29414>

4. Ле Ван Хоанг, Ле Куок Динь, Семенчиков Н.В., Та Суан Тунг, Яковлевский О.В. Аэродинамические характеристики корпусов дирижаблей с эллиптическим поперечным сечением // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2012. № 177(3). С. 125- 131.

5. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В., Чан Куанг Дык, Яковлевский О. В. Численное исследование влияния струй движителей на аэродинамические характеристики дирижабля// Тезисы докладов 10-й Международной конференции “Авиация и Космонавтика - 2011”. М , 2011. С 22-23

6. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В., Чан Куанг Дык, Яковлевский О. В. Численное исследование влияния струй движителей на аэродинамические характеристики дирижабля // Тезисы докладов 10-й Международной конференции “Авиация и Космонавтика - 2011”. М , 2011. С 22-23

7. Ле Куок Динь. Исследование влияния расположения винтов вблизи корпуса дирижабля на его аэродинамические характеристики // Сборник тезисов докладов конференции “Инновации в авиации и космонавтике - 2012”. М. 2012. С 18.

8. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В., Яковлевский О. В. Влияние работы винтов на аэродинамические характеристики дирижабля от экрана // Тезисы докладов 11-й Международной конференции “Авиация и Космонавтика – 2012”. М , 2012. С 32.

9. Ле Куок Динь, Данг Нгок Тхань. Исследование аэродинамических характеристик воздушных винтов вблизи экрана в присутствии корпуса дирижабля // Тезисы докладов седьмого международного аэрокосмического конгресса IAC’12. М. 2012. С 69-70.

10. Ле Куок Динь, Данг Нгок Тхань. Численное моделирование обтекания дирижабля вблизи экрана с учетом влияния струй винтов // Тезисы докладов седьмого международного аэрокосмического конгресса IAC’12. М. 2012. С 90.

11. Ле Куок Динь, Семенчиков Н. В. Особенности обтекания и аэродинамических характеристик дирижабля с работающими винтами вблизи экрана // Материалы XLIII научных чтений памяти К.Э. Циолковского: Тезисы докладов XLVII научных чтений К.Э. Циолковского. - Калуга. 2012. С. 248-249.

12. Ле Куок Динь. Влияние наклона плоскости вращения винтов на аэродинамические характеристики дирижабля // Сборник тезисов докладов конференции “Инновации в авиации и космонавтике - 2013”. М. 2013. С 57.