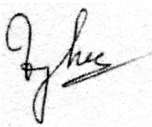


ЧИН ЧУНГ ХИЕУ

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
С УЧЕТОМ УПРАВЛЕНИЯ ОБТЕКАНИЕМ И ИХ КОМПОНОВКИ**

Специальность 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена
летательных аппаратов



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Калугин Владимир Тимофеевич,
факультет СМ МГТУ им.
Н.Э. Баумана, декан

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
Липатов Игорь Иванович,
ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2029782

Чин Ч. Методика определения донного сопрот

- 783

кандидат технических наук, доцент
Каретников Георгий Константинович,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский государственный
технический университет гражданской
авиации (МГТУ ГА)»

Защита состоится 27 июня 2013 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета ДС 212.008.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105007, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета ДС 212.008.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Калугин В.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Определение донного сопротивления является одной из важных задач в аэродинамике. Донное сопротивление тела вращения может достигать 30% полного сопротивления. Величина донного давления (донного сопротивления) тел вращения является функцией большого числа аэрогазодинамических параметров внешнего потока, а также зависит от компоновки летательных аппаратов (удлинения корпуса, формы лобового обтекателя, геометрических параметров хвостовой части). При управлении обтеканием летательных аппаратов (ЛА) с использованием аэродинамических щитков, за счет изменения формы донного среза (выемки), выреза или перфорации поверхности донной части, отрывное обтекание в донной области носит сложный характер и недостаточно изучено.

В настоящее время отсутствуют расчетные методы определения донного сопротивления для таких вариантов управления, имеются лишь разрозненные результаты по аэродинамическим характеристикам, полученные экспериментальным путем. Имеющаяся информация недостаточна для создания физических и математических моделей расчета донного сопротивления ЛА и вычисления параметров в донной области. Ввиду этого разработка метода определения донного сопротивления, проведение комплексных исследований влияния на донное давление различных вариантов выемок (с вырезом, с перфорацией), наличия органов управления в кормовой части, а также подвода теплоты в донную область и вращения ЛА являются актуальной задачей.

Цель работы. Целью работы являлось повышение точности определения аэродинамических характеристик (АДХ) ЛА с учетом влияния на донное давление аэродинамических щитков, выемок (с вырезом, перфорацией), удлинения корпуса, формы головного обтекателя, а также подвода теплоты в донную область и вращения ЛА.

Задачи исследования. В диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведение комплекса экспериментальных аэродинамических исследований в дозвуковой и в сверхзвуковой аэродинамических трубах, включающих дренажный, визуализационный и весовой эксперименты с использованием специально созданных моделей, позволяющих изменять компоновку, геометрические параметры ЛА и кормовой части.
2. Создание программно-алгоритмического обеспечения численного моделирования на основе комбинированного метода С. К. Годунова для вязкого трехмерного ламинарного потока тел простейших форм и метода контрольного объема с использованием программы Ansys для расчета донного давления ЛА с учетом управления обтеканием.
3. Разработка интегрального метода расчета донного давления за ЛА с учетом протоков между щитками и подвода теплоты в донную область.
4. Анализ и обобщение результатов численных исследований, выявление физических структур обтекания, определение донного давления за телами и влияние на него тормозных щитков, выемок (с вырезом, с перфорацией).

ей), удлинения корпуса, формы носовой части, а также подвода теплоты и вращения ЛА.

Объектом исследования являлись тела вращения различной компоновки ЛА с аэродинамическими щитками, с донной выемкой, с вырезом и перфорацией донной поверхности.

Методы исследования. В работе использованы методы экспериментальной аэродинамики, предусматривающие визуализацию течений, испытаний дренированных моделей ЛА и проведение весовых экспериментов в дозвуковой и сверхзвуковой трубах. На основе исследования физических процессов проводилось математическое моделирование обтекания тел вращения с учетом управления обтеканием ЛА. Расчетные методы представляют собой метод контрольного объема, используемый в пакете Ansys CFX, комбинированный метод С. К. Годунова и интегральный метод расчета параметров потока, разработанный на основе теории отрывных течений.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов гарантирована корректностью выбора исходных ограничений и допущений при постановке задачи; приемлемой точностью при проведении экспериментальных исследований измеряемых и вычисляемых величин; последовательным использованием при построении математических моделей обтекания органов управления полетом ЛА основных уравнений аэрогазодинамики, которые являются выражением фундаментальных законов сохранения массы, количества движения и энергии; согласованием результатов вычислительного и интегрального расчета с данными экспериментов МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦАГИ, НИИ Механики МГУ.

Научная новизна. В диссертационной работе экспериментально и теоретически исследован процесс отрывного обтекания управляющих аэродинамических щитков. Найдена зависимость донного давления от перестройки единой структуры отрывного течения за органами управления (ОУ) к автономным областям отрыва потока. Определено влияние изменения формы донного среза (донной выемки, выемки с вырезом, с перфорацией) на значение донного давления. Адаптирован численный метод Годунова для расчета параметров отрывных течений с учетом вращения и подвода теплоты при ламинарном режиме течения. Усовершенствованы интегральный метод и методика численного моделирования на основе метода контрольного объема с использованием пакета Ansys CFX для расчета донного давления с достаточной для инженерной практики точностью в широких диапазонах изменения определяющих параметров.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке алгоритмов расчета и вычислительных программ определения донного сопротивления при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях с учетом влияния органов управления, компоновки, подвода теплоты и вращения ЛА. Внедрен в программный комплекс расчета АДХ ЛА интегральный метод определения донного давления за ЛА, учитывающий наличие щитков на корпусе ЛА, протока газа между ними и подвода теплоты в донную область. Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, использовались в учебном процессе кафедры СМЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана и могут быть рекомендованы для применения в аэро-

динамическом проектировании ЛА с различной компоновкой тел вращения и ОУ щиткового типа.

На защиту выносятся

1. Результаты экспериментальных исследований обтекания тел вращения со щитковыми устройствами при дозвуковой и сверхзвуковой скоростях.
2. Методика и алгоритм расчета донного сопротивления тел простой формы методом Годунова с учетом вязкостных эффектов, теплопередачи и вращения.
3. Алгоритм расчета донного сопротивления тел вращения с органами управления обтеканием ЛА методом контрольного объема с использованием программного комплекса Ansys CFX.
4. Алгоритм интегрального метода расчета донного давления за щитками и за корпусом ЛА с учетом протока газа между щитками.
5. Результаты расчета влияния щитков на донное сопротивление.
6. Результаты расчета влияния донной выемки, перфорации и выреза поверхности донной части на донное сопротивление при различных удлинениях и формах лобового обтекателя ЛА.

Личный вклад автора состоит в разработке методик аэродинамических испытаний, расчетных методик, анализе и обобщении полученных результатов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: XVIII Школе-семинаре «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях», 23-27 мая 2011 г., Звенигород; Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2011 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 научных работах, в том числе 4 научных статьях перечня ВАК [1-4] и 2 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы, содержит 184 страниц текста, 135 рисунков, 6 таблиц. Список использованной литературы включает 125 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дан краткий анализ состояния вопроса по теме работы и на его основе сформулированы цель, задачи, выбраны методы исследования, отмечена новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также дано краткое содержание работы по главам.

В первой главе систематизированы параметры, оказывающие первостепенное влияние на донное давление (сопротивление), приведены характеристики исследуемых летательных аппаратов различной геометрии (летательные аппараты со щитковыми тормозными устройствами, с донной выемкой и перфорацией поверхности). Отмечено, что наличие в кормовой части ЛА щитков изменяет структуру отрывного обтекания за телом и оказывает существенное влияние на донное сопротивление и аэродинамические характеристики ЛА.



Рис. 1. Исследуемые варианты управления обтеканием ЛА

Проведен краткий анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных изучению донного сопротивления ЛА, отрывного обтекания за уступом и телами вращения, определению влияния различных факторов на донное сопротивление и давление, разработке методов вычисления донного сопротивления. В главе сделан акцент на работы по определению донного давления ЛА и влиянию на него различных факторов, таких как аэрогазодинамические параметры внешнего потока и геометрические характеристики хвостовых частей (Бондаренко Р. М., Гогиш Л.В., Исаев С.А., Калугин В. Т., Краснов Н.Ф., Лаврухин Г. Н., Липатов И. И., Липницкий Ю. М., Степанов Г. Ю., Шманенков В.Н., Нейланд В. Я., Швец А. И., Швец И. Т., Kruiswyk R. W., Чжен П.). Показано, что наиболее полно изучены закономерности изменения донного давления для простых тел, как за плоскими уступами, так и за телами вращения с плоским срезом. Показано влияние чисел M и Re внешнего потока, характера и толщины пограничного слоя на срезе хвостовой части, углов сужения контура внешней поверхности хвостовой части на донное давление. Однако практически отсутствуют работы, описывающие влияние аэродинамических щитковых устройств, конфигурации донного среза в виде выемки, вырезов или перфорации донной поверхности, а также подвода теплоты в донную часть и вращения на значение донного давления и донного сопротивления для тел малого удлинения (рис.1). На основании этого сформулированы задачи исследования.

Во второй главе описан комплекс проведенных экспериментов, даны результаты испытаний и сделана оценка точности измеряемых и вычисляемых величин.

Целью эксперимента являлось определение донного давления и влияние на него хвостовых управляющих устройств. При дозвуковой скорости исследу-

дуются три варианта хвостовых частей: с выемками, с выемками и вырезом, с выемками и перфорацией. При сверхзвуковой скорости хвостовой частью является тормозное устройство с различным количеством щитков. Исследования проводились в дозвуковой (рис. 2) и в сверхзвуковой трубах МГТУ им. Н. Э. Баумана (рис. 3).

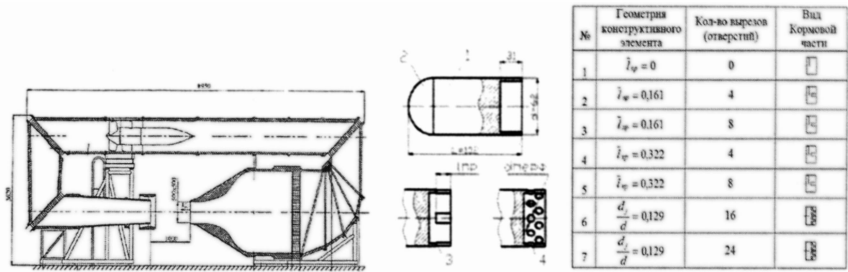


Рис. 2. Дозвуковая труба Т-500 МГТУ им. Н. Э. Баумана и экспериментальные модели

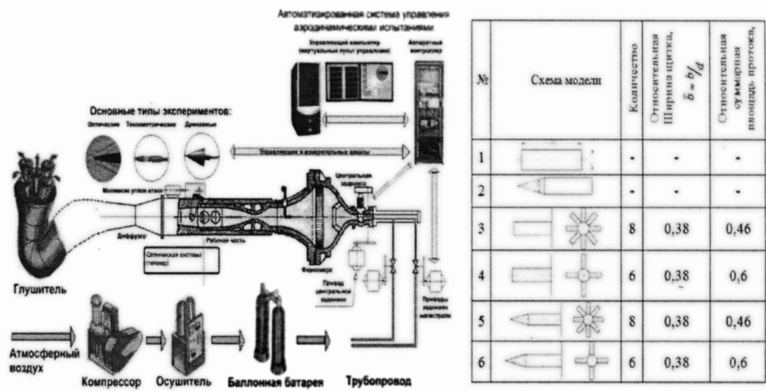


Рис. 3. Схема сверхзвуковой трубы и исследуемые модели

На рис. 4а представлена зависимость относительного донного давления $\bar{p}_{\text{дср}} = (p_{\text{д}} - p_{\infty}) / (0,5 \rho V_{\infty}^2)$ от угла атаки. Наличие системы протока в условиях дозвукового течения ($V_{\infty}=25$ м/с) приводит к эжекции газа из донной области, в результате донное давление уменьшается (рис. 4а). Данные, полученные в процессе физического моделирования при дозвуковой скорости, наглядно демонстрируют существование зависимости между вращением и характером распределения давления в донной области аппарата. Вращение понижает давление за донным срезом аппарата для любых исследуемых кормовых частей, имеющих выемки с вырезами, так и без них (рис. 4б).

По результатам экспериментов при сверхзвуковой скорости ($M_{\infty}=2,7$, $\alpha=0\dots8^{\circ}$) были получены зависимости измеряемого значения донного давления от угла атаки α для исследуемых конфигураций моделей.

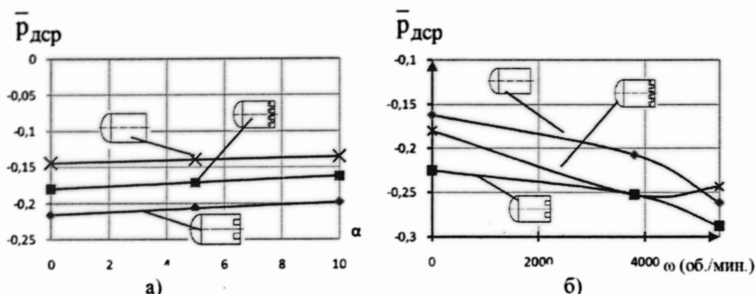


Рис. 4. Изменение донного давления $V_\infty=25$ м/с: а) - $\bar{P}_{\text{дср}}(\alpha)$; б) - $\bar{P}_{\text{дср}}(\omega)$

В той же главе приведен анализ результатов экспериментов по влиянию щитков на аэродинамические коэффициенты ЛА и трансформацию структур течения в донной области в широком диапазоне скорости ($M_\infty=1,2\dots5,1$).

В третьей главе описан алгоритм расчета донного давления на основе метода Годунова С. К. (см. работы Иванова М. Я. и др.). Система уравнений, лежащая в основе численного метода, включает уравнения Навье-Стокса, представлена в работе автора [1].

При численном решении задачи вязкого обтекания ЛА использовался комбинированный подход. Первоначально проводился расчет параметров невязкого обтекания и запись параметров потока вблизи ЛА, затем вызывалась подпрограмма расчета тензора вязких напряжений, и проводился расчет поля течения с учетом вязкостных эффектов. При решении второй задачи производные на границах ячеек, входящие в вязкие члены уравнения движения, выражались через центральные разности по известным параметрам на предыдущем временном слое. Причем, если для представления той или иной производной требовались параметры в соседних ячейках, то они находились с помощью линейной интерполяции по значениям функции в ближайших ячейках. Расчет производных температуры, входящих в уравнения для тепловых потоков, для каждой грани производился аналогично расчету тензора напряжений с использованием расстояния от центра ячейки до оси x .

Начальные условия задавались во всех ячейках, на которые разбита расчетная область. В их качестве можно принять, например, параметры газа в набегающем потоке. Постановка граничных условий сводилась к определению параметров ("больших величин") на гранях ячеек сетки, совпадающих с границей расчетной области. На обтекаемой поверхности тела должны выполняться условия непротекания.

Тестовые расчеты проведены для затупленного конуса при сверхзвуковой скорости. Полученные результаты донного давления хорошо согласуются с экспериментальными значениями, что подтверждает адекватность разработанной методики.

В четвертой главе приведены описание программного комплекса Ansys CFX и его возможностей, численный метод контрольного объема и интегральный метод определения донного давления ЛА с тормозными щитками и с подводом теплоты в донную область.

Математическая модель в Ansys CFX основана на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, которые замыкаются с помощью какой-либо модели турбулентности. Обобщенное уравнение, отражающее законы сохранения, в интегральной форме записывалось в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi \, d\Omega + \int_{\Omega} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS = \int_{\Omega} \Gamma \operatorname{grad} \phi \cdot \vec{n} \, dS + \int_{\Omega} q_{\phi} \, d\Omega, \quad (1)$$

где ϕ - обобщенная переменная $\phi = \{1, u, v, w, k, \omega, h, R\}$, ρ - плотность, u, v, w - составляющие скорости вдоль осей Ox, Oy, Oz , h - энтальпия; Ω - конечный объем, $\vec{V}$ - вектор скорости, dS - дифференциальный элемент площади, Γ - коэффициенты переноса, q_{ϕ} - источниковый член, k - турбулентная кинетическая энергия, ω - удельная скорость диссипации турбулентной энергии, R - тензор рейнольдсовых напряжений, $\vec{n}$ - вектор нормали. В качестве модели турбулентности использовались модели $k - \omega$ SST Ментера.

Расчётная область разбивается на конечное число контрольных объёмов, и решение уравнений сохранения производится для каждого из них. В центре каждого контрольного объёма или на его грани располагается узел расчётной сетки, в котором и производится определение параметров потока. Для каждого контрольного объёма Ω записывается система уравнений сохранения, в которую входят уравнение неразрывности, уравнения движения и уравнение сохранения скалярной величины, описывающее модель турбулентности, а для ряда течений и уравнение энергии.

Для нахождения параметров потока на поверхности контрольных объёмов используются различные схемы интерполяции, использующие значения в узлах (в центрах или на гранях контрольных объёмов). Интегралы, взятые по контрольному объёму или его поверхности, аппроксимируются при помощи одной из известных зависимостей. При подстановке в обобщённое дифференциальное уравнение аппроксимированных значений, получено линейное алгебраическое уравнение, называемое дискретным аналогом исходного уравнения в частных производных. Решение этого уравнения является приближённым решением уравнения, записанного относительно отдельного контрольного объёма. Расчётная сетка в целом, как совокупность контрольных объёмов, порождает систему линейных алгебраических уравнений.

Граничные условия задаются следующим образом. На границе типа «вход потока» параметры течения считаются известными, на границе типа «выход» ставится условие продолжения решения. На оси симметрии задается условие непротекания, на поверхности тела – условие прилипания.

Для получения точного результата расчета отрывного течения и донного давления необходимо, чтобы сетка в области ближнего следа была построена с меньшим шагом, чем в других областях. Были проведены тестовые расчеты и исследования влияния размера ячеек сетки, особенно в области ближнего следа, на значение донного давления для цилиндра с коническим обтеканием. Рассматривались варианты сеток с выделенной областью ближнего следа (длина $2d$, радиус $1,5d$), общее количество тетраэдральных ячеек: 825689, 1206508, 1867975, 2140505. Влияние сетки в области ближнего следа

оказалось значительным, с увеличением количества ячеек в донной области донное сопротивление стремится к неизмененному значению. В дальнейшем расчеты проводились для сетки с 1867975 ячейками. Некоторые результаты расчета представлены на рис.5.

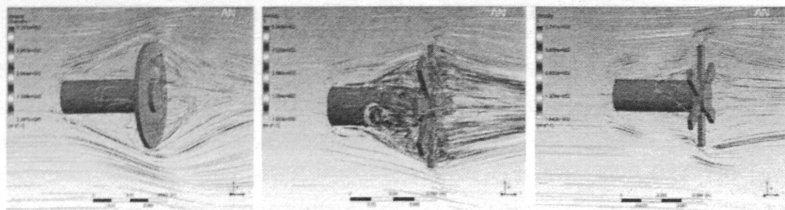


Рис. 5. Обтекания тел со щитковыми устройствами при $M_\infty=2$

В этой же главе представлен интегральный метод определения донного давления ЛА с тормозными щитками и с подводом теплоты в донную область.

В этом случае для расчета параметров течения за донной частью тормозного устройства используют приближенный подход, упрощающий картину обтекания. Рассмотрены две модели течения в донной части.

1. Если отношение площади дна ЛА и тормозного устройства к площади круга, описанного по наружным кромкам тормозного устройства, не превышает некоторого предельного значения, то можно считать, что газ, проходящий в донную область (ближний след) в промежутках между щитками тормозного устройства не нарушает существенно структуру течения в ней. При этом осуществляется как бы подпитка массы газа, циркулирующего в зоне отрыва за ЛА. Частным случаем рассмотренной схемы является обтекание ЛА с тормозным устройством в виде сплошного диска, юбки ("непроницаемые" щитки).

2. Второй случай обтекания донной части ЛА имеет место при больших промежутках между щитками тормозного устройства. Поток отрывается со всех кромок лопастей тормозного устройства и с задних кромок донного среза зонда в промежутках между щитками.

При решении задач о расчете донного давления и подводе теплоты в область отрыва исходят из следующих предпосылок: течение квазиплоское, стационарное, влияние начального пограничного слоя на процесс смешения не учитывается, подвод теплоты осуществляется внутри отрывной области вдоль продольной оси обтекаемого тела, теплообмен с внешней средой за счет теплопроводности отсутствует.

Вычисление донного давления осуществляется в следующей последовательности. Первоначально определяются параметры донного течения при условии отсутствия перетекания газа через протоки между щитками. И для этих условий вычисляется критическая масса газа, при которой происходит перестройка структур течений от типа I к типу II:

$$\Delta I_{MAX} = \frac{k}{k-1} \int_{\eta_{пр}}^{\infty} \frac{\varphi}{1 - Cr_D^2 \varphi^2} d\eta - \frac{k}{k-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varphi^2}{1 - Cr_D^2 \varphi^2} d\eta, \quad (2)$$

где $\Phi = V_x / V_d = 0,5 \cdot (1 + \operatorname{erf} \eta)$; $\eta = \sigma \cdot y / x$; $\sigma = 12 + 2,758 M_d$; M_d - число Маха на внешней границе области смешения; Cr_d - число Крокко; k - отношение удельных теплоемкостей газа.

Если $\Delta I_{\max} > \bar{m}_{\text{злп}}$ (где $\bar{m}_{\text{злп}}$ - относительная масса газа, инжектируемого в донную область через протоки), то решением системы уравнений с использованием метода разделяющей линии тока с учетом массообмена газа в ближний след, определяются параметры течения за тормозным (стабилизирующим) устройством (в этом случае структура течения соответствует типу I).

Если $\Delta I_{\max} < \bar{m}_{\text{злп}}$, то принимается, что на формирование течения в области следа непосредственное влияние оказывают параметры потока перед щитком, т.е. в расчетах принимают, что давление торможения перед донной областью равно давлению в области отрыва перед щитками, а также имеет место взаимное влияние двух соседних щитков, приводящее к уменьшению начального разворота потока между щитками. Поэтому усредненное давление в области следа для структуры потока, соответствующей типу II, определяется как усредненное давление между донным давлением, рассчитываемым по параметрам обтекания верхней кромки щитка и донным давлением, вычисленным по параметрам отрывной зоны перед щитком.

В основу определения донного давления с учетом подвода теплоты положено следующее уравнение:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Phi^2}{(1 - Cr_d^2 \cdot \Phi^2)} d\eta + \frac{q_0 \cdot \sigma \cdot \cos \beta_d \cdot \left(1 - \frac{b \cdot h}{2L \cdot \operatorname{tg} \beta_d}\right) \cdot (k - 1)}{k \cdot p_d \cdot V_d \cdot (1 - Cr_d^2)} = \int_{\eta_{\text{рлп}}}^{+\infty} \frac{\Phi}{(1 - Cr_d^2 \cdot \Phi^2)} \cdot \xi d\eta, \quad (3)$$

где β_d - угол отрыва потока; $h = D - d$ - высота уступа; $\xi = T / T_d \geq 1$ - относительная температура; q_0 - максимальный удельный тепловой поток; L - длина центрального тела; $b = 0 \dots 0,5$ - коэффициент, характеризующий изменения теплового потока вдоль продольной оси центрального тела.

Алгоритм решения задачи следующий. Задаваясь углом β_d , рассчитывается структура обтекания обратного конуса с углом $\beta_k = \beta_d$ и определяется давление p_d и число M_d . Используя интегральное соотношение (3) и соотношение для теплового потока, рассчитываются параметры течения на разделяющей линии тока: $S_{\text{рлп}}$, $M_{\text{рлп}}$, $p_{\text{рлп}}$, а из полученной структуры течения определяется давление за скачком уплотнения. Угол β_d при котором выполняется условие $p_{\text{ск}} = p_{\text{орлп}}$ является искомым. Этому углу соответствуют определенные значения давления, числа Маха и т.д. в донной области.

Пятая глава посвящена результатам расчетов донного сопротивления (донного давления) и влияния на него различных компоновочных параметров, среди них: щитковые тормозные устройства, выемки, выемки с вырезом, выемки с перфорацией, удлинение, форма носовой части, а также подвод теплоты в донную часть и вращение корпуса ЛА. Значение донного давления за кормовым срезом принимается как среднее по площади донное давление.

Расчет донного сопротивления тел со щитковыми устройствами. Были проведены расчеты обтекания тел вращения со щитковыми устройствами

при сверхзвуковой скорости $M_\infty=2$. Щитки имеют постоянную высоту $\bar{h} = h/D = 1,06$. Определено влияние количества щитков при условии, что неизменными оставались ширина и высота щитков. Полученные результаты расчета показали, что отсос газа из передней отрывной зоны, обусловленный потоками между щитками, и приток его в донную область приводит к изменению донного давления за цилиндром и щитками. Существует критическое значение относительной площади протока $\bar{S}_{\text{крит}}$, выше которого единое отрывное течение в донной области разрушается. Относительная площадь протока определяется по формуле $\bar{S} = (1 - \sum S_{\text{щитк}}) / S_{\text{диск}}$. При $\bar{S} < \bar{S}_{\text{крит}}$, с увеличением площади протока, осредненное донное давление возрастает и достигает максимального значения. Распределения давления за щитками и цилиндром отличаются незначительно, можно принять их одинаковыми. При $\bar{S} > \bar{S}_{\text{крит}}$, донное давление уменьшается при увеличении площади протока, при этом донное давление за щитками значительно отличается от донного давления за цилиндром.

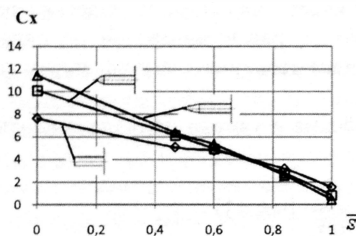


Рис. 6. Зависимость C_x от относительной площади протока

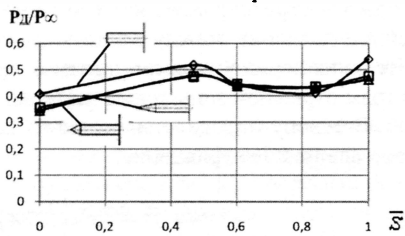


Рис. 7. Зависимость относительного донного давления от относительной площади протока

Исследование влияния количества щитков при одинаковой относительной площади протока показало, что при одной и той же площади протока, изменение количества щитков практически не влияет на значение осредненного донного давления. Также проводились расчеты по влиянию положения щитков на поверхности длинного корпуса тела. Результаты расчетов выявили, что при изменении положения щитков на корпусе тела, донное давление имеет минимальное значение, если щитки находятся у донного среза, а если щитки расположены на расстоянии половины высоты щитка, донное давление имеет максимальное значение.

Влияние выемки на донное сопротивление. На рис. 8 и рис. 9 представлены результаты расчета влияния выемки на донное сопротивление при дозвуковой и сверхзвуковой скоростях. Установлено, что наличие выемки при малых дозвуковых скоростях ($M_\infty < 0,3$) практически не изменяло донное давление. При $M_\infty > 0,3$ и сверхзвуковой скорости донная выемка снижает донное сопротивление (до 6%). Результаты расчетов показали, что с возрастанием относительной глубины выемки $\bar{b} = b/R$, донное давление, действующее на кормовой срез, увеличивается, и существует предельное значение относитель-

ной глубины $\bar{b} = (1-1,2)R$, выше которого значение донного сопротивления $C_{хд}$ практически не меняется (рис. 9).

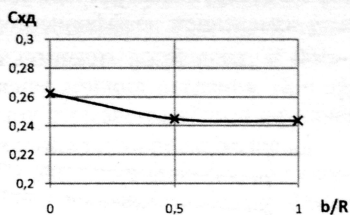


Рис. 8. Зависимость $C_{хд}$ от глубины выемки при $M_{\infty}=0,4$

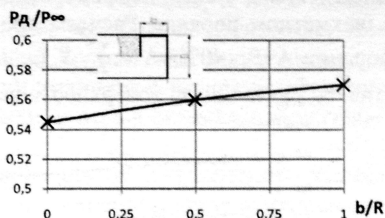
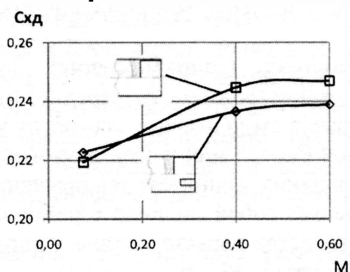
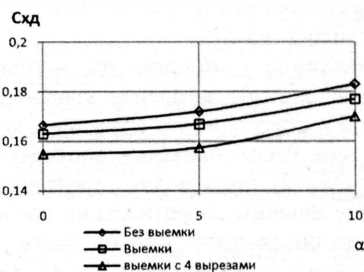


Рис. 9. Зависимость относительной донной давления от глубины выемки при $M_{\infty}=2$

Значение $C_{хд}$ определяется также конфигурацией выемки, что оказывает влияние на распределение скорости и давления в зоне отрывного течения. Расчеты показали, что для выемки цилиндрической формы кривая распределения давлений в донном срезе аналогична кривой в случае обтекания без выемки, для выемки сферической формы кривая изменяется качественно. Это объясняется тем, что торможение потока в угле цилиндрической выемки вызывает повышение давления в ней, а при сферической выемке такое торможение отсутствует и на донном срезе давление плавно уменьшается от центра донного среза к стенке цилиндра.



а)



б)

Рис. 10. Коэффициент донного сопротивления: а)- дозвуковая скорость; б) – $M_{\infty}=2$

Влияния выемки с вырезом на донное сопротивление. На рис. 10 представлены результаты расчета коэффициента донного давления для тела без выреза и с вырезом при до- и сверхзвуковых скоростях. При дозвуковой скорости проведены расчеты донного сопротивления для различных скоростей $M_{\infty}=0,04...0,6$. Показано, что при малой дозвуковой скорости ($M_{\infty}<0,3$), донное сопротивление уменьшается незначительно при наличии вырезов (рис. 10а). В диапазоне изменения скоростей $M_{\infty}=0,3...0,6$ и при сверхзвуковой скорости ($M_{\infty}=2$) вырезы снижают донное сопротивление на 6-7%.

Влияние перфорации при сверхзвуковой скорости. Существенное влияние на величину донного давления может оказать такой фактор, как есте-

ственное перетекание газа с поверхности корпуса в застойную область за донным срезом, за счет чего давление на дне повышается. Боковая поверхность донной выемки была перфорирована круглыми отверстиями, расположенными в шахматном порядке. Расчеты проведены с изменением коэффициентов перфорации $\Delta=5...40\%$, ($\Delta = \sum S_{\text{отвер}} / S_{\text{поверх}} \cdot 100\%$, здесь $S_{\text{отвер}}$ - площадь отверстия, $S_{\text{поверх}}$ - площадь поверхности выемки).



Рис. 12. Зависимость относительного донного давления от угла атаки

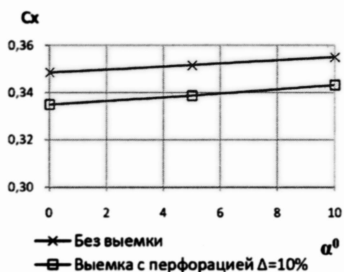


Рис. 13. Зависимость коэффициента полного сопротивления от угла атаки

Полученные результаты расчетов показали что, наличие перфорации существенно снизило донное сопротивление, но при этом волновое сопротивление и сопротивление трения увеличивались. При степени перфорации $\Delta=10\%$, полное сопротивление уменьшилось на 7%, а значение донного сопротивления уменьшилось на 20%.

Влияние удлинение на донное давление (сопротивление). Донное давление за телом вращения зависит от параметров потока перед кормовой кромкой и структуры его обтекания, которые в свою очередь зависят от удлинения тела. Расчет проведен при дозвуковой ($V_\infty=25$ м/с) и сверхзвуковой скоростях ($M_\infty=2$). Модель для определения влияния удлинения тел вращения на значение донного сопротивления представляет собой цилиндр с различными формами обтекателей носовой части. В качестве характеристики удлинения тела используется значение удлинения цилиндра $\lambda_{ц} = L_{ц} / d$.

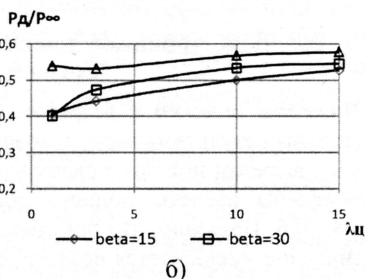
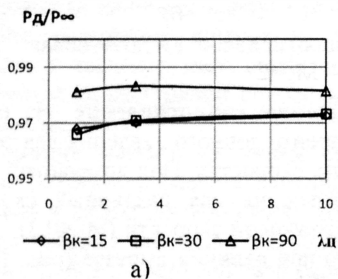


Рис. 14. Зависимость относительного донного давления от удлинения цилиндрической части: а) - $V_\infty=25$ м/с; б) - $M_\infty=2$

На рис. 14а показана зависимость коэффициента донного давления от значения удлинения при $V_\infty=25$ м/с. У моделей с коническим обтекателем,

донное давление увеличивается при увеличении λ_d , а у модели с торцевым обтекателем, донное сопротивление увеличивается незначительно. Это происходит из-за того, что у тел вращения с коническим обтекателем, течение вблизи излома безотрывное. Именно в таком режиме, чем больше удлинение, тем больше толщина пограничного слоя у донной кромки, что также вызывает увеличение донного давления. При обтекании цилиндра с торцевым обтекателем поток отрывается вблизи передней кромки, и отрыв оказывает значительное влияние на донное давление.

На рис. 146 видно, что при сверхзвуковом потоке с увеличением удлинения донное давление повышается за дном тела. Это объясняется влиянием вязкости потока на донное давление. Чем больше удлинение тела, тем больше толщина пограничного слоя. При $\lambda_d > 15$, изменение удлинения не оказывает влияния на донное сопротивление. Донное давление тел с большим удлинением практически не зависит от формы головной части и по величине постоянно в различных точках потока за дном тела.

Влияние формы носовой части на донное давление. Были проведены расчеты влияния угла полураствора конического обтекателя тел вращения при дозвуковой и сверхзвуковой скоростях. Полученные результаты показали, что влияние формы носовой части на донное давление несет сложный характер в зависимости от удлинения цилиндрической части. Во всех исследуемых случаях, у тела с торцевым обтекателем донное давление больше, чем у тела с коническим обтекателем.

Влияние подвода теплоты в донную область. Расчет течения за кормовым срезом ЛА с учетом подвода теплоты проведен методом Годунова и интегральным методом. Математическое моделирование нагрева проводилось заданием температуры во внутренних ячейках стенки. Результаты расчетов обтекания тел вращения при нулевом угле атаки и числе Маха $M_\infty=3$, представленные на рис.15, позволяют сделать вывод о повышении донного давления и, как следствие, снижении донного сопротивления при подводе теплоты в ближний след.

На рис. 15а приведены расчетные зависимости относительного приращения донного давления $\epsilon = [(p_d - p'_d)/p'_d]100\%$ (где p_d - статическое донное давление при подводе теплоты в донную область; p'_d - донное давление при адиабатическом процессе). Зависимость $\epsilon(T)$ в данном диапазоне изменения избыточной температуры нагрева до 2000 К, полученная расчетным методом имеет линейный характер. Дополнительно, в целях сравнения расчетных значений с экспериментальными данными (работы Ермолаева И. К. и Зубкова А. И.), были проведены расчеты (рис. 15б) для случая подвода теплоты посредством нагреваемого стержня, расположенного перпендикулярно кормовому срезу. С увеличением подвода теплоты в область ближнего следа значение ϵ (донное давление) возрастает, при этом зависимость донного давления от относительного значения также близка к линейной (здесь Q , Q_0 – соответственно теплота, подводимая в область ближнего следа и теплота, рассчитанная по параметрам невозмущенного течения).

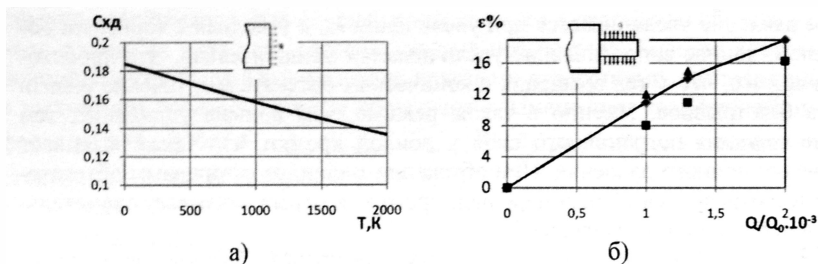


Рис. 15. Зависимость коэффициента донного сопротивления (а) и относительного приращения донного давления ε (б) от температурных фактов(б): — ◆ - численный расчет; ▲ - расчет по интегральному методу; ■ - экспериментальные данные

Влияние вращения ЛА на донное давление. Вращение кормовой части ЛА сопровождается изменением состояния пограничного слоя на обтекаемой поверхности, формированием сложной структуры отрывного течения в донном следе и, как следствие, изменением аэродинамических характеристик аппарата в целом. Были получены результаты численного моделирования вязкого ламинарного сверхзвукового обтекания тела при нулевом угле атаки и числе Маха $M_\infty=2$. Расчетная модель представляет собой цилиндр с затупленным конусом с углом полураствора $\beta=15^\circ$, радиус затупления $\bar{r}_0=2r_0/D=0,343$, длина вращающейся кормовой части $\bar{l}=l_{вращ.}/l_{цил.}=0,5$, диапазон скорости вращения корпуса $\omega=0 \dots 10000$ (об/мин).

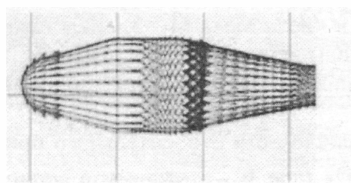


Рис. 16. Профиль скорости

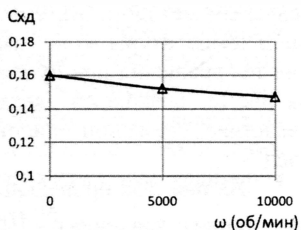


Рис. 17. Зависимость $C_{хд}$ от скорости вращения

Проведенные расчеты показали, что вращение кормовой части ЛА с $\omega=10000$ (об/мин) способствует незначительному изменению донного давления.

В заключении диссертационной работы приводятся основные выводы по результатам проведенных исследований в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен комплекс экспериментальных аэродинамических исследований при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания тел, включающих дренажный, визуализационный и весовой эксперименты с использованием специально созданных моделей, позволяющих изменять компоновку, геометрические параметры ЛА и кормовой части

2. Адаптирован метод Годунова для расчета донного сопротивления тел.

3. Создан алгоритм определения донного сопротивления тел вращения с учетом управления обтеканием с использованием программного комплекса Ansys.

4. Разработан алгоритм расчета донного давления интегральным методом тел с щитковыми устройствами и теплоподводом в донную область.

5. Установлено влияние щитковых устройств на донное давление при сверхзвуковой скорости. Найдена зависимость донного давления от перестройки от единой структуры отрывного течения перед ОУ к автономным областям отрыва потока. При небольшой площади протока $\bar{S} < 0,4$ не разрушая единое отрывное течение в донной области, донное давление изменяется линейно в зависимости от относительной площади протока.

6. Наличие выемки в донном срезе снижает донное сопротивление до 5-6% при до- и сверхзвуковых скоростях. Наличие выемки с вырезом снижает донное давление до 7%.

7. Наличие перфорации в виде отверстия с коэффициентом перфорации 10% при сверхзвуковой скорости снижает донное сопротивление до 20-30%, а полное сопротивление на 6-7%.

8. С увеличением удлинения ЛА в диапазоне $\lambda_d = 1 \dots 15$, донное давление увеличивается при до- и сверхзвуковых скоростях. При удлинении $\lambda_d > 15$ изменение удлинения не оказывает влияния на донное сопротивление.

9. Подвод теплоты приводит к уменьшению донного сопротивления. В рассмотренном диапазоне изменения избыточной температуры (до 2000K) уменьшение донного сопротивления является линейной функцией от температуры. Степень повышения донного давления может достигать 15...18%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ РАБОТАХ

1. Экспериментальное и математическое моделирование процессов обтекания летательных аппаратов при управлении течением в ближнем следе / Ч. Х. Чин [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. 2011. №1. С. 71-81.
2. Калугин В. Т., Чернуха П. А., Чин Ч. Х. Моделирование вязкого обтекания вращающихся летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. Аэромеханика и прочность. 2010. № 151. С. 17-22.
3. Мичкин А.А., Чин Ч. Х. Влияние вращения летательного аппарата на параметры течения в ближнем следе // Научный Вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2011. №172. С. 190-195.
4. Калугин В. Т., Чернуха П. А., Чин Ч. Х.. Экспериментальное и математическое моделирование процесса обтекания летательных аппаратов с тормозными устройствами // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. МГТУ им. Н. Э. Баумана 2012. № 11. С. 217-232.
5. Бобков Н.С., Мичкин А.А., Чин Ч.Х. Моделирование процессов обтекания вращающихся летательных аппаратов малого удлинения дозвуковым потоком // Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (23-27 мая 2011 г., Звенигород). М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С.377–378.
6. Мичкин А.А., Чин Ч.Х. Анализ влияния вращения летательного аппарата на аэродинамические характеристики при отрывном режиме его обтекания // Будущее машиностроения России: Сборник трудов Всероссийской конференции молодых учёных. М., 2011. С. 245-246.