

УДК 621.453/.457-6

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РДТТ ПРИ ВЫБОРЕ ТОПЛИВ МАРШЕВЫХ СТУПЕНЕЙ (ЧАСТЬ 1)

С.А. Биткин

Представлена разработанная, прошедшая многолетнюю эксплуатацию, постоянно обновляющаяся система прогнозирования энергетических характеристик маршевых РДТТ баллистических ракет, обеспечивающая проектирование на начальном этапе разработки в ходе многовариантного поиска рационального облика двигателей в составе многоступенчатой ракеты, формирования требований к смесевым ракетным твердым топливам, целью которой является формирование требований технического задания на двигательные установки. В основе создания комплекса программ оперативного прогнозирования энергетических характеристик лежит междисциплинарный подход, обусловленный разнообразием взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в двигателе при его работе и длительной эксплуатации и вычислительный эксперимент, позволяющий на основе параметрических исследований процессов по полномасштабным математическим моделям сформировать упрощенные, но достаточно точные математические модели верхнего уровня иерархии.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, системный этап проектирования, смесевое твердое ракетное топливо, удельный импульс тяги, потери удельного импульса, профилирование сопла, двухфазное течение, пакет прикладных программ, аппроксимационные зависимости.

Структура и состав программного обеспечения

Интегрированная система прогнозирования энергетических характеристик маршевых РДТТ баллистических ракет предназначена для обеспечения проектирования на начальном этапе разработки в ходе многовариантного поиска рационального облика двигателей в составе многоступенчатой ракеты и формирования требований к смесевым ракетным твердым топливам [1, 2].

Структура и состав системы, включающей программный комплекс диалогового расчета двигателя (ДИАРАД), применяемый на этапе системного проекта при формировании требований к смесевым ракетным твердым топливам (СРТТ) и разработке технических заданий (ТЗ) на двигатели изображена на рис. 1.1.

Комплекс ДИАРАД включает в себя программные средства, как в виде пакетов прикладных программ, так и отдельных автономных модулей, объединенных управляющим модулем ФОРМИД, обеспечивающим формирование исходных данных для расчета и логических цепочек вычислений [3].

Комплекс позволяет выполнять следующий цикл расчетов:

1.1. Термодинамический расчет (пакет ТЕРМ)

- расчет термодинамического удельного импульса тяги при различных давлениях в камере сгорания и степени расширения сопла;
- расчет равновесных термодинамических и теплофизических характеристик и состава продуктов сгорания в камере, в различных сечениях по тракту сопла, на срезе сопла;
- расчет термодинамических характеристик и состава продуктов сгорания с учетом отклонений от равновесия: неравновесность кристаллизации, химическая неравновесность, неполнота сгорания, тепловые потери;
- расчет термодинамических характеристик и состава продуктов истечения с учетом дополнительного прихода массы уносимых ТЗП и ЭСМ.

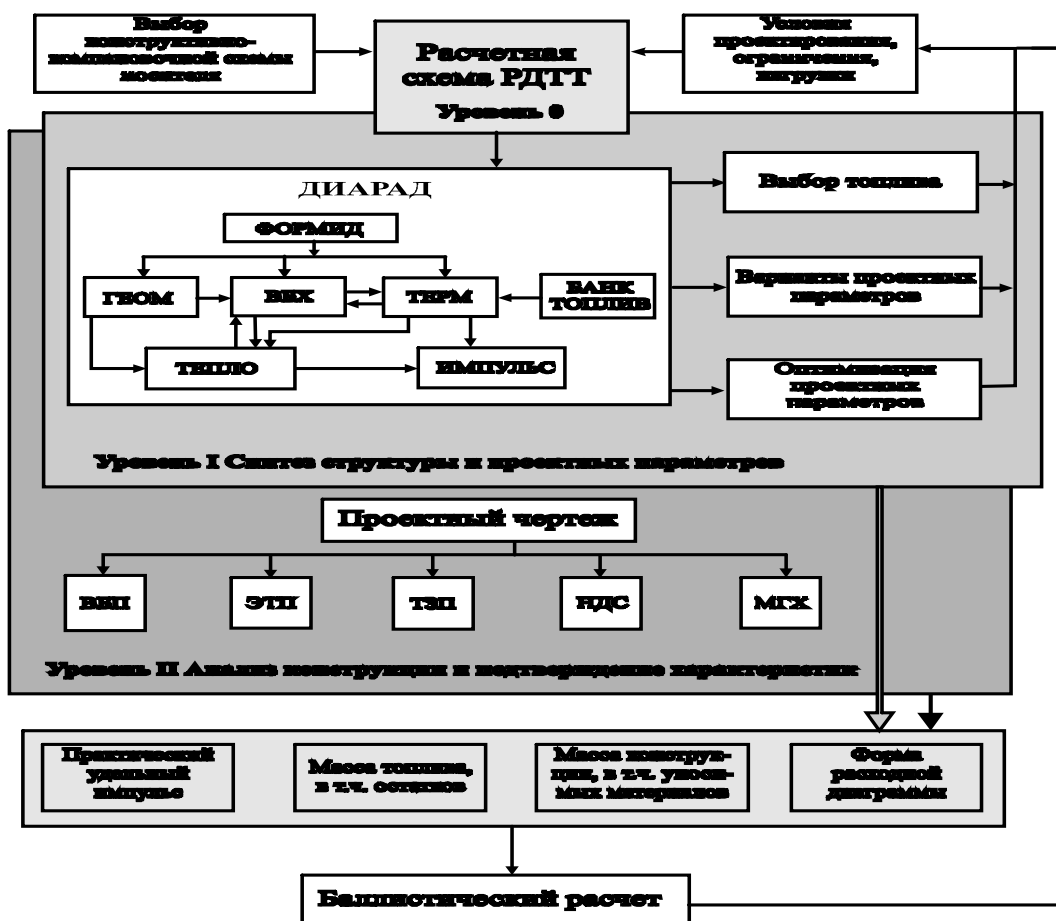


Рис. 1.1. Структура и состав программного обеспечения

Основу пакета ТЕРМ составляет программа «АСТРА-4рс» с базой данных «ИВТАНТЕРМО» [4], дополненная блоком формирования исходных данных для различных вариантов двигателей, блоком БАНК ТОПЛИВ и графическим представлением результатов расчетов. Результаты термодинамического расчета являются исходными данными для внутрибаллистических расчетов, расчетов практического удельного импульса тяги, теплового расчета, расчета параметров струи продуктов сгорания.

1.2. Расчет геометрических, массовых и массо-центровочных характеристик топливного заряда (пакет ГЕОМ)

- расчет по интерполяционному методу характеристик выгорания заряда твердого топлива с произвольной 3-х мерной геометрией поверхности;
- расчет вскрытия поверхности корпуса в процессе выгорания заряда;
- расчет проходных сечений, свободного объема камеры сгорания по времени работы;
- расчет массы заряда, координат центра масс, продольного и поперечного моментов инерции заряда;
- расчет продольного распределения массы топлива в процессе выгорания зарядов.

Основу пакета ГЕОМ составляет программа SQUARE 2 [5], дополненная блоком формирования исходных данных и документирования выходной информации. Пакет предназначен для обеспечения проектирования твердотопливных зарядов в процессе его структурного и параметрического синтеза.

Результаты расчета имеют как самостоятельное значение в части массо-центровочных и моментных (МЦМХ) характеристик заряда, определяющих МЦМХ ракеты, так и являются исходными данными для расчетов диаграмм расхода и давления в пакете расчета внутрибаллистических характеристик (ВБХ) и теплового состояния элементов конструкции.

1.3. Внутрибаллистический расчет (пакет ВБХ)

- расчет среднеинтегральных параметров двигателя на основном (установившемся) режиме и текущих параметров по времени работы: давления в камере сгорания, секундного массового расхода, коэффициента истечения, диаметра критического сечения сопла;
- расчет квазистационарного участка работы по нульмерной методике;
- расчет внутрибаллистических параметров при выходе двигателя на режим;
- расчет спада давления в камере в конце горения заряда, в том числе программированного спада тяги, импульса последствия (глубокого спада тяги);
- расчет переходных процессов в камере при различных воздействиях: вскрытии дополнительных отверстий для отсечки тяги, впрыска дополнительного компонента (например, воды для гашения заряда), изменении скорости горения либо поверхности горения заряда;

- расчет предельных отклонений внутрибаллистических характеристик: массового расхода, давления, тяги, времени работы, значений максимального давления и времени работы.

Выходные характеристики пакета являются исходными данными для теплового и энергетического расчетов.

1.4. Энергетический расчет (пакет ИМПУЛЬС)

- определение теоретического максимального удельного импульса тяги;
- расчет составляющих потерь удельного импульса;
- расчет практического пустотного удельного импульса тяги;
- расчет зависимости удельного импульса тяги от противодавления;
- расчет параметров продуктов сгорания, в том числе параметров конденсированной фазы по тракту и на срезе сопла.

1.5. Расчет контура сопла (пакет КОНТУР)

- профилирование сверхзвуковой части сопла для течения чистого газа;
- профилирование сверхзвуковой части сопла для течения двухфазных продуктов сгорания.

Основу пакета составляет программа ISLOK [6], использующая метод характеристик для построения профиля течения чистого газа по предельной или промежуточной линии тока.

В основу профилирования сопла для двухфазных продуктов сгорания положена методика и программа [7].

Параметры контура сопла используются при геометрическом проектировании РДТТ для компоновки соплового блока, его утопленной части и сверхзвуковой части, в том числе телескопических насадков, компоновки вспомогательных систем двигателя, расположенных как снаружи, так и внутри сопла (рулевой привод, вспомогательные двигатели, ПАДы запуска и разделения, системы наддува).

2. Расчет практического удельного импульса тяги

На этапе синтеза проектных параметров и выбора топлива оперативный расчет удельного импульса тяги осуществляется средствами комплекса ДИАРАД – блоки ТЕРМ и ИМПУЛЬС, на этапе анализа конструкции и подтверждения характеристик двигателей расчет подкрепляется применением пакета расчета энерготяговых параметров ЭТП [8].

Расчет практического удельного импульса проводится при следующих условиях:

- при среднеинтегральных параметрах двигателя;
- при отклонениях параметров двигателя и топлива от номинальных для определения его предельных отклонений;
- при параметрах, соответствующих работе двигателя со сложным соплом в начале установившегося режима;
- при параметрах, соответствующих отрывному течению в сопле;

- при параметрах, соответствующих работе двигателя на участке глубокого спада;

- при других параметрах, отличных от номинальных.

Для расчета удельного импульса задаются исходные данные, которые подразделяются на следующие типы:

1. Конструктивные и геометрические параметры РДТТ

- диаметр среза сопла d_a ;

- длина сверхзвуковой части сопла l_c ;

- диаметр и длина сверхзвуковой части сопла в сложенном положении при наличии телескопических насадков;

- степень утопленности сопла в камеру сгорания l_{yt} ;

1. количество складываемых телескопических насадков;

- профиль сверхзвуковой части сопла.

2. Внутрибаллистические параметры

- базовые значения давления в камере, включая давление в начале установившегося режима, среднеинтегральное давление, давление на участке глубокого спада и т.д.;

- диаметр критического сечения сопла: начальный, средний, конечный;

3. Характеристики применяемого топлива

- условная формула;

- энтальпия образования.

4. Результаты термодинамического расчета

- показатель изоэнтропы расширения;

- содержание конденсированной фазы.

5. Параметры конденсированной фазы

- распределение частиц по размерам.

6. Результаты теплового расчета

- массовая доля уносимых ТЗП и ЭСМ и их характеристики;

- величина разгара критического сечения сопла.

7. Диапазон изменения наружного противодавления.

Методика расчета практического удельного импульса тяги РДТТ базируется на определении теоретического максимального значения величины удельного импульса $I_{уд}^{mo}$ с последующим вычитанием составляющих потерь, существующих в реальных двигателях [9].

3. Потери удельного импульса тяги

Для расчета суммарных потерь удельного импульса тяги применяется подход, в соответствии с которым рассчитываются отдельные составляющие потерь по соответствующим методикам и программам. Каждый вид потерь рассчитывается независимо от других, а полные потери определяются суммой отдельных составляющих.

$$I_{y\partial} = \left(1 - \frac{\xi_{\Sigma}}{100} \right) \cdot I_{y\partial}^{m\partial}$$

$$\xi_{\Sigma} = \sum \xi_i$$

В соответствии с имеющимися представлениями о реальных физических процессах горения топлива, течения двухфазных продуктов сгорания и теплообмена в камере сгорания и по тракту сопла при определении практического удельного импульса тяги учитываются следующие основные виды потерь:

ξ_f – потери на рассеяние, обусловленные непараллельностью потока оси сопла;

$\xi_{тр}$ – потери на трение вследствие возникновения пограничного слоя вблизи стенки сопла, обусловленного эффектами вязкости и теплопроводности;

$\xi_{хн}$ – тепловые потери, потери из-за химической неравновесности и недогорания;

$\xi_{кр}$ – потери на отсутствие кристаллизации окиси алюминия в сопле;

$\xi_{\partialф}$ – потери из-за запаздывания частиц к-фазы ;

$\xi_{иск}$ – потери из-за искажения профиля сопла в закритической части;

$\xi_{комп}$ – компоновочные потери, обусловленные уплотненностью сопла в камеру сгорания и наличием телескопических насадков;

$\xi_{мэн}$ – потери из-за уноса ТЗП и ЭСМ.

Прямой расчет составляющих потерь в реальном двигателе осуществляется по соответствующим методикам и программам пакета расчета энергетических параметров (ЭТП) [8], что, однако, не отвечает требованиям оперативности оценки при проведении проектных оценок, когда требуется рассчитать множество вариантов.

С целью проведения оперативных расчетов и определения газодинамических составляющих потерь удельного импульса разработана методика, в основе которой лежит аппроксимация результатов численных исследований с применением пакета ЭТП.

3.1. Расчет потерь на рассеяние

Методика оперативной оценки потерь на рассеяние основана на результатах численных исследований потерь на рассеяние семейства оптимальных профилей комбинированного типа. Расчеты потерь на рассеяние проведены по программе расчета до–транс-сверхзвукового осесимметричного течения невязкого и нетеплопроводного газа в соплах Лавалья.

Численные исследования проведены в диапазоне параметров, охватывающем представляющие наибольший практический интерес степени расширения (y_a) и относительные длины (\bar{l}_c) сопла:

$$y_a = 3,5 \div 4,1 \text{ при } \bar{l}_c = 0,97 \div 1,03 \text{ – для РДТТ I ступени}$$

$$y_a = 5 \div 10 \text{ при } \bar{l}_c = 0,94 \div 1,06 \text{ – для РДТТ верхних ступеней.}$$

Для всех вариантов расчетов использован единый профиль дозвуковой части сопла (профиль Витошинского), достаточно близко аппроксимирующий профиль конструкции реальных двигателей. Параметры продуктов сгорания принимались характерными для современных твердых топлив: температура в камере $T_k = 3850\text{K}$, газовая постоянная $R = 28,0 \text{ кгм/кг град}$, показатель изэнтропы $n = 1,14$.

Профили сверхзвуковой части сопел рассчитывались по методике [10]. Угловая точка скруглялась радиусом $R = 0,15 R_{кр}$ до касательного сопряжения с предельной линией тока. При этом величина смещения вдоль оси контура, соответствующая предельной линии тока, аппроксимировалась выражением:

$$\Delta = 0,01497 \cdot R_{кр}^2$$

Скругление угловой точки выполнялось как необходимое условие расчета течения по программе. Погрешность, вносимая при этом в результате расчета незначительна.

Потери на рассеяние определялись по зависимости:

$$\xi = \frac{1}{\rho} \int_0^{\beta} \frac{1}{Y(x)} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{u^2 + v^2}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{u^2 + v^2}{\rho} \right) \right] dx$$

где $\xi = \nu / Y(x)$

x, y – оси цилиндрической системы координат,

$Y(x)$ – ордината стенки сопла,

u, v – составляющие вектора скорости,

ρ – плотность,

$$\beta = \frac{k+1}{2k}$$

k – показатель адиабаты,

$$H_0 = \frac{1}{k} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right)$$

H_0 – энтальпия торможения,

$m \cdot \rho \cdot u \cdot v$ – составляющие количество движения.

Результаты расчетов представлены в таблицах 3.1, 3.2 и на рис.3.1, 3.2.

По результатам расчетов получены аппроксимационные аналитические зависимости:

$$\xi = 0,0001 \cdot y_a^2 \quad \text{для } 3,5 \leq y_a \leq 4,1$$

$$\xi = 0,0001 \cdot y_a^2 \quad \text{для } 5 \leq y_a \leq 9$$

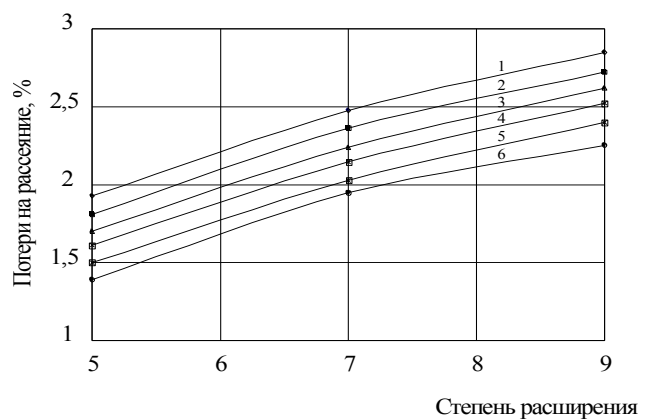
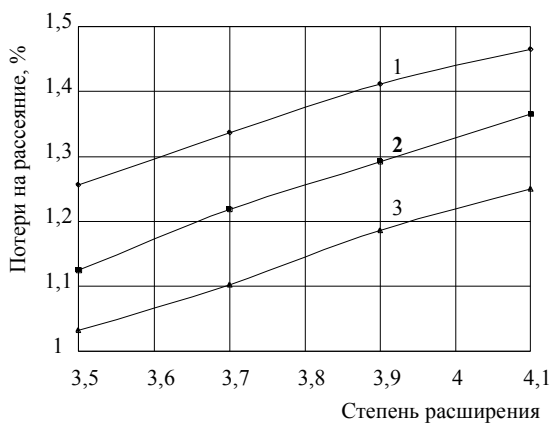
Погрешность относительно прямого расчета составит не более $\pm 0,05\%$.

Таблица 3.1

Y_a	ξ_f		
	$\bar{\ell}_c$		
	0,97	1,0	1,03
3,5	1,256	1,124	1,032
3,7	1,336	1,218	1,102
3,9	1,412	1,292	1,186
4,1	1,465	1,365	1,25

Таблица 3.2

Y_a	$\bar{\ell}_c$					
	0,94	0,96	0,98	1,0	1,03	1,06
5	1,928	1,809	1,704	1,612	1,5	1,39
6				1,9		
7	2,475	2,362	2,239	2,146	2,027	1,947
8				2,353		
9	2,847	2,722	2,619	2,523	2,4	2,253



10				2,67		
----	--	--	--	------	--	--

Рис. 3.1. Зависимость потерь на рассеяние от степени расширения при различных удлинениях сопла для РДТТ I ступени:

1 – l=0,97; 2 – l=1,0; 3 – l=1,03.

Рис.3.2. Зависимость потерь на рассеяние от степени расширения при различных удлинениях сопла для верхних ступеней:

1 – l=0,94; 2 – l= 0,96; 3 – l=0,98;
4 – l=1,0; 5 – l=1,03; 6 – l=1,06.

3.2. Особенности двухфазных течений в сопле и двухфазные потери

Значительную долю суммарных потерь удельного импульса составляют потери, обусловленные наличием металлического горючего (алюминия или гидрида алюминия) в составе смесового ракетного твердого топлива, образующего при сгорании в камере конденсированную фазу. Содержание алюминия или гидрида алюминия в топливе составляет $\sim 17\text{--}22\%$, что приводит к образованию в потоке продуктов сгорания $\sim 30\text{--}40\%$ по массе конденсированной окиси алюминия. Двухфазность протока продуктов сгорания в камере и в сопле РДТТ приводит к значительному увеличению суммарных потерь удельного импульса тяги по сравнению с идеальным термодинамическим расчетом (доля потерь из-за двухфазности может составлять $50\text{--}70\%$ суммарных потерь).

Основные составляющие потерь, связанные с двухфазностью продуктов сгорания обусловлены следующими физическими явлениями:

- незавершенностью процесса кристаллизации окиси алюминия в сопле из-за большой скорости потока и малого времени пребывания в сопле, соизмеримого с временем процесса кристаллизации;
- инерционностью частиц конденсированной фазы, приводящей к выносу их на контур сопла и требующей увеличения угла наклона контура концевой части раструба с целью сохранения работоспособности, что обуславливает увеличение потерь на рассеяние;
- неравномерностью распределения частиц по радиусу вследствие утопленности сопла в камеру и образования надсоплового «кармана», приводящей к «компоновочным» потерям удельного импульса;
- неравномерностью разгара сопла в окрестности критического сечения сопла, обусловленной взаимодействием материалов с частицами окиси алюминия, приводящей к образованию «закритической ямы»;
- температурным и скоростным запаздыванием частиц конденсированной фазы от газа при движении смеси двухфазных продуктов сгорания смесевых металлизированных твердых топлив по тракту сопла.

Исследования и разработка методов расчета неравновесного двухфазного течения в осесимметричных соплах Лаваля с учетом состава и свойств газовой и конденсированной фаз, исходной дисперсности частиц, параметров потока на входе в сопло представлены в [11, 12, 13].

На системном этапе проектирования с достаточной степенью точности оценка эффектов, связанных с неравновесными процессами в двухфазных потоках, в том числе и потери вследствие запаздывания частиц к-фазы проводится на основе параметрических исследований двухфазных течений в соплах. Расчеты двухфазных течений проведены для комбинированного профиля сопла, спрофилированного по методу характеристик с отогнутой концевой частью, обеспечивающего отсутствие выпадения частиц Результа-

ты расчетов двухфазных потерь в зависимости от диаметра критического сечения сопла и содержания конденсированной фазы представлены на рис. 3.3.

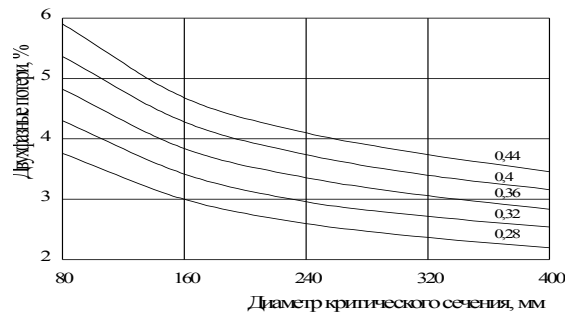


Рис. 3.3. Зависимость двухфазных потерь от диаметра критического сечения при различном содержании конденсированной фазы в продуктах сгорания

Расчеты составляющих потерь, таких как незавершенность кристаллизации конденсата, тепловые потери, потери на химическую неравновесность, потери вследствие присутствия в потоке уносимых теплозащитных материалов проводятся путем термодинамических расчетов с соответствующими исходными данными.

Расчеты потерь на трение проводится на основе метода Авдуевского [14] с использованием соотношений из монографии [9].

Компоновочные потери (на утопленность сопла в корпус и на разрыв контура вследствие наличия телескопических насадков) на начальном этапе принимаем по рекомендациям, основанным на экспериментальных и численных исследованиях.

4. Профилирование сверхзвуковой части сопла

Профилирование сверхзвуковой части сопел РДТТ, работающих на СРТТ с двухфазными продуктами сгорания существенно влияет на максимальную реализацию энергетических характеристик топлива и обеспечение работоспособности соплового блока.

Для решения задачи профилирования на стадии проектных исследований с целью оперативного определения характеристик профилей для двухфазных продуктов сгорания, обеспечивающих течение без заметного выноса конденсата на стенки сопла и минимальные потери удельного импульса тяги разработана методика [10].

При больших степенях расширения сопла, ($\sim 5-9$), характерных для верхних ступеней ракет, проявляются особенности течения двухфазной среды, конденсированные частицы окиси алюминия, составляющие до 0,35–0,4 массовой доли продуктов сгорания современных твердых топлив, из-за своей инерционности при обтекании вогнутого профилированного контура сверхзвукового сопла не успевают развернуться и при некоторых условиях выпадают на стенку.

При выпадении на стенку частицы к-фазы оказывают на поверхность сопла эрозионное (механический унос), силовое (обмен импульсом), тепловое (за счет высокой температуры, кинетической энергии и теплоты кристаллизации) и химическое воздействие, что значительно ухудшает стойкость раструба сопла и увеличивает потери удельного импульса.

Для обеспечения работоспособности конструкции соплового блока необходимо исключить вынос конденсированной фазы на стенку сверхзвуковой части раструба. В отраслевом стандарте на основании теоретических и экспериментальных исследований предложено с целью исключения выпадения конденсата, профилировать сопло по предельной линии тока чистого газа, а концевой участок, начиная с точки заметного выпадения частиц конденсата с размером ≥ 1 мкм, выполнять коническим с углом полураствора, большим угла наклона траекторий частиц конденсата.

Условиям невыноса конденсата могут удовлетворять профили различных типов – комбинированные, с отогнутой концевой частью, двухрадиусные, контуры вариационного типа. Различие суммарных потерь удельного импульса для профилей указанных типов, приходящих в одну точку среза, может составлять от 0,3 до 1,5 с в зависимости от степени расширения и относительного удлинения сопла.

По результатам обобщения расчетных и экспериментальных данных предложена методика нахождения точки заметного осаждения частиц на стенку сверхзвуковой части сопла и разработаны рекомендации по профилированию сопел комбинированного типа. Методика положена в основу разработки практического руководства для проектных исследований по профилированию сопел комбинированного типа для двухфазных продуктов сгорания современных твердых топлив.

Базовыми профилями принято семейство профилей, соответствующих предельной линии тока с угловой точкой и обеспечивающих минимальные потери импульса для комбинированных сопел.

Определяющее влияние на положение точки начала интенсивного выпадения конденсата оказывают параметры сверхзвуковой части сопла, а именно начальный угол его раскрытия (θ_{ax}):

$$\theta_{ax} = \theta_s = \frac{\theta_{ax}}{f} \cdot f \quad (4.1)$$

Соотношение (4.1) определяет угол наклона контура в точке начала интенсивного выпадения частиц (θ_s) в зависимости от минимального угла раскрытия сопла:

$f(\lambda_s)$ – функция, учитывающая изменения плотности частиц, температуры газа, сжимаемость и зависящая от скорости газа.

Функция $f(\lambda_s)$ аппроксимируется выражением:

$$f(\lambda_s) = \frac{\lambda_s + 1}{2,3 - 0,3\lambda_s},$$

где λ_s – приведенная скорость в точке выпадения.

Приведенная скорость в точке выпадения находится из зависимости:

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{1}{\lambda_s}\right)^{\frac{1}{n}}}}$$

где n – показатель изоэнтропы;

k – коэффициент, учитывающий влияние дозвуковой части, $k \geq 1$.

За счет оптимизации формы до – трансзвуковой части сопла и организации равномерного потока на входе в сопло k может быть доведен до величины $k=1,15$.

Расчет базового семейства профилей, соответствующих предельным линиям тока течения чистого газа с равномерной характеристикой на выходе для заданных значений M_0 проведен по программе ISLOK [6]. Оп-

ределены координаты базовых профилей $y=f(x)$ и изменение угла наклона контура $\theta=f(x)$. Расчеты проведены для показателя изоэнтропы $n=1,16$ в диапазоне чисел Маха $M=35:50$.

В рассчитанном семействе профилей выбран ряд опорных профилей, для которых определены координаты точки начала заметного осаждения конденсата. Для этого находилось изменение функции угла наклона контура по длине опорного профиля $\theta=f(x)$ и функции (4.1), соответствующей по θ_{ax} – максимальному углу наклона контура рассматриваемого опорного профиля. В окрестности предполагаемого пересечения, функция $Q_s=f(\lambda_s)$ переводилась, с использованием табулированной зависимости для λ_s и зависимости $y=f(x)$ рассматриваемого опорного профиля в функцию вида $\theta=f(x)$. При $\theta = \theta_s$ определились координаты точки начала осаждения.

Значение k в функции (4.1) принималось равным 1, т.е. сечение осаждения конденсата определилось для наихудших расчетных условий, т.е. определяемые профили будут иметь некоторый запас по выносу конденсата.

Результаты расчетов координат начала осаждения частиц представлены на рис. 4.1. Результаты аппроксимируются зависимостью:

$$x = 0,10875$$

с погрешностью не более $\Delta = 100\%$.

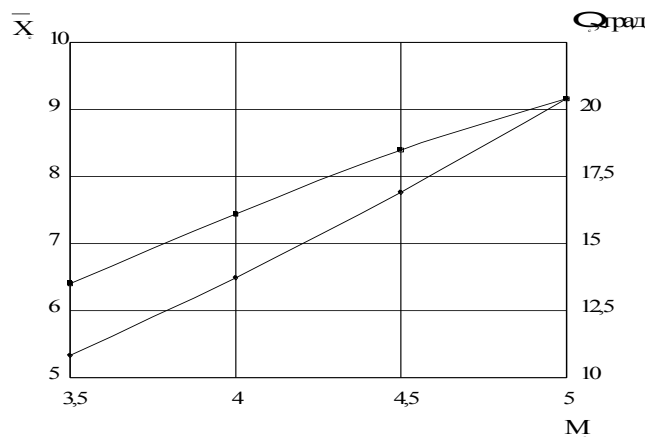


Рис. 4.1. Зависимость абсциссы и угла наклона в зоне начала осаждения, от числа Маха

Профиль концевой части сопла за сечением начала осаждения частиц так же должен удовлетворять соотношению (4.1). Угол наклона концевой части растет от величины θ_s до θ_a , определяемой из (1) при $\lambda = \lambda_a$. Концевой участок лежит между конусами с углами θ_s и θ_a . На этапе проектных оценок достаточно воспользоваться упрощенной, конической формой концевой части с учетом наклона, равным θ_a (λ_c). Для этого к опорному профилю в точке $\{x_s, y_s\}$ пристыковывается конический участок с углом θ_a (λ_c) и определяется длина сопла заданной снятием расширения.

По результатам расчетов получены аппроксимационные зависимости, позволяющие выбрать базовый профиль с числом Маха M_0 для заданной степени расширения y_a при различных удлинениях \bar{l}_c :

$$M_0 = \frac{31(1.21)^{\bar{l}_c}}{0.999}, \text{ при } 3,5 \leq y_a \leq 4,2; \quad (4.2)$$

$$M_0 = \frac{36(0.48)^{\bar{l}_c}}{0.5421}, \text{ при } 5 \leq y_a \leq 10 \quad (4.3)$$

Зависимости (4.2, 4.3) достаточно точно позволяют определить параметры комбинированного профиля сопла на базе предельной линии тока и конической концевой части при заданных степенях расширения и относительном удлинении сопла в диапазоне $M_0 = 3,5 \div 5,0$; $\bar{l}_c = 0,9 \div 1,1$ (рис. 4.2, 4.3).

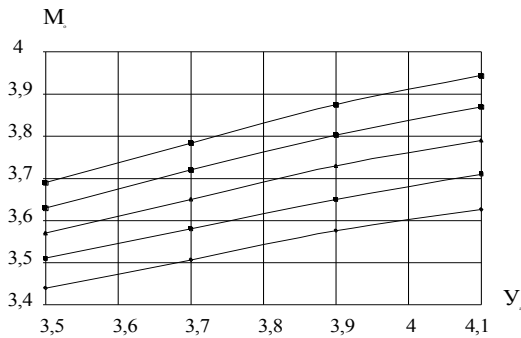


Рис. 4.2. Зависимость числа Маха M_0 от степени расширения при различных удлинениях сопла для РДТТ первой ступени:
1 - $lc=0,9$; 2 - $lc=0,95$;
3 - $lc=1,0$; 4 - $lc=1,05$; 5 - $lc=1,1$.

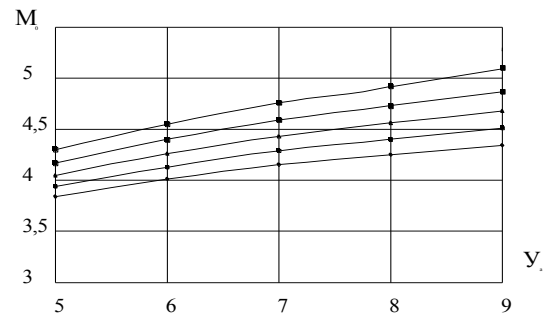


Рис. 4.3. Зависимость числа Маха M_0 от степени расширения при различных удлинениях сопла для РДТТ верхних ступеней:
1 - $lc=0,9$; 2 - $lc=0,95$; 3 - $lc=1,0$;
4 - $lc=1,05$; 5 - $lc=1,1$.

При подготовке рукописи к печати вышла монография [15], в которой обобщены обширные теоретические и экспериментальные исследования потерь удельного импульса тяги в РДТТ различной конструкции. На дальнейшем этапе планируется сопоставить представленные в монографии результаты исследований с применяемыми методиками и внести уточняющие коррективы в метод расчета практического удельного импульса разрабатываемых изделий с РДТТ.

Библиографический список

1. Биткин, С.А. Высокоэнергетические твердые топлива – основа конструктивного совершенства и баллистической эффективности РДТТ БРПЛ / С.А. Биткин, С.В. Козлов, С.А. Рязанов, Н.А. Обухов // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Бийск: ФНПЦ «Алтай», 2003.
2. Биткин, С.А. О методологии формирования требований к топливам маршевых РДТТ БРПЛ на этапе системного проекта / С.А. Биткин // Шестая всероссийская конференция по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах ОСОС'2008. Тезисы докладов. – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2008.
3. Васенин, И.М. Программный комплекс расчета основных параметров РДТТ ДИАРАД. Руководство пользователя / И.М. Васенин, А.А. Глазунов, Н.А. Обухов, С.А. Биткин и др. – Миасс: КБМ, 1985.
4. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4/ps). Описание применения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995.

5. Расчет площади поверхности и инерционных характеристик энергоузлов изделий Т «SQUARE-2». Руководство пользователя. – Миасс: КБМ, 1982.
6. Васенин, И.М. Программа расчета сверхзвуковой части осесимметричных сопел методом характеристик «ISLOK». Описание применения / И.М. Васенин, В.Г. Бутов, В.М. Галкин. – Томск, 1984.
7. Комплекс программ расчета двухфазного течения в осесимметричных соплах Лаваля с учетом процессов коагуляции, дробления и вращения частиц «К2» / Е.А. Козлов, А.А. Глазунов, Н.Г. Кувшинов. – Томск. 2000.
8. Васенин, И.М. Программный комплекс расчета энерго-тяговых параметров РДТТ ЭТП. Руководство пользователя / И.М. Васенин, А.А. Глазунов, Н.А. Обухов, С.А. Биткин и др. – Миасс: КБМ, 1985.
9. Губертов, А.М. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротева. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
10. Обухов, Н.А. Методика проектного расчета контура и основных параметров соплового блока СОПОТ. НИР «Аметист-2», ГОНТИ-11.1987 / Н.А. Обухов, С.А. Биткин, Ю.П. Ковардаков, А.Л. Карташев.
11. Васенин, И.М. Газовая динамика двухфазных течений в соплах / И.М. Васенин и др. – Томск: Изд-во Томского университета, 1986. – 264 с.
12. Стернин, Л.Е. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.Н. Подвысоцкий. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.
13. Тишин, А.П. Особенности течения двухфазных продуктов в сопле / А.П. Тишин // Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 1. / под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1971.
14. Авдеевский, В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / В.С. Авдеевский, Ю.И. Данилов, В.К. Кошкин и др. – М.: Оборонгиз, 1960. – 389 с.
15. Милёхин, Ю.М. Энергетика ракетных двигателей на твердом топливе / Ю.М. Милёхин, А.Н. Ключников, Г.В. Бурский, Г.С. Лавров. – М.: Наука, 2013. – 207 с.

[К содержанию](#)