

На правах рукописи

КАРТАШЕВА Марина Анатольевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТЯХ ОТРЫВА
ПОТОКА ЗА ЭЛЕМЕНТАМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Ваулин Сергей Дмитриевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Спиридонов Евгений Константинович,
кандидат технических наук, доцент
Губерт Александр Викторович.

Ведущая организация – Открытое акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева»,
г. Миасс.

Защита состоится 18 декабря 2008 г., в 10 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.298.14 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, ауд. 1013.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 14 ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Л.Б. Соколинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что одной из важнейших проблем в развитии современной летательной техники является исследование высокоинтенсивных физических, прежде всего газодинамических, процессов, протекающих при движении современных летательных аппаратов со сверхзвуковыми (гиперзвуковыми) скоростями в плотных слоях атмосферы.

Особенный интерес, как наименее изученную область в данном направлении исследований, представляет определение характеристик течения газа в отрывных областях за элементами гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА).

Возникновение областей отрыва потока при движении летательного аппарата связано с двумя основными типами течения: с внешним обтеканием летательного аппарата, движущего с большой (гиперзвуковой) скоростью и истечением рабочего тела из соплового блока двигательной установки (ДУ).

В диссертационной работе основное внимание уделено ГЛА, совершающим полет в плотных слоях атмосферы, что приводит к развитию отрывной области за торцем обтекаемого летательного аппарата в районе днища. Наличие отрывной донной области ГЛА существенным образом влияет на его аэродинамические характеристики, а также параметры теплообмена в отрывной донной области течения. К таким аппаратам следует отнести пилотируемые летательные аппараты, осуществляющие спуск как по баллистической траектории, так и посадку по самолетному типу на взлетно-посадочную полосу, спускаемые модули автоматических летательных аппаратов, а также летательные аппараты, осуществляющие беспилотный управляемый полет.

Развитие другого типа области отрыва потока связано с применением в ДУ ГЛА кольцевых сопловых блоков. Кольцевое сопло представляет собой осесимметричное газодинамическое устройство, предназначенное для создания тяги ДУ, состоящее в общем случае из центрального тела и внешней обечайки, и имеющее кольцевое минимальное сечение, плоскость которого составляет некоторый угол с направлением оси сопла.

Возможность и эффективность применения ГЛА определяется степенью исследованности газодинамической структуры течения вокруг летательного аппарата и за его элементами (в том числе за торцем укороченного центрального тела ДУ ГЛА), наличием развитых методов математического моделирования процессов в отрывных областях потока и методов определения газодинамических параметров отрывной донной области, а также методов проектирования ГЛА и его элементов различных геометрических и газодинамических конфигураций.

Развитие отрывной области, ее структура и параметры как за донным торцем ГЛА, так и за торцем укороченного центрального тела кольцевого сопла, одинаковы. Поэтому для исследования характеристик таких областей возможно применение одного подхода, основанного на математическом моделировании газодинамических процессов в областях отрыва потока.

Целью диссертационной работы является разработка методов исследования характеристик отрывной области течения, параметры которой необходимы для определения аэродинамических и газодинамических характеристик гиперзвуко-

вого летательного аппарата, в том числе двигательной установки с кольцевым соплом, и разработка методологии профилирования кольцевого сопла оптимальной конфигурации, на основе исследования физических процессов в отрывной области течения и математического моделирования исследуемых процессов.

Поставленная цель достигается:

- исследованием течения в отрывных зонах, возникающих при обтекании элементов летательных аппаратов, включая ДУ, движущихся со сверхзвуковыми (в том числе гиперзвуковыми) скоростями;
- разработкой математической модели газодинамических процессов в отрывной донной области за телом, обтекаемым потоком со сверхзвуковой (в том числе гиперзвуковой) скоростью;
- разработкой вычислительных алгоритмов расчета течений газа в отрывной донной области за элементами ГЛА;
- математическим моделированием нестационарных газодинамических процессов в ближнем следе за элементами ГЛА, в том числе за укороченными центральными телами кольцевых сопел;
- разработкой методики профилирования оптимальных по тяге кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом;
- постановкой вариационной задачи построения кольцевого сопла оптимальной геометрической конфигурации, решаемой с помощью методов нелинейного программирования;
- профилированием оптимальных кольцевых сопел внешнего расширения, имеющих в поле течения области отрыва потока.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что разработаны методические подходы к исследованию газодинамических характеристик отрывной области течения и определения параметров за элементами ГЛА, базирующиеся на анализе режимов отрывной области и ближнего следа с учетом большинства значимых физических процессов и факторов.

Предложена комплексная модель отрывной донной области за элементами ГЛА, основанная на методе «разделяющей линии тока» и модифицированной модели Корста, позволяющая, в отличие от известных, совместно учесть ряд новых факторов, в частности, осесимметричность течения, толщину начального пограничного слоя в точке отрыва потока, работу сил трения в слое смещения и протяженность области повышения давления в точке присоединения потока на оси симметрии обтекаемого элемента ГЛА (либо кольцевого сопла ДУ).

Впервые проведено комплексное математическое моделирование газодинамических процессов в отрывной области за элементами ГЛА, движущегося в плотных слоях атмосферы, при различных условиях обтекания, соответствующих траекториям полета перспективных летательных аппаратов.

Впервые проведено комплексное математическое моделирование газодинамических процессов в отрывной донной области за торцем укороченного центрального тела кольцевого сопла внешнего расширения ДУ.

Разработана методика профилирования оптимальных по тяговым характеристикам кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным те-

лом, в которой для определения величины донной тяги впервые использована предложенная модель отрывной донной области.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задачи исследования, согласованием результатов расчета тестовых и методических задач с результатами расчетов по методикам других авторов и экспериментальными данными.

Теоретическая ценность диссертационной работы заключается в разработке методики определения параметров отрывных областей течения за элементами ГЛА на основе системного подхода к исследованию газодинамических параметров и анализа режимов отрывной донной области и ближнего следа с учетом большинства значимых физических процессов и факторов, влияющих на параметры рассматриваемой области за обтекаемым телом. В процессе проведения численных исследований и решения прикладных задач проведено математическое моделирование течений газа в результате которого выявлены особенности параметров течения в отрывных областях за элементами ГЛА и ДУ с кольцевыми соплами с учетом всех значимых физических факторов.

Разработан пакет прикладных программ для математического моделирования газодинамических параметров отрывной донной области как комплекс взаимосвязанных вычислительных алгоритмов, функциональное наполнение которого создано по модульному принципу, что обеспечивает гибкость построения пакета прикладных программ в соответствии с рассматриваемой задачей.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что с помощью разработанных и использованных алгоритмов впервые решен ряд прикладных задач, связанных с эффективным применением ГЛА, движущихся в плотных слоях атмосферы (в том числе ДУ с кольцевыми соплами внешнего расширения с укороченным центральным телом).

Полученные результаты могут быть использованы в научно-исследовательских, проектных и конструкторских организациях при разработке летательных аппаратов (в том числе гиперзвуковых) различного назначения и двигательных установок с кольцевыми соплами.

Основные положения, выносимые на защиту. В результате исследований по поставленной проблеме на защиту выносятся следующие основные положения:

- комплексная математическая модель для исследования газодинамических процессов и определения характеристик отрывной области за элементами гиперзвукового летательного аппарата, использующая метод «разделяющей линии тока», отличающаяся от известных учетом осесимметричности течения, толщины начального пограничного слоя в точке отрыва потока, работы сил трения в слое смешения и протяженности области повышения давления в точке присоединения потока на оси симметрии обтекаемого элемента летательного аппарата;
- пакет прикладных программ для математического моделирования течений в областях отрыва потока с учетом всех значимых физических процессов и факторов, действующих в рассматриваемых областях течения, реализующий предложенную модель отрывной области течения;

- результаты математического моделирования течения газа в отрывной области за летательным аппаратом, движущимся в атмосфере с гиперзвуковой скоростью;
- результаты математического моделирования течения газа в отрывной области за торцем укороченного центрального тела кольцевого сопла внешнего расширения двигательной установки гиперзвукового летательного аппарата;
- методика профилирования оптимальных по тяговым характеристикам кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом, включающая постановку и решение вариационной задачи построения оптимального сопла с помощью методов нелинейного программирования и метода прямой оптимизации;
- результаты профилирования оптимального кольцевого сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом с учетом величины донной тяги, определяемой параметрами отрывной донной области, в условиях заданных ограничений на их геометрические характеристики и рабочие параметры.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на Межотраслевых научно-практических конференциях «Снежинск и наука» (г. Снежинск, 2000, 2003), Международных конференциях «VII, VIII, IX Забабахинские научные чтения» (г. Снежинск, 2003, 2005, 2007), Международных научных конференциях Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2007, г. Челябинск; ПаВТ'2008, г. Санкт-Петербург), Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (г. Челябинск, 2007), Всероссийской научной конференции «Математика.Механика.Информатика» (г. Челябинск, 2006), Межрегиональном совете по науке и технологиям (г. Миасс, 2005).

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертационной работе, опубликовано 24 работы (из них 5 без соавторов), в том числе 4 статьи, 6 докладов, 12 тезисов докладов, 1 описание программы, получено 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Статьи [1,2] опубликованы в научном журнале «Вестник «ЮУрГУ». Серия «Машиностроение», включенном ВАК в перечень журналов, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. В статье [2] М.А. Карташевой принадлежат математическая модель и вычислительный алгоритм, соавторам – постановка задачи и техническая схема объекта. В работах [3,4,6,10-23] М.А. Карташевой принадлежат математическая модель отрывной донной области и результаты математического моделирования течений за элементами ГЛА и ДУ. А.Л. Карташеву принадлежит постановка задачи исследования. В работах [8,9] М.А. Карташевой принадлежит вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ, соавторам – постановка задачи и модели сложных инженерных объектов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, в котором сформулированы основные выводы по работе. Общий объем диссертации составляет 168 страниц, в том числе 102 страницы текста, 47 страниц с рисунками, 19 страниц со списком использованных источников, включающим 158 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертационной работы, ее цель, научная новизна и практическая ценность исследований, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор современного состояния исследований в области определения характеристик газодинамических процессов в областях отрыва потока. Одной из важнейших проблем, связанных с исследованием аэродинамических режимов, реализующихся при полете летательного аппарата с гиперзвуковой скоростью в плотных слоях атмосферы, является исследование характеристик отрывной области течения, возникающей, как правило, за обтекаемым телом в районе днища (донного торца), к данному случаю также можно отнести отрывные зоны, возникающие в двигательных установках летательных аппаратах, в частности за торцем укороченного тела кольцевого сопла.

Приведена постановка задачи исследования по теме диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены проблемы математического моделирования течений газа в отрывной области за элементами летательных аппаратов (прежде всего ГЛА различных конфигураций и в кольцевых соплах с укороченным центральным телом).

Отрывные течения представляют собой отдельный класс течений, математическое моделирование которых представляет собой достаточно сложную многофакторную задачу. Решение данной задачи требует, как правило, построения универсального алгоритма, позволяющего рассчитывать характеристики отрывного течения в широком диапазоне параметров течения. При этом, одной из важнейших задач, которую необходимо решить перед постановкой математической задачи, является выделение различных типов областей отрыва потока.

Для выделения типов отрывных течений предлагается использовать два подхода: «геометрический» и «газодинамический». «Геометрический подход» к классификации типов областей отрыва потока предполагает анализ параметров отрывного течения в зависимости от формы обтекаемого тела в месте отрыва потока (угла наклона поверхности элемента летательного аппарата к его продольной оси).

Указанный подход удобен для предварительного анализа структуры отрывной области течения, так как определяет тип области течения только по углу наклона вектора скорости в сечении отрыва, не требуя детального анализа структуры области отрыва потока.

«Газодинамический подход» заключается в исследовании ударно-волновой структуры отрывной области течения. Такой подход позволяет исследовать особенности потока, определяемые свойствами среды и рабочими параметрами в сечении отрыва. Принципиальным отличием данного подхода является возможность детального моделирования элементов области отрыва потока, что позволяет разрабатывать различные модели областей отрыва потока. Пример детализации ударно-волновой структуры течения вокруг ГЛА представлен на рис. 1.

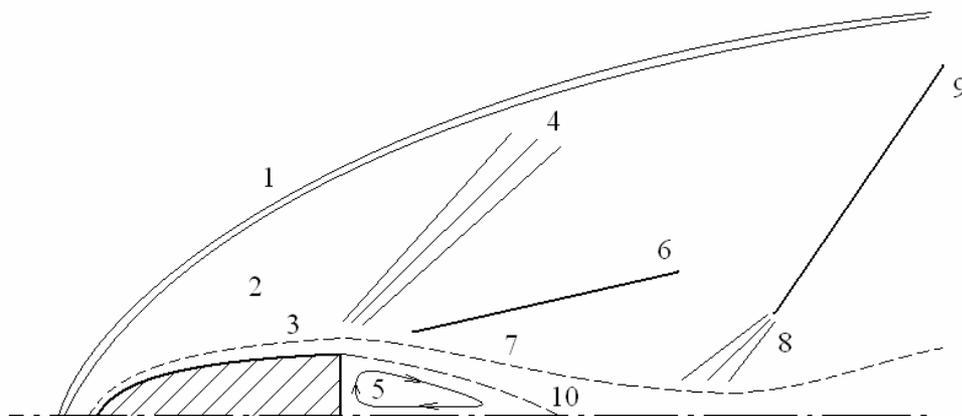


Рис. 1. Схема течения около летательного аппарата:

1 – головная ударная волна, 2 – область невязкого течения, 3 – пограничный слой, 4 – веер волн разрежения, 5 – область возвратно-циркулярного течения, 6 – висячий скачок уплотнения, 7 – вязкий слой смешения, 8 – волны сжатия, 9 – замыкающий скачок уплотнения, 10 – разделяющая линия тока

Другой, не менее интересный случай отрывной области течения реализуется в кольцевых соплах внешнего расширения с укороченным центральным телом. Расчетная схема такого сопла представлена на рис. 2.

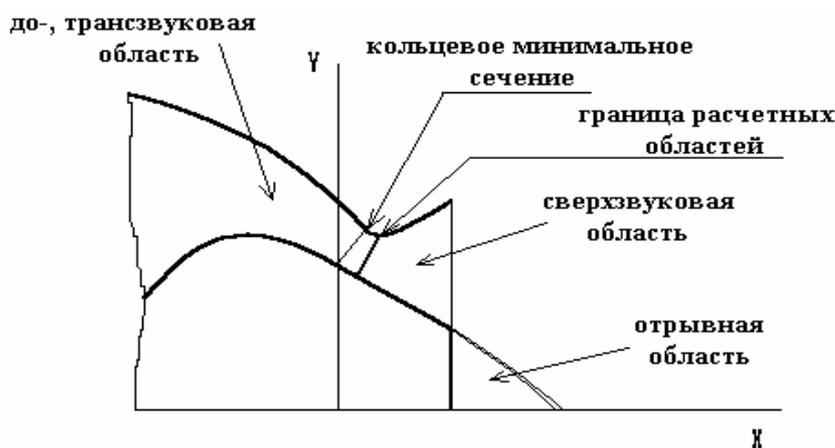


Рис. 2. Расчетная схема кольцевого сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом

В целом, днище летательного аппарата, также как и торец укороченного центрального тела, представляют собой элементы гиперзвукового летательного аппарата, обтекание которых происходит с образованием областей отрыва потока, и которые являются предметом исследования настоящей диссертационной работы.

Для расчета параметров течения в отрывной области возможно использование как прямого численного моделирования с помощью различных численных методов, реализованных в вычислительных алгоритмах, так и создание моделей отрывной области течения, для реализации которых в виде вычислительного алгоритма необходимы характеристики рабочей среды в сечении отрыва потока: параметры внешнего невязкого течения, параметры пограничного слоя, а также физические характеристики среды.

Для проведения математического моделирования рассмотрена нестационарная система уравнений газовой динамики в интегральной форме, описывающая осесимметричное течение идеального газа:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\sigma} y \rho dx dy + \oint_{\Gamma} y \rho (u dy - v dx) &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\sigma} y \rho u dx dy + \oint_{\Gamma} y ((\rho u^2 + p) dy - \rho u v dx) &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\sigma} y \rho v dx dy + \oint_{\Gamma} y (\rho u v dy - (\rho v^2 + p) dx) &= \iint_{\sigma} p dx dy, \\
 \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\sigma} y \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dx dy + \oint_{\Gamma} y \rho \left(\frac{p}{\rho} + e + \frac{V^2}{2} \right) (u dy - v dx) &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ – плотность газа; p – давление газа; u, v – осевая и радиальная компоненты вектора скорости \vec{V} ; x, y – осевая и радиальная координаты; $e = \frac{1}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho}$ – удельная внутренняя энергия газа; t – время; σ – произвольная замкнутая область в плоскости X, Y с границей Γ .

Вопрос о количестве граничных условий для рассматриваемой системы уравнений решается на основе анализа ее характеристических свойств. На стенках ставится условие непротекания $V_n=0$; на границе струи задается давление $p = p_n$; на входной дозвуковой границе должны быть поставлены три граничных условия, в качестве которых используется постоянство энтропии $S = \text{const}$, полной энтальпии $i_o = \text{const}$, распределение угла наклона вектора скорости $\Theta_* = \Theta_*(x, y)$. На сверхзвуковой входной границе необходимо задание всех параметров течения. Выходная граница выбирается таким образом, чтобы нормальная к границе составляющая скорости была сверхзвуковой. Граничных условий в этом случае не требуется.

В качестве уравнения состояния рассматриваемого газа принято уравнение состояния совершенного газа:

$$p = \rho R_{\text{газ}} T, \tag{2}$$

где p – давление газа; ρ – плотность газа; $R_{\text{газ}}$ – газовая постоянная; T – температура газа.

Расчет параметров до-, трансзвукового течения проводится методом установления по схеме С.К. Годунова–В.П. Колгана.

Для расчета течений в сверхзвуковых областях потока использована система интегральных уравнений:

$$\frac{d}{dx} \int_{y_-}^{y_+} \vec{a} dy = \left(\vec{a} y' - \vec{b} \right) \Big|_{y_-}^{y_+} + \int_{y_-}^{y_+} \vec{f} dy, \tag{3}$$

где векторы-столбцы определяются равенствами:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \end{pmatrix}, \quad \vec{f} = -\frac{\rho}{y} \begin{pmatrix} v \\ uv \\ v^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где y^+, y^- – верхняя и нижняя границы потока соответственно.

Система (3) замыкается условием постоянства полной энтальпии:

$$\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} + V^2 = \frac{k+1}{k-1}, \quad (5)$$

или интегральным законом сохранения энергии:

$$\frac{d}{dx} \int_{y^-}^{y^+} (2i + V^2) \rho u dy = (uy' - v)(2i + V^2) \rho \Big|_{y^-}^{y^+} - \int_{y^-}^{y^+} \frac{\rho v}{y} (2i + V^2) dy, \quad (6)$$

где $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ – модуль вектора скорости; $i = i(p, \rho)$ – удельная энтальпия, решаемая методом М.Я. Иванова–А.Н. Крайко–Н.В. Михайлова, являющимся стационарным аналогом схемы С.К. Годунова.

Для расчета до-, трансзвукового течения (в том числе и для прямого численного моделирования отрывной области течения) использована система нестационарных уравнений осесимметричного течения:

$$\begin{aligned} \int_{\tau(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau &= - \int_{s(t)} (\rho \vec{V})_n ds, \\ \frac{d}{dt} \int_{\tau(t)} \rho \vec{V} d\tau &= - \int_{s(t)} p \vec{n} ds, \\ \frac{d}{dt} \int_{\tau(t)} \rho E d\tau &= - \int_{s(t)} (\rho \vec{V})_n ds, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\tau(t)$ и $s(t)$ – соответственно объем и поверхность лагранжевой ячейки; \vec{V} – скорость потока; E – удельная полная энергия, решаемая с помощью метода крупных частиц. Использование данного метода позволяет моделировать сложные картины обтекания осесимметричных тел различной формы в сжимаемом газе в более широком диапазоне скоростей потока.

Расчет параметров турбулентного пограничного слоя проводится с помощью интегрального метода С.С. Кутателадзе–А.И. Леонтьева.

Расчет параметров течения в отрывной области может быть осуществлен различными способами. Они могут быть определены как моделированием течения в отрывной области с помощью численных методов, так и посредством специально разработанных моделей. Математическое моделирование газодинамических процессов с помощью численных методов, в частности методов сквозного счета, позволяет определить параметры течения, не выделяя особенностей (разрывов) параметров потока. Однако, при использовании разностных схем, адекватно описывающих течение в основном потоке газа, обтекающем элементы ГЛА, где числа

Рейнольдса составляют $Re \sim 10^5 \div 10^7$, для расчета параметров отрывной области, где велико влияние сил вязкости и $Re \sim 10^2 \div 10^4$, необходимо внести изменения в вычислительный алгоритм, реализующие учет возникающих в этой области течения вязких эффектов. В этом случае расчет всего поля течения требует разработки как минимум двух вычислительных алгоритмов, что существенно усложнит задачу моделирования процессов в рассматриваемой области течения. В ряде случаев возможно успешное применение вычислительных алгоритмов, основанных на конечно-разностных методах, для моделирования процессов в отрывной области потока за торцем укороченного центрального тела без учета вязких эффектов.

Второй способ расчета параметров отрывной области заключается в разработке специальных приближенных методов расчета параметров отрывной области с использованием упрощающих положений, аналитических соотношений и эмпирических формул.

Предложена комплексная модель течения в отрывной донной области, основанная на модифицированной модели Корста, отличающаяся от известных учетом осесимметричности течения, толщины начального пограничного слоя в точке отрыва, работы сил трения в слое смешения и протяженности области повышения давления в точке присоединения потока на оси симметрии кольцевого сопла.

Схема построения модели и ее основные положения заключаются в следующем (рис. 3).

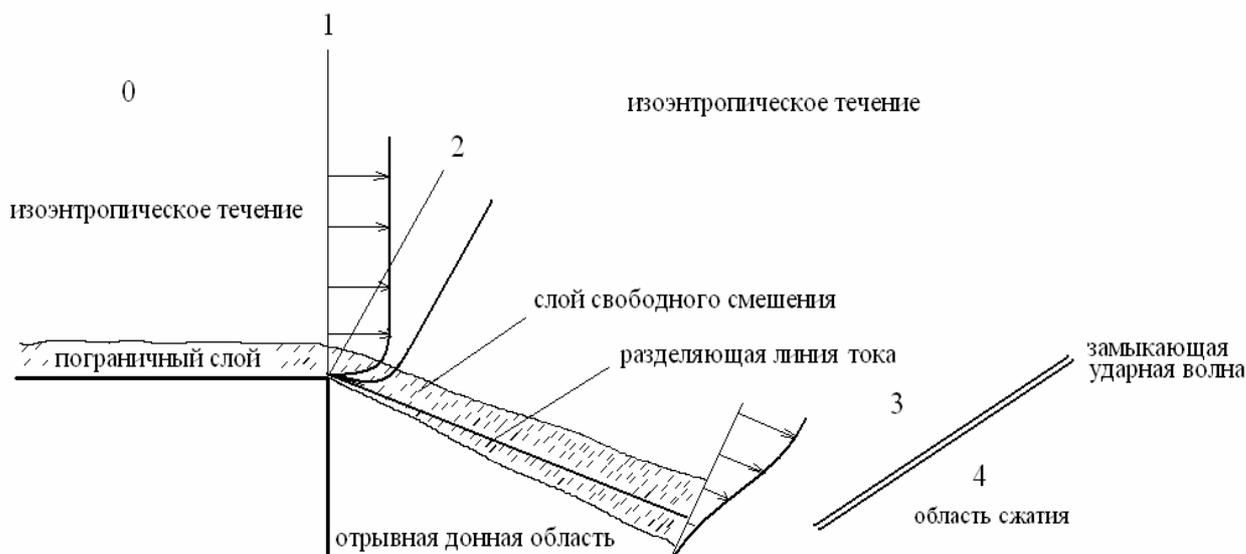


Рис. 3. Модель течения для расчета величины донного давления

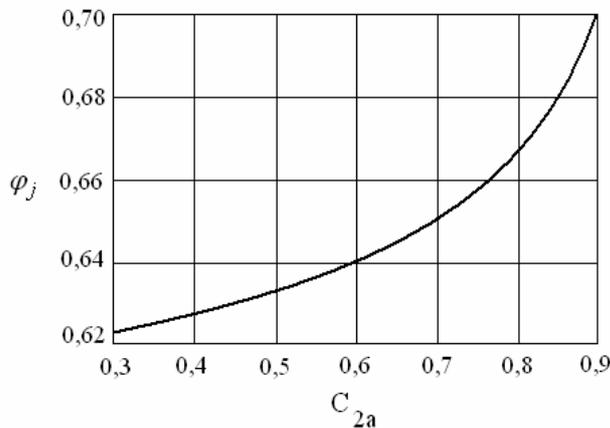
Поток, набегающий на донную часть вдоль двумерной поверхности, является звуковым или сверхзвуковым и остается сверхзвуковым после отрыва от угла.

Образуются четыре области течения:

1. Область между сечениями 0 и 1. Поток набегаёт на заднюю кромку.
2. Область между сечениями 1 и 2. Поток расширяется при обтекании задней кромки.
3. Область между сечениями 2 и 3. Вблизи границ сжимаемой струи происходит смешение при постоянном давлении.
4. Область 3 и 4. Повторное сжатие в плоском скачке в конце отрывного течения.

Основные допущения предлагаемой модели следующие:

- в области диссипативного вязкого течения, на которое воздействует прилегающий почти однородный невозмущенный поток, статическое давление равно давлению в невозмущенном потоке: $p = p_n$;
- расширение внешнего потока между сечениями 1 и 2 происходит в соответствии с решением Прандтля–Майера;
- смешение на границе струи между сечениями 2 и 3 происходит при постоянном давлении: $p_2 = p_3$; безразмерный профиль скорости в слое смешения описывается соотношением $\varphi = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf}\eta)$, где $\eta = \sigma(y/x)$ и представлен на рис. 4;
- возрастание давления в области повторного сжатия в конце отрывной области течения определяется примыкающим внешним течением, а сжатие во внешнем потоке – плоским косым скачком между областями 3 и 4;



$$C_{2a} = \left\{ 1 + \frac{2}{(k-1)M_n^2} \right\}$$

Рис. 4. Безразмерная скорость вдоль разделяющей линии тока

- в отрывной области масса газа должна сохраняться, условие смыкания линий тока получается из условия сохранения массы в отрывной зоне и применяется к линии тока, которая приходит в критическую точку области замыкания;
- осесимметричность газового потока учитывается с помощью уравнения расхода, определения осевой и радиальной координат точки присоединения разделяющей линии тока;
- учет начальной толщины пограничного слоя в точке отрыва потока на обтекаемой поверхности;
- корректировка безразмерного профиля скорости газа в слое смешения;
- условие присоединения потока учитывает работу сил трения в пограничном слое и вязком слое смешения:

$$\frac{p_o}{p_d} = \frac{p_c}{p_d} \frac{1}{\bar{p}_{cr}}, \quad (8)$$

где p_o – полное давление газа в слое смешения (на разделяющей линии тока), p_d – донное давление на торце центрального тела, p_c – статическое давление за косым скачком уплотнения в области присоединения потока, \bar{p}_{cr} – критический перепад давления на скачке уплотнения, определяемый как мера работы сил трения в пограничном слое и зоне смешения.

Присоединение потока на оси симметрии осуществляется по следующей схеме (рис. 5):

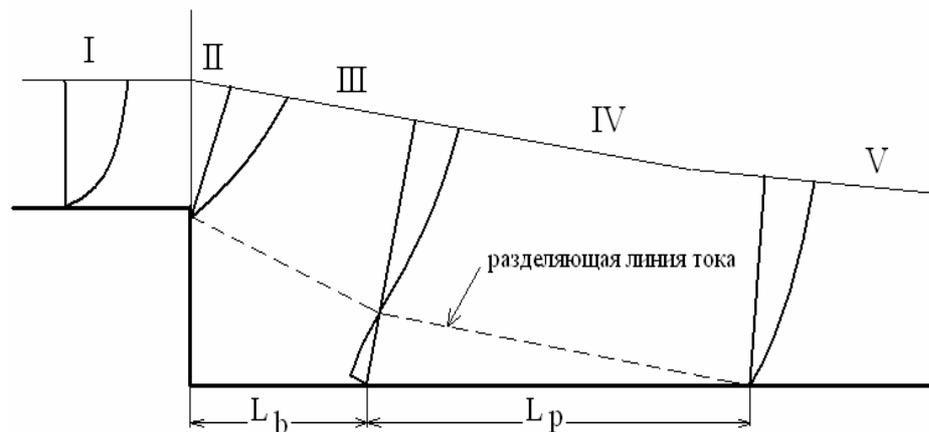


Рис. 5. Схема отрывного течения за осесимметричным донным уступом:

I – набегающего сверхзвукового потока с пограничным слоем; II – перехода потока и пограничного слоя через веер волн разрежения или скачок уплотнения у кромки уступа; III – изобарическую длиной L_b , с давлением, равным донному давлению p_d ; IV – повышения давления длиной L_p ; V – выравнивания давления

Принципиальным отличием предложенной модели является то, что она разработана для геометрических конфигураций, характерных для отрывной области за ГЛА, движущимся в плотных слоях атмосферы, и ДУ с кольцевыми соплами.

В третьей главе рассмотрены вопросы математического моделирования газодинамических процессов в областях отрыва потока с помощью разработанного пакета прикладных программ «S-FLOW», реализующем математические модели и вычислительные алгоритмы, предложенные автором диссертационной работы. Приведена структура пакета прикладных программ «S-FLOW», и описание его функционального наполнения.

С целью определения газодинамических характеристик областей отрыва потока за элементами ГЛА с помощью разработанного пакета прикладных программ «S-FLOW» проведено математическое моделирование течений вокруг ГЛА конической формы, движущегося в плотных слоях атмосферы с большой сверхзвуковой (гиперзвуковой) скоростью и течений в кольцевых соплах с укороченным центральным телом различных геометрических конфигураций при различных условиях работы.

С помощью предложенной модели отрывной донной области и разработанного вычислительного алгоритма проведены численные параметрические исследования зависимости газодинамических параметров осесимметричной отрывной донной области гиперзвукового летательного аппарата при различных характеристиках потока в точке отрыва, результаты которых приведены в работах автора. Полученные результаты представлены на рис. 6, 7 и 8. На рисунках обозначены: P_d – давление в отрывной области (донное давление), P_1 – давление в точке отрыва потока, P_∞ – давление потока на бесконечности (давление невозмущенного потока), M – число Маха, θ – угол наклона поверхности летательного аппарата к продольной оси в точке отрыва потока. На рис. 6 (в верхнем правом углу) также представ-

лены результаты сравнения результатов расчета по предложенной модели с экспериментальными результатами при $\theta = 0^\circ$ (верификация решения задачи моделирования отрывного течения в данном случае возможна с использованием имеющихся многочисленных решений других авторов и значительного количества экспериментальных данных).

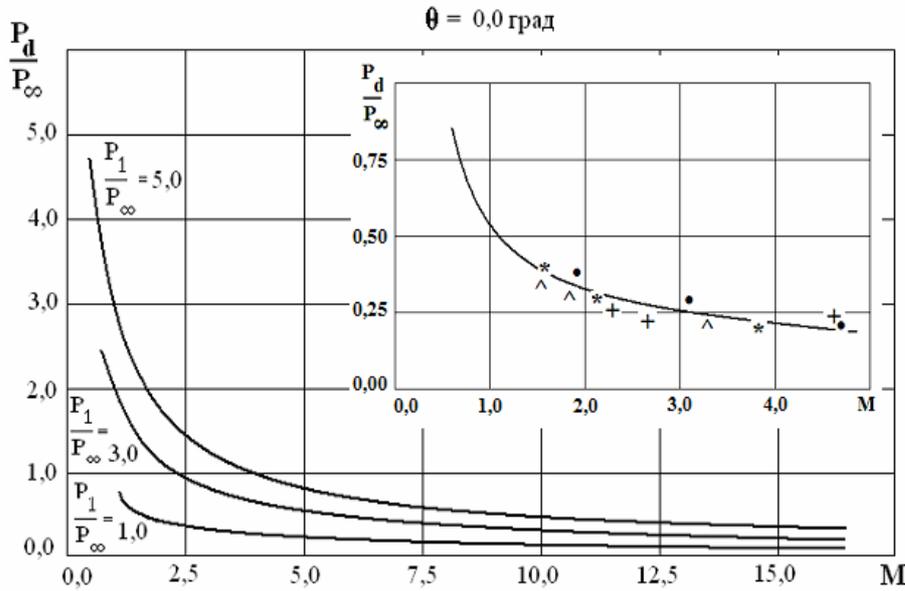


Рис. 6. Зависимость величины донного давления от числа Маха при различных давлениях в точке отрыва (в правом верхнем углу графика приведено сравнение расчетной зависимости при $P_1/P_\infty = 1,0$ с экспериментальными данными: •, +, △ – данные работы Л.В. Гогиша и Ю.Г. Степанова «Турбулентные отрывные течения», М.: Наука, 1979; * – данные работы П. Чжена «Отрывные течения», М.: Мир, 1973, т. 3)

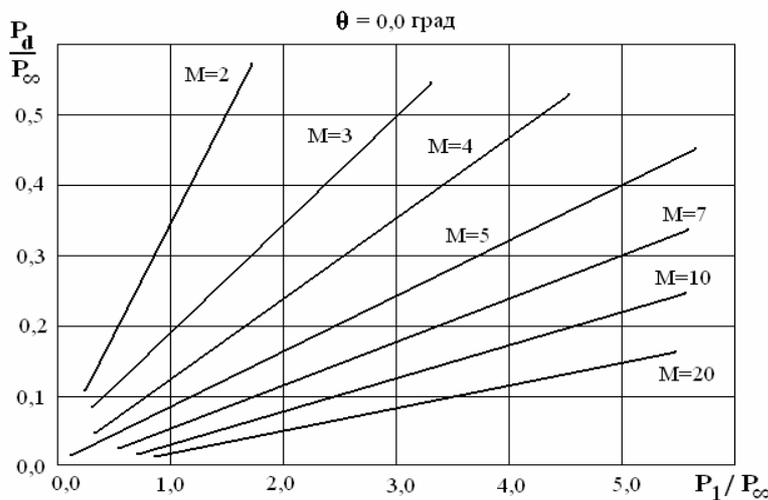


Рис. 7. Зависимость величины донного давления от давления в точке отрыва при различных числах Маха

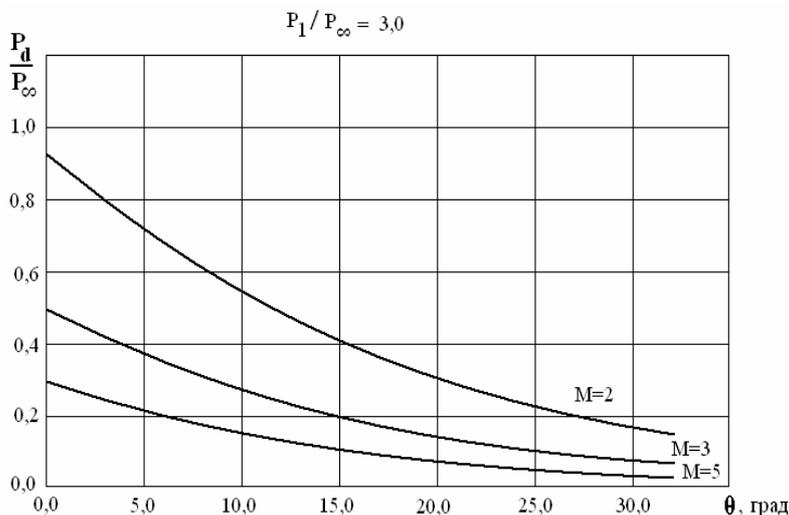


Рис. 8. Зависимость величины донного давления от угла наклона поверхности летательного аппарата к продольной оси в точке отрыва потока

На рисунках 9, 10, 11, представлены результаты математического моделирования параметров отрывной донной области (величины донного давления) с помощью предложенной модели и методов сквозного счета.

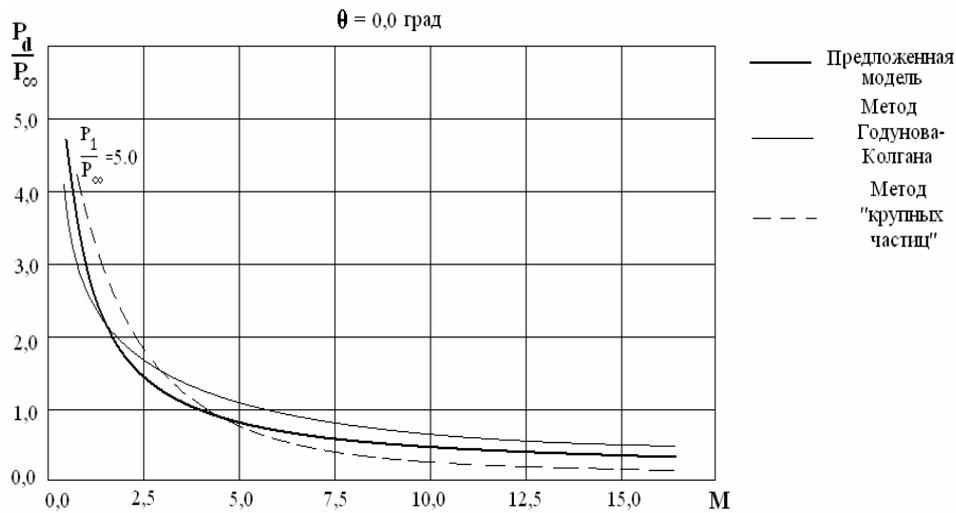


Рис. 9. Результаты расчета зависимости величины донного давления от числа Маха различными методами

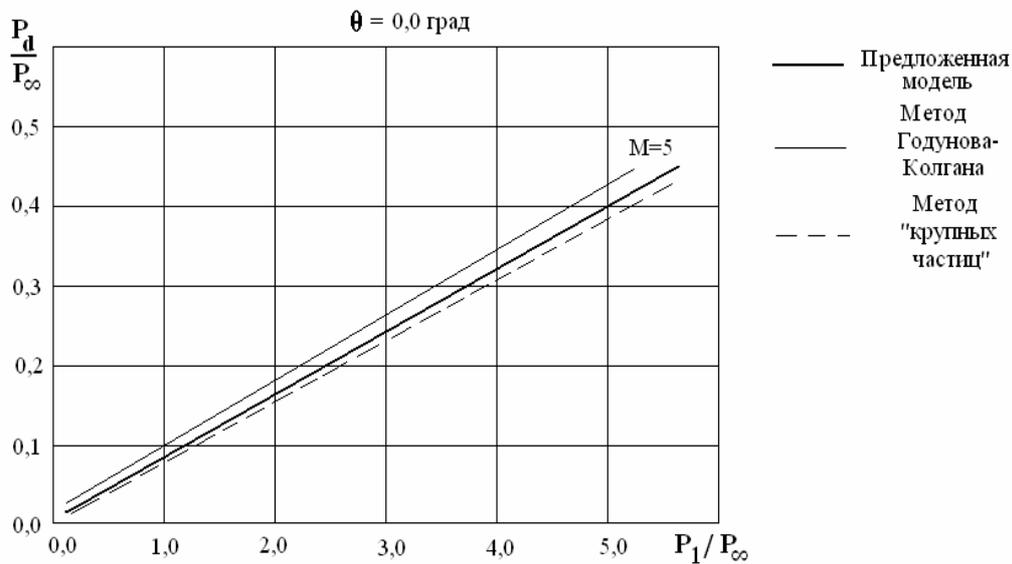


Рис. 10. Результаты расчета зависимости величины донного давления от давления в точке отрыва потока различными методами

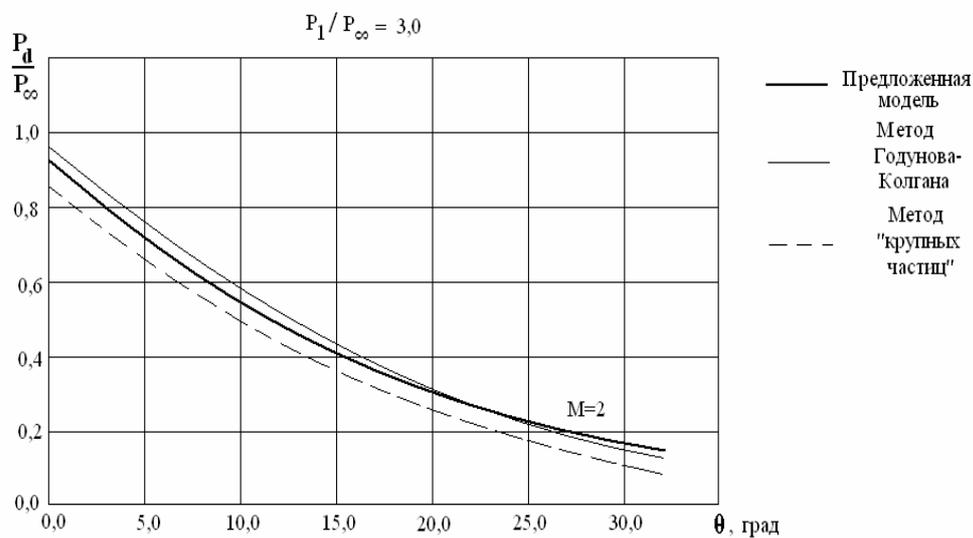


Рис. 11. Результаты расчета зависимости величины донного давления от угла наклона поверхности летательного аппарата к продольной оси в точке отрыва потока различными методами

Проведено математическое моделирование кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным и предельной укороченным центральными телами. Результаты математического моделирования представлены на рис. 12 и 13.

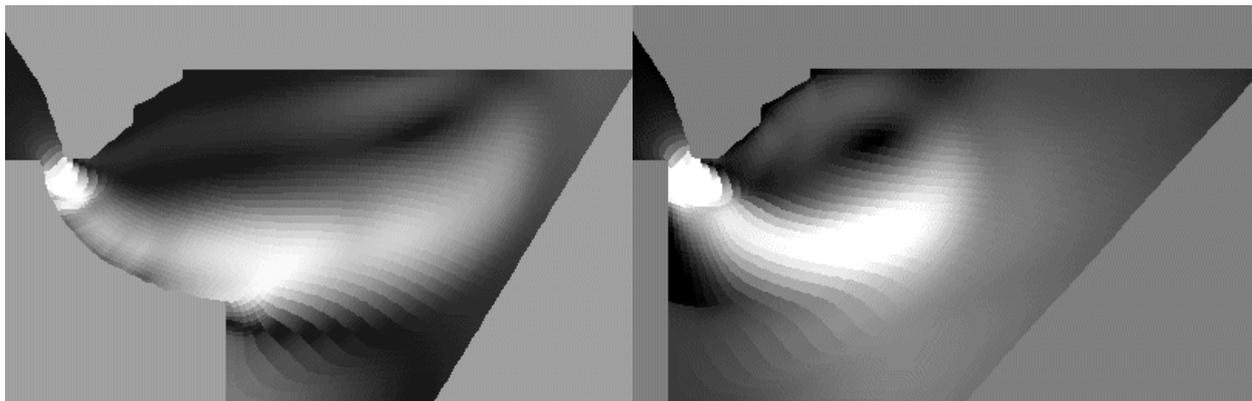


Рис. 12. Распределение числа Маха в кольцевых соплах (более светлые участки соответствуют большим числам Маха)

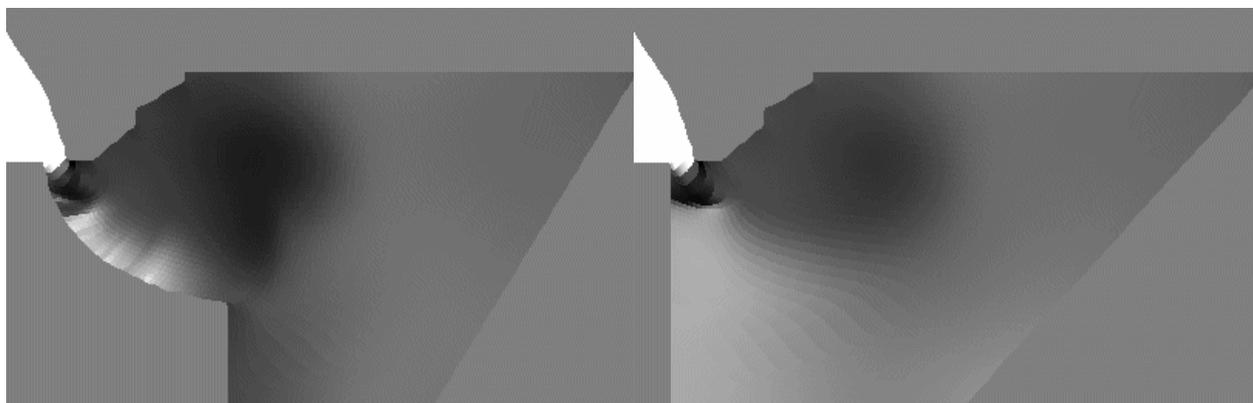


Рис. 13. Распределение давления в кольцевых соплах (более светлые участки соответствуют большим давлениям)

В четвертой главе рассмотрены вопросы оптимального профилирования кольцевых сопел внешнего расширения. В поле течения таких сопел присутствуют отрывные зоны, оказывающие существенное влияние на тяговые характеристики сопел рассматриваемого типа.

Предложена методика построения кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом, за торцом которого образуется отрывная донная область. Поиск оптимальной конфигурации кольцевого сопла осуществлялся путем решения вариационной задачи, при постановке которой в число оптимизируемых параметров включаются геометрические характеристики сопла, при этом такие параметры как показатель изоэнтропии газа k и располагаемый перепад давлений в сопле p_o/p_n считаются постоянными.

Решение вариационной задачи осуществлялось с помощью сведения её к задаче нелинейного программирования. Основными элементами данного подхода являются прямые расчеты поля течения и метод поиска экстремума функций многих переменных, что делает данный алгоритм применимым ко всем газодинамическим задачам, для которых известны методы расчета поля течения, в том числе и для кольцевых сопел.

Рассмотрено произвольное стационарное осесимметричное течение газа в сопле. Необходимо построить контур сопла $y = \xi(x)$, доставляющий экстремум функционалу:

$$J = \int_A^B \Phi(x, \xi, \xi', u_1, \dots, u_n) dx, \quad (9)$$

где Φ – известная функция, $\{u_i\}$ ($i = 1, \dots, n$) – система функций, удовлетворяющих уравнениям течения; A и B – начальная и конечная точки контура сопла, штрихом обозначены производные по x вдоль контура сопла.

Рассматриваются следующие изопериметрические условия:

$$K_j = \int_A^B G_j(x, \xi, \xi') dx, \quad j = 1, \dots, m, \quad (10)$$

где $G_j(x, \xi, \xi')$ и K_j – известные функции и константы.

Искомый оптимальный контур можно определить следующим образом:

$$y'(x) = \xi_0'(x) + \Delta\xi'(x), \quad y(x_0) = y_0, \quad (11)$$

где $\xi_0(x)$ – известная функция, x_0 – начальная точка контура, величина $\Delta\xi(x)$ аппроксимируется отрезком ряда:

$$\Delta\xi(x) = \sum_{k=0}^l c_k \varphi_k(x), \quad (12)$$

где $\{\varphi_k\}$ – система линейно независимых функций, c_k – коэффициенты.

При постановке вариационной задачи для исследуемого сопла коэффициент тяги может быть записан в виде:

$$K_T = K_{T*} + \alpha \int_A^B P(x, y(x); \Theta_*) dF + K_{T_D}, \quad (13)$$

где K_{T*} – коэффициент тяги, создаваемой потоком в минимальном сечении сопла; A, B – начальная и конечная точки профиля центрального тела; Θ_* – угол наклона минимального сечения; $P(x, y(x); \Theta_*)$ – распределение давления по центральному телу; α – безразмеривающий множитель; K_{T_D} – коэффициент тяги, создаваемой торцем укороченного центрального тела; интегрирование проводится по площади проекции поверхности центрального тела на плоскость $X = \text{const}$.

Контур центрального тела разбивается на участки с некоторым распределением узлов и гладким восполнением между ними. Вариационная задача нахождения функции $y(x)$ и угла Θ_* , обеспечивающих максимум коэффициента тяги в условиях заданных габаритных ограничений, сводится к задаче поиска экстремума функции нескольких переменных (целевой функции):

$$K_T = f(\Theta_*; c_1, c_2, \dots, c_n), \quad (14)$$

где c_k – коэффициенты, определяемые профилем центрального тела, которая может быть решена методами нелинейного программирования.

Прямые расчеты параметров течения проводятся с учетом всех особенностей течения (учет до-, трансзвуковой области течения, параметров отрывной области и пограничного слоя).

На рис. 14 представлена конфигурация сопла для проведения оптимизации. На рис. 15 представлены результаты оптимизации геометрии кольцевого сопла для газа. На рис. 16 представлены результаты оптимизации геометрии кольцевого сопла с учетом до-, трансзвуковой области течения. На рис. 17 представлены результаты оптимизации геометрии кольцевого сопла с учетом до-, трансзвуковой области течения и параметров пограничного слоя на обтекаемых поверхностях.

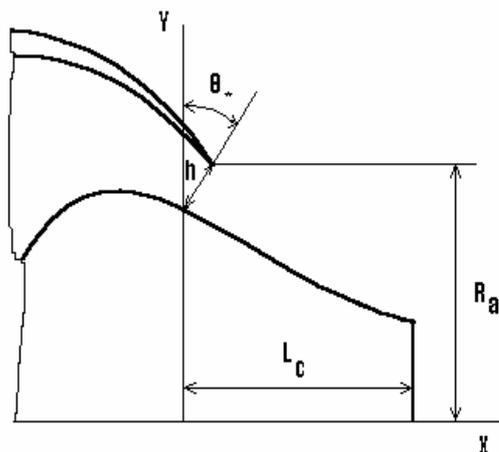
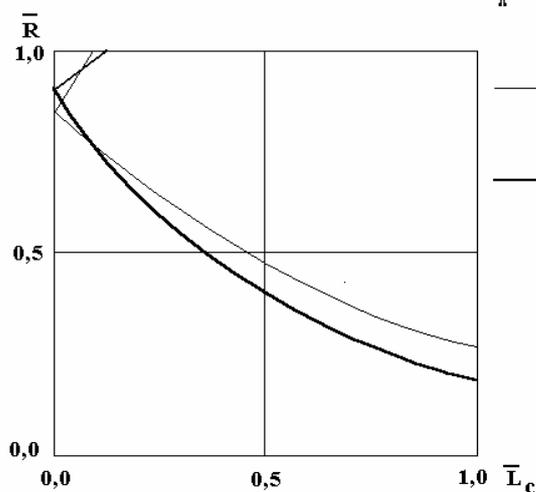
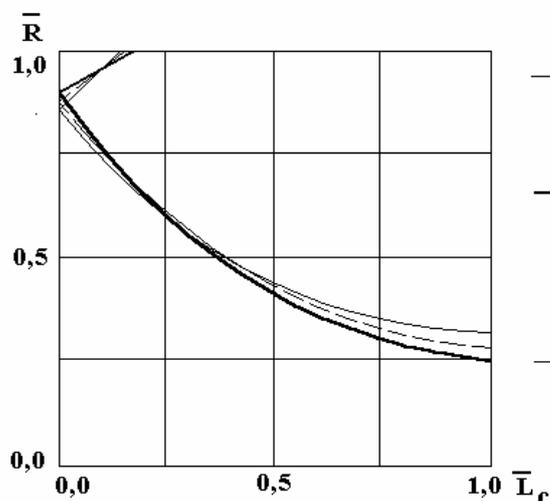


Рис. 14. Конфигурация кольцевого сопла для проведения оптимизации



— начальное сопло :
 $K_T = 1,447$
 — оптимальное сопло :
 $K_T = 1,524$

Рис. 15. Начальное и оптимальное кольцевые сопла



— начальное сопло
 $K_T = 1,452$
 — оптимальное сопло
 $K_T = 1,531$
 - · - оптимальное сопло
 без учета до-, транс-
 звуковой области
 $K_T = 1,512$

Рис. 16. Конфигурации кольцевых сопел, полученные с учетом до-, трансзвуковой области течения

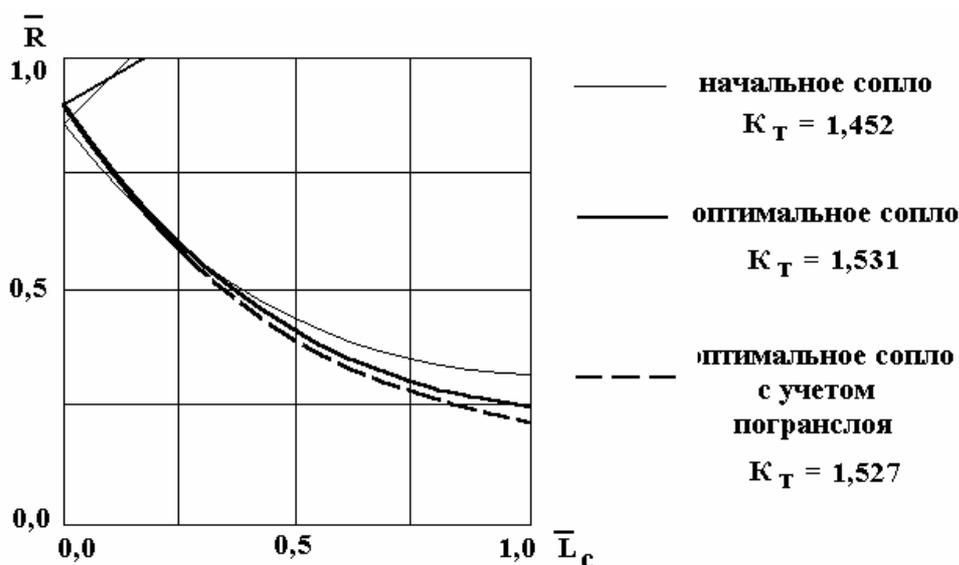


Рис. 17. Конфигурации кольцевых сопел, полученных при учете параметров пограничного слоя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в областях отрыва потока за элементами летательных аппаратов. Разработана новая модель для расчета параметров отрывной области течения за гиперзвуковым летательным аппаратом, в том числе за элементами двигательной установки. Разработана методика профилирования оптимальных по тяговым характеристикам кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом с учетом характеристик отрывной области течения. По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработана новая комплексная математическая модель для исследования газодинамических процессов и определения характеристик отрывной области за элементами гиперзвукового летательного аппарата, использующая метод «разделяющей линии тока», отличающаяся от известных учетом осесимметричности течения, толщины начального пограничного слоя в точке отрыва потока, работы сил трения в слое смешения и протяженности области повышения давления в точке присоединения потока на оси симметрии обтекаемого элемента летательного аппарата.
2. Разработан пакет прикладных программ «S-FLOW» для математического моделирования течений в областях отрыва потока с учетом всех значимых физических процессов и факторов, действующих в рассматриваемых областях течения, реализующий предложенную модель отрывной области течения.
3. С помощью математического моделирования определены параметры течения газа в отрывной области за летательным аппаратом, движущимся в атмосфере с гиперзвуковой скоростью. Получены новые результаты, связанные с определением параметров отрывных областей за элементами гиперзвуковых летательных аппаратов. Достоверность полученных результатов следует из согласия их с известными экспериментальными данными.

4. С помощью математического моделирования исследованы параметры течения газа в отрывной области за торцем укороченного центрального тела кольцевого сопла внешнего расширения двигательной установки гиперзвукового летательного аппарата. Установлены особенности ударно–волновой структуры течения в соплах различных геометрических конфигураций и впервые определены уровни тяговых характеристик кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным и предельно укороченным центральными телами с использованием разработанной модели отрывной донной области.
5. Разработана методика профилирования оптимальных по тяговым характеристикам кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом, включающая постановку и решение вариационной задачи построения оптимального сопла с помощью методов нелинейного программирования и метода прямой оптимизации. Предложенная методика может быть использована при проектировании двигательных установок с кольцевыми соплами.
6. Построены оптимальные геометрические конфигурации кольцевых сопел внешнего расширения с укороченным центральным телом с учетом величины донной тяги, определяемой параметрами отрывной донной области, в условиях заданных ограничений на их геометрические характеристики и рабочие параметры. Впервые получены значения коэффициента тяги кольцевого сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом, за торцем которого имеется отрывная область, параметры которой определены по разработанной модели с учетом большинства физических процессов и факторов, влияющих на величину донной тяги сопла. В результате оптимизации получено увеличение значения коэффициента тяги на $\sim 5,3\%$.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК:

1. Карташева, М.А. Математическое моделирование течений в областях отрыва потока [Текст]/ М.А. Карташева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Выпуск 11. – № 10 (110). – С. 36–44.
2. Карташева, М.А. Оценка динамических характеристик отопительной системы при определении теплотребления в инженерных объектах [Текст]/ М.А. Карташева, С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, А.Л. Шестаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Выпуск 12. – № 23 (123). – С. 80–85.

Другие публикации:

3. Kartasheva, M.A. Mathematical Simulation of Flows In the Field of the Flow Separation [Text]/ M.A. Kartasheva, A.L. Kartashev // AIP Conference Proceedings. – August 3, 2006. – Volume 849. P. 460–464.
4. Карташева, М.А. Математическое моделирование параметров теплового состояния отрывной донной области за коническим телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докла-

- дов Всероссийской научно-технической конференции/ Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 97–100.
5. Карташева, М.А. Математическое моделирование течения в отрывной области высокоскоростного летательного аппарата [Текст]/ М.А. Карташева // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции/ Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 100–105.
 6. Карташева, М.А. О моделировании течений в областях отрыва потока [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Ракетно-космическая техника. Серия XIV. – 2005. – Вып. 1 (53). – С. 72–96.
 7. Карташева, М.А. Пакет прикладных программ для математического моделирования газодинамических процессов в областях отрыва потока – «S-FLOW»: описание применения [Текст]/ М.А. Карташева. – Челябинск: ЧелГУ, 2006. – 44 с.
 8. Карташева, М.А. Создание систем математического моделирования сложных технических объектов на основе высокопроизводительных систем [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2007): труды Международной научной конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – Т.1. – С. 280–284.
 9. Карташева, М.А. Применение высокопроизводительных вычислений для математического моделирования сложных инженерных объектов [Текст]/ М.А. Карташева, С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, А.Л. Шестаков // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2008): труды Международной научной конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 334–339.
 10. Карташева, М.А. Математическое моделирование течений в областях отрыва потока [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Труды Международной конференции VIII Забабахинские научные чтения. 5–10 сентября 2005 года. Снежинск. – С. 185–193.
 11. Карташева, М.А. Исследования течения многокомпонентных сред в кольцевых соплах [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Международной конференции VII Забабахинские научные чтения. 8–12 сентября 2003 года. Снежинск. – С. 238–239.
 12. Карташева, М.А. Исследование параметров теплового состояния отрывной донной области за коническим телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Международной конференции VIII Забабахинские научные чтения. 5–10 сентября 2005 года. Снежинск. – С. 200–201.
 13. Карташева, М.А. Математическое моделирование течений в областях отрыва потока [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Международной конференции VIII Забабахинские научные чтения. 5–10 сентября 2005 года. Снежинск. – С. 185–186.
 14. Карташева, М.А. О моделировании отрывной донной области за осесимметричным обтекаемым телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Международной конференции VIII Забабахинские научные чтения. 5–10 сентября 2005 года. Снежинск. – С. 199–200.

15. Карташева, М.А. Особенности течения в отрывной донной области высокоскоростного летательного аппарата [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Международной конференции VIII Забабахинские научные чтения. 5–10 сентября 2005 года. Снежинск. – С. 198–199.
16. Карташева, М.А. Исследования течений многокомпонентных сред в кольцевых соплах ракетных двигателей [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции 10–14 сентября 2007. – Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2007. – С. 241–243.
17. Карташева, М.А. О математическом моделировании тепловых режимов отрывной донной области гиперзвукового летательного аппарата [Текст]/ М.А. Карташева // Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции 10–14 сентября 2007. – Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2007. – С. 243–244.
18. Карташева, М.А. Построение оптимальной конфигурации кольцевого сопла с многокомпонентным рабочим телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Забабахинские научные чтения: сборник материалов IX Международной конференции 10–14 сентября 2007. – Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2007. – С. 259–261.
19. Карташева, М.А. Моделирование течения в отрывной донной области за осесимметричным телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Всероссийская научная конференция «Математика. Механика. Информатика». Челябинск: Изд-во ЧелГУ, 2006.
20. Карташева, М.А. Математическое моделирование течения в осесимметричной отрывной донной области [Текст] М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Труды Межрегионального совета по науке и технологиям. Миасс, 2005.
21. Карташева, М.А. Профилирование оптимального кольцевого сопла с укороченным центральным телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Межотраслевой научно-практической конференции «Снежинск и наука–2000». Снежинск. 29 мая – 2 июня 2000 г. Изд-во СФТИ. – С. 40–42.
22. Карташева, М.А. Профилирование оптимальных кольцевых сопел с многокомпонентным реагирующим рабочим телом [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Межотраслевой научно-практической конференции «Снежинск и наука–2003». Снежинск. 9–14 июня 2003 г. – Изд-во СФТИ, 2003.
23. Карташева, М.А. Расчет параметров течения в отрывной области [Текст]/ М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Тезисы Межотраслевой научно-практической конференции «Снежинск и наука–2003». Снежинск. 9–14 июня 2003 г. – Изд-во СФТИ, 2003.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «S-FLOW: пакет прикладных программ для математического моделирования течений газа в технических системах» / М.А. Карташева. – Заявка № 2008614942 от 27.10.2008.