

На правах рукописи

ГРЯЗЕВ Василий Михайлович



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ
СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ**

**Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ**

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

Тула 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
МОГИЛЬНИКОВ Николай Викторович
- Официальные оппоненты:** КЭРТ Борис Эвальдович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»,
г. Санкт-Петербург, заведующий кафедрой
- ОБУХОВ Игорь Юрьевич,
кандидат технических наук,
АО «Конструкторское бюро приборостроения
им. академика А.Г. Шипунова»,
г. Тула, ведущий инженер-конструктор
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет», г. Пенза

Защита состоится «_26_» декабря 2017 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05 на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», по адресу: 300012. г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/>

Автореферат разослан «_26_» октября 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова
Марина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача расчета движения твердого тела в газовой среде имеет исключительно обширное приложение в технике. Любое движение в атмосфере автомобиля, самолета, ракеты, снаряда есть движение в газовой среде. Сюда же можно отнести задачу о движении малоразмерных твердых частиц в несущем газе или жидкости, связанную с технологическими процессами гидроабразивной и пескоструйной обработки деталей, процессы работы поршневого компрессора, турбины, пневмоцилиндра и т. п. Варианты решения данной задачи связаны с разработкой программных комплексов моделирования физических процессов, сопровождающих движение тела и газовой среды.

В настоящее время разработано и широко используется большое число универсальных программных комплексов имитационного моделирования физических процессов различной природы - тепломеханики, внутренней и внешней баллистики, газовой динамики, механики деформируемого твердого тела. Разработано большое число мощных универсальных пакетов, таких как ANSYS, SolidWorks, позволяющих не только проводить имитационное моделирование широкого класса газодинамических задач, но и одновременно реализовать сопряженные решения смежных задач механики деформируемого твердого тела, теплопроводности, акустики и др.

Наряду с очевидными положительными моментами, универсальность пакета, имеет и определенные недостатки, связанные с требованием достаточно высокой квалификации пользователей, необходимостью оценкой приемлемости выбранной математической модели для описания соответствующего физического процесса, значительных вычислительных ресурсов ЭВМ. Все это приводит к тому, что в настоящее время в проектных организациях, наряду с использованием упомянутых универсальных пакетов программ, используется большое число программных разработок, в том числе и реализующих газодинамические расчеты в режиме имитационного моделирования. Эти разработки ориентированы на решение определенной узкой группы задач, связанных с функционированием соответствующих технических устройств, как правило, с одновременным моделированием сопряженных процессов, связанных с оценкой термпрочности, учетом перемещений твердых тел и т.п. Ограничение области применения позволяет обоснованно выбрать вид математической модели, соответствующей анализируемому процессу, значительно упростить ее программную реализацию, выбрав соответствующий эффективный и апробированный метод решения.

Одной из областей применения специализированных программных комплексов является имитационное моделирование сопряженных задач газовой динамики и механики движения твердого тела. Подобные процессы сопровождают работу поршневого двигателя, турбины, выстрел артиллерийской или стрелковой системы, старт пиротехнического элемента. Про-

граммные разработки, реализующие моделирование данных процессов, должны обеспечивать решение сопряженных задач, как по физической природе (газовая динамика – движение твердого тела), так и по степени детализации (нульмерная термодинамическая модель – многомерная задача газовой динамики), при этом сопряжение решения обеспечивается соответствующим сопряжением начальных и граничных условий.

Традиционный подход к решению подобных задач – последовательное автономное моделирование отдельных этапов не всегда возможен, например, если тело перемещается в нестационарном газовом потоке и оказывает влияние на структуру течения. Решение данной задачи требует проведения расчета газодинамического течения с учетом переменных граничных условий и наличия подвижных границ твердого тела. Фактором, осложняющими решение данной задачи, является необходимость учета малых угловых перемещений тела, не отображаемых в счетной зоне, при использовании двумерной модели газодинамического течения. Все это требует использования специальных подходов к программной реализации имитационной модели процесса и определяет **актуальность темы диссертации**.

Все сказанное позволяет сформулировать **цель данной работы**: разработка математических моделей и программного обеспечения, реализующего имитационное моделирование процессов, сопровождающих движение твердого тела в газовом потоке сложной структуры.

Здесь и далее под газовым потоком сложной структуры мы будем понимать нестационарные и стационарные течения с неоднородным распределением газодинамических параметров в пространстве.

Объектом исследований настоящей работы являются математические модели процессов, сопровождающих движение твердого тела в газовом потоке сложной структуры.

Предмет исследований – алгоритмы и программы, реализующие разработанные математические модели в виде вычислительного эксперимента.

В соответствии с целью работы были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Разработка математических моделей сопутствующих процессов, сопровождающих движение тела в газовом потоке сложной структуры.
2. Разработка программного комплекса имитационного моделирования процесса нестационарного газодинамического течения для переменных граничных условий счетной зоны и наличия подвижных границ твердых тел.
3. Разработка алгоритма расчета силового воздействия на тело, перемещающееся в зоне нестационарного газодинамического течения сложной структуры.
4. Тестирование разработанного программного комплекса.
5. Оценка возможности использования разработанного программного обеспечения для решения различных прикладных задач.

Общая методика исследований.

Разрабатываемые в диссертации модели базируются на фундаментальных соотношениях механики движения твердых тел, газо- и термодинамики, их программная реализация проводилась с использованием эффективных и апробированных численных методов решения задач механики.

Научная новизна работы.

1. Разработана комплексная математическая модель процессов, определяющих движение тела в газовом потоке сложной структуры.
2. На основе модификации метода крупных частиц разработан алгоритм расчета силового воздействия на тело, перемещающееся в зоне нестационарного газодинамического течения сложной структуры, учитывающий переменные граничные условия и влияние на параметры движения угловых перемещений тела, не отображаемых в счетной области двумерного решения газодинамической задачи.
3. Разработан программный комплекс, реализующий имитационное моделирование изучаемых процессов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель процессов, определяющих движение тела в газовом потоке сложной структуры.
2. Алгоритм расчета силового воздействия на тело, перемещающееся в зоне нестационарного газодинамического течения сложной структуры, основанный на модификации метода крупных частиц.
3. Программный комплекс, реализующий имитационное моделирование изучаемых процессов.
4. Результаты тестирования разработанного программного комплекса.
5. Результаты анализа области практического приложения разработанного программного комплекса.

Практическая значимость работы. Разработанные программные средства обеспечивают проведение анализа параметров движения тела в режиме имитационного моделирования процесса, что обеспечивает оценку влияния указанных характеристик на эффективность и безопасность функционирования различных технических устройств.

Программный модуль расчета нестационарного газодинамического течения при наличии подвижных тел в счетной зоне получил свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614602 Российская Федерация.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-41-710663).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс студентов ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по направлению подготовки магистратуры 24.04.03 «Баллистика и гидроаэродинамика» при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий по дисциплине «Основы баллистики и аэродинамики».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена сопоставлением и удовлетворительным согласованием результатов моделирования процессов, полученных с использованием разработанных программных средств, с известными экспериментальными данными и результатами решения частных задач, полученных другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Всероссийских научно-технических конференциях: "Проблемы специального машиностроения", Тула, 2014, 2016 гг., "Наука. Промышленность. Оборона", Новосибирск, 2015 г., «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов», Тула, 2016 г., Всероссийской конференции по баллистике, Санкт-Петербург, 2016 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемом издании, рекомендованном ВАК.

Личный вклад. Все представленные в диссертации результаты исследования получены лично автором. Из совместных публикаций в диссертацию включены только результаты соискателя, связанные с разработкой математических моделей и их программной реализацией.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и основных выводов, списка литературы из 117 наименований. Объем диссертации составляет 146 с., включая 39 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ подходов к решению задачи о движении тела в газовом потоке сложной структуры.

Рассматриваются существующие подходы и программные разработки, связанные с моделированием нестационарных газодинамических течений в многомерной постановке, и области применения указанных задач.

Показано, что для рассматриваемого класса задач целесообразно использовать расчет нестационарного течения в двумерном варианте с использованием апробированного и хорошо себя зарекомендовавшего метода крупных частиц, реализованного на регулярной ортогональной сетке. Учет несимметричного воздействия на тело, связанного с наличием небольших угловых перемещений в процессе движения, возможно учесть с использованием зависимостей аэродинамического расчета.

Для обеспечения комплексного моделирования процессов, помимо основного блока расчета газодинамического течения, необходимо разрабо-

тать вспомогательные автономные программные модули, обеспечивающие расчет процесса движения летательного аппарата (ЛА) в пусковой установке (ПУ), предварительный аэродинамический расчет и расчет параметров движения для варианта движения ЛА с большими угловыми перемещениями.

В конце главы формулируются задачи исследования.

Во **второй главе** работы рассматривается разработка комплексной математической модели имитационного моделирования движения тела в газовом потоке сложной структуры. Взаимосвязь вычислительных модулей и передаваемые параметры иллюстрирует рисунок 1.

Для описания процесса в ПУ использовалось термодинамическое приближение, включающее уравнения баланса массы и энергии и дополнительные уравнения, описывающие газоприток при горении топливных элементов. Рассматривалась обобщенная модель процесса, соответствующая активно-реактивному старту из закрытой ПУ, при которой, в процессе горения летательного заряда, возможно начало работы реактивного двигателя (РД). Подобная модель соответствует начальному этапу движения для большинства рассматриваемых изделий.

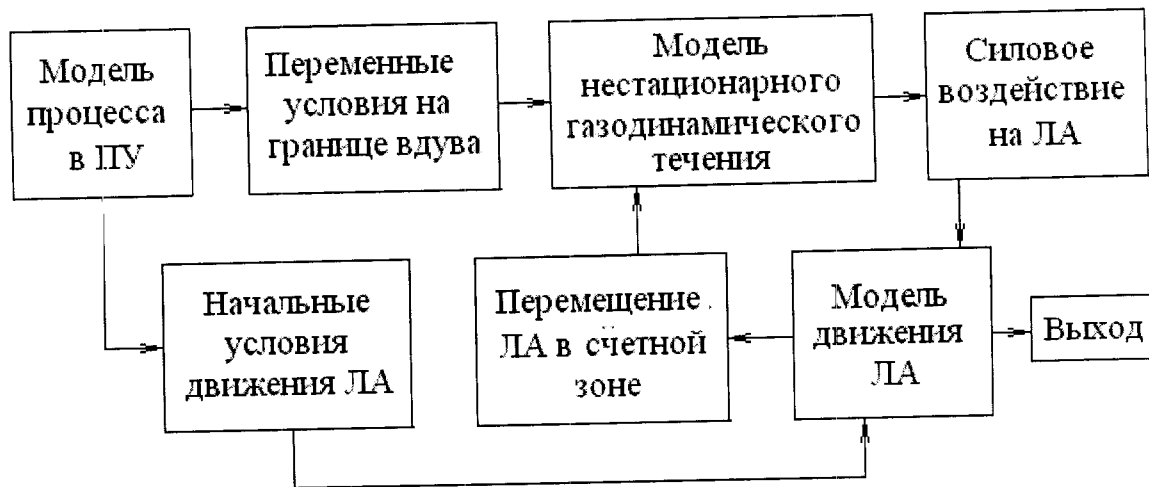


Рисунок 1 - Взаимосвязь математических моделей и передаваемые параметры

В качестве модели нестационарного газодинамического течения для выделенной области использовалась система уравнений Эйлера, реализованная в двумерном варианте – осесимметричном и плоском. На левой границе расчетной области предусматривалось задание переменных от времени газодинамических параметров, вычисляемых из параллельного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс в ПУ. На правой и верхней границах области задавались условия открытой границы. Для

нижней границы осесимметричного варианта задавалось условие непротекания, а для плоского случая – условие открытой границы.

Для численной реализации математической модели методом крупных частиц использовалась регулярная сетка с прямоугольными ячейками. Как известно, используемый численный метод предполагает моделирование законов сохранения, записанных для ячеек эйлеровой, и расщепление физического процесса на малом временном шаге на более элементарные процессы.

Законы сохранения массы импульса и энергии для ячеек сетки записываются в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho dW = - \oint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho \vec{V} dW = - \oint_S (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dS - \int_W \text{grad} p dW; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W \rho E dW = - \oint_S [\rho E (\vec{V} \cdot \vec{n}) + p (\vec{V} \cdot \vec{n})] dS. \quad (3)$$

К данным уравнениям необходимо добавить уравнение изменения соотношения между компонентами газовой фазы, характеризуемого изменением показателя адиабаты газовой смеси

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_W k \rho dW = - \oint_S k \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS, \quad (4)$$

и уравнение состояния

$$e = E - (u^2 + v^2)/2; \quad p = (k - 1) \rho e. \quad (5)$$

В уравнениях (1)-(5) приняты следующие обозначения: p, ρ, E - давление, плотность, полная удельная энергия; \vec{V} - вектор скорости с компонентами u, v ; \vec{n} - вектор нормали к поверхности; e - внутренняя удельная энергия; k - показатель адиабаты.

Решение рассматриваемой задачи осложняется присутствием в счетной зоне подвижных границ твердых тел.

Для варианта использования регулярной сетки с прямоугольными ячейками был предложен специальный алгоритм, исключаящий перестройку счетной зоны до момента перемещения тела на расстояние, равное размеру грани ячейки, и, одновременно, учитывающий деформацию ячеек, контактирующих с подвижной границей.

Данный алгоритм можно пояснить следующим образом.

Пусть тело перемещается в положительном направлении вдоль оси ОХ со скоростью V . За шаг по времени Δt происходит смещение границ тела на величину Δl , при этом приграничные ячейки с газом, находящиеся справа (ячейки типа А) будут сжиматься, а находящиеся слева (ячейки типа В) – растягиваться. Уменьшение размера ячеек типа А ведет к нарушению

устойчивости схемы, поэтому в начальный момент для ячейки типа А принимаем размер $\Delta x_A = 2\Delta x$, а для ячеек типа В $\Delta x_B = \Delta x$.

Для учета перемещения тела в классическую схему метода крупных частиц вводим предварительный этап, предполагающий расчет газодинамических параметров в приграничных ячейках при их деформировании на величину Δl с использованием следующих соотношений (индекс «н» обозначает начальные, а индекс «к» - конечные значения газодинамических и геометрических параметров в ячейке):

$$\rho_k = \rho_n \Delta x_n / \Delta x_k; \quad p_k = p_n (\Delta x_n / \Delta x_k)^k;$$

$$u_k = \frac{\rho_n \Delta x_n u_n}{\rho_k \Delta x_k} = u_n; \quad v_k = v_n; \quad E_k = \frac{p_k}{\rho_k (k-1)} + \frac{u_k^2 + v_k^2}{2},$$

где величины Δx_k и Δx_n определяются

- для ячеек типа А:

$$\Delta x_k = 2\Delta x - \Delta l_k, \quad \Delta x_n = 2\Delta x - \Delta l_n; \quad \Delta l_k = \Delta l_n + V\Delta t;$$

- для ячеек типа В:

$$\Delta x_k = \Delta x + \Delta l_k, \quad \Delta x_n = \Delta x + \Delta l_n; \quad \Delta l_k = \Delta l_n + V\Delta t.$$

Изменения в расчетных зависимостях для последующих этапов метода крупных частиц минимальны:

- на эйлеровом этапе вместо размера грани ячейки Δx необходимо использовать Δx_k , при расчете промежуточного значения полной удельной энергии на подвижной границе необходимо условие непротекания использовать в виде $u_{zp} = V$, что обеспечит одновременно автоматический учет работы по перемещению подвижной границы;

- на лагранжевом этапе, при вычислении объема ячейки и потоков, необходимо вместо размера грани ячейки Δx использовать размер Δx_k .

При перемещении тела на расстояние Δl_k большее Δx , обеспечивалось изменение конфигурации счетной зоны и перестройки приграничных ячеек. При этом ячейка типа В разделялась на две одинаковые ячейки с размером $\Delta x_k = \Delta x$, значения газодинамических параметров в этих ячейках не изменились. Ячейка типа А с номером i объединялась со смежной ячейкой $i+1$, в новой ячейке длиной $\Delta x_k = 2\Delta x$ осредненные значения газодинамических параметров вычислялись исходя из условия сохранения массы импульса и энергии.

Подобный алгоритм позволяет исключить значительные осцилляции газодинамических параметров в приграничных ячейках по сравнению с подходом, когда движение происходит посредством дискретного перемещения тела на величину Δx .

Задача определения силового воздействия на тело в зоне газодинамического течения рассматривалась в двух вариантах - с учетом влияния тела на параметры течения и без учета данного влияния.

При учете влияния тела на параметры течения полагалось, что тело движется в зоне течения с малыми углами атаки и скольжения. Для данной задачи рассматривались варианты ЛА с жестким и сложенным стабилизатором.

Для ЛА со сложенным стабилизатором значение осевой силы X определялось из решения газодинамической задачи через распределение давления по поверхности корпуса ЛА.

При определении нормальной силы использовалась линейная зависимость ее коэффициента от угла атаки $C_y = C_y^\alpha \alpha$, где производная C_y^α при обтекании ЛА со стороны кормы, имеющей форму цилиндра с плоским торцом (с возможностью небольшого сужения), а так же комбинацию цилиндров различного диаметра, принималась равной значению коэффициента осевой силы C_x , полученного при газодинамическом расчете $C_y^\alpha = k_y C_x$, с поправочным коэффициентом $k_y = 0,93$. Для других вариантов кормовых частей значение производной C_y^α определялось из предварительного аэродинамического расчета и задавалось табличной функцией числа Маха $C_y^\alpha = C_y^\alpha(M_\infty)$.

При определении коэффициента момента тангажа $m_z = m_z^\alpha \alpha = C_y^\alpha C_d \alpha$, коэффициент центра давления C_d определялся через координату центра давления, которая соответствовала центру тяжести эпиюры нормальной сжимающей силы, действующей по боковой поверхности ЛА, определяемой из решения газодинамической задачи.

Для ЛА с жестким стабилизатором силовое воздействие определялось суммой силовых воздействий на корпус ЛА и на стабилизатор. При этом силовое воздействие на стабилизатор определялось параметрами газодинамического течения в зоне средней хорды консоли стабилизатора и аэродинамическими коэффициентами стабилизатора, полученными предварительным расчетом.

Рассмотренный подход к определению силовых параметров, действующих на ЛА в зоне нестационарного газодинамического течения, позволяет учесть, как параметры самого течения, с учетом влияния на них ЛА, так и малые угловые смещения ЛА, не отображаемые в счетной зоне. В свою очередь это обеспечивает возможность расчета параметров пространственного движения ЛА.

Для варианта расчета параметров движения тела без учета его влияния на параметры течения силовое воздействие определялось через систему аэродинамических коэффициентов, которые задавались в функции числа Маха и пространственного угла атаки. При этом допускалась возможность изменения угла атаки в пределах $0-180^\circ$, что соответствует нестабилизиро-

ванному движению ЛА. Для определения аэродинамических коэффициентов был разработан программный модуль, использующий известные данные аэродинамических продувок.

В качестве математических моделей движения тела использовались два варианта моделей – модель движения тела по траектории с малой кривизной и малыми углами атаки и модель движения при наличии значительных углов атаки и скольжения, включая режимы нестабилизированного движения.

Для первого варианта использовалась обычная система уравнений пространственного движения ЛА, в которую вводился дополнительный учет массовой и аэродинамической асимметрии, посредством задания дополнительных начальных углов атаки и скольжения, а так же дополнительных моментов, связанных с эксцентриситетом приложения продольной силы.

Для варианта со значительными углами атаки и кривизной траектории использовалось допущение об осевой симметрии ЛА. Уравнения пространственного движения записывались в проекциях на оси связанной системы координат, использовались кинематические уравнения Эйлера для направляющих косинусов, записанные в форме Пуассона.

В **третьей главе** работы рассматриваются вопросы программной реализации и тестирования разработанных математических моделей.

Разработанные математические модели были реализованы в виде программного комплекса GDMB, реализующего имитационное моделирование движения тела в нестационарном потоке сложной структуры, и дополнительных автономных программных модулей: модуля START, предназначенного для расчета параметров внутрибаллистического процесса при активно-реактивном старте из закрытой ПУ, модуля AER, реализующего расчет аэродинамических коэффициентов, и модуля VNB, реализующего расчет параметров движения тела в стационарном потоке сложной структуры при наличии участка нестабилизированного движения. Программный комплекс (ПК) реализует сопряженный расчет двумерного газодинамического течения многокомпонентного невязкого газа и движения тела в счетной зоне с одновременным вычислением изменения газодинамических параметров на границе счетной зоны (в зоне вдува газа), силового воздействия на тело и параметров его движения, в том числе, с учетом возможной несимметрии обтекания, вызванной малыми угловыми перемещениями.

Интерфейсная часть ПК обеспечивает удобство конфигурирования счетной зоны решения газодинамической задачи: задание конфигураций тел, газовых областей, граничных условий счетной зоны, визуальное представление результатов расчета параметров нестационарного течения. Интерфейсная часть является во многом типовой и, в этом плане, обеспечивает некоторые возможности известных ПК, таких как возможность записи фильма, обеспечивающего просмотр развития процесса газодинамического течения в цветном, либо в черно-белом варианте, размещение в счетной

зоне датчиков, фиксирующих изменение газодинамических параметров во времени и т.д. Однако, прикладной характер разрабатываемого ПК наложил некоторые отпечатки на интерфейсную часть, связанные, например, с заданием конфигураций твердых тел и газовых областей по точкам контура с использованием числового ввода координат (а не мышкой, как в известном пакете GDT), использование файлового ввода - вывода параметров, связанных с расчетом движения тела, и параметров, регистрируемых виртуальными датчиками, с целью удобства их последующего документирования и использования, а так же графической обработки.

Автономные программные модули расширяют возможности ПК и используются для решения следующих задач:

- определения газодинамических параметров течения на срезе ПУ и кинематических параметров движения ЛА в момент выхода из ПУ;
- предварительного расчета аэродинамических коэффициентов, определяющих аэродинамическое воздействие на ЛА на участке движения с большими углами атаки;
- определения траекторных параметров ЛА при движении в зоне стационарного течения заданной структуры.

В свою очередь ПК GDMB, помимо задачи расчета параметров движения тела произвольной конфигурации в нестационарном потоке, позволяет решать различные традиционные задачи, связанные с расчетом параметров газодинамического течения в двумерном варианте.

Тестирование ПК GDMB проводилось посредством определения силового воздействия на тело при стационарном обтекании и сравнения результатов с известными экспериментальными данными, а так же оценки правильности отражения основных элементов нестационарного течения на срезе ПУ.

Результаты определения коэффициента продольной силы посредством виртуальной продувки с использованием разработанного ПК для тел плохобтекаемой формы, характерных для кормовых частей ЛА, дают хорошее совпадение с экспериментом и аэродинамическим расчетом по известным методикам. При этом, при наличии конических поверхностей, целесообразно введение согласующего коэффициента $k_h=0,9$, учитывающего завышение результата, связанное с аппроксимацией контура тела целыми ячейками.

Результаты расчета координаты центра давления по предложенной методике показали хорошее совпадение с экспериментом при продувке цилиндра с плоским торцом и для полного конуса. Для комбинации конус-цилиндр погрешность определения центра давления несколько выше (в среднем 9%). При этом указанная погрешность связана, в основном, с определением координаты центра давления в окрестностях звуковой точки, что объясняется, по-видимому, погрешностями, связанными с использованием модели невязкого газа.

Несмотря на это, в целом полученные результаты подтвердили возможность использования разработанного ПК для определения силового воздействия на тело при его движении в зоне нестационарного течения сложной структуры.

Тестирование алгоритма расчета параметров течения и силового воздействия на подвижные тела в счетной зоне проводилось по результатам решения модельной задачи расчета движения двух тел цилиндрической формы навстречу друг другу (рис. 2).

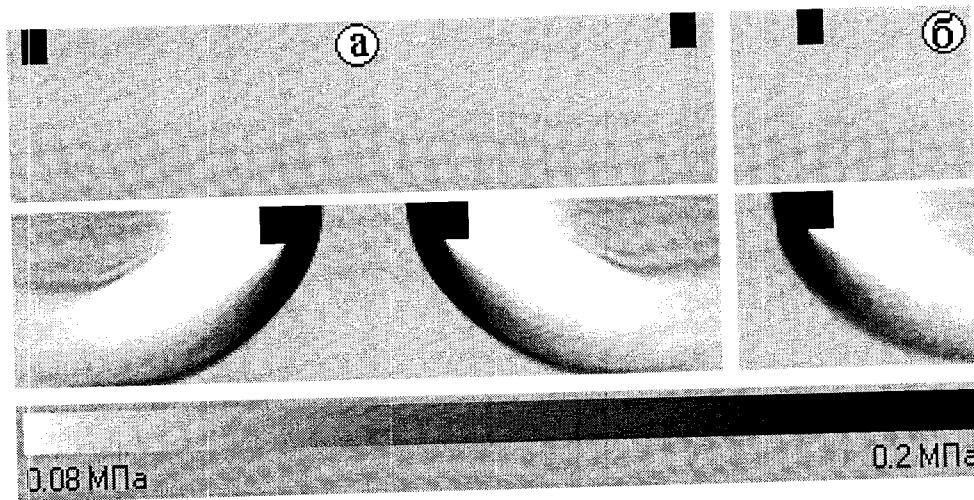


Рисунок 2 - Изменение давления в счетной зоне: а – два цилиндра движущихся навстречу друг другу в неподвижном газе; б – неподвижный цилиндр, обтекаемый потоком газа

Результаты расчета показали хорошее совпадение распределения давления в счетной зоне для рассматриваемого и контрольного вариантов. Наблюдаемое выполнение симметрии течения является дополнительным контрольным тестом правильности вычислений. Сравнительный анализ вариантов расчета показывает, что для варианта с неподвижным телом граница ударной волны более размыта, что указывает на более быструю сходимость и лучшее моделирование процесса в случае подвижного тела, что подтверждается результатами расчета осевой силы (рис. 3).

Для оценки правильности представления структуры нестационарного течения проводилось сравнение отражения расчетного определения основных элементов течения (распределение градиента плотности, изображение справа) с теневыми фотографиями начального этапа процесса истечения воздуха из канала пусковой установки.

Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента показали хорошее отражение волновой структуры процесса и основных элементов течения. Хорошо просматриваются ударная волна, зона уплотнения за диском Маха, косые скачки уплотнения, ограничивающие зону изоэнтропического течения, зоны вихревого течения на периферии диска Маха.

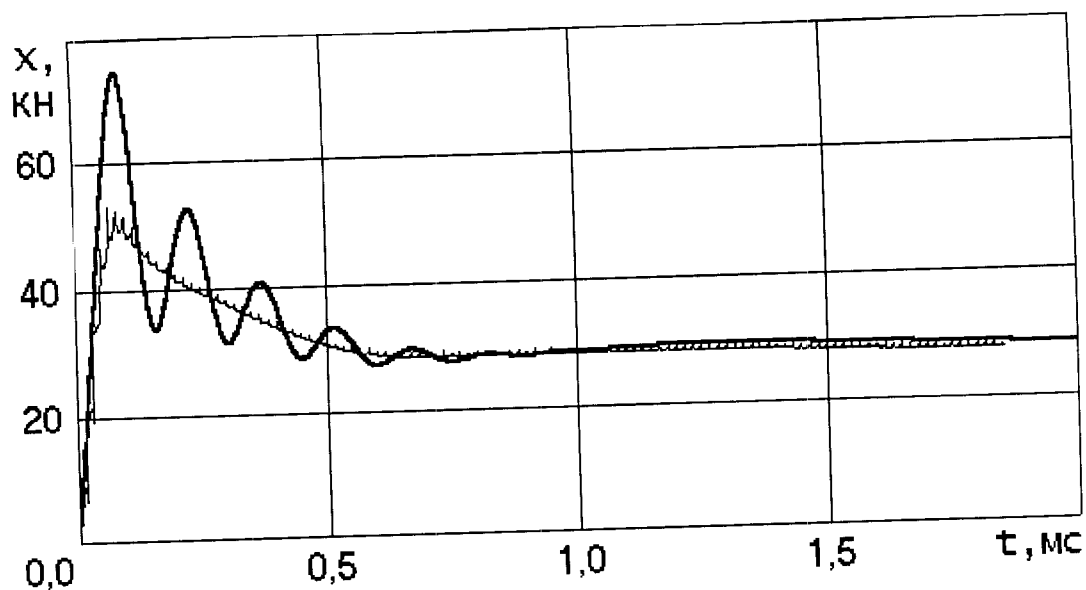


Рисунок 3 - Изменение осевой силы в процессе установления течения:
 — - вариант «а» с подвижным телом; — - неподвижное тело, «б»

Тестирование программного модуля START проводилось посредством сравнения результатов расчета с известными результатами расчетов параметров внутрибаллистического процесса, полученными другими авторами, а модуля VNB посредством решения модельных задач. В процессе тестирования были получены удовлетворительные результаты.

В четвертой главе работы рассматриваются примеры решения некоторых прикладных задач, связанных с расчетом параметров движения тел в газовом потоке сложной структуры, и варианты применения разработанного программного комплекса для решения задач из смежных областей.

Первым примером являлось моделирование движение ЛА в зоне нестационарного течения на срезе ПУ. Были рассмотрены различные варианты конфигураций кормовых и носовых частей ЛА, а так же различные начальные скорости их движения в зоне течения (рис. 4). Получены оценки изменения силового воздействия на ЛА и кинематических параметров движения в рассматриваемом периоде.

Анализ результатов расчетов показал, что весь процесс движения ЛА можно разделить на два участка – участок интенсивного силового воздействия на ЛА и участок нестабилизированного движения в зоне течения. Это позволило предложить приближенную методику расчета изменения кинематических параметров движения ЛА, пригодную для расчета их статистических характеристик методом статистического моделирования.

Рассмотрен пример определения структуры течения вокруг подвижного носителя, показавший необходимость учета параметров возмущенного течения при старте с подвижного носителя, двигающегося со сверхзвуковой скоростью, при расположении ПУ в зоне близкой к миделевому сечению.

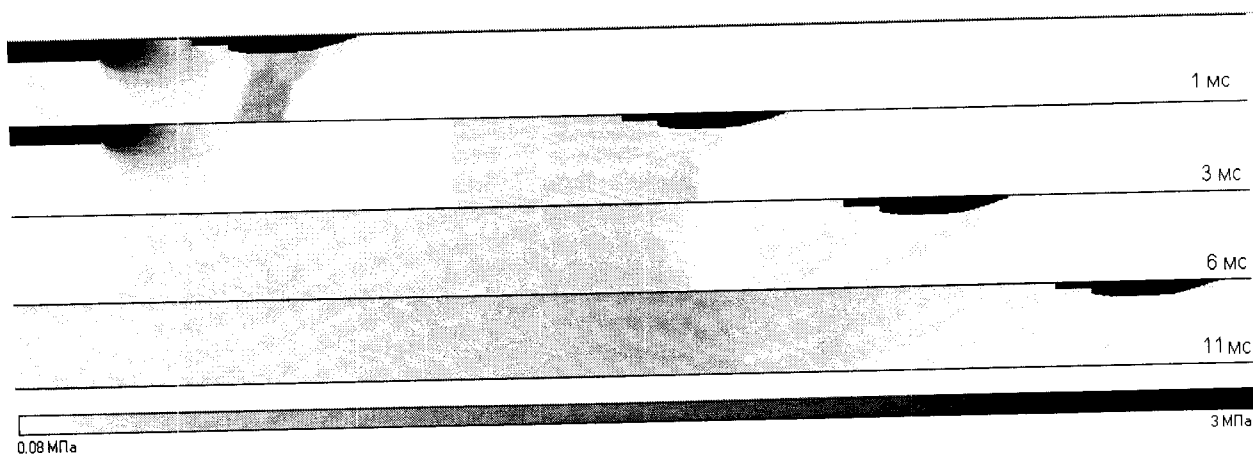


Рисунок 4 - Распределение давления в счетной зоне в различные моменты времени при обтекании ЛА

Приведен пример расчета процесса активно - реактивного старта из закрытой ПУ с короткой направляющей, показавший преимущества подобного старта с точки зрения увеличения начальной скорости и снижения силового воздействия на ПУ, и пример расчета параметров движения при старте с подвижного носителя пиротехнического элемента при различных условиях, показавший возможность оценки опасных, с точки зрения столкновения с носителем, вариантов старта.

Рассмотрена возможность использования разработанного программного комплекса для моделирования ряда прикладных задач, например, газодинамического процесса в полости импульсного поршневого компрессора (рис. 5). Из рисунка видно преимущество предлагаемого варианта учета подвижной границы твердого тела, исключающее осцилляцию решения.

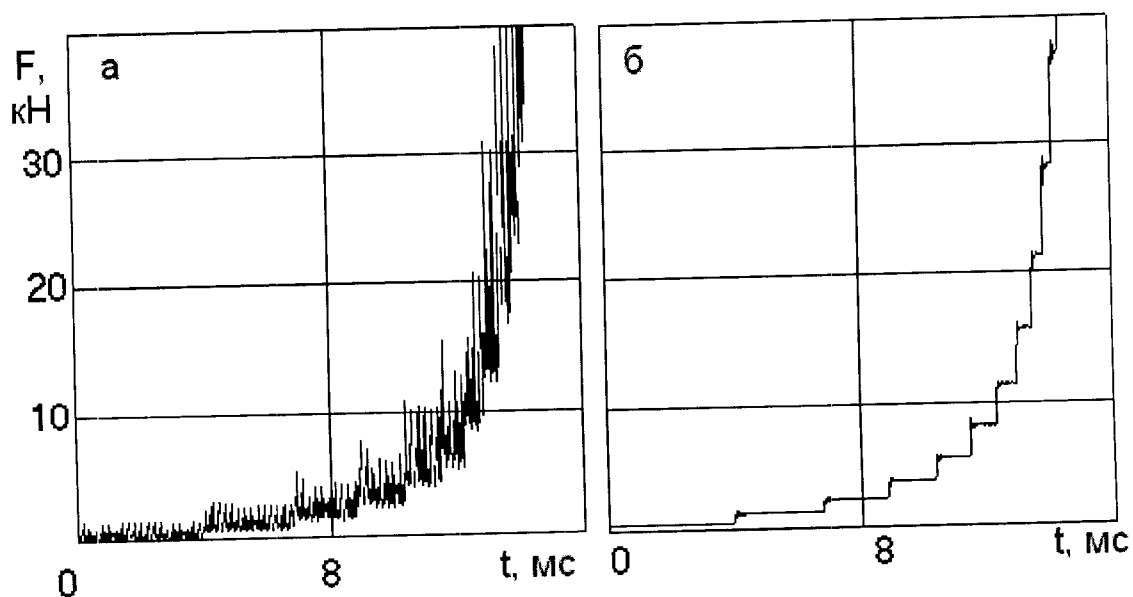


Рисунок 5 - Расчетное изменение усилия на поршне импульсного поршневого компрессора: а – расчет с дискретным перемещением поршня; б – аналогичный расчет с использованием схемы деформируемых дробных ячеек

В качестве возможного приложения разработанного программного обеспечения можно привести задачи расчета течений сложной структуры в условиях неподвижных границ: вдув топливовоздушной смеси в цилиндр двигателя внутреннего сгорания, формирование крупномасштабных вихревых структур при взаимодействии струйных течений с жесткой поверхностью (рис. 6), отделение ЛА от носителя в воздухе и некоторых других.

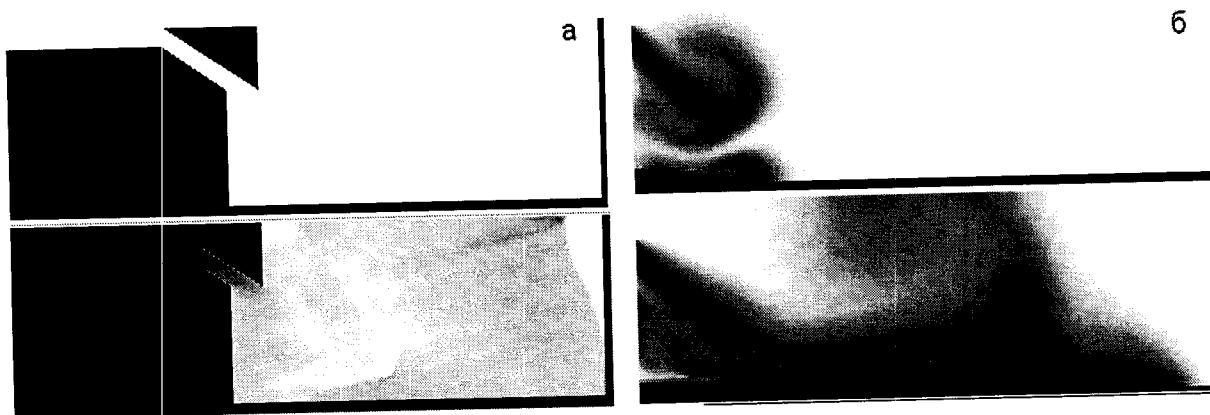


Рисунок 6 - Поля давления для процессов: а - вдув топливовоздушной смеси в цилиндр через клапан; б – взаимодействие двух струйных течений с жесткой поверхностью

В **заключении** приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана комплексная математическая модель процессов, определяющих параметры течения и движения тела в газовом потоке сложной структуры.

2. Предложен алгоритм расчета силового воздействия на тело, перемещающееся в зоне нестационарного газодинамического течения сложной структуры.

3. Разработан программный комплекс имитационного моделирования процесса нестационарного газодинамического течения для переменных граничных условий счетной зоны и наличии перемещающихся тел в счетной зоне, а так же вспомогательные автономные программные модули, обеспечивающие расчет начальных условий и параметров движения тела.

4. Тестирование программного комплекса имитационного моделирования движения тела в газовом потоке сложной структуры показало удовлетворительное отображение структуры и основных элементов нестационарного течения – ударной волны и контактной границы, а так же возможность использования результатов расчета газодинамического течения в двумерной осесимметричной постановке для расчета параметров силового воздействия

на тело, обеспечивающих последующий анализ его пространственного движения.

5. Предложенный алгоритм расчета силового воздействия на тело, перемещающееся в счетной зоне решения газодинамической задачи, показал удовлетворительное определение параметра течения и параметров силового воздействия с незначительным уровнем пульсации решения в пределах 2%.

6. Тестирование автономных вспомогательных модулей, обеспечивающих расчет начальных условий и параметров движения тела, по результатам сравнения с известными решениями и качественного анализа отображения процесса, показало удовлетворительные результаты.

7. Использование разработанного программного комплекса для анализа за структуры течения вокруг подвижного носителя, передвигающегося с различной скоростью, показало необходимость учета сложной структуры течения для сверхзвукового обтекания при старте ЛА в зоне близкой к миделевому сечению. Для остальных вариантов старта, включая дозвуковое обтекание, толщина слоя, соответствующего возмущенной зоне, не превосходит половины радиуса миделевого сечения.

8. Проведенные иллюстративные расчеты показали возможность использования разработанного программного обеспечения имитационного моделирования движения тела для решения ряда прикладных задач, связанных с оценкой изменения параметров движения ЛА при движении в зоне околодульного течения, а так же определения условий старта пиротехнических элементов, исключающих возможное их соударение с подвижным носителем.

9. Возможные дополнительные области применения разработанного программного комплекса - моделирование процессов отделения носителя от ЛА; газодинамического процесса в полости импульсного поршневого компрессора; процесса заполнения полости цилиндра двигателя внутреннего сгорания; формирование крупномасштабных вихревых структур при взаимодействии струйных течений с жесткой поверхностью; оценка последствий возможной террористической атаки с использованием взрывчатых веществ в закрытых помещениях.

10. Использование визуализации газодинамических процессов обеспечивает широкие возможности применения разработанного программного обеспечения в процессе обучения студентов, посредством имитационного моделирования газодинамических процессов в типовых элементах машин и устройств.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Грязев, В.М. Расчет параметров движения мины в зоне околодульного течения / В.М. Грязев, С.В. Шепетило // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014.- Вып. 12. - Ч. 1. - С. 250-253.

2. Грязев, В.М. Разработка программного комплекса моделирования внутрибаллистических процессов при активно-реактивном старте / В.М. Грязев, М.С. Воротилин, Н.В. Могильников, О.А. Фомичева // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2016. - Вып. 13. – Ч.1. - С. 3 - 7.
3. Грязев, В.М. Расчет параметров движения твердого тела в зоне нестационарного осесимметричного течения сложной структуры / В.М. Грязев // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2016. - Вып. 12. – Ч. 2. - С. 85 – 90.
4. Грязев, В.М. Модификация метода крупных частиц применительно к расчету течений с подвижными границами твердых тел / В.М. Грязев, Н.В. Могильников // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2017. - Вып. 1. – Ч.1. - С. 258 - 264.
5. Грязев, В.М. Некоторые приложения задачи расчета газодинамического течения в условиях подвижных границ твердых тел / В.М. Грязев, Н.В. Могильников // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2017. - Вып. 4. - Ч.1. - С. 102 - 108.
6. Грязев, В.М. Оценка изменения параметров углового движения мины в зоне околосуперзвукового течения / В.М. Грязев // Наука. Промышленность. Оборона: Труды XVI Всероссийской НТК. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. - С. 236-238.
7. Грязев, В.М. Активно-реактивный старт пиротехнического изделия из нарезной ПУ / В.М. Грязев // Фундаментальные основы баллистического проектирования: V Всесоюзная научно-техн. конф., Санкт-Петербург, 27 июня – 1 июля 2016 г.: сб. матер. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.: 2016. – С. 113-114.
8. Грязев, В.М. Определение аэродинамических характеристик ПБ при старте с подвижного носителя / В.М. Грязев // XIV Всероссийская НТК «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов»: материалы докладов. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. - С. 132 - 136.
9. Программный модуль расчета нестационарного газодинамического течения при наличии подвижных тел в счетной зоне: свидетельство гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017614602 Рос. Федерация / Могильников Н.В., Грязев В.М.; заявитель и правообладатель ФБГОУ ВО «Тульский государственный университет».- № 2017611558; заявл. 27.02.17; гос. регистр. 24.04.17.
10. Создание концептуальных моделей физических явлений и процессов функционирования газодинамических импульсных систем: отчет по НИР. № гос. рег. АААА-А16-116042010052-6. Грант РФФИ №16-41-710663; рук. Воротилин М.С.; исполн.:Грязев В.М. [и др.]. - Тула, ТулГУ. - 2016. - 87 с.