**Содержание**

[1. Специальная часть 3](#_Toc10500640)

[2. Расчет внутрибаллистических параметров двигателя с воспламенителем и зарядом выбранных конструкций 17](#_Toc10500641)

[2.1.1. Методика расчета внутрибаллистических параметров 17](#_Toc10500642)

[Список использованной литературы 20](#_Toc10500643)

# 1. Специальная часть

Программа КОМТЕД предназначена для расчета параметров функционирования РДТТ с вкладным многошашечным зарядом последовательного снаряжения на полное время работы двигателя.

В процессе своей работы программа КОМТЕД через заданные интервалы реального времени функционирования, моделируемого РДТТ выдает основные внутрибаллистические характеристики (ВБХ) двигателя такие, как давление, скорость, температуру потока продуктов сгорания, интегралы давления, моментальный расход через сопловое отверстие и т.п. Дополнительно печатается информация о распространении пламени по поверхности твердого топлива и о времени вскрытия соплового отверстия.

Программа существует в двух вариантах. В первом варианте (будем называть КОМТЕД-1) заряд представляет из себя последовательно расположенные шашки в виде толстых цилиндров форма которых задается в исходной информации. Во втором варианте (будем называть его КОМТЕД-2) геометрия последовательно расположенных шашек задается в виде таблиц в необходимых для этого сечениях по оси двигателя с равномерным шагом по выгоранию.

Для определения ВБХ РДТТ алгоритм программы основан на реализации математической постановки задачи, предусматривающей совместное рассмотрение следующих процессов:

- горение воспламенительного состава, расположенного в одном из свободных объемов рис.1;

- прогрева и постепенного подключения к горению поверхности топливных шашек;

- течение продуктов сгорания вдоль оси двигателя;

- тепловое взаимодействие продуктов сгорания со стенкой камеры двигателя;

- гидравлическое взаимодействие с решетками, расположенными в свободных объемах и удерживающими заряд в неподвижном состоянии;

- деформацию заряда и камеры за счет перепадов давления (рассматривается только в программе КОМТЕД-1);

- изменение геометрии заряда в процессе горения.

Оба варианта программы написаны на языке АЛГОЛ-60 для транслятора АЛГОЛ-60 для транслятора АЛГОЛ-ГДР, входящего в состав математического обеспечения ЭВМ БЭСМ-6.

КОМТЕД является достаточно самостоятельной программой, не использующей библиотечные процедуры, кроме двух системных: CTIME и IFOVFL.

Объем используемой программой оперативной памяти, расчетное время сильно зависят от конкретной задачи, предлагаемой для решения. Для тестовых примеров данные параметры программ являются следующие:

Логическая структура программы.

2.1. Описание задачи

Наиболее полная физико-математическая постановка задачи об определении ВБХ РДТТ рассматриваемого типа реализуется в программе КОМТЕД-I. В варианте КОМТЕД-2 отсутствует учет деформации топливных шашек камеры в целом.

При построении математической модели в самом общем случае (КОМТЕД-1) использовались следующие основные допущения.

1. Поток газовой смеси в каналах и кольцевых зазорах на рис.1 на начальном и основном участках работы РДТТ считается одномерным, а в свободных объемах на начальном и основном участках работы двигателя, как и во всей полости камеры в целом на участке спада характеристики газового потока считаются осредненными по соответствующим объемам.
2. Поступающие за счет горения газы мгновенно механически смешиваются с газами, либо находящимися в данном свободном объеме, либо протекающими над данной горящей поверхностью. Состав газовой смеси считается замороженным, а сама смесь- идеальным совершенным газом.
3. Тепловое взаимодействие продуктов сгорания отвечает условиям возможного применения квазистационарных критериальных зависимостей для определения числа Нуссельта
4. Условия деформации стенок камеры и шашек основного заряда совпадают с условиями применения соответственно полумоментной теории оболочек и задачи Лямэ.

С учетом сделанных выше предположений, в самом общем случае системы уравнений, описывающих изменение газодинамических величин в - ом свободном объеме V записывается следующим образом

Используются следующие обозначения

t-время

*-*полная внутренняя энергия газа;

- давление. плотность, скорость, показатель адиабаты и концентрации продуктов газовой смеси;

*;*

N1-количесвто топливных шашек основного заряда, тогда N1+1- количество свободных объемов (головной имеет номер I, а предсопловой N1+1);

NI-номер свободного объема, в котором располагается воспламенитель с навеской, радиусом зерна, плотностью, скоростью горения и коэффициентом формы зерна;

Z –относительная толщина сгоревшего свода зерен воспламенителя;

-суммарная скорость движения плоскостей торцов шашек заряда, ограничивающих данный свободный объем, друг относительно друга (в случае головного или предсоплового объема относительно соответствующего днища)

поток массы (энтальпия) газов из канала и кольцевого зазора в объем со стороны «левой» шашки;

*-* соответствующие потоки массы энтальпии газов из канала кольцевого зазора «правой» шашки.

- газоприход от воспламенителя;

-газоприход от горения торцов шашек, прилегающих к соответственно слева и справа. В случае бронированных торцов .

Расход массы газов через сопловое отверстие;

-время достижения давления разрушения сопловой мембраны;

-текущее значение живого сечения потока газов через сопловое отверстие;

*-* теплотворные способности топлива воспламенителя, «левой» и «правой» шашек соответственно, которые равны произведению изобарных теплоемкостей продуктов и температур горения.

-концентрация «начального» газа;

;

-газовые постоянные и изохорные теплоемкости газов, входящих в смесь.

Переходя в рассмотрении к областям каналов и кольцевых зазоров заряда с учетом, сделанных выше допущений, система уравнений, описывающих движение газовой смеси вдоль оси камеры для произвольного объема W в интегральной форме, запишется следующим образом

Величины характеризуют потери импульса и энергии соответственно за счет трения и теплообмена

Для определения решаются две задачи: о прогреве многослойной стенки камеры, которая моделируется линейным одномерным уравнением нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего (на поверхностях омываемых газом атмосферы с продуктами сгорания) и четвертого (на поверхностях соприкосновения слоев) рода, и об определении температуры поверхности твердого топлива, которую следуя можно свести к решению обыкновенного дифференциального уравнения

где - коэффициенты температуропрводности и теплопроводности топлива, - коэффициент теплоотдачи

Здесь - числа Рейнольдса (за характерный размер берется x – текущая длина пограничного слоя), Прандтля, -теплопроводность газа.

Определение температуры поверхности топлива необходимо и для решения задачи о воспламенении основного заряда. В данной методике за критерий зажигания взято достижение поверхностью твердого топлива некой определенной экспериментально для каждого состава температуры вспышки.

Эрозионное горение основного заряда учитывается введением коэффициента эрозионного горения в форме, предложенной Вилюновым В.Н.

Радиальные перемещения корпуса камеры WR, связанные с деформацией оболочки под действием перепада давления в кольцевом зазоре   
и атмосферного определяется по формуле, полученной при использовании полумоментной теории оболочек с учетом жесткого закрепления концов

Здесь

При

X-осевая координата;

- модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала стенки камеры;

R-Радиус серединной поверхности;

- толщина стенки.

Радиальные перемещения заряда , обусловленные перепадом давления между каналами и кольцевыми зазорами, а также линейно распределенным по длине поджатием шашки с торцов находятся из решения известной задачи Лямэ 3 с учетом осевого напряжения

в виде добавки ,

Здесь

-текущий радиус

-модуль Юнга и коэффициент Пуассона топлива.

Сшивка решений системы уравнений для осредненных по свободным объемам параметров и одномерных газодинамических производится посредством граничных условий:

-  равенства статических давлений в случае дозвукового истечения газов из области одномерного газодинамического решения;

-  равенства полных импульсов и полных энтальпий газов при дозвуковом втекании в область одномерного газодинамического решения.

При конструировании потока полного импульса через плоскость сшивки решений учитывается влияние диафрагм, удерживающих заряд в неподвижном состоянии. Для этого определяется реакция газов на диафрагму как произведение давления на последней (находится из решения задачи об ударе газа о твердую стенку) и площади диафрагмы, перекрывающей путь потоку (геометрические характеристики диафрагм вводятся вместе с остальной исходной информацией в виде таблиц).

За начальные условия берутся равенство нулю скоростей начального газа, равенство давления, плотности и температуры по всей конструкции начальным значениям, мгновенное зажигание только поверхности воспламенителя, считается, что концентрация всех продуктов горения равны нулю и конструкция начального газа равна единице.

2.2. Методы решения

Численно задачи расчета течения газовой смеси в областях каналов и кольцевых зазоров заряда реализована методом распада произвольного разрыва С.К. Годунова с использованием интегральных законов сохранения.

В процессе расчета каждая из 2·N1(по количеству шашек основного заряда № I) областей решение разбивается на N2[j]. J=1÷N1 «элементарных» объемов (количество таких объемов для канала и кольцевого зазора одной и той же шашки одинаково). Каждом выбранном объеме вращения газодинамические параметры осредняются. Изменение осредненных величин во времени описываются следующими соотношениями:

Здесь

-шаг численного интегрирования по времени для данного временного слоя;

- величина -ого «элементарного объема».

Кроме уже употребленных при математической постановке обозначений газодинамических величин использованы M, I, H, T, Q- соответственно плотности потоков массы, полного импульса полной энтальпии, напряжения трения и теплового потока.

Индекс K относится к поверхностям. Через которые происходит перетекание газов либо с коих осуществляется приток массы и энергии за счет горения, а N-к стенке камеры и негорящей поверхности твердого топлива.

-соответственно шаги интегрирования по времени для предыдущего временного слоя и на два временных слоя назад;

- коэффициенты, подбираемые экспериментально;

-шаг по координате;

-соответсвенно самая «правая» и самая «левая» скорость волны возмущения в е-ой ячейке.

Плотности потоков M, I, H через плоскости раздела элементарных ячеек находятся через параметры, определяемые из задачи о распаде произвольного разрыва по величинам для временного слоя .

Геометрические параметры – площади для прохода газов и поверхности горения- находятся либо через простые зависимости для толстых цилиндров с учетом решения задач деформации заряда и корпуса в варианте КОМТЕД-1, либо линейной интерполяцией по таблицам геометрических характеристик, вводимых в исходной информации в варианте КОМТЕД-2.

Для определения тепловых потоков и времен зажигания участков поверхности твердого топлива совместно с газодинамической решаются две тепловые задачи:

-  о прогреве поверхности твердого топлива (для каждой ячейки разбиения в областях кольцевых зазоров по схеме Кранка-Николсона численно интегрируется линейное уравнение теплопроводности);

-  о прогреве поверхности твердого топлива (для каждого из «элементарных объемов методом Эйлера интегрируется обыкновенное дифференциальное уравнение, определяющее текущую температуру поверхности заряда.

Система уравнений, определяющая параметры в областях свободных объемов, интегрируется одношаговым методом Эйлера.

Для всех нестационарных задач за шаг интегрирования по времени берется , определяемый условиями устойчивости для решения газодинамической задачи методом С.К. Годунова.

Газодинамическая задача решается в безразмерных переменных. В качестве масштабов выбираются следующие величины:

-масштаб давления произведению показателя адиабаты для продуктов сгорания топлива первой шашки и давления по формуле Bory, вычисленному в предположении, что топливо всего заряда имеет одинаковый состав с первой шашкой;

-масштаб скорости ,где - показатель адиабаты, газовая постоянная и изобарная температура горения топлива первой шашки;

-масштаб плотности ;

-масштаб времени , где -длина корпуса камеры.

При определении параметров течения на квазистационарном участке для ускорения сходимости метода установления через равные промежутки «фиктивного» времени установления «правятся» уровни давления и плотности в зависмости от секундных суммарных прихода массы газа за счет горения MP и расхода последнего через сопло MR по формулам:

для всех -ых расчетных ячеек.

2.3. Логическая структура

Как программа «Комтед-1», так и программа «Комтед-2» состоит из одинакового количества подпрограмм. Две подпрограммы стандартные для матобеспечения ЭВМ ВЭСМ-6. Это IFOVL, служащая для обработки авостных ситуаций, и CTIME, обеспечивающая слежения за временами функционирования программы (коммерческим и центрального процессора). Остальные I7 подпрограмм созданы авторами и оформлены в виде внутренних алгол-процедур.

Ход процесса расчета параметров функционирования двигателя определяется следующей последовательностью:

-1. Начало. Ввод исходной информации.

-2. Расчет периодов выхода давления на стационарный режим и квазистационарного режима функционирования РДТТ. Вывод расчетной информации.

-3. Расчет участка спада давления в камере двигателя. Вывод расчётной информации.

-4. Конец.

Использование метода установления для определения параметров течения на квазистационарном участке работы двигателя позволило структурно объединить расчет «начального» и «основного» периодов работы РДТТ. Различие только в том, что при расчете периода выхода давления на режимное квазистационарное значение изменение геометрических параметров за счет выгорания происходит параллельно с вычислением параметров течения, тогда как при расчете квазистационарных значений параметров течения на «основном» участке функционирования РДТТ сначала определяются измененные геометрические параметры топливных шашек, а газодинамические характеристики течения вычисляются в процессе многократного интегрирования газодинамических уравнений. С учетом этого можно описать программу, как реализацию нижеследующей последовательности шагов вычислительного алгоритма.

ШАГ 1. Начало. Ввод исходной информации по конструктивным особенностям РДТТ, используемым материалам, директивных параметров для управления программой.

ШАГ 2. Вычисление необходимых масштабов и составленных из последних констант, а также единожды определяемых констант, необходимых для расчетов. Рассылка начальных данных. Печать вводимой исходной информации, основных масштабов, а также начального распределения газодинамических и геометрических параметров, изменяющихся в процессе счета.

ШАГ 3. Численное интегрирование газодинамических и тепловых уравнений на один шаг по времени (на участке выхода двигателя на режим шаг по времени-«реальный» шаг процесса функционирования двигателя, на квазистационарном участке –шаг по «фиктивному» времени метода установления). При необходимости печать сообщения о воспламенении участков топливных шашек.

ШАГ 4. Решение задачи о деформации камеры и заряда (только для программы КОМТЕД-1).

ШАГ 5. Рассмотрение условия о вскрытии сопла и печать результатов для этого момента.

ШАГ 6. Определение характера текущего периода функционирования РДТТ. Если это выход двигателя на режим, то ШАГ 7. Если это квазистационарный участок, то на ШАГ 8.

ШАГ 7. Проверка критерия выхода двигателя на квазистационарный режим. Определение текущего времени. В случаях достижения времени выхода либо времени вывода результатов расчета печать текущих значений газодинамических и геометрических параметров. Переход на ШАГ 3.

ШАГ 8. Проверка начала процесса установления на данном временном слое. Если процесс на последнем только что начался-изменение геометрических характеристик заряда, на ШАГ 3. Если процесс установления продолжается длительное время и необходимо проверить сходимость к решению (что делается через определенные промежутки), то производится сравнение решения методом установления; при невыполнении условия сходимости в случае необходимости. и , на ШАГ 3 ; при выполнении условия сходимости изменяется текущее время , время установления полагается равным 0, после проверки при выполнении условия необходимости вывода текущих значений газодинамических параметров происходит печать результатов счета; в случае отсутствия «прогара» шашек на ШАГ 3, иначе на ШАГ 9.

ШАГ 9. Расчет периода спада давления в двигателе с безразмерным шагом равным I. Через каждые 50 шагов производится вывод результатов счета. Счет продолжается до уровня давления в камере 2,5 от начального значения.

ШАГ. 10. Конец.

# *2. Расчет внутрибаллистических параметров двигателя с воспламенителем и зарядом выбранных конструкций*

# *2.1.1. Методика расчета внутрибаллистических параметров*

Расчет внутрибаллистических параметров (ВБП) двигателя с зарядом и воспламенителя выбранных конструкций проводился численным методом интегрирования системы дифференциальных уравнений внутренней баллистики в одномерной газодинамической постановке. Численно задача расчета параметров течения газовой смеси в зоне канала заряда и кольцевого зазора между зарядом и стенкой камеры сгорания реализована в программе методом распада произвольного разрыва С.К. Годунова с использованием интегральных законов сохранения.

При расчете ВБП учитывались следующие факторы:

- фактические геометрические размеры заряда и газового тракта двигателя;

- эрозионное горение топлива в форме, предложенной Вилюновым;

- двухсвязность в области течения газа по каналу заряда и кольцевому зазору;

- наличие диафрагм, удерживающих заряд в камере сгорания, при этом учитывается реакция потока газа на диафрагму при ударе о нее как о твердую стенку и перекрытие диафрагмой площади для прохода газов;

- место расположения воспламенителя;

- скорость горения дымного пороха в навеске воспламенителя, а также форма и размеры экрана;

- наличие сопловой заглушки и давление ее разрушения:

решается ее тепловая задача определения температуры поверхности твердого топлива. При ее решении учитывается наличие в камере сгорания атмосферного воздуха в момент начала воспламенения и обтекание поверхности твердого топлива продуктами сгорания воспламенителя;

- результаты расчета тепловой задачи используются для учета постепенного воспламенения поверхности заряда (за критерий воспламенения поверхности заряда принято достижение ею температуры вспышки топлива).

При проведении расчетов ВБП приняты следующие допущения, постоянные для всех вариантов сочетаний размеров и характеристик заряда:

- внутренний диаметр камеры сгорания принят равным его минимальному значению, равному 

- давление разрушения сопловой заглушки принято равным ;

- масса навески ДРП-2 в воспламенителе принята равной 35 г;

- площадь критического сечения сопла при работе двигателя принята постоянной, т.е разгар не учитывался;

- разбросы поверхности горения заряда и площади проходов для продуктов сгорания учитывались в пределах допуска на геометрические размеры заряда;

- скорость горения и эрозионные характеристики БРТТ, также коэффициент перехода к скорости горения топлива в двигателе определялись с учетом опытных данных серийных изделий- аналогов и результатов испытаний зарядов по теме «Багульник»;

- несимметричный диапазон поля допуска скорости горения между партиями был принят исходя из обеспечения требования ТЗ к БВП.

# Список использованной литературы

1. Серебряков М.Е. "Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет". Оборонгиз,1962

2. Колмаков А.Д., Козлов Е.А., Венгерский В.В. и др. "Газодинамический расчет внутрибаллистических характеристик РДТТ с вкладным многошашечным зарядом последовательного снаряжения на полное время работы двигателя.

3. Бритарев В.В., Ключников А.Н., Ветров П.И. и др. "Отработка зарядов 15…, 15…воспламенителя 15… двигателям отделения и увода ДУ 15… Отчет ФГУП «ФЦДТ "Союз"»,

4. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., и др. "Численное решение многомерных задач газовой динамики"и Москва, Наука, 1976

5. Соркин Р.Е. "Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. Внутренняя баллистика." Москва, Наука, 1983.

6. Абугов Д.И., Бобылев В.М., "Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива" Москва, Машиностроение, 1987

7. Трусов Б. Г. "Универсальная программа расчета параметров равновесия многокомпонентных термодинамических систем «Астра»". МВТУ им. Баумана, НИИ проблем машиностроения, Москва, 1983.