

**К.Н. Волков  
В.Н. Емельянов**

**Течения и теплообмен  
в каналах  
и вращающихся полостях**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2010

УДК 532.529  
ББК 22.253  
В 67



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проектам  
09-08-07028 и 09-08-02003*

Волков К.Н., Емельянов В.Н. **Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 488 с. — ISBN 978-5-9221-1182-9.

Рассматриваются течения и теплообмен в межлопаточных каналах и вращающихся кавернах газовых турбин и компрессоров. Обобщается опыт численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса на неструктурированных сетках на основе метода конечных объемов и реализации различных компонентов вычислительного алгоритма. Обсуждаются вопросы поддержки численных расчетов, в том числе создание геометрической модели, построение сетки, реализация вычислительного алгоритма на современных многопроцессорных системах. Приводятся результаты расчетов течений и теплообмена в межлопаточных каналах и кавернах, ограниченных подвижными и неподвижными стенками, и изучаются особенности сопряженного теплообмена во вращающихся полостях.

Для научных работников, специализирующихся в области вычислительной газовой динамики и теплообмена, инженерно-технических работников, занимающихся проектированием газовых турбин, а также преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей высших учебных заведений.

ISBN 978-5-9221-1182-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2010

© К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
Введение . . . . .	10
<b>Глава 1. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики . . . . .</b>	<b>29</b>
1.1. Построение физико-математической модели . . . . .	30
1.1.1. Конструктивные схемы (30). 1.1.2. Горение твердого топлива (33). 1.1.3. Состав продуктов сгорания (35). 1.1.4. Рабочие процессы (41). 1.1.5. Внутренняя баллистика (43).	
1.2. Особенности внутренних течений. . . . .	44
1.2.1. Течения в каналах со вдувом (45). 1.2.2. Эрозионное горение (48). 1.2.3. Течения в предсопловом объеме (49). 1.2.4. Сопловые течения (52). 1.2.5. Течения, наводимые органами управления (54). 1.2.6. Течения, наводимые поворотом управляющего сопла (55). 1.2.7. Течения, наводимые элементами отбора и сброса газа (57). 1.2.8. Течения в заманжетной полости (57). 1.2.9. Течения во вращающихся двигателях (58). 1.2.10. Течения в условиях действия массовых сил (58). 1.2.11. Тепловая защита (60). 1.2.12. Продольные вихревые структуры (61). 1.2.13. Сепарация частиц (63). 1.2.14. Неустойчивость рабочих процессов (64). 1.2.15. Динамика распространения послестартового облака (67). 1.2.16. Газодинамические процессы в задачах утилизации зарядов (67).	
1.3. Моделирование газодинамических процессов . . . . .	70
1.3.1. Размерность модели (70). 1.3.2. Уровень физической сложности (73).	
1.4. Моделирование тепловых процессов и процессов зажигания . . . . .	76
1.4.1. Суммарный тепловой поток (76). 1.4.2. Конвективная теплопередача (77). 1.4.3. Теплообмен излучением (79). 1.4.4. Кондуктивная теплопередача (81). 1.4.5. Прогрев, воспламенение и горение топлива (81).	
1.5. Моделирование изменения внутреннего объема камеры сгорания . . . . .	85
1.5.1. Влияние напряженно-деформированного состояния (85). 1.5.2. Влияние условий функционирования (87).	

1.6. Моделирование акустических и колебательных процессов . . . . .	88
1.7. Основные уравнения и расчетные соотношения . . . . .	89
1.7.1. Модель вихревого течения невязкой жидкости (89).	
1.7.2. Модель вязкой жидкости (90). 1.7.3. Модель турбулентности (92).	
1.8. Методы решения газодинамических и вспомогательных задач . . . . .	100
1.8.1. Реализация модели невязкой жидкости (100). 1.8.2. Реализация модели вязкой несжимаемой жидкости (100). 1.8.3. Реализация модели вязкой сжимаемой жидкости (101). 1.8.4. Решение задачи Коши (102). 1.8.5. Построение сетки (103).	
<b>Глава 2. Двумерные течения в каналах со вдувом . . . . .</b>	<b>106</b>
2.1. Основные подходы . . . . .	107
2.1.1. Точные решения (107). 2.1.2. Полугидравлический метод (114). 2.1.3. Формулировка граничных условий (115). 2.1.4. Ламинарно-турбулентный переход (116). 2.1.5. Экспериментальные исследования (117).	
2.2. Течение в плоском и осесимметричном канале . . . . .	117
2.2.1. Распределения скорости и давления (118). 2.2.2. Кинематические характеристики течения (121). 2.2.3. Интегральные характеристики течения (123).	
2.3. Течение в канале с несимметричным вдувом . . . . .	127
2.4. Течение в кольцевом канале . . . . .	130
2.5. Структура течения во вращающемся канале . . . . .	135
2.6. Перемещение горячей поверхности канала . . . . .	141
2.6.1. Невязкое приближение (141). 2.6.2. Учет вязких эффектов (145). 2.6.3. Численные расчеты (154).	
2.7. Отклонение от симметричной формы поперечного сечения . . . . .	155
2.8. Течение в зазоре между торцом заряда и днищем двигателя . . . . .	156
2.8.1. Течение в зазоре между горящим торцом заряда и днищем (156). 2.8.2. Течение в зазоре между негорящим торцом заряда и днищем (159).	
2.9. Течение в канале с произвольным профилем скорости во входном сечении канала . . . . .	161
2.10. Течение в канале с нестационарным вдувом . . . . .	164
2.11. Сжимаемые течения в каналах со вдувом . . . . .	167
2.12. Теплообмен в канале с проницаемыми стенками . . . . .	182
2.13. Модель слоистой гидравлики . . . . .	192
2.13.1. Параболизованная модель течения (192). 2.13.2. Основные допущения (194). 2.13.3. Несжимаемая жидкость (195). 2.13.4. Упрощение интегрального уравнения (198). 2.13.5. Сжимаемая жидкость (200). 2.13.6. Численное решение интегрального уравнения (205). 2.13.7. Результаты расчетов (210).	
2.14. Акустическое поле в канале заряда . . . . .	212
2.14.1. Основные уравнения (212). 2.14.2. Поперечные колебательные моды (212). 2.14.3. Продольные колебательные моды (215).	

2.15. Линейный подход к исследованию устойчивости . . . . .	217
2.16. Нестационарное течение в канале . . . . .	219
2.17. Влияние турбулентности на характеристики течения в канале . . . . .	224
2.17.1. Приближенный подход (224). 2.17.2. Подход, основанный на поиске подобного решения (228).	
<b>Глава 3. Трехмерные течения в каналах со вдувом . . . . .</b>	<b>234</b>
3.1. Упрощенные подходы к описанию трехмерных течений . . . . .	235
3.1.1. Общая характеристика (235). 3.1.2. Методы понижения размерности (236). 3.1.3. Методы возмущений (237). 3.1.4. Конструирование течений наложением особенностей (237).	
3.2. Моделирование течений в каналах звездообразной формы . . . . .	238
3.3. Описание течений в переменных скорость–вихрь скорости . . . . .	244
3.3.1. Преобразование уравнений (245). 3.3.2. Постановка граничных условий (248). 3.3.3. Вычислительная процедура (248). 3.3.4. Реализация граничного условия для вихря (250). 3.3.5. Расчет характеристик турбулентности (253). 3.3.6. Результаты расчетов (253).	
3.4. Моделирование течений на основе параболизированной формулировки задачи . . . . .	254
3.4.1. Формулировка модели (254). 3.4.2. Детали численной реализации (257). 3.4.3. Результаты расчетов (259).	
3.5. Течение в канале с кольцевой выточкой . . . . .	268
3.6. Течение жидкости в коаксиальном зазоре при наличии узлов отбора и подвода газа . . . . .	277
3.7. Течение в зазоре между эксцентрично расположенными цилиндрами . . . . .	281
3.8. Моделирование крупных вихрей турбулентного течения в канале со вдувом . . . . .	284
3.8.1. Формулировка модели (284). 3.8.2. Параметры и сетка (285). 3.8.3. Сеточная зависимость решения (286). 3.8.4. Результаты расчетов (287).	
3.9. Нестационарные процессы . . . . .	300
3.9.1. Основные подходы (300). 3.9.2. Нестационарное горение топлива (302). 3.9.3. Волновые процессы (303). 3.9.4. Ламинарные течения (306). 3.9.5. Ламинарно-турбулентный переход (308). 3.9.6. Турбулентные течения (312). 3.9.7. Крупномасштабные вихревые структуры (315). 3.9.8. Управление течениями (317).	
3.10. Выбор модели турбулентности . . . . .	319
3.11. Влияние массовых сил . . . . .	330
3.12. Течения во вращающихся двигателях . . . . .	331
3.13. Химически реагирующие течения . . . . .	334
<b>Глава 4. Двухфазные течения . . . . .</b>	<b>339</b>
4.1. Движение частицы в канале со вдувом . . . . .	340
4.1.1. Основные уравнения (340). 4.1.2. Точное решение для случая сильного вдува (341). 4.1.3. Результаты расчетов (347).	

4.2. Влияние массовых сил на движение частицы . . . . .	351
4.2.1. Основные уравнения (351). 4.2.2. Качественный анализ (353). 4.2.3. Численные расчеты (358).	
4.3. Стохастическое моделирование движения частицы в канале . . . . .	361
4.4. Влияние дисперсной фазы на характеристики турбулентности . . . . .	364
4.4.1. Обратное влияние примеси (365). 4.4.2. Математическая модель (367). 4.4.3. Результаты расчетов (370).	
4.5. Течение с химическими реакциями и горением частиц . . . . .	372
4.5.1. Построение модели (372). 4.5.2. Результаты расчетов (376).	
4.6. Изменение размера частиц . . . . .	380
4.7. Дробление и коагуляция частиц в канале . . . . .	383
4.7.1. Критериальные соотношения (383). 4.7.2. Результаты расчетов (387).	
4.8. Волновые явления в камере сгорания . . . . .	391
4.8.1. Основные допущения (391). 4.8.2. Волновое уравнение (392). 4.8.3. Модельное уравнение (392). 4.8.4. Акустический баланс (393). 4.8.5. Вычисление интегралов (398). 4.8.6. Разворот потока (401). 4.8.7. Вклад дисперсной фазы (402). 4.8.8. Устойчивость течения (404).	
4.9. Демпфирование акустических колебаний . . . . .	406
4.9.1. Акустические, вихревые и энтропийные волны (406). 4.9.2. Механизмы взаимодействия (407). 4.9.3. Влияние горения частиц (409). 4.9.4. Теоретические решения (410). 4.9.5. Построение математической модели (413). 4.9.6. Вычислительная процедура (416). 4.9.7. Результаты расчетов (416). 4.9.8. Столкновения между частицами (422).	
4.10. Обтекание утопленного сопла двухфазным потоком . . . . .	427
Заключение . . . . .	435
1. Роль математического моделирования (435). 2. Место данной работы (436). 3. Направления развития (436).	
Список литературы . . . . .	440

## Предисловие

В ракетно-космической технике ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ) прочно занимают одну из ведущих позиций. Несмотря на структурную простоту исполнения данного типа энергоустановок, протекающие в них процессы имеют сложную природу. Работа РДТТ характеризуется сочетанием множества процессов различной природы — физических, химических, термодинамических и процессов теплопереноса, развивающихся на фоне общей газодинамической обстановки в рабочем пространстве РДТТ.

Внутренняя газодинамика РДТТ сформировалась как самостоятельное и непрерывно развивающееся направление механики жидкости и газа. Прикладная значимость данного направления поддерживается необходимостью освоения новых конструктивных решений, внедрением новых материалов и топливных композиций, а также изменением рабочего диапазона параметров.

Для настоящего времени характерно подведение итогов проведенных работ. Появляются монографии, обобщающие исследования различных научных групп, опыт конструирования и расчетной диагностики. К такому типу принадлежит и данная работа, которая обобщает исследования авторов в течение длительного времени. Особое внимание уделяется теоретическому методу исследования газодинамики и теплообмена внутрикамерных процессов в РДТТ при помощи разработанного комплекса средств вычислительного моделирования, включающих в себя совокупность моделей различного уровня схематизации, реализующих их алгоритмов и программных модулей.

В монографии описываются оригинальные методы математического моделирования, разработанные авторами или при их непосредственном участии, а также приводятся результаты решения ряда практически важных задач для типичных конструктивных схем РДТТ. Представленный анализ позволяет обобщить полученные результаты и построить на их основе модели топологически схожих конструкций.

Книга разбита на главы, разделы и подразделы. Формулы, рисунки и таблицы нумеруются внутри каждой главы (указывается номер главы и порядковый номер рисунка или таблицы).

Во введении приводятся габаритно-массовые характеристики некоторых РДТТ. Подчеркивается необходимость совершенствования и разработки новых конструктивно-компоновочных схем и моделей термодинамических процессов в камерах сгорания и сопловых блоках.

В главе 1 рассматриваются вопросы, связанные с постановкой и реализацией вычислительного эксперимента для задач внутрикамерной газодинамики РДТТ. Технология численного эксперимента предполагает разработку физической и математической моделей решаемой задачи, построение дискретной модели и ее программную реализацию, а также эксплуатацию готового программного комплекса и анализ результатов расчетов. Разработка физической модели в существенной степени зависит от доступных ресурсов вычислительной техники, а содержание дискретной модели — от архитектуры компьютеров. При этом роль сравнительно простых математических моделей и имеющихся аналитических решений возрастает, поскольку они используются как при отладке программного комплекса, так и для проверки результатов численных расчетов.

В главе 2 приводятся точные решения уравнений Навье–Стокса, описывающих течения в каналах с проницаемыми стенками, которые характеризуются линейной зависимостью продольной скорости от одной из пространственных координат (решения с пространственным ускорением по продольной координате), и исследуются свойства этих решений. Оценивается роль вязкости, сжимаемости и турбулентности в формировании картины течения в условиях, характерных для внутрикамерного объема РДТТ. Полученные результаты используются для построения и обоснования математических моделей, описывающих двух- и трехмерные течения в каналах со вдувом.

В главе 3 рассматриваются вопросы, связанные с построением, реализацией и обоснованием математических моделей трехмерных течений в каналах с проницаемыми стенками. Обсуждаются модели различной степени сложности и трудоемкости. Для моделирования течений в достаточно длинных каналах с неизменной формой поперечного сечения по длине канала разрабатываются модели, в основу которых положен ряд упрощающих положений, связанных с наличием преимущественного направления развития потока (параболизированные модели). Математические модели более общего плана реализуются в рамках решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых при помощи  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, или в рамках современных подходов к моделированию турбулентных течений (моделирование крупных вихрей). Обсуждаются особенности численной реализации моделей и постановки граничных условий на проницаемой поверхности канала.

Работоспособность моделей, их тестирование и возможности разработанных средств численного моделирования демонстрируются на примере решения ряда модельных задач. Получены распределения скорости, давления и характеристик турбулентности в каналах, имеющих различную форму поперечного сечения в плане. Сравняются резуль-



таты, полученные в рамках различных моделей, а также вычислительные ресурсы, необходимые для реализации каждого из подходов.

В главе 4 приводятся точные решения уравнений, описывающих движение пробной частицы, а также результаты численного моделирования движения частиц под влиянием факторов нетурбулентной природы. Точные решения, описывающие движение частиц, позволяют найти предельную траекторию частиц (сепаратрису) и исследовать особенности концентрации дисперсной фазы. Поверхность горения топлива моделируется поверхностью вдува смеси газа и частиц, параметры которых известны и не зависят от места вдува и наличия массовых сил.

В рамках стохастического лагранжевого подхода исследуется влияние размера частиц на закономерности их рассеивания в канале со вдувом. Влияние турбулентности учитывается при помощи введения случайных флуктуаций скорости несущего потока в уравнение движения пробной частицы. Проводится сравнение результатов расчетов, полученных при детерминистическом и стохастическом описаниях движения дисперсной фазы. Обсуждается влияние концентрации дисперсной фазы и размера частиц на механизм и интенсивность турбулентного переноса, а также демпфирующее влияние конденсированной фазы на акустические колебания параметров рабочего тела в камере сгорания.

В заключении формулируются основные выводы и некоторые направления дальнейших исследований.

Список литературы дается в конце книги в алфавитном порядке (сначала русскоязычные издания, затем публикации, вышедшие за рубежом на английском языке).

Авторы надеются, что полученные результаты и собранный материал поможет читателю уверенно ориентироваться в многочисленных публикациях на данную тему, а приведенные результаты будут способствовать развитию исследований в данной области.

Авторы выражают глубокую признательность академику РАН А. М. Липанову за поддержку и постоянное внимание к работе.

Авторы будут благодарны за замечания и уточнения, которые можно присылать на адрес кафедры плазмогазодинамики и теплотехники Балтийского государственного технического университета (190005 Санкт-Петербург, ул. 1-ая Красноармейская, д. 1) или на электронный адрес [ve5303@mail.ru](mailto:ve5303@mail.ru).

*К.Н. Волков  
В.Н. Емельянов*

## **Введение**

Данная монография посвящена развитию методов и подходов к моделированию внутренних течений в рабочем пространстве ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). Моделью течения продуктов разложения твердого топлива в камере сгорания РДТТ служит модель течения в канале с распределенным вдувом, что отражает наиболее существенную сторону процесса — подвод массы со стороны горячей поверхности заряда. Процессы, связанные с прогревом топлива, разложением его компонентов и их химическим реагированием, протекают в тонком поверхностном слое и в данной модели не учитываются.

Внутренняя газодинамика РДТТ представляет собой научное направление, появившееся в соответствии с запросами практики проектирования и оптимизации двигательных установок. Данное направление, с одной стороны, использует новейшие достижения в области вычислительной газодинамики, теории горения, механики двухфазных сред, турбулентности, а с другой стороны, определяет постановку новых задач механики жидкости и газа, особенностью которых является сочетание и взаимовлияние процессов различной физической природы.

### **Ракетные двигатели твердого топлива**

Ракетные двигатели твердого топлива являются одним из основных типов двигателей современных ракетно-космических систем (ракеты-носители) и ракетного вооружения (баллистические ракеты, реактивные системы залпового огня). Они находят широкое применение в качестве маршевых двигателей, стартовых ускорителей и разгонных блоков, а также двигателей вспомогательного назначения (системы управления, разделения, торможения). Установка навесных РДТТ, включаемых при старте, является эффективным средством повышения мощности ракеты-носителя.

Характеристики некоторых маршевых РДТТ ракет-носителей приводятся в таблице. В таблице используются следующие сокращения: сопло — внешнее/утопленное (В/У), корпус — металлический/композитный (М/К).

Габаритно-массовые характеристики РДТТ изменяются в достаточно широких пределах: от ускорителей космической транспортной системы Space Shuttle (вес 570 т, диаметр корпуса 3,71 м, длина 38,2 м) до миниатюрных вспомогательных двигателей (вес топлива —

Таблица В.1. Характеристики маршевых РДТТ некоторых ракет-носителей

Параметр	Space Shuttle	Titan III	Titan IV	H II	Ariane V
Диаметр, м	3,71	3,05	3,2	1,8	3,05
Диаметр канала, м	1,5	1,1	1,05	0,62	1,15
Длина, м	35,2	21,6	24,6	17,23	24,4
Масса топлива, т	502,6	273	313	59	237,5
Сопло	У	В	У	У	У
Корпус	М	М	К	М	М
Число сегментов	4	7	3	4	3
Тип топлива	PВАН	PВАН	НТРВ	НТРВ	НТРВ

десятки грамм, диаметр и длина двигателя — несколько сантиметров). В зависимости от назначения РДТТ имеет тягу от сотых долей ньютона до нескольких меганьютонов, а продолжительность работы — от долей секунды до нескольких минут.

В сравнении с другими типами ракетных двигателей РДТТ получили широкое распространение благодаря простоте конструкции и наземного обслуживания, высокой надежности, возможности длительного (до 15 лет и более) хранения в полностью снаряженном виде, постоянной готовности системы к пуску (в течение гарантийного срока не требуются регламентные работы), а также экономической эффективности за счет относительно невысокой стоимости.

Прогресс в развитии РДТТ связан с разработкой новых и совершенствованием существующих схемно-компоновочных решений, рецептур твердых топлив, теоретических и расчетных методов для комплексного моделирования рабочих процессов, а также с применением конструкционных и теплозащитных материалов, обладающих высокой удельной прочностью и теплоэрозионной стойкостью.

При этом необходимо обеспечить снижение веса конструкции, уменьшение разбросов внутрибаллистических и энергетических характеристик, увеличение удельного импульса тяги, плотности твердого топлива, давления в камере сгорания, повышения стабильности и надежности работы РДТТ. Конечная цель разработок состоит в увеличении дальности полета и доставляемой полезной нагрузки с учетом энергомассовых, надежностных и стоимостных критериев.

## Внутрикамерные процессы

Работа РДТТ характеризуется взаимосвязью и взаимовлиянием физических, химических, термодинамических процессов и процессов

теплопереноса, развивающихся на фоне общей газодинамической обстановки в рабочем пространстве внутрикамерного объема.

Специфическими особенностями течений, развивающихся во внутренних полостях РДТТ, являются наличие частиц конденсированной фазы, межфазное взаимодействие, коагуляция и дробление частиц; до-, транс- и сверхзвуковые скорости потока; массоподвод от горячей поверхности заряда; пространственный характер течения продуктов сгорания при функционировании органов управления и наличии заряда сложной конфигурации; ударные волны вблизи элементов конструкции; вязкие течения в отрывных зонах; теплообмен на поверхности сопла; нестационарные физико-химические процессы.

Процессы «раздувания» заряда, или эрозионного горения, связаны с особенностями турбулентного переноса вблизи горячей поверхности. Выпадение частиц конденсированной фазы определяется особенностями поля скорости в канале, а работа внутренней тепловой защиты двигателя — характером приповерхностных течений.

В основе явления эрозионного горения твердого топлива лежит тепловой механизм, приводящий к увеличению скорости горения при обдуве поверхности заряда потоком продуктов сгорания вследствие увеличения теплового потока из газовой фазы реакционной зоны горения в конденсированную. Дополнительный тепловой поток в конденсированную фазу зоны горения и его распределение по поверхности заряда определяются (при прочих равных условиях) газодинамической структурой потока у поверхности канала.

На практике находят применение модели различной степени сложности и точности, выбор которых диктуется решением практических задач: профилирование до-, транс- и сверхзвуковой части сопла для до-

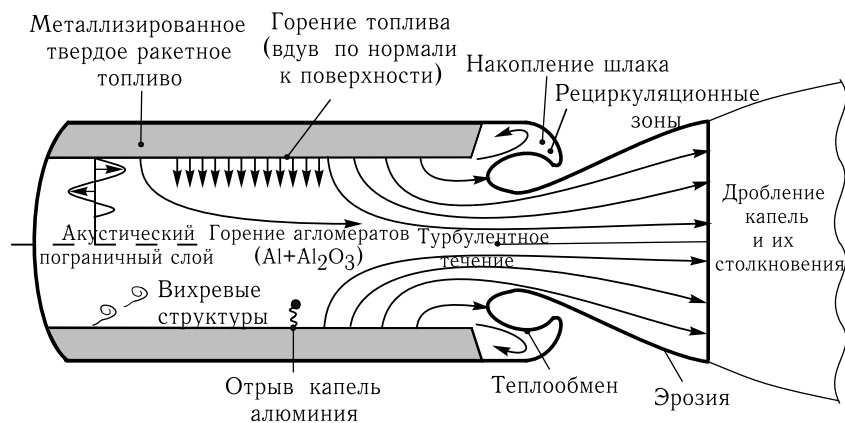


Рис. В.1. Газодинамические процессы в РДТТ

стижения оптимальных энергетических и весовых характеристик двигателя с учетом заданных габаритных ограничений (степень утолщения сопла, размещение опорного шарнира, толщина теплозащитного покрытия); расчет потерь удельного импульса тяги и коэффициента расхода сопла; исключение или минимизация осаждения частиц на стенки и накопления конденсированных продуктов сгорания в камере сгорания и предсопловом объеме; формирование исходных данных для последующего расчета конвективного и лучистого теплообмена, теплового состояния и эрозии теплозащитного покрытия камеры сгорания и сопла; расчет эффективности органов управления вектором тяги (поворотное управляющее сопло, газовые рули, вдув в закритическую часть сопла); моделирование нестационарных и переходных процессов (выход двигателя на режим, вылет сопловой заглушки, спад давления).

### **Использование вдува в технике**

Исследование течений в каналах с проницаемыми стенками не ограничивается внутрикамерной газодинамикой РДТТ.

Плоские или цилиндрические каналы, с боковой поверхности которых подается газ или жидкость, имеют многие технические устройства, а вдув используется во многих технологических процессах (производство бумаги, охлаждение и сушка, разделение изотопов). С точки зрения газовой динамики, течение в таком канале формируется под влиянием поперечного потока от стенок канала, сжимаемости и вязкости рабочего тела, а также ускоряющего градиента давления, вызванного подводом массы и изменением проходного сечения канала.

Схема подачи газа с боковой поверхности канала и через его левый торец используется в охлаждающих устройствах полимерных волокон при их вытяжке (формовании). В этом случае левый торец канала соответствует зеркалу фильеры.

Пористое охлаждение представляет собой один из эффективных способов защиты стенок канала плазмотрона от тепловых потоков. Вдув газа через пористые стенки обеспечивает его подачу в зону дугового нагрева, что позволяет интенсифицировать энерговыделение в дуге за счет роста напряженности электрического поля, а также уменьшить тепловые потери на стенки канала и вернуть тепло в столб дуги. Плазмотроны с пористой межэлектродной вставкой (МЭВ) предоставляют широкие возможности для повышения мощности и эффективности подобных устройств. Применение пористых материалов с различной проницаемостью секций МЭВ допускает профилирование интенсивности вдува по длине канала и газодинамическое управление параметрами дугового потока.

Каналы со вдувом находят применение в высокотемпературных теплообменных устройствах, позволяя исключить появление термических напряжений, связанных с тепловым расширением пакета труб, и обеспечить надежную эксплуатацию теплообменных устройств на всех режимах работы при отсутствии постоянного обслуживания (например, для замкнутой газотурбинной установки с ядерным реактором ресурс работы составляет около 250 тысяч часов, а период работы без постоянного местного обслуживания — около 10 тысяч часов). Для эффективной компенсации теплового расширения используется пакет труб на основе трубы Фильда, состоящей из двух концентрических труб. Холодный теплоноситель течет по внутренней трубе, разворачивается в тупиковом конце и протекает далее по межтрубному кольцевому пространству. Горячий теплоноситель обтекает внешнюю поверхность трубы. Для повышения эффективности трубы Фильда и снижения паразитных тепловых потоков между цилиндрическим каналом внутренней трубы и кольцевым каналом внутренняя труба делается пористой со вдувом части теплоносителя в межтрубный кольцевой канал.

Газогенераторы на твердом топливе применяются для получения газа с требуемой температурой, давлением и химическим составом. Процессы, происходящие в камерах сгорания газогенераторов, не отличаются от процессов в камерах сгорания РДТТ, за исключением истечения газовой смеси. Камеры сгорания твердотопливных газогенераторов имеют достаточно простое геометрическое оформление, в связи с чем применять двух- и трехмерные математические модели не имеет смысла. Расчеты обычно проводятся в рамках нульмерной или одномерной математической модели.

Несмотря на широкое использование каналов со вдувом в различных технических устройствах, внимание к моделированию внутренних течений в каналах со вдувом во многом объясняется той ролью, которую они играют в прогнозировании характеристик и исследовании устойчивости рабочих процессов в РДТТ.

## **Исторический обзор**

История развития РДТТ позволяет лучше понять особенности двигательных установок данного типа, проблемы, возникающие при их создании, достоинства и недостатки. Внутренняя баллистика развивалась в соответствии с фундаментальными открытиями, изобретениями и социальными заказами.

При рассмотрении развития ракет на твердом топливе обращает на себя внимание определяющая роль топлива. Появление нового топлива предопределяет создание нового топливно-конструктивного типа двигателя, знаменуя новый этап развития.

Твердотопливные двигатели ведут свою историю от пороховых ракет древности, в которых был впервые реализован принцип реактивного движения. Источником энергии первых ракетных двигателей был черный или дымный порох, состоящий из 75 % нитрата калия ( $\text{KNO}_3$ ), 15 % древесного угля и 10 % серы.

На протяжении долгого времени РДТТ не подвергались принципиальным изменениям и их развитие шло довольно медленными темпами. Основная причина этого заключалась в неблагоприятных физических характеристиках черного пороха. Дымный порох представляет собой ракетное топливо с весьма низким удельным импульсом, что обуславливается как его низкой калорийностью, так и высоким содержанием конденсированной фазы в продуктах сгорания.

Дальнейшее развитие ракет на твердом топливе связано с появлением бездымных коллоидных порохов на труднолетучем растворителе (баллиститное топливо). Различные составы бездымного пороха были созданы во Франции (П. Вьель), Швеции (А. Нобель), России (Д. Менделеев). Коллоидный порох представляет собой твердый раствор органических веществ, которые являются сложными эфирами азотной кислоты (например, раствор нитроцеллюлозы в нитроглицерине). Конечный продукт (двухкомпонентное топливо) поддается формованию под давлением, что позволяет изготавливать пороховые заряды путем прессования.

Создание бездымного пороха стимулировало интерес к РДТТ. Использование нового пороха не встретило особых препятствий в ствольной артиллерии, поскольку не требовало создания нового типа орудия. При выстреле пороховой заряд мгновенно превращается в газ с давлением в сотни мегапаскалей и снаряд с высокой скоростью выбрасывается из орудия.

Ракетная техника оказалась перед необходимостью разработки принципиально нового топливно-конструктивного типа двигателя. Создание топливных зарядов на основе бездымного пороха с использованием нелетучего растворителя оказалось трудной задачей. Несмотря на создание технологии изготовления одноканальных шашек, они нашли применение лишь в реактивных снарядах (системы залпового огня).

Ракетный двигатель на топливе нового типа обладал в  $2,5 \div 3$  раза бóльшим удельным импульсом по сравнению с РДТТ на дымном порохе. Увеличение удельного импульса было достигнуто за счет более высокой калорийности баллиститных топлив (примерно вдвое выше, чем дымных), низкого содержания в продуктах сгорания конденсированной фазы, применения сверхзвукового сопла, использования высоких рабочих давлений в двигателе.

В ходе Второй мировой войны появилось твердое ракетное топливо нового типа, представляющее собой механическую смесь тонкоизмель-

ченного минерального окислителя и горючего-связки с возможным включением энергоповышающих добавок.

Начальный период развития смесевых топлив связан с их использованием в качестве топлива к стартовым ускорителям для самолетов при взлете. Данные системы не предъявляли жестких требований к энергетике топлива и стабильности его баллистических характеристик.

Потребности развития ракетной техники стимулировали поиск составов с более высокими энергетическими характеристиками и более благоприятными баллистическими показателями.

В дальнейшем стали использоваться более эффективные окислители, а в качестве горючего-связующего — различные полимеры типа каучуков. Топливо, представляющее после смешения компонентов вязкую массу, обеспечивает снаряжение двигателя заливкой с последующей полимеризацией связки после нагрева. В таком двигателе заряд прочно скреплен с корпусом, а горение происходит изнутри по каналу фигурного профиля (например, в виде звезды), создаваемого при заливке за счет помещаемого в двигатель стержня, который удаляется после нагрева. Для исключения горения по торцевым поверхностям на них наносят бронирующие покрытия.

Смесевые топлива устойчиво горят при давлениях в несколько мегапаскалей, что позволяет снизить массу конструкции РДТТ. Технология снаряжения двигателя топливом не накладывает ограничений ни на диаметр заряда, ни на его массу. Постоянство тяги или необходимое изменение ее во времени достигается применением топлив с разными скоростями горения и выбором соответствующей конфигурации поперечного сечения заряда.

Помимо окислителя (обычно перхлората аммония, 70%), горючего-связующего (разного рода каучуки, 12%) и порошкообразного металла (алюминий, 16%), в топливо вводятся пластификаторы, отвердители (эпоксидный отвердитель, 1,5%), катализаторы (окись железа, 0,5%) и другие добавки, предназначенные для улучшения физических, механических и технологических свойств топлива, обеспечения полимеризации горючего-связующего, получения расчетных характеристик горения, увеличения допустимого срока хранения заряда.

Для топлив на основе перхлората аммония и обычных полимерных связующих характерна слабая зависимость скорости горения от давления и начальной температуры, а также сравнительно высокие энергетические характеристики. Скорость горения серийных топлив на основе перхлората аммония находится обычно в пределах от 4 до 20 мм/с.

Изобретение смесового топлива и новой технологии изготовления зарядов произвели революцию в области РДТТ и ракетной техники. Дальнейший прогресс был связан с разработкой более совершенных



составов смесевых топлив, созданием конструкций реактивных сопел, применением новых конструкционных, теплоизоляционных и других материалов, усовершенствованием технологических процессов изготовления РДТТ.

За период 1960–1990 гг. масса комплекта маршевых двигателей увеличилась в  $3 \div 4$  раза, масса конструкции маршевых двигателей относительно веса топлива снизилась более чем в 2 раза, а внутрикамерное рабочее давление выросло более чем втрое. Удельный импульс тяги маршевых двигателей был увеличен на  $35 \div 40$  кгс·с/кг. В частности, твердотопливный ускоритель системы Space Shuttle имеет длину 38,2 м, диаметр корпуса 3,71 м, массу 568 т. Двигатель работает в течение 122 с, развивая полный импульс тяги почти 1300 МН·с при максимальной тяге 14 МН. Масса топливного заряда составляет 502 т (88,4% от общей массы).

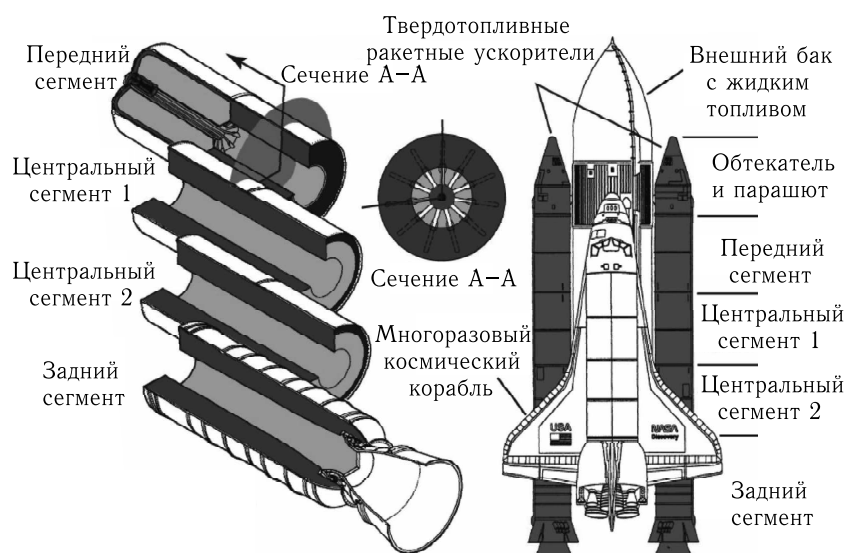


Рис. В.2. Схема двигательной установки системы Space Shuttle

Смесевое топливо распределяется между 4 секциями, которые изготавливаются отдельно и соединяются в одно целое при помощи механических замков. Сегментная конструкция разрешает проблемы, связанные с изготовлением и транспортировкой крупногабаритных РДТТ. Основная доля тяги создается за счет горения заряда по поверхностям центральных круглых каналов малой конусности. В передней секции заряд имеет начальный канал в виде 11 лучевой звезды. Благодаря такой конфигурации горячей поверхности, тяга вначале возрастает,

достигая максимума примерно через 20 с, затем в последующие 40 с снижается в 1,5 раза, после чего несколько возрастает, а начиная с 85 с полета вновь снижается (сначала плавно, а начиная с 110 с — резко). Характер изменения тяги обеспечивает достаточно высокое начальное ускорение, ограниченное динамическое давление на конструкцию в средней фазе полета и небольшую перегрузку (порядка  $3g$ ) в конце полета.

В передней секции устанавливается небольшой РДТТ кратковременного действия, обеспечивающий воспламенение топливного заряда в течение 0,3 с. В задней секции крепится реактивное сопло массой около 10 т, вдвинутое на 1/4 своей длины в корпус двигателя.

При сгорании топливного заряда образуются продукты сгорания с температурой порядка 3400 К и давлением 4,4 МПа (максимальное давление в 1,5 раза больше). При расширении в сопле продукты сгорания развивают скорость, равную 2480 м/с у поверхности и 2600 м/с в вакууме скорости.

Для управления траекторией полета вокруг горловины сопла устанавливается универсальный гибкий подшипник диаметром около 2 м и массой свыше 3 т, обеспечивающий совместно с гидроприводом поворот сопла в двух осевых плоскостях на угол  $\pm 8^\circ$  и изменение вектора тяги. Соответствующим поворотом двух сопел достигается управление по тангажу, курсу и крену.

При модернизации маршевых РДТТ с целью увеличения тяговооруженности ракеты конструкторская мысль идет двумя путями: путем совершенствования заряда (улучшение свойств топлива, увеличение поверхности горения) и путем совершенствования соплового блока. Вместо простых зарядов с цилиндрическим каналом находят применение канально-щелевые заряды и заряды с каналами, имеющими звездообразное поперечное сечение.

Изначально в РДТТ применялась четырехсопловая компоновка для уменьшения строительной высоты ракеты и использования сопел в качестве органов управления и стабилизации. Течение продуктов сгорания в таких двигателях сопровождается увеличением давления в камере сгорания, а также увеличением уноса теплозащитного покрытия днища. Наличие несоосного входа продуктов сгорания в сопло вызывает увеличение массы тепловой защиты на заднем днище двигателя, потери удельного импульса тяги и несимметричный унос массы тепловой защиты газового тракта сопла. Для исключения обгорания концевой части (зоны среза) сопла и необходимости размещения сопел внутри хвостового или межступенчатого отсека ракеты степень их расширения ограничивается.

Четырехсопловые блоки с разрезными (для управления) соплами заменяются односопловым блоком с более высокой степенью расшире-

ния сопла (такие сопла в четырехсопловом варианте не вписываются в мидель ракеты) с вдвинутым соплом в камеру сгорания (сопло не вписывается по длине в строительную высоту ракеты), получая так называемое утопленное сопло с клапанами вдува для управления ракетой в полете. Применение частично (до 50% от общей длины сопла) утопленных в корпус двигателя сопловых блоков позволяет увеличить степень расширения сопла от 4,0 до 5,5. Дальнейшее утапливание сопла в камеру сгорания приводит к резкому возрастанию потерь удельного импульса тяги, уменьшению запасов топлива и ухудшению массовых характеристик сопла и двигателя в целом.

Оптимальной конструкцией сопла является комбинация из утопленного и раздвигаемого сопла, снабженного выдвигаемыми телескопическими насадками. В сложенном (исходном) положении выдвигаемые телескопические насадки сопла размещаются у заднего днища двигателя и раскрываются во время работы двигателя после снятия фиксации исходного положения, образуя в выдвинутом (рабочем) положении с неподвижной частью сопла единый газодинамический тракт. Конструкция сопла РДТТ с изменяемой геометрией обеспечивает возможность реализации высокой степени расширения сопла, выполнение требований по повышению энергетических характеристик с одновременным выполнением габаритных ограничений на двигатель.

Для изменения направления вектора тяги утопленное сопло делается поворотным. Подвижное управляющее сопло наилучшим образом отвечает конструктивным особенностям и условиям работы сопел большого расширения в составе РДТТ.

Изменение направления вектора тяги достигается путем установки газовых рулей на выходе из сопла, несимметричным вводом газа в сопло, что приводит к повороту реактивной струи, отклонением (качанием) сопла в осевой плоскости и другими способами.

В результате, компоновка камер сгорания РДТТ претерпевает существенные изменения.

Коэффициент массового совершенства двигателей, представляющий собой отношение массы конструкции к массе твердотопливного заряда, находится на уровне  $0,11 \div 0,12$ , а коэффициент объемного заполнения камеры сгорания топливом (отношение объема заряда к внутреннему объему камеры сгорания) составляет 0,9. Масса соплового блока с органами управления у современных РДТТ достигает до  $40 \div 50\%$  общей массы конструкции.

Процесс проектирования РДТТ заключается в преодолении противоречий, поскольку одновременно предъявляемые требования по максимальному удельному импульсу тяги, максимальному заполнению камеры сгорания твердым топливом при минимальной массе конструкции и удовлетворении требований к внутрибаллистическим характери-

кам и габаритным ограничениям определяют необходимость поиска оптимального варианта конструктивной схемы. Основными требованиями являются требования по габаритам и энергетическим характеристикам.

Разработка новых топливных композиций или модификация существующих является сложной задачей, поскольку факторы, способствующие улучшению одного качества, вызывают нежелательное изменение другого. Возможности повышения удельного импульса РДТТ за счет применения более эффективных топлив представляются довольно ограниченными.

Применению топлив, содержащих бериллий вместо алюминия (ожидается увеличение удельного импульса на 7% за счет снижения молекулярной массы топлива в сочетании с повышением температуры сгорания), препятствует высокая токсичность бериллия и продуктов его сгорания, а также дороговизна бериллия. Дальнейшее увеличение удельного импульса (еще порядка на 7%) представляется возможным за счет использования гидрида бериллия ( $\text{BeH}_2$ ) вместо бериллия. Помимо токсичности, его применению препятствует нестабильность соединения и трудность приготовления достаточно плотных составов.

Следует отметить, что топлива, содержащие бериллий или его химические соединения, при большем удельном импульсе характеризуются меньшей плотностью. Бериллий уступает по этому показателю алюминию почти в 1,5 раза, а гидрид бериллия — более чем в 4 раза.

Энергетические характеристики топлив повышаются также за счет применения более активных окислителей и горючих-связующих. Использование в смесевом топливе перхлората нитрония ( $\text{NO}_2\text{ClO}_4$ ) вместо перхлората аммония ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ), который содержит почти в 2 раза меньше кислорода, обеспечивает прирост удельного импульса примерно на 10%. Применению этого окислителя препятствует его гигроскопичность, плохая совместимость с освоенными связующими и взрывоопасность. Высокая чувствительность к внешним воздействиям препятствует применению в смесевых топливах и фтораминовых связующих, содержащих атомы фтора, азота и водорода.

Помимо удельного импульса, важными характеристиками твердых топлив являются плотность, механические свойства, стабильность, технологичность, способность к полимеризации при нормальной температуре (для этого используются различные катализаторы). Эффективным считается использование многофункциональных и комплексных добавок, позволяющих получать твердые топлива с оптимальным сочетанием свойств (изменение структуры известных компонентов, применение новых способов их изготовления и обработки, изменение химической технологии приготовления топлива).

## **Роль математического моделирования**

Процессы в камере сгорания РДТТ как в нестационарные, так и в квазистационарные периоды работы являются сложной совокупностью большого числа физико-химических процессов. Их математическое моделирование предполагает рассмотрение таких явлений, как зажигание и горение навески воспламенительного состава, распространение продуктов горения по внутрикамерному объему, теплообмен продуктов сгорания с поверхностью топливного заряда, прогрев топлива, его зажигание и горение, истечение продуктов сгорания из камеры двигателя, напряженно-деформированное состояние корпуса и топливного заряда и его влияние на внутрикамерные процессы, изменение геометрии внутрикамерного объема и другие.

Уровень сложности математических моделей, используемых для прогнозирования изменения параметров работы двигателя, изменяется в широких пределах — от простейших моделей, позволяющих получить аналитические соотношения, применяемые в инженерных расчетах, до моделей, появление которых стимулировал прогресс вычислительной техники и ориентированных на использование численных методов. В результате для решения задач внутрикамерной газодинамики имеется набор математических моделей, алгоритмов и программ, подчиненных решению основной задачи и обеспечивающих эксплуатацию программных комплексов в широком диапазоне варьируемых параметров, а также реализованных совокупностью различных методик, применение которых представляется в равной степени правомерным для решаемых задач. При этом выполняется частичное перекрытие применимости различных численных методик при одинаковых исходных данных, а гибкое изменение физической постановки задачи позволяет исследовать характер протекающих процессов и выяснить роль различных факторов в формировании картины потока.

Роль численного моделирования постоянно возрастает, что обуславливается снижением коммерческой стоимости вычислительной техники, включая многопроцессорные системы обработки данных, и сокращением объемов дорогостоящего натурного эксперимента за счет увеличения объемов численного моделирования. Кроме того, численный эксперимент позволяет получить результаты, получение которых представляется трудоемким либо невозможным при натурном моделировании, а также предоставляет возможность установления физических закономерностей в исследуемых сложных процессах.

Технология численного эксперимента предполагает разработку физической и математической моделей решаемой задачи, построение дискретной модели и ее программную реализацию, а также эксплуатацию готового программного комплекса и анализ результатов расчетов.

Разработка физической модели в существенной степени зависит от доступных ресурсов вычислительной техники, а содержание дискретной модели — от архитектуры компьютеров. При этом роль сравнительно простых математических моделей и имеющихся аналитических решений возрастает, поскольку они используются при отладке программного комплекса и для проверки результатов численных расчетов.

Для расчетов течений в каналах со вдувом используются специализированные CFD-коды, примерами которых служат код MSD (структурированные сетки) и код CEDRE (неструктурированные сетки), развитые во французском аэрокосмическом центре ONERA в рамках программы ASSM (Aerodynamics of Segmented Solid Motors), поддержанной CNES/CNRS <sup>1)</sup>. Для экспериментальных исследований в ONERA созданы установки VECLA (плоские течения), VALDO (осесимметричные течения), C1xb (нестационарные режимы течения, двухфазные течения, вихревые структуры).

Следует отметить сравнительно медленное внедрение методов вычислительной газовой динамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) и их использование для расчетов полномасштабных конфигураций РДТТ по сравнению с другими областями техники, например, с турбомашиностроением (газовые турбины, компрессоры).

### Имеющиеся публикации

Ракетным двигателям твердого топлива посвящено значительное число монографий как научного плана, так и учебников и учебных пособий. В качестве одного из учебных пособий отметим книгу А. М. Липанова и А. В. Алиева <sup>2)</sup>.

Можно отметить общую эволюцию существующих изданий. Для первых этапов были характерны работы, в которых для развития нового направления либо проецировались подходы внутренней баллистики артиллерийских систем <sup>3)</sup>, либо предлагались простые нульмерные и одномерные подходы <sup>4)</sup>, либо обосновывались более общие подходы на

---

<sup>1)</sup> Fabignon Y., Kuentzmann P., Vuillot F., Prevost M., Bec R., Robert E., Marion-Duval P. A survey of French research and technology program on the internal aerodynamics of segmented solid motors // ONERA Report. 2002. No. TP-02-22. 25 p.

<sup>2)</sup> Липанов А. М., Алиев А. В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1995. 400 с.

<sup>3)</sup> Орлов Б. В., Мазинг Ю. Г. Термодинамические и баллистические основы проектирования РДТТ. М.: Машиностроение, 1979. 536 с.

<sup>4)</sup> Шишков А. А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 148 с.

основе классической газодинамики <sup>1)</sup>. В монографии Б. А. Райзберга, Б. Т. Ерохина, К. П. Самсонова <sup>2)</sup> дана теоретическая постановка задач внутренней газодинамики РДТТ.

С накоплением опыта расчета и отработки РДТТ стали появляться работы, обобщающие этот опыт. Среди них отметим книгу И. Х. Фахрутдинова и А. В. Котельникова <sup>3)</sup>, а также книгу, вышедшую под общей редакцией Л. Н. Лаврова <sup>4)</sup>. В числе этих работ интенсивно развивался теоретический подход, основанный на идеях вычислительного моделирования <sup>5)</sup>.

Экспериментальные подходы решения задач этого класса рассматривались в ряде работ, из которых отметим книги Ю. В. Полежаева и А. А. Шишкова <sup>6)</sup>, А. А. Шишкова, С. Д. Панина, Б. В. Румянцева <sup>7)</sup>, М. И. Соколовского <sup>8)</sup>, а также книгу, выпущенную под ред. Н. П. Кузнецова <sup>9)</sup>.

Экспериментальные наработки авторского коллектива данной монографии обобщаются в книге С. К. Савельева, В. Н. Емельянова, Б. Я. Бендерского <sup>10)</sup>, в которой излагаются результаты экспериментальных исследований по внутренней газодинамике РДТТ и управлению свойствами внутренних течений, выполненных в ЛМИ–БГТУ (течения в каналах РДТТ, газодинамика РДТТ с многосопловой крыш-

---

<sup>1)</sup> Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Наука, 1967. 368 с.

<sup>2)</sup> Райзберг Б. А., Ерохин Б. Т., Самсонов К. П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972. 384 с.

<sup>3)</sup> Фахрутдинов И. Х., Котельников А. В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1987. 325 с.

<sup>4)</sup> Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Под общ. ред. Л. Н. Лаврова. М.: Машиностроение, 1993. 215 с.

<sup>5)</sup> Ерохин Б. Т., Липанов А. М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.

<sup>6)</sup> Полежаев Ю. В., Шишков А. А. Газодинамические испытания тепловой защиты. М.: Промедек, 1992. 248 с.

<sup>7)</sup> Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

<sup>8)</sup> Соколовский М. И. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе. М.: Машиностроение, 2003. 464 с.

<sup>9)</sup> Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент / Под ред. Н. П. Кузнецова. Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 552 с.

<sup>10)</sup> Савельев С. К., Емельянов В. Н., Бендерский Б. Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. Санкт-Петербург: Недра, 2007. 268 с.

кой и поворотным управляющим соплом, газодинамика вращающихся РДТТ с торцевыми зарядами и другие). Дается подробное описание как горячих стендовых установок, позволяющих воспроизвести особенности течений высокотемпературной среды (условия, приближенные к реальным условиям работы РДТТ), так и газодинамических стендов, работающих на низкотемпературном рабочем теле с имитацией горения вдувом газа (имеется возможность подробного исследования газодинамических полей, в том числе с учетом сложных пространственных эффектов).

Научный интерес к результатам, изложенным в упомянутых монографиях, не ослабевает, поскольку они предоставляют данные физического и математического моделирования газодинамических и теплообменных процессов в пространственных течениях сложной структуры, востребованные в смежных областях техники (теплообменные устройства, химическая технология, системы охлаждения) и имеющие значение для тестирования современных расчетных средств.

Повышение энергомассовых характеристик РДТТ вынуждает ученых и инженеров к более детальному исследованию внутрикамерных процессов. Ограниченные возможности газодинамических стендов и достаточно высокие затраты на их создание стимулировали разработку математических моделей разного уровня сложности для описания нестационарных и квазистационарных процессов в РДТТ.

Имеется ряд монографий, обобщающих исследования различных научных групп, опыт конструирования РДТТ и расчетной диагностики внутренних течений. Среди таких работ отметим книги И. М. Васенина, В. И. Архипова, В. Г. Бутова, А. А. Глазунова, В. Ф. Трофимова <sup>1)</sup> (Томский государственный университет, Томск), А. Д. Рычкова <sup>2)</sup> (Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск), В. П. Бобрышева, В. Д. Лисицы, Ф. Ф. Спиридонова <sup>3)</sup> (НПО «Алтай», Бийск), книгу, выпущенную под редакцией Л. Н. Лаврова <sup>4)</sup> (НПО «Искра», Пермь).

---

<sup>1)</sup> *Васенин И. М., Архипов В. И., Бутов В. Г., Глазунов А. А., Трофимов В. Ф.* Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во ТГУ, 1986. 264 с.

<sup>2)</sup> *Рычков А. Д.* Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.

<sup>3)</sup> *Бобрышев В. П., Лисица В. Д., Спиридонов Ф. Ф.* Физико-математическое моделирование внутрикамерной газодинамики РДТТ. М.: ЦНИИИ-ТИКПК, 1993. 128 с.

<sup>4)</sup> *Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Под ред. Л. Н. Лаврова.* М.: Машиностроение, 1993. 214 с.



Особое место в ряду этих исследований занимают работы, выполненные научной школой УрО РАН, созданной академиком А. М. Липановым. Различные результаты, связанные с моделированием внутрикамерных процессов, изложены в книгах А. М. Липанова, Б. Т. Ерохина <sup>1)</sup> и В. В. Калинина, Ю. Н. Ковалева, А. М. Липанова <sup>2)</sup>. Более поздние результаты приведены в книге Б. Т. Ерохина <sup>3)</sup> и книге А. М. Липанова, В. П. Бобрышева, А. В. Алиева, Ф. Ф. Спиридонова, В. Д. Лисицы <sup>4)</sup>.

В книге А. В. Алиева <sup>5)</sup> рассматриваются внутрикамерные процессы в РДТТ различных конструкций и излагаются методы расчета внутриваллистических параметров и напряженно-деформированного состояния прочноскрепленных с корпусом зарядов и корпусов. Обсуждаются методы исследования процессов горения твердого топлива и экспериментальной отработки РДТТ.

Результаты исследований автоколебаний газа, возникающих в установках с горением, излагаются в книге В. М. Ларионова и Р. Г. Зарипова <sup>6)</sup>. Приводится общая концепция теории вибрационного горения как автоколебательного процесса, проблемы его теоретического описания и перспективы приложения теории к решению практических задач. На основе энергетического метода разработана обобщенная теоретическая модель, позволяющая с единых позиций рассматривать самовозбуждение продольных акустических колебаний газа в типовых устройствах. Предложена методика расчета границ неустойчивости, частот и амплитуд установившихся колебаний. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными и служат основой для проектирования устройств вибрационного горения полезного назначения и разработки мер по устранению колебаний в камерах сгорания напряженных энергетических установок.

Значительный вклад в развитие методов комплексного расчетно-теоретического анализа термодинамических, газодинамических, тепло-

---

<sup>1)</sup> Ерохин Б. Т., Липанов А. М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.

<sup>2)</sup> Калинин В. В., Ковалев Ю. Н., Липанов А. М. Нестационарные процессы и методы проектирования узлов РДТТ. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

<sup>3)</sup> Ерохин Б. Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ. М.: Машиностроение, 1991. 560 с.

<sup>4)</sup> Численный эксперимент в теории РДТТ / Липанов А. М., Бобрышев В. П., Алиев А. В., Спиридонов Ф. Ф., Лисица В. Д. / Под ред. А. М. Липанова. Екатеринбург: Наука, 1994. 302 с.

<sup>5)</sup> Алиев А. В. Внутренняя баллистика РДТТ. М.: Машиностроение, 2007. 504 с.

<sup>6)</sup> Ларионов В. М., Зарипов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением. Казань: Изд-во КГТУ, 2003. 228 с.

вых и физико-химических процессов в камерах сгорания РДТТ, лежащих в основе принятия проектно-конструкторских решений, внесли ученые и инженеры Исследовательского центра им. М. В. Келдыша (ранее НИИ тепловых процессов).

В книге, изданной по редакции А. С. Коротева <sup>1)</sup>, обобщаются данные из отечественной и зарубежной литературы, а также излагаются результаты оригинальных исследований в области внутренней баллистики двухфазной газовой динамики, горения твердых топлив, тепломассообмена, механизмов разрушения и уноса применяемых теплозащитных материалов, нестационарных процессов при работе РДТТ. Рассматриваются методы решения задач двухфазных течений в камерах сгорания и соплах с учетом особенностей межфазного взаимодействия, дробления и коагуляции частиц, на основе которых строятся методики оптимального профилирования сопел и расчета энергетических потерь, сопряженные задачи тепломассообмена, теплового состояния, абляции и термодеструкции теплозащитных и эрозионностойких материалов. Описываются результаты исследований эффективности органов управления вектором тяги РДТТ. Разработанные подходы позволяют прогнозировать основные характеристики РДТТ (изменение давления в камере, состав и расход продуктов сгорания, удельный импульс и коэффициент расхода, параметры тепломассообмена, нагрев и унос теплозащитных материалов, профилирование контура сопла), а также проводить оптимизацию параметров, выбор тепловой защиты, конфигурации заряда, степени расширения и формы сопла, сравнивать эффективность различных топлив на ранних стадиях проектирования РДТТ.

Широкий круг исследований физических, химических и газодинамических процессов, связанных с горением твердого топлива, проведен в рамках шестилетней совместной американо-российской программы <sup>2)</sup>, которая длилась с 1 октября 1995 по 30 сентября 2001. В программе участвовали 9 университетов США и 7 исследовательских групп из России, представляющие различные университеты и научные центры. Техническим директором программы являлся профессор М. W. Beckstead (Brigham Young University, USA), а программным директором — профессор F. E. C. Culick (California Institute of Technology, USA). В рамках программы разработаны методы физического и чис-

---

<sup>1)</sup> Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. А. С. Коротева. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

<sup>2)</sup> Investigations of novel energetic materials to stabilize rocket motors // Report of the Caltech Multidisciplinary University Research Initiative (MURI). California Institute of Technology, Jet Propulsion Center. 2002. 275 p.

ленного моделирования, а также созданы предметно-ориентированные программные комплексы для расчета и прогнозирования характеристик рабочих процессов и функциональных параметров РДТТ, позволяющие сократить расходы на их проектирование и отработку.

Статьи по тем или иным вопросам, связанным с моделированием внутрикамерных процессов, публикуются в периодических изданиях по механике жидкости и газа и тепломассообмену, а также в трудах национальных и международных конференций по газовой динамике и теплообмену, например, в трудах Международной конференции «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах» (International Conference on Internal Ballistics and Combustion Processes in Solid Propulsion Systems and Guns), организуемой Институтом прикладной механики УрО РАН (Ижевск), который возглавляет академик РАН А.М. Липанов, и в трудах международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем» (Intra-Chamber Processes, Combustion and Gas Dynamics of Dispersed Systems), проводимой Балтийским государственным техническим университетом (Санкт-Петербург). Среди конференций, проводимых за рубежом, отметим International Conference on Computational Ballistics, организуемую Wessex Institute of Technology (Southampton, UK), и серии конференций, проводимых под эгидой American Institute of Aeronautics and Astronautics (USA).

Данная монография в существенной степени отличается от имеющихся изданий. В ней основное внимание уделяется постановке, проведению и анализу результатов моделирования внутрикамерных процессов в РДТТ на системе специально созданных для этой цели серии математических моделей разного уровня схематизации и сложности. При этом учитываются и последние достижения фундаментальной науки в области моделирования турбулентных <sup>1)</sup> и двухфазных <sup>2)</sup> течений, а также в области разработки современных вычислительных технологий для моделирования внутренних течений <sup>3)</sup>. Эти подходы модифицируются и адаптируются к задачам внутренней газодинамики РДТТ.

Демонстрируется два подхода к решению сложных задач газовой динамики и теплообмена. Один из них основан на применении чис-

---

<sup>1)</sup> Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 376 с.

<sup>2)</sup> Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения газа с частицами. М.: Физматлит, 2008. 564 с.

<sup>3)</sup> Волков К. Н., Емельянов В. Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. Москва: Физматлит, 2010. 488 с.

ленных методов, а другой — на использовании анализа, выполненного с предварительным упрощением математической постановки задачи, исходя из ее известных особенностей.

Особенностью работы является также то обстоятельство, что она выполнена в рамках университетской науки, в отличие от работ, авторами которых являются непосредственные разработчики техники. Это делает возможным сконцентрироваться на выделении и исследовании общих закономерностей газодинамики и теплообмена, а не на конкретных конструктивных оформлениях заряда твердого топлива. Результаты, полученные в рамках данной работы, являются общими в плане научных приложений.

Модели, методы и подходы, приведенные в книге, разработаны авторами или при их непосредственном участии.

Проблема внутренней газодинамики энергоустановок рассматривалась членами авторского коллектива в течении длительного времени. Эволюция разработок шла от экспериментальных подходов через разработку экономичных средств вычислительного моделирования к применению современных численных методов и информационных технологий. На данном этапе было осознано, что в равной мере востребованы как упрощенные методики и подходы, так и сложные модели, учитывающие трехмерность, нестационарность и многодисциплинарность процессов в РДТТ. В монографии отражаются эти подходы, оцениваются их возможности и устанавливаются взаимосвязи.

## Глава 1

### **МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВНУТРИКАМЕРНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ**

Процессы в камере сгорания РДТТ как в нестационарные, так и в квазистационарные периоды его работы являются сложной совокупностью большого числа физико-химических процессов. Их математическое моделирование предполагает рассмотрение таких явлений, как зажигание и горение навески воспламенительного состава, распространение продуктов горения по внутрикамерному объему, теплообмен продуктов сгорания с поверхностью топливного заряда, прогрев топлива, его зажигание и горение, истечение продуктов сгорания из камеры двигателя, напряженно-деформированное состояние корпуса и топливного заряда и его влияние на внутрикамерные процессы, изменение геометрии внутрикамерного объема и другие.

Уровень сложности математических моделей, используемых для прогнозирования параметров работы двигателя, изменяется в широких пределах — от простейших моделей, позволяющих получить аналитические соотношения, которые применяются в инженерных расчетах, до моделей, появление которых стимулировал прогресс вычислительной техники и ориентированных на использование современных вычислительных технологий. В результате для решения задач внутрикамерной газодинамики получается набор математических моделей, алгоритмов и программ, подчиненных решению основной задачи и обеспечивающих эксплуатацию программного комплекса в широком диапазоне варьируемых параметров, а также реализованных совокупностью различных методик, применение которых представляется в равной степени правомочным для решаемых задач. При этом выполняется частичное перекрытие применимости различных численных методик при одинаковых исходных данных, а гибкое изменение физической постановки задачи позволяет исследовать характер протекающих процессов и выяснить роль различных факторов в формировании картины течения.

Роль численного моделирования постоянно возрастает, что обуславливается снижением коммерческой стоимости вычислительной техники, включая многопроцессорные системы обработки данных, и сокращением объемов дорогостоящего натурального эксперимента за счет увеличения объемов численного моделирования. Кроме того, числен-

ный эксперимент дает данные, получение которых представляется либо трудоемким либо невозможным при натурном моделировании. Имеется также возможность установления физических закономерностей в исследуемых сложных процессах.

В данной главе рассматриваются вопросы, связанные с постановкой и реализацией вычислительного эксперимента для задач внутрикамерной газодинамики РДТТ. Технология численного эксперимента предполагает разработку физической и математической моделей решаемой задачи, построение дискретной модели и ее программную реализацию, а также эксплуатацию готового программного комплекса и анализ результатов расчетов. Разработка физической модели в существенной степени зависит от доступных ресурсов вычислительной техники, а содержание дискретной модели — от архитектуры компьютеров. При этом роль сравнительно простых математических моделей и имеющихся аналитических решений возрастает, поскольку они используются как при отладке программного комплекса, так и проверки результатов численных расчетов.

### **1.1. Построение физико-математической модели**

Конструктивная схема двигателя во многом определяет характер протекающих процессов, а принятый уровень схематизации продуктов горения — сложность математической модели.

**1.1.1. Конструктивные схемы.** Основными конструктивными узлами и элементами РДТТ являются корпус, заряд твердого топлива, сопловой блок, органы управления вектором тяги, воспламенитель, узлы отсечки тяги и узлы аварийного выключения двигателя. Конструктивные компоненты РДТТ и соответствующие им математические модели приводятся на рис. 1.1.

Корпуса РДТТ имеют различную геометрическую форму (цилиндрическую, овальную, сферическую, торовую, коническую, комбинированную). В корпусе содержится прочно скрепленный с ним заряд твердого топлива. Корпус двигателя изготавливается либо из металла, либо из пластика.

Успехи в развитии крупногабаритных РДТТ связаны с освоением смесевых высокоэнергетических ракетных топлив, оформленных в виде блоков-зарядов, изготавливаемых заливкой топливной массы в корпус и прочно скрепленных с обечайкой двигателя. Внутренняя поверхность заряда создается формообразующими элементами в процессе полимеризации топливной массы.

Смесевое твердое топливо представляет собой механическую смесь тонкоизмельченного минерального окислителя (как правило, перхлора-

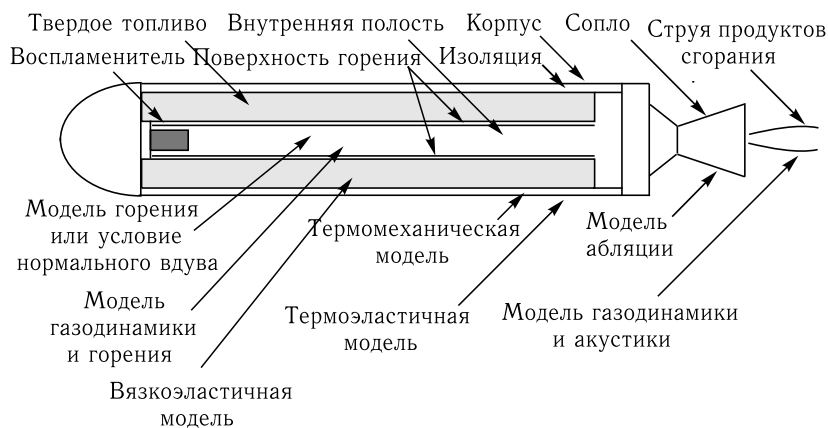


Рис. 1.1. Основные компоненты РДТТ и соответствующие им математические модели

та аммония), органического горючего-связки (различные типы каучуков) и металлических добавок (чаще всего мелкодисперсных частиц алюминия).

В зависимости от назначения и требований, предъявляемых к РДТТ, необходимо обеспечить определенную форму кривой изменения давления в камере двигателя, что достигается выбором формы заряда. Различают дегрессивную (давление с течением времени падает), нейтральную (давление постоянно) и прогрессивную (давление растет) форму заряда. Во многих случаях заданный закон газоподвода достигается сочетанием дегрессивно и прогрессивно горящих элементов.

Конструкции крупногабаритных РДТТ характеризуются разнообразием схемных решений и сложностью форм внутренних проточных трактов и каналов, позволяющих обеспечить требуемую поверхность горения.

Наиболее простыми формами зарядов являются сплошные заряды торцевого горения, обеспечивающие постоянство давления в камере сгорания (двигатели малой тяги и твердотопливные газогенераторы). В цилиндрических шашках с осевым сквозным каналом и бронированными торцами достигается постоянство поверхности горения. Для получения нейтрального горения сквозной канал дополняется продольными щелями, варьируя число которых и их относительную длину, добиваются необходимого изменения поверхности горения. Кривые давления с различной прогрессивностью получаются при использовании цилиндрических зарядов с внутренним каналом звездообразной формы с разным числом и формой лучей (маршевые двигатели баллистических

ракет). Высокий коэффициент заполнения двигателя топливом обеспечивают заряды с цилиндрически-коническим каналом и примыкающим к нему наклонным щелевым компенсатором. Для получения ступенчатой кривой изменения тяги применяются комбинированные формы зарядов (двухрежимные РДТТ).

Сопловой блок, служащий для разгона продуктов сгорания топлива и создания тяги путем преобразования тепловой энергии топлива в кинетическую, состоит из одного или нескольких сопел. Сопловой блок соединяется с задним днищем различным образом, а для небольших двигателей составляет с ним одно целое.

Конструкция соплового блока с учетом выбранного топлива и заданной траектории полета ракеты определяется необходимой тягой, удельным импульсом тяги, давлением в камере сгорания, временем работы двигателя и габаритными ограничениями. Четырехсопловые блоки малой длины обеспечивают управление вектором тяги по всем каналам (тангаж, рыскание, крен). Использование односопловых блока с центральным соплом, утопленным в камеру сгорания, позволяет повысить энергетические характеристики и сократить длину двигателя за счет продвижения сопла в камеру сгорания. В утопленном сопле (submerged nozzle) совмещаются функции создателя тяги и управляющего устройства, а его привлекательность связана с возможностью снижения потерь удельного импульса по сравнению с многосопловой конструкцией.

По конструкции внутрикамерного объема применяемые на практике двигательные установки делятся на несколько классов в зависимости от числа каналов и одно- или многосопловых блоков. В частности, в конструкции двигательных установок, содержащих один канал и одно сопло, выделяют передний объем, канал, предсопловой объем и неутопленное сопло. В этом случае область интегрирования состоит из четырех характерных объемов. При наличии щелей в окрестности переднего и соплового днищ область состоит из пяти объемов.

Управление вектором тяги по каналам тангажа, рыскания и крена осуществляется при помощи различных устройств (требуется создание боковых усилий, составляющих  $1 \div 7\%$  от величины тяги). Органы управления разделяются на органы управления локального действия (щитки, дефлекторы, газовые рули, устройства для подачи жидкости или газа) и подвижные управляющие сопла. В органах управления локального действия при выработке управляющего усилия сопло остается неподвижным. При использовании поворотного управляющего сопла подвижная часть соплового тракта связывается с неподвижной частью при помощи шарнира.



**1.1.2. Горение твердого топлива.** Твердые топлива имеют достаточно широкую номенклатуру и отличаются друг от друга по характеристикам работы, что обусловлено их различным назначением. Одним из критериев, по которому характеризуются заряды, является их скорость горения: медленногорящие топлива ( $2 \div 6$  мм/с), топлива со средней скоростью горения ( $6 \div 15$  мм/с) и быстрогорящие топлива ( $30 \div 60$  мм/с).

Горение смесового твердого топлива представляет собой сложный процесс, включающий в себя ряд взаимосвязанных процессов химической, термодинамической и физической природы, и является самостоятельным научным направлением.

Наиболее распространенными твердыми топливами являются топлива с окислителем на основе ионов перхлората ( $\text{ClO}_4^-$ ), в частности перхлората аммония (Ammonium perchlorate, AP).

Нитрат аммония (Ammonium nitrate, NG) дешевле перхлората аммония и является окислителем, совместимым с окружающей средой, поскольку он полностью газифицируется при горении и не выделяет соляную кислоту (HCl), ответственную за загрязнение окружающей среды и за видимость факела РДГТ вследствие конденсации водяного пара. Трудности использования нитрата аммония в качестве окислителя связаны с уменьшением удельного импульса, а также при разработке рецептур топлива с алюминием (низкая эффективность горения, поверхностная агломерация, фазовые переходы при температуре окружающей среды, гигроскопичность). Для регулирования зависимости скорости горения от давления используются катализаторы, а для увеличения скорости горения в состав топлива вводится энергетическое связующее. Применяются специфические добавки, способные стабилизировать фазовые переходы и ограничивающие гигроскопичность. Рассматриваются твердые топлива, основанные на системе двойного окисления (перхлорат аммония и нитрат аммония), что позволяет найти компромисс между двумя окислителями [180].

Типичные топлива для крупногабаритных РДГТ представляют собой смесь алюминиевого порошка с частицами относительно малого размера ( $3 \div 30$  мкм), составляющими до 20 % массы топливной композиции, и кристаллов перхлората аммония ( $40 \div 300$  мкм), обеспечивающих окислительный потенциал композиции (до 65 % массы заряда), диспергированных в матрице синтетического резиноподобного связующего (до 15 % массы заряда).

Алюминий наиболее часто используется в качестве энергетических добавок к компонентам твердого топлива (реакция окисления алюминия происходит с большим выделением энергии). В качестве замены алюминию рассматриваются возможности использования бериллия (продукты горения бериллия являются токсичными), циркония (поро-

шок циркония примерно в 2,5 раза плотнее порошка алюминия) и магния (достигается почти полное сгорание исходного металла), а также гибридов металлов, таких, как  $\text{AlH}_3$ ,  $\text{BeH}_2$  и  $\text{ZrH}_2$  (они обеспечивают высокую энергетику топлива, но являются несовместимыми с многими полимерными материалами).

Каталитические добавки (catalysts, suppressants) используются в некоторых случаях для увеличения скорости горения (наряду с изменением дисперсности окислителя) и уменьшения чувствительности скорости горения к изменению давления и температуры. Находят применение как твердые добавки (например, оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), так и жидкие. Увеличение дисперсности частиц катализатора способствует повышению скорости горения. Дополнительное увеличение скорости горения и снижение показателя степени в законе скорости горения дает использование комбинации нескольких катализаторов. Введение в смесевые топлива 1% смеси, содержащей 84% окиси меди и 16% окиси хрома, увеличивает скорость горения на 30%.

Замедление горения топлива осуществляется путем введения в его состав специальных соединений (двуокись магния, трехфтористый бром), называемых ингибиторами. Вводятся также добавки для подавления нежелательных эффектов при догорании факела РДТТ в атмосфере и уменьшения дымообразования.

В качестве баллистических добавок (ballistic modifier) и для стабилизации горения твердого топлива (combustion stabilizer) используется оксид титана ( $\text{TiO}_2$ ).

Исследование горения твердого топлива представляет собой отдельное научное направление, в котором разработаны модели горения различной степени сложности [360].

При моделировании рабочих процессов в РДТТ горение топлива обычно схематизируется, причем уровень схематизации изменяется в зависимости от постановки задачи. В задачах выхода двигателя на режим, где существенными являются процессы подключения поверхности и распространения пламени по заряду, используются детализированные модели горения, требующие сопряжения газодинамической части задачи с задачей прогрева, воспламенения и горения топлива. В упрощенном подходе используется предположение о том, что процессы горения происходят в узкой области, прилегающей к поверхности заряда. С математической точки зрения, такое предположение приводит к постановке условия нормального вдува рабочего тела, параметры которого определяются из термодинамического расчета и условия равновесия.

Внедрение высокотемпературных топлив в РДТТ (с температурой горения  $T > 4500 \text{ K}$ ) для увеличения удельного импульса тяги ставит

под вопрос надежность использования углерод-углеродных композитных материалов в конструкциях сопловых блоков.

В качестве одного из вариантов решения данной проблемы находят применение двухсоставные заряды, состоящие из высокотемпературных и низкотемпературных топлив. Низкотемпературное топливо, расположенное вблизи соплового блока, создает более холодную область из продуктов сгорания — газовую завесу, которая омывает стенку и снижает ее температуру. Надежность работы сопла при этом увеличивается, а разгары проточной части уменьшаются. Недостатком двухсоставных зарядов является частичное снижение удельного импульса тяги. Для оптимизации удельного импульса и других внутрибаллистических характеристик двигателя необходимо точное знание динамики выгорания двухсоставного заряда.

Для решения проблем загрязнения атмосферы диоксинами используются бесхлорные неорганические (аммониевые соли динитрамина, соли нитроформа) или органические (октоген, гексоген) окислители.

**1.1.3. Состав продуктов сгорания.** Металлические добавки в виде высокодисперсного порошка (в основном, алюминия) входят в состав многих типов современных смесевых твердых топлив. Они призваны обеспечить достижение требуемого уровня энергетических характеристик и демпфирование неуправляемых акустических колебаний параметров рабочего тела в камерах сгорания. Следствием введения металла в рецептуру топлива является наличие конденсированной фазы в продуктах сгорания.

**Дисперсность.** Для исследования рабочих процессов в РДТТ важным является образование мелкодисперсных частиц окиси алюминия ( $Al_2O_3$ , частицы высокодисперсного оксида) диаметром  $0,1 \div 20$  мкм, а также относительно крупных частиц металла (Al, частицы-агломераты) диаметром 100 мкм и более. Распределение частиц, образующихся в результате горения топлива, характеризуется бимодальным распределением по размерам (рис. 1.2).

Характеристики конденсированных продуктов сгорания, химический состав, концентрация и дисперсность частиц высокодисперсного оксида и частиц-агломератов зависят от свойств топлива (дисперсность и количество окислителя) и структуры его поверхностного слоя (карманы, межкарманные мостики, каркасный слой), взаимодействия и конкуренции различных механизмов агломерации (карманный, межкарманный и докарманный), а также давления в камере сгорания [7, 8, 194].

Источником образования частиц высокодисперсного оксида служит металл, не участвующий в агломерации, и металл агломератов. Сгорание неагломерирующего металла осуществляется в пределах



Рис. 1.2. Распределение частиц по размерам

поверхностного слоя горящего топлива, а металла агломератов — при движении частиц-агломератов в потоке продуктов сгорания. Различие в источниках появления высокодисперсного оксида является причиной образования частиц, отличающихся по своим размерам.

Для частиц-агломератов механизм образования окислов связан с гетерогенным окислением и последующим накоплением окиси на горячей поверхности исходного металла, а для мелкой — с парофазным механизмом и образованием ядер конденсации на некотором расстоянии от поверхности горячей частицы с их дальнейшим ростом вследствие броуновской коагуляции [7, 8, 194]. Микроскопический анализ конденсированной фазы показывает, что частицы мелкой фракции имеют правильную сферическую форму, но несколько деформированы.

При горении смесового твердого топлива входящие в их состав частицы металлов претерпевают ряд сложных физико-химических превращений, начиная от плавления и агломерации капель на горячей поверхности заряда и заканчивая испарением, горением, дроблением и химическим взаимодействием металла и оксида с образованием газообразных продуктов реакции и их выносом в газовую фазу (рис. 1.3). Между температурой поверхности топлива (1200 К) и его начальной температурой (300 К) находятся две характерные температуры — температура плавления алюминия (933 К) и температура разложения связующего. Физико-химические процессы протекают в течение короткого промежутка времени и накладываются друг на друга, что затрудняет построение полной и универсальной модели явления, позволяющей прогнозировать размеры формирующихся частиц. Время горения частицы пропорционально ее начальному диаметру в степени  $1 \div 2$ .

В канале заряда многосекционных РДТТ с раскрепляющимися манжетами на манжету осаждаются частицы окиси алюминия и образуют на ее поверхности пелену. На краю манжеты происходит диспергирование этой пелены и формирование крупных капель размером до

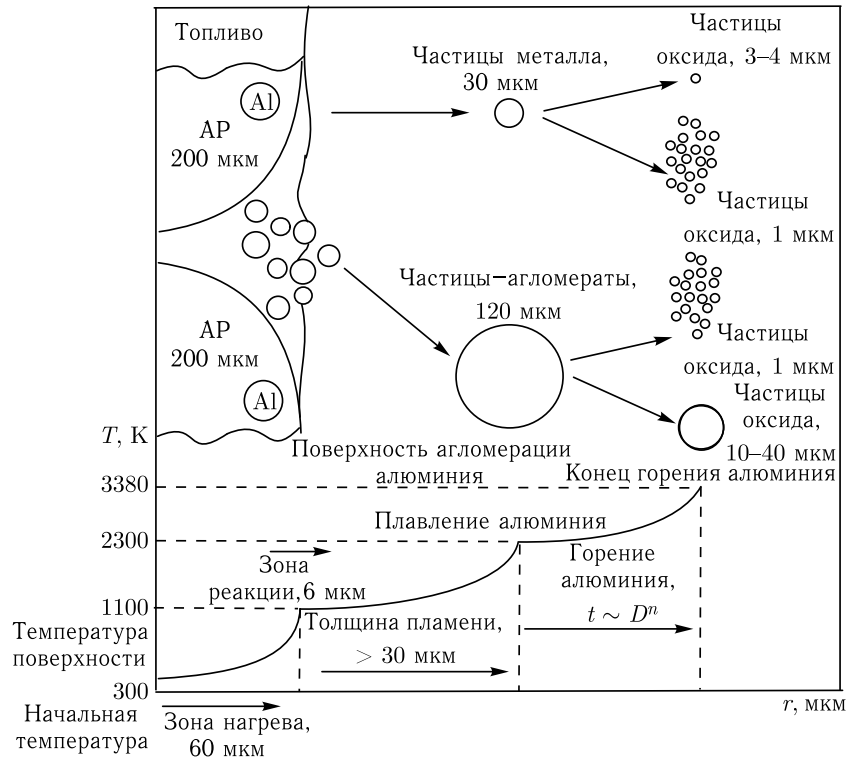


Рис. 1.3. Физико-химические превращения частиц алюминия

1 мм. Попадая в поток, эти капли коагулируют с мелкодисперсными частицами, увеличиваясь в размерах и частично дробясь, увеличивая долю конденсированных продуктов сгорания.

Время сгорания агломератов растет с увеличением их размера. В неблагоприятных условиях (маленькая камера сгорания, низкий окислительный потенциал газообразных продуктов горения) часть недогоревшего металла агломератов выносится потоком в сопло, что ухудшает тяговые характеристики сопла (расходный комплекс, коэффициент тяги, удельный импульс). Двухфазные потери удельного импульса пропорциональны массовой доле конденсированной фазы в продуктах сгорания и диаметру частиц в степени  $1,5 \div 2,0$ .

В частности, измерения размеров частиц в продуктах сгорания топлива в ускорителях системы Space Shuttle показывают, что до 80% массы дисперсной фазы образовано частицами размером около 15 мкм, а 20% — частицами размером порядка 115 мкм.

Распределение частиц окиси алюминия по размерам является ключевым фактором при исследовании стабильности горения твердого топлива. Для заданной частоты колебаний имеется размер частиц, оказывающий наиболее эффективное демпфирующее воздействие на развитие неустойчивости в камере сгорания. Демпфирующее воздействие конденсированной фазы пропорционально количеству мелких частиц, образующихся в результате горения. Частицы-агломераты являются слишком крупными, чтобы оказывать влияние на колебания рабочего тела. Горение агломератов приводит к тому, что источники энергии колебаний оказываются распределенными по объему камеры сгорания, а не локализованными на поверхности горения топлива или вблизи нее.

**Строение агломератов.** Одной из особенностей горения смеси твердого топлива с добавками алюминия является слияние (агломерация) расплавленных частиц металла и его оксида в поверхностном слое горящего топлива в капли, размер которых на порядок превышает размеры исходных частиц металла.

Размер агломератов, покидающих поверхность горения, изменяется в широких пределах. Для смеси твердого топлива на основе бутилкаучуковой связки (плотность  $1780 \text{ кг/м}^3$ , содержание алюминия 18%) при давлении около 4 МПа и температуре продуктов сгорания 3400 К размер агломератов алюминия на поверхности горения изменяется от 65 до 444 мкм. При этом содержание алюминия в частице составляет 0,037 (при 65 мкм), 0,499 (при 167 мкм), 0,253 (при 233 мкм), 0,214 (при 333 мкм) и 0,460 (при 444 мкм).

В зависимости от особенностей внутреннего строения агломераты разделяются на два типа. К первому типу относятся «матричные» агломераты, состоящие из частиц оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) сферической формы, в которые внедрены отдельные частицы алюминия. Агломераты второго типа представляют собой капли алюминия, на поверхности которых в том или ином количестве в виде частицы находится окись алюминия, называемая «нашлепкой» окиси (рис. 1.4). Содержание окиси в составной частице достигает 50% и более. Свойства таких образований близки к равновесным, при которых поверхностная энергия стремится к минимальному значению. Размер оксидных отложений на поверхности частицы металла зависит от состава газовой среды, в которой происходит горение.

На поверхности топлива образуется каркасный слой, состоящий из продуктов разложения связки и расплавленного алюминия, толщиной от 100 до 500 мкм (с понижением давления толщина каркасного слоя увеличивается до 700 мкм). В том случае, когда частицы окислителя существенно крупнее частиц металла, пространство между частицами окислителя заполнено горячим связующим, содержащим частицы металла. При горении такого состава ячейки горячего с вкраплениями

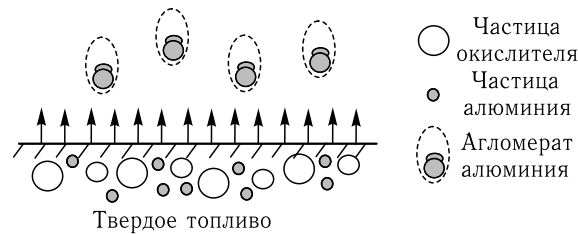


Рис. 1.4. Горение и агломерация частиц алюминия

металла и остатками связки отрываются от поверхности топлива, затем происходит выгорание связки и образование агломерата, размер которого определяется средним расстоянием между частицами окислителя (плотностью упаковки).

Химический анализ шлаков, остающихся в камере сгорания после огневых испытаний, указывает на наличие активного несгоревшего алюминия. Для различных топлив количество несгоревшего алюминия составляет до 1% для крупногабаритных РДТТ и до 10 ÷ 15% для малогабаритных модельных двигателей и твердотопливных газогенераторов.

Появление остатков конденсированных продуктов сгорания в виде шлака у заднего днища вблизи утолщенного сопла ухудшает баллистическую эффективность двигателя и создает дополнительные проблемы по обеспечению работоспособности теплозащитного покрытия у заднего дна.

**Горение частиц.** Разрабатываются специальные математические модели и алгоритмы для моделирования движения и горения составных агломератов в потоке продуктов сгорания твердого топлива [37, 48, 87, 88, 342]. Обзор моделей горения индивидуальной частицы алюминия приводится в работе [115]. В условиях микро- и обычной гравитации наблюдается несимметричное горение частицы алюминия и ее вращение [186]. В общем случае такие модели характеризуются достаточно большой сложностью и в существенной степени зависят от принятой схематизации процесса горения (рис. 1.5).

Температура воспламенения частиц алюминия обычно полагается равной температуре плавления оксида алюминия (2300 К), при которой происходит разрушение оксидной пленки, покрывающей частицу металла. Для наночастиц температура воспламенения меньше и достигает 900 К [366].

Частицы металла горят в диффузионном или кинетическом режиме [342]. В диффузионном режиме скорость горения лимитируется скоростью диффузии окислителя к поверхности частицы. В кинетическом режиме скорость горения зависит от скорости химических реакций.

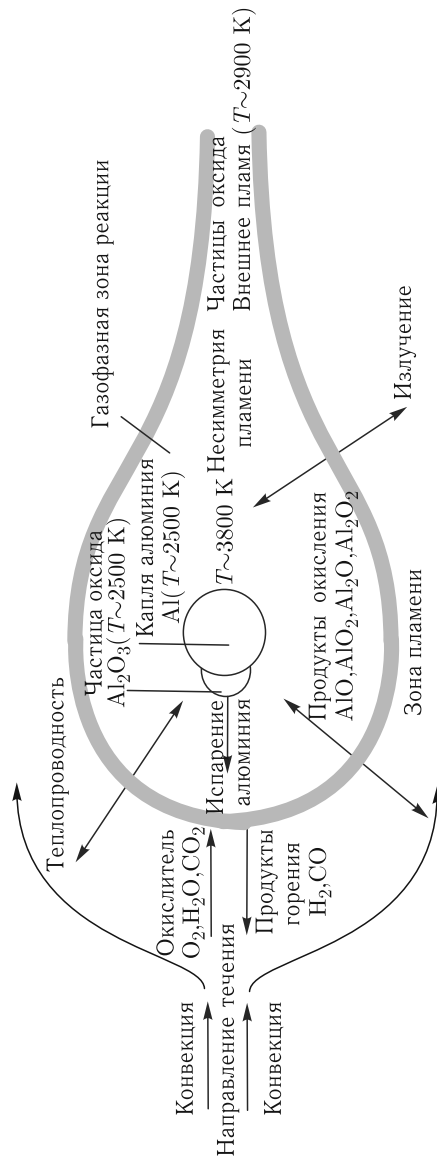


Рис. 1.5. Горение частицы алюминия