

*К 150-летию Научно-учебного комплекса  
«Энергомашиностроение»*

# **Техническая физика и энергомашиностроение**



## **Редакционный совет**

А. А. Александров (председатель), д-р техн. наук  
А. А. Жердев (зам. председателя), д-р техн. наук  
В. Л. Бондаренко, д-р техн. наук  
А. Ю. Вараксин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН  
К. Е. Демихов, д-р техн. наук  
Ю. Г. Драгунов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН  
Н. А. Иващенко, д-р техн. наук  
В. И. Крылов, канд. техн. наук  
М. К. Марахтанов, д-р техн. наук  
С. Е. Семенов, канд. техн. наук  
В. И. Хвесюк, д-р техн. наук  
Д. А. Ягодников, д-р техн. наук

**М. В. Добровольский**

# **Жидкостные ракетные двигатели**

**Основы проектирования**

*Под редакцией Д.А. Ягодникова*

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов  
Российской Федерации  
по университетскому политехническому образованию в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров  
«Ракетные комплексы и космонавтика»,  
специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»  
направления подготовки дипломированных специалистов  
«Двигатели летательных аппаратов»*

**3-е издание, дополненное**



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана  
**2 0 1 6**

УДК 629.7(075.8)  
ББК 39.65  
Д56

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, профессор *А.А. Козлов*;  
д-р техн. наук, профессор *Б.А. Соколов*

**Добровольский, М. В.**

Д56 Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования : учебник для высших учебных заведений / М. В. Добровольский ; под ред. Д.А. Ягодникова — 3-е изд., доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 461, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4145-7

Изложены основы проектирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Даются основные положения теории, методы расчета и описание узлов и агрегатов двигательных установок с ЖРД. Рассмотрены процессы расширения газов в соплах, смесеобразования и теплообмена, а также методы профилирования сопел, расчета форсунок, определения форм и объема камеры сгорания. Приведены системы подачи с турбонасосными агрегатами и вытеснительные системы подачи с газовым, пороховым и жидкостным аккумуляторами давления. Изложены методики и примеры расчетов элементов конструкции и ЖРД в целом.

Третье издание учебника (1-е — 1968 г., 2-е — 2005 г.) дополнено параметрами отечественных и зарубежных ЖРД конца XX в.

Соответствует курсам лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и магистрантов высших технических учебных заведений. Может быть полезен также инженерам и аспирантам, специализирующимся в области ракетной техники.

УДК 629.7(075.8)  
ББК 39.65

ISBN 978-5-7038-4145-7

© Московский государственный  
технический университет  
имени Н. Э. Баумана, 2016  
© Оформление. Издательство МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2016

## Предисловие председателя редакционного совета

---

---

Кафедра «Ракетные двигатели» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана — один из опорных коллективов московской научно-педагогической школы подготовки специалистов с высшим образованием в области ракетных двигателей. Школа сформировалась в Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана в 1940–1950-х годах как творческое содружество с родственными кафедрами Московского авиационного института, научными и промышленными предприятиями и организациями ракетно-космического профиля, работающими в Московском регионе.

Сохраняя и развивая традиции теплотехнической школы МВТУ им. Н.Э. Баумана, московская школа ракетного двигателестроения придерживается системного подхода к ракетному двигателю как тепловой машине. Истоком школы стала кафедра «Двигатели внутреннего сгорания», возглавляемая в те годы крупным ученым с мировым именем, доктором технических наук, профессором А.С. Орлиным. В составе кафедры было организовано подразделение, занимавшееся исследованием ракетных двигателей. Формирование школы проходило в тесной взаимосвязи со школой подготовки инженеров-ракетчиков, возглавляемой крупным ученым, академиком, доктором технических наук, профессором В.И. Феодосьевым.

Основные достижения школы ракетного двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана нашли отражение в издаваемых учебниках. Среди них — написанный основателями школы Г.Б. Синярёвым и М.В. Добровольским, выдержавший два издания и переведенный на несколько иностранных языков учебник для средних специальных учебных заведений «Жидкостные ракетные двигатели», ставший базовым и для многих вузов.

Наиболее полно опыт подготовки инженеров-двигателистов на кафедре «Ракетные двигатели» отражен в выдержавшем четыре издания и отмеченном Государственной премией учебнике «Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей». Редактор и один из авторов учебника — ученый, стоявший у истоков московской школы ракетного двигателестроения, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В.М. Кудрявцев, возглавлявший кафедру более 30 лет, являющийся также основателем ведущей научной школы России «Горение порошкообразных металлов в смесевых конденсированных и дисперсных системах». Среди авторов — основатели кафедры А.П. Васильев, заслуженный деятель науки и техники России, доктор технических наук, профессор В.М. Поляев, сформировавший в России научную школу «Исследования процессов гидромеханики и теплообмена при течении жидкости и газов в структурно сложных средах».

Дальнейшее развитие московской научно-педагогической школы отражено в таких трудах, как «Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов» (в составе авторского коллектива — профессора МГТУ им. Н.Э. Баумана Г.Б. Синярёв и Б.Г. Трусов); «Ракетные двигатели на

твердом топливе» профессора кафедры А.М. Веницкого, а также написанная А.М. Веницким в соавторстве с учеником, выпускником Университета, ныне академиком РАН доктором технических наук, профессором В.Т. Волковым монография «Конструкция и обработка РДТТ». Среди более поздних работ — два издания учебника «Теория регулирования ракетных двигателей».

В XXI веке традиции научно-педагогической школы продолжили профессор Д.А. Ягодников и А.А. Дорофеев, доктор технических наук В.Г. Цегельский, опубликовавшие несколько содержательных учебников, учебных пособий и монографий, среди которых необходимо отметить «Основы теории тепловых ракетных двигателей» (учебник выдержал три издания), «Ядерные ракетные двигатели и энергетические установки», «Воспламенение и горение порошкообразных металлов», «Двухфазные струйные аппараты», «Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе», «Технология производства ракетных двигателей твердого топлива» и третье издание учебника М.В. Добровольского под редакцией Д.А. Ягодникова «Жидкостные ракетные двигатели», выходящее в канун 150-летнего юбилея факультета «Энергомашиностроение» и 70-летия кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана  
доктор технических наук, профессор  
*А.А. Александров*

## Из предисловия к первому изданию

---

Важнейшим элементом ракетно-космических систем являются двигательные установки с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД), которые обеспечили не только полеты с недостижимой ранее скоростью в пределах земной атмосферы, но и возможность полета в космическое пространство.

Несмотря на кажущуюся простоту ЖРД создание таких двигателей потребовало знаний и опыта, соответствующих современному уровню науки и техники, широкого внедрения методов гидродинамики, газовой динамики и теории теплообмена в инженерные расчеты. Современная двигательная установка с ЖРД представляет собой сложную систему, работа узлов и агрегатов которой взаимосвязана. Поэтому проектирование того или иного агрегата нельзя вести изолированно, без учета конструкции и работы остальных элементов установки, что создает определенные трудности и при изложении соответствующего материала.

В настоящем учебнике делается попытка систематического изложения основ проектирования камер двигателя и двигательной установки в целом. По содержанию книгу можно разделить на две части: главы 1–5, в которых излагаются основные вопросы проектирования камер двигателя, и главы 6–9, в которых рассматриваются основные вопросы проектирования двигательной установки в целом.

Предполагается, что студенты, изучающие настоящий курс, знакомы с основами ракетной техники и теорией рабочих процессов в ЖРД. Однако для большего удобства работы над книгой в первой главе кратко изложены основные понятия, которые используются при рассмотрении тех или иных вопросов проектирования ЖРД. Для лучшего понимания рабочих процессов и особенностей расчета элементов ЖРД основные методы расчета иллюстрируются примерами.

Ввиду ограниченного объема книги некоторые вопросы (турбонасосные агрегаты, регулирование и др.), рассматриваемые в специальных учебниках или пособиях, излагаются в сжатой форме. При этом даются только основные положения, необходимые для правильного подхода к проектированию установки в целом. Автор стремился избегать математических выкладок в случаях, когда они не могут быть использованы для непосредственных расчетов тех или иных элементов двигательной установки. При написании учебника автором были систематизированы сведения, опубликованные в периодической печати и книгах, а также использованы ранее опубликованные работы автора.

Автор выражает глубокую благодарность профессорам С. Д. Гришину, Ф. Л. Якайтису и доценту Ю. В. Крылову за ценные замечания и рекомендации, сделанные при рецензировании книги, а также профессору Г. Б. Синяреву за ценные советы, данные при совместном обсуждении книги.

*М. В. Добровольский*

## Предисловие ко второму изданию

---

Тридцать пять лет отделяют нас от момента выхода первого издания учебника М. В. Добровольского «Жидкостные ракетные двигатели». Достигнутые успехи в использовании ракетно-космической техники для лунных экспедиций, долговременных орбитальных станций, многоразовых космических кораблей, стратегических межконтинентальных ракет и высокоточного ракетного оружия стали возможными благодаря постоянному развитию и совершенствованию конструкций и схем жидкостных ракетных двигательных установок, которые осуществляются несколькими поколениями ракетчиков-двигателистов. Преемственность конструкторов и научных сотрудников обеспечивается с конца 40-х годов XX в. подготовкой инженеров по специальности «Ракетные двигатели», в которой активно и плодотворно участвует все большее количество государств.

Среди обширной учебной литературы по ракетным двигателям можно выделить несколько учебников и монографий, которые признаны специалистами классическими. К их числу, несомненно, относится учебник Мстислава Владимировича Добровольского «Жидкостные ракетные двигатели» [1]. Вышедший тиражом 13 тыс. экземпляров, он давно стал библиографической редкостью. Несмотря на появление новых учебников различных авторских коллективов [2, 3], эта книга до сих пор остается одной из самых востребованных у студентов и аспирантов, а также у обучающихся в бакалавриате и магистратуре. Успех учебника М. В. Добровольского объясняется блестящим методическим исполнением, доступной формой представления материала, четкостью определений, наличием примеров схем двигательных установок и расчетов основных элементов конструкции ЖРД, оптимальным применением математического аппарата для расчета характеристик теплофизических, химических, а также термодинамических процессов в ЖРД. Все это делает учебник незаменимым для получения базовых знаний будущими ракетчиками-двигателистами, готовящимися участвовать в разработке ЖРД нового поколения.

При подготовке второго издания была проведена большая работа по переводу физических величин в систему СИ и замене устаревшей терминологии жидкостного ракетного двигателестроения в соответствии с ГОСТ 17655–89 «Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения». Кроме того, некоторые схемы двигательных установок, которые не используются в настоящее время, были заменены, во-первых, на более современные и, во-вторых, на являющиеся наиболее интересными с точки зрения достигнутых тактико-технических показателей и реализованных конструкторских решений. Следует отметить, что желание сохранить структуру и стиль изложения книги М. В. Добровольского наложило определенные ограничения на более широкое представление опубликованного в печати материала по отечественным и зарубежным ракетным двигательным установкам, оставляя это другим изданиям.

Начиная работу над вторым изданием, коллектив кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана считал главной целью удовлетворение потребности в этом учебнике преподавателей, студентов и всех занимающихся разработкой или интересующихся ракетно-космической техникой. Кроме того, выход в свет второго издания является данью памяти одного из основателей учебного процесса по специальности «Ракетные двигатели» — М. В. Добровольского.

В заключение выражаем признательность рецензентам – профессорам А. А. Козлову и Б. А. Соколову – за поддержку второго издания книги, а также помогавшему в подготовке рукописи доценту В. А. Буркальцеву и оформлявшим текстовый материал ко второму изданию Е. А. Устиновой и И. С. Аверькову.

*Д. А. Ягодников*



# Глава 2

## Сопла ЖРД

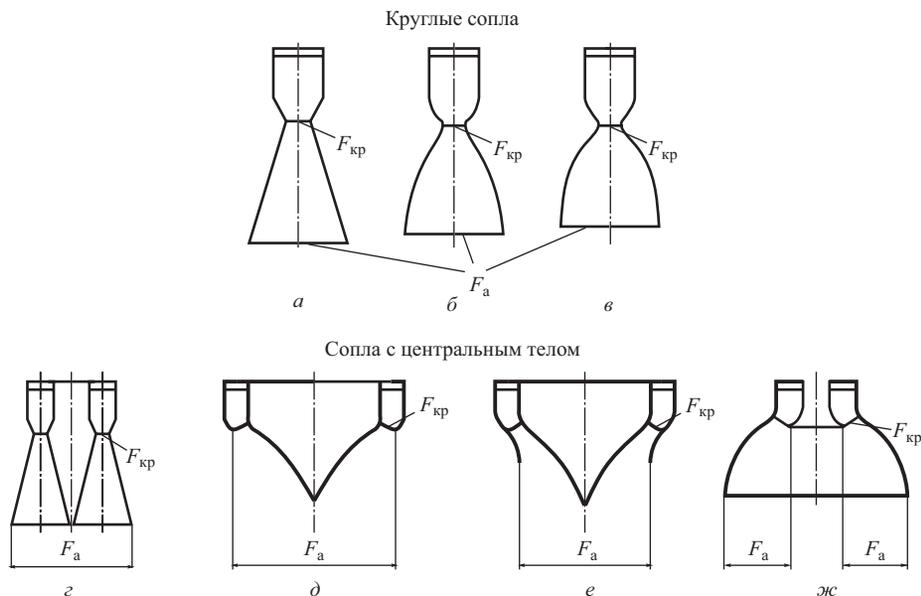
В сопле камеры двигателя происходят расширение и разгон продуктов сгорания, т. е. преобразование тепловой энергии, получаемой в камере сгорания, в кинетическую энергию движения газов. От качества работы сопла, его экономичности и веса зависят качество и вес всей двигательной установки.

### 2.1. Типы сопел и основные требования к ним

В настоящее время применяются (или исследуется возможность применения) следующие основные типы сопел (рис. 2.1): конические, профилированные и сопла с центральным телом.

#### Конические и профилированные сопла

*Конические сопла* имеют закритическую часть в виде конуса с прямой образующей (рис. 2.1, а). Они наиболее просты в изготовлении и широко применялись



**Рис. 2.1.** Типы сопел ЖРД:

а — коническое; б — с угловым входом; в — профилированное; з — кольцевое; д — с полным внешним расширением; е — с частичным внутренним расширением; жс — тарельчатое со свободным внутренним расширением

# Глава 3

## Смесеобразование и смесительная головка камеры ЖРД

---

---

Эффективность работы камеры сгорания ЖРД в значительной мере зависит от качества организации процессов смесеобразования и горения, в свою очередь, существенно зависящих от свойств топлива и конструкции головки камеры двигателя.

### 3.1. Основные стадии процессов смесеобразования и горения топлив

#### Смесеобразование и преобразование топлива

*Смесеобразованием* называется комплекс процессов, протекающих от момента ввода в камеру компонентов топлива до образования однородной смеси. Таким образом, процесс смесеобразования складывается из подачи компонентов в камеру через форсунки, дробления струй на капли, испарения и перемешивания.

Процесс смесеобразования должен обеспечить:

- 1) возможно более полное сгорание компонентов в камере;
- 2) возможно более равномерное распределение соотношения компонентов (т.е.  $K_m$ ) и расходонапряженности  $q_m$  по сечению камеры (см. § 5.1);
- 3) возможно меньшую склонность к возникновению неустойчивого горения;
- 4) образование пристеночного слоя, необходимого для защиты стенок камеры от высоких тепловых потоков, направленных в стенку.

*Преобразованием топлива* в продукты сгорания будем называть суммарный процесс, состоящий из процессов смесеобразования и горения топлива.

Процессы преобразования в зависимости от типа топлива (самовоспламеняющегося или несамовоспламеняющегося) схематично представлены на рис. 3.1.

При *самовоспламеняющемся* топливе (рис. 3.1, а) после распыления компонентов процесс горения протекает в трех направлениях. Часть топлива испаряется до смешения в жидкой фазе. После этого происходят смешение компонентов в газовой фазе и горение их, которое и приводит к образованию продуктов сгорания.

Вторая часть топлива перемешивается в жидкой фазе. При контакте капель горючего и окислителя реакция горения начинается непосредственно в жидкой фазе. В связи с резким повышением температуры при горении часть топлива, недостаточно перемешавшаяся в жидкой фазе, испаряется, не успев вступить в реакцию. Дальнейшее смешение и горение этого топлива происходят уже в газовой фазе.

# Глава 4

## Охлаждение ЖРД

---

---

### 4.1. Теплообмен в ЖРД

Организация охлаждения камер является одной из важнейших задач проектирования ЖРД и по сравнению с другими типами тепловых машин значительно усложняется особенностями процесса теплообмена в ЖРД.

Первая особенность состоит в том, что процесс в камере ЖРД протекает при высоких температурах (3000...4000 К) и давлениях (до 25 МПа и более). Поскольку продукты сгорания движутся по камере двигателя с очень большой скоростью, резко возрастают коэффициент конвективной теплоотдачи от горячих продуктов сгорания к стенкам камеры двигателя и, следовательно, конвективные тепловые потоки  $q_{к2}$ , принимающие в критическом сечении сопла значения до  $(23...150) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Второй особенностью теплообмена в ЖРД является высокий уровень лучистых тепловых потоков. Как известно, излучательная способность газов пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры, поэтому при указанных выше температурах в камере сгорания и сопле ЖРД возникают большие лучистые тепловые потоки  $q_{л}$ , которые для обычных топлив достигают 20...40% общего теплотока, направленного в стенки камеры сгорания. Поскольку при движении газа по соплу его температура уменьшается, относительная доля лучистого теплового потока снижается.

Третья особенность теплообмена в ЖРД состоит в том, что ввиду мощных суммарных конвективных и лучистых тепловых потоков к стенкам камеры температура ее может достигать недопустимо высоких величин. Поэтому для ЖРД следует применять жаропрочные материалы, обладающие возможно большей теплопроводностью, что, однако, выполнить весьма трудно, так как жаропрочные материалы, как правило, имеют сравнительно малую теплопроводность.

Четвертая особенность теплообмена вытекает из условий применения ЖРД как двигательной установки летательного аппарата (ракеты, спутника, самолета). Поэтому использовать для охлаждения двигателя специальную жидкость в большинстве случаев нерационально. Обычно ЖРД охлаждают каким-либо из компонентов топлива, пропуская его до подачи в камеру сгорания ЖРД через полость охлаждения. Такой принцип охлаждения усложняет конструкцию камеры и вызывает дополнительные требования к топливным компонентам, так как количество компонента, пропускаемого через охлаждающий тракт, ограничено его расходом.

Кроме указанных главных особенностей, характерных для ЖРД в целом, на организацию процесса охлаждения влияют также род топлива, тип и назначение двигателя и его конструкция. Так, применение двух низкокипящих

# Глава 5

## Камеры сгорания ЖРД

---

### 5.1. Формы и примеры выполненных камер сгорания ЖРД

Камера сгорания двигателя является главным агрегатом ракетной двигательной установки. В ней, в основном, завершаются процессы смесеобразования и горения топлива.

Известны следующие основные формы камер сгорания ЖРД (рис. 5.1):

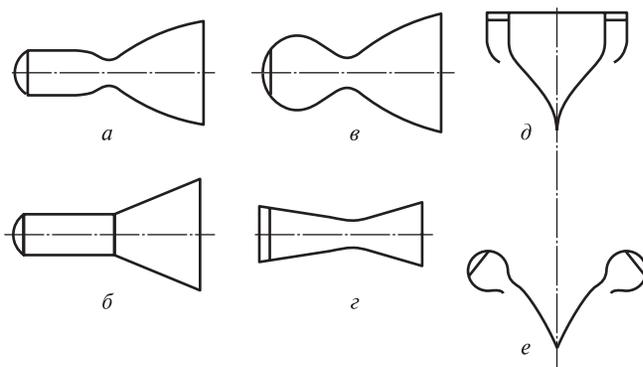
- 1) цилиндрическая;
- 2) шарообразная (или грушевидная);
- 3) коническая;
- 4) кольцевая.

Рассмотрим особенности каждой из этих форм.

#### Цилиндрические камеры сгорания.

##### Средняя и относительная расходонапряженности

В настоящее время наиболее распространены цилиндрические камеры сгорания. Их применяют для камер двигателей всех тяг. Основное преимущество цилиндрических камер — простота изготовления. Простая форма облегчает применение легких скрепленных стенок с частыми связями и трубок. Жидкостные ракетные двигатели с отъемными сопловой частью и головкой обычно имеют цилиндрическую камеру сгорания. Применение цилиндрических камер в многокамерных двигательных установках облегчает компоновку



**Рис. 5.1.** Формы камер сгорания:

*a* — цилиндрическая; *б* — форма полутеплового сопла; *в* — шарообразная; *г* — коническая; *д, е* — кольцевые

# Глава 6

## Двигательные установки

---

В соответствии с ГОСТ 17655–89 жидкостная ракетная двигательная установка состоит из одного или нескольких ЖРД, пневмогидравлической системы подачи топлива и вспомогательных устройств. Жидкостный ракетный двигатель включает в себя камеры, турбонасосные агрегаты, газогенераторы, агрегаты автоматики, устройства для создания управляющих усилий, рамы, трубопроводы и вспомогательные устройства и агрегаты. В свою очередь, камера ЖРД состоит из камеры сгорания и сопла. Систему подачи компонентов топлива можно разделить на три основные части.

1. Агрегат для создания давления подачи компонента.

2. Система агрегатов и трубопроводов, обеспечивающих запуск, останов и работу двигателя. В общем случае такая система будет гидро-, пиро- и пневмоэлектросистемой. В каждом частном случае в системе может отсутствовать пневматическая, электрическая или пиротехническая часть.

3. Баки. (При турбонасосной системе подачи баки на схеме двигательной установки часто не изображают, хотя и они являются составной частью двигательной установки.)

### 6.1. Системы подачи

В зависимости от назначения к ЖРД предъявляют различные требования по тяге, продолжительности и условиям работы. Это приводит к большому разнообразию применяемых способов подачи компонентов и схем двигательной установки в целом. В настоящее время можно привести несколько десятков типов двигательных установок, отличающихся схемой, используемым топливом, способом его подачи, конструкцией основных агрегатов (камеры сгорания, сопла, турбонасосного агрегата) и т. д.

Одним из важных элементов, характеризующих двигательную установку в целом, является система подачи компонентов.

По типу агрегата, создающего давление подачи, различают *турбонасосную* и *вытеснительную* системы подачи.

Наиболее распространенными в ЖРД являются турбонасосные системы, обеспечивающие подачу компонентов топлива в широком диапазоне давлений и расходов. Элементарная схема турбонасосной системы подачи представлена на рис. 6.1. Компоненты из баков 1 поступают к насосам 4 и подаются в камеру сгорания 5. Главным элементом системы подачи является турбонасосный агрегат (ТНА), с помощью которого создается необходимое давление подачи компонентов и обеспечивается заданный расход.

# Глава 7

## Турбонасосные агрегаты

Основным агрегатом системы насосной подачи компонентов является *турбонасосный агрегат* (ТНА). Главными элементами ТНА являются насосы, подающие компоненты с заданным давлением, турбина, служащая для привода насосов, и газогенератор (ЖГГ или ПГГ), в котором получают рабочее тело турбины.

Проектирование ТНА включает проектирование этих элементов, а также вспомогательных устройств (пусковых устройств, патрубков и т. д.), общую их компоновку и определение характеристик совместной работы.

Методика проектирования насосов и турбин ТНА в принципе не отличается от общепринятых методик проектирования центробежных насосов и авиационных турбин, но должна учитывать особенности применяемых компонентов топлива, условий работы и компоновки двигательной установки ЖРД.

Основы теории и проектирования агрегатов и узлов ТНА подробно изложены в работах [2, 34, 35], поэтому рассмотрим только специфические особенности выбора основных параметров при проектировании отдельных агрегатов и ТНА в целом, а также некоторые характеристики ТНА.

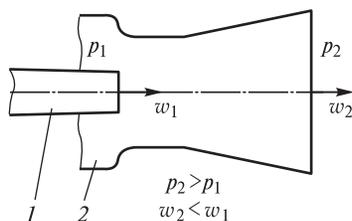
### 7.1. Насосы для подачи компонентов в ЖРД

Насосы подразделяют на следующие принципиально разные типы: объемные, лопастные и струйные.

*Объемные насосы* подают жидкость, вытесняя ее каким-либо другим твердым телом, как, например, насосы плунжерные, поршневые, шестеренчатые и коловратные.

В *лопастных насосах* энергия, необходимая для повышения давления жидкости, сообщается лопатками вращающегося колеса. К числу лопастных относятся центробежные и осевые насосы.

Схема *струйного (инжекторного) насоса* показана на рис. 7.1. Здесь компонент поступает в насадок 2. Из сопла 1 вытекает газ (или жидкость) высокой энергии, который увлекает компонент и прокачивает его через насадок в полость повышенного давления. Повышение давления определяется энергией струи, вытекающей из центрального сопла. Достоинство струйных насосов состоит в их конструктивной простоте и отсутствии вращающихся частей. Однако КПД



**Рис. 7.1.** Схема струйного насоса:

1 — сопло; 2 — насадок

# Глава 8

## Двигательные установки с дожиганием

---

---

Двигательной установкой *с дожиганием* (или *с замкнутой схемой*) называется установка, в которой отработавшее в турбине рабочее тело поступает в камеру сгорания, где происходит его догорание при оптимальном соотношении горючих и окислительных элементов. При этом характерные для двигательных установок *без дожигания* (*открытой схемы*) потери тяги за счет нерационального расхода компонентов для привода турбины отсутствуют и удельный импульс двигательной установки с дожиганием равен удельному импульсу камеры. Поэтому в двигательных установках с дожиганием для создания тяги более полностью используется химическая энергия всего топлива, имеющегося на борту ракеты.

Ранее (см. § 6.3) было показано, что для двигательной установки без дожигания увеличение давления в камере более 10...15 МПа нерационально, так как для необходимого для этого увеличения давления подачи топлива требуется соответствующее увеличение мощности ТНА. При этом расход топлива  $\dot{m}_T$  на привод ТНА возрастает настолько, что прироста удельного импульса двигательной установки за счет увеличения  $p_k/p_a$  не будет (см. формулу (6.5) и рис. 6.8).

Таким образом, применение замкнутой схемы не только повышает удельный импульс двигательной установки по сравнению с  $I_y$  установки открытой схемы, но и дает возможность дальнейшего увеличения  $I_y$  за счет увеличения давления в камере.

В зависимости от состояния, в котором компоненты подаются в камеру сгорания, различают два типа двигательных установок с дожиганием: «газ + жидкость» и «газ + газ». При схеме «газ + жидкость» один из компонентов, окислитель или горючее, полностью поступает в ЖГГ, где и сгорает с частью второго компонента (соответственно при  $\alpha \gg 1$  или  $\alpha \ll 1$ ). Образовавшиеся газообразные продукты сгорания с большим избытком окислительных или горючих элементов поступают на привод турбины ТНА и затем по газоводу — в камеру сгорания. Второй компонент поступает в камеру сгорания в жидком виде. Разновидностью замкнутой схемы типа «газ + жидкость» является показанная на вклейке (рис. 7, 8) схема четырехкамерного двигателя РД-170, работающего на кислороде и керосине, который выполняет функции маршевой двигательной установки, а также обеспечивает управление траекторией ракеты-носителя за счет отклонения камер на угол  $\pm 8^\circ$ . Двигатель РД-170 спроектирован как многоразовый и сертифицирован на десятикратное использование.

При схеме «газ + газ» оба компонента поступают в два ЖГГ (один с  $\alpha \gg 1$ , второй с  $\alpha \ll 1$ ). Из ЖГГ продукты сгорания подаются на привод турбин ТНА и затем поступают в камеру сгорания, где происходит их догорание при заданном соотношении горючего и окислителя.

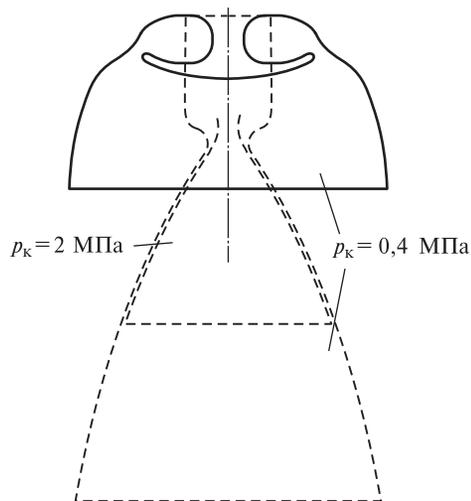
# Глава 9

## Двигательные установки с вытеснительной системой подачи

Вытеснительная система подачи топлива (ВСП) ЖРД является первой используемой основоположниками ракетостроения Р. Годдардом, Ф. А. Цандером, М. К. Тихонравовым, В. П. Глушко и другими для запуска первых ракет, которые перемещались по траектории с помощью ЖРД. Основное достоинство ВСП состоит в том, что она проще турбонасосных по конструкции, не имеет сложных агрегатов, подобных ТНА, и вращающихся элементов; она обеспечивает более простой запуск и останов двигателя, что в некоторых условиях может также являться существенным преимуществом. Однако вытеснительная система имеет существенный недостаток, состоящий в том, что топливные баки находятся под давлением подачи, вследствие чего их масса становится очень большой.

Габаритно-массовый анализ двигательных установок с вытеснительной системой подачи показал, что иногда при работе на больших высотах установки с низким давлением в камере, порядка 0,5 МПа, более рациональны, чем установки с турбонасосной системой подачи. Дело в том, что при работе на большой высоте в связи с ничтожно малым давлением окружающей среды можно и при малом давлении в камере получить степень расширения газа в сопле  $\epsilon = 200-800$ , обеспечивающую достаточно высокий удельный импульс. При этом несколько снизится температура в камере сгорания, а также увеличатся габариты камеры двигателя, так как при уменьшении давления в камере сгорания при той же тяге (или расходе) согласно уравнениям (1.9) и (1.20) площадь  $F_{кр}$  и площадь среза  $F_a$  соответственно увеличатся.

Для сравнения на рис. 9.1 показаны контуры камер двигателей, имеющих одинаковую степень расширения сопла и работающих при давлении в камере 0,4 и 2 МПа соответственно, откуда видно, что при понижении давления существенно увеличиваются габаритные размеры камеры. Тем не менее в связи



**Рис. 9.1.** Сравнение контуров камер двигателей, имеющих одинаковые тяги и степени расширения при различных давлениях в камере

## Список литературы

---

---

1. *Добровольский М. В.* Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. — М.: Машиностроение, 1968.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др.; Под ред. В. М. Кудрявцева. — М.: Высш. шк., 1993.
3. *Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П.* Теория ракетных двигателей / Под ред. В. П. Глушко. — М.: Машиностроение, 1989.
4. *Уманский С. П.* Ракеты-носители и космодромы. — М.: Рестарт+, 2001.
5. *Паушкин Я. М.* Химия реактивных топлив. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
6. *Кацкова О. Н., Шмыглевский Ю. Д.* Таблицы параметров осесимметричного сверхзвукового течения свободно расширяющегося газа с плоской переходной поверхностью. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
7. *Rao G. V. R.* Exhaust nozzle contour for optimum thrust // *Jet Propulsion*. — 1958. — V. 28. — № 6. — P. 377–382.
8. *Колт С., Бедел Д.* Характеристики конического ракетного сопла при течиении с отрывом от стенки // ВРТ. — 1966. — № 3. — С. 55–61.
9. *Пирумов У. Г., Рубцов В. А.* Расчет осесимметричных сверхзвуковых кольцевых сопел // Тр. Моск. ин-та механики. — 1961. — № 6. — С. 11–18.
10. Авиационные, ракетные, морские и промышленные двигатели. 1944–2000: Справ. — М.: АКС-Конверсалт, 2000.
11. *Клячко Л. А.* К теории центробежной форсунки // Теплоэнергетика. — 1962. — № 3. — С. 34–37.
12. *Махин В. А., Присняков В. Ф., Токарев И. Ф.* Теория истечения кипящей жидкости через центробежную форсунку // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1962. — № 3. — С. 166–167.
13. *Махин В. А.* Экспериментальное исследование истечения кипящей жидкости через центробежную форсунку // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1962. — № 4. — С. 139–144.
14. *Иевлев В. М.* Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. — М.: Машиностроение, 1975.
15. *Авдеевский В. С., Галицейский Б. М., Глебов Г. А.* Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. — М.: Машиностроение, 1992.
16. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. — М.: Наука, 1982.
17. Ракетные двигатели/ М. Баррер, А. Жомотт, Б. Ф. Весте, Ж. Ванденкеркове. — М.: Оборонгиз, 1962.
18. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977.
19. *Зарубин В. С.* Температурные поля в конструкции летательных аппаратов. Методы расчета. — М.: Машиностроение, 1978.
20. Исследование ракетных двигателей на жидком топливе: Сб. пер./ Под ред. В. И. Ильинского. — М.: Мир, 1964.

21. *Затонский А. В., Орлин С. А., Пелевин Ф. В.* Расчет теплового состояния камеры ЖРД с использованием ЭВМ: Учеб. пособие / Под ред. В. М. Поляева. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999.
22. *Полянский А. Р.* Расчет охлаждения ЖРД с использованием электронных таблиц. Методические указания по тепловым расчетам. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
23. *Хендрикс Н., Грехэм Д., Сю Л., Мидейрос Р.* Соотношения для коэффициента теплоотдачи к водороду при кипении и при сверхкритическом давлении // Ракетная техника. — 1962. — № 2. — С. 77–78.
24. Неустойчивость горения в ЖРД / Под ред. Д. Т. Харрье, Ф. Г. Рирдона. — М.: Мир, 1975.
25. *Натанзон М. С.* Продольные автоколебания жидкостной ракеты. — М.: Машиностроение, 1977.
26. *Крокко Л., Чжен Синь-И.* Теория неустойчивости горения в ЖРД. — М.: ИЛ, 1958.
27. *Раушенбах Б. В.* Вибрационное горение. — М.: Физматгиз, 1961.
28. *Гуров А. Ф.* Расчеты на прочность и колебания в ракетных двигателях. — М.: Машиностроение, 1966.
29. *Гахун Г. Г., Баулин В. И., Володин В. А.* Конструкция и проектирование ЖРД. — М.: Машиностроение, 1989.
30. *Поляев В. М., Багров В. В., Курпатенков А. В.* Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов. — М.: Изд-во УНПЦ «Энергомаш», 1997.
31. *Идельчик И. Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — М.: Машиностроение, 1992.
32. *Волков Е. Б., Сырицын Т. А., Мазинг Г. Ю.* Статика и динамика ракетных двигательных установок. В 2-х т. — М.: Машиностроение, 1978.
33. *Гликман Б. Ф.* Автоматическое регулирование ЖРД. Т. 1. — М.: Машиностроение, 1974.
34. Газовые турбины авиационных двигателей / Г. С. Жирицкий, В. И. Локкай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. — М.: Машиностроение, 1971.
35. *Овсянников Б. В., Боровский Б. И.* Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. — М.: Машиностроение, 1986.
36. *Трофимов В. Ф.* Осуществление мечты. — М.: Машиностроение, 2001.
37. *Липанов А. М., Алиев А. В.* Проектирование РДТТ. — М.: Высш. шк., 1995.
38. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
39. Многоразовый орбитальный корабль «Буран» / Под ред. Ю. П. Семенова. — М.: Машиностроение, 1995.
40. *Первов М. А.* Ракетное оружие РВСН. — М.: Виоланта, 1999.

## Информация по ракетным двигателям в сети Интернет

---

1. Федеральное космическое агентство России. — <http://www.federspace.ru>
2. Новости космонавтики. — <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru>
3. Международная федерация космонавтики. — <http://www.iafastro.com>
4. Многоразовый транспортно-космический комплекс «Энергия–Буран». — <http://www.buran.ru>
5. НПО «Энергомаш» им. акад. В. П. Глушко. — <http://www.npoenergomash.ru>
6. РКК «Энергия» им. акад. С. П. Королева. — <http://www.energia.ru>
7. Российская космическая научная сеть Интернет. — <http://www.rssi.ru/cp1251/rssi.htm>
8. ГКНЦ им. М.В. Хруничева. — <http://www.khrunichev.ru>
9. Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры Космического агентства России. — <http://www.tsenki.com>
10. Библиотека конгресса США. — <http://www.loc.gov>
11. Европейское космическое агентство. — <http://www.esa.int/esacp/index.html>
12. Европейские новости космонавтики. — <http://www.euronews.net>
13. Лаборатория реактивного движения NASA. — <http://www.jpl.nasa.gov>
14. Научно-технологическая корпорация Китая. — <http://www.spacechina.com/espace>
15. Центр аэронавтики и космонавтики Германии. — <http://www.dlr.de/dlr-homepage>
16. Жидкостные ракетные двигатели. — <http://www.lpre.de>

## Предметный указатель

---

### А

- Аккумулятор давления 255,399
- Арматура 272
- Ампульная установка 447

### Б

#### Баки 266

- , заборные устройства 267, 269
- , внутреннее устройство 267
- , воздушная (газовая) подушка 270
- нагруженные 266
- , наддув 261
- несущие 266
- , объем 270
- разгруженные 266
- , расположение 266
- , системы наддува 261
- , система опорожнения 297
- , форма 267
- тороидальные 267
- цилиндрические 267
- чечевицеобразные 267
- шаровые 267
- Безгазогенераторная схема 388
- Бронированные заряды 435

### В

#### Время

- индукции воспламенения 79
- пребывания 78
- – условное 78, 229
- преобразования 78

#### Вытеснительная система подачи

- газобаллонная (см. газобаллонная подача) 254, 398
- – – с жидкостным аккумулятором давления (ЖАД) 399, 442
- – – с пороховым аккумулятором давления (ПАД) 399, 434
- Вязкость продуктов сгорания 150

### Г

- Газобаллонная подача с подогревом газа 405

#### Газогенераторы 358

- , ЖГГ 363
- , ПГГ (см. парогазогенератор) 360

#### Гидравлические потери в арматуре 287, 291

- – – в охлаждающем тракте 287
- – – в трубопроводах 291
- – местные 291
- – из-за трения 291

#### Гидропиропневмоэлектросистема 254

#### Головка камеры 106

- , влияние на удельный импульс 112, 127
- – плоская 106
- –, пропускная способность 80
- –, размещение форсунок 110
- – сферическая 108
- – шатровая 109

#### Горение 77

- неустойчивое (см. неустойчивое горение) 231
- Горючее 14

### Д

#### Давление замыкания схемы 373

- на входе в насос 314
- наддува баков 261
- насыщенных паров 323
- подачи 287

#### Двигательная установка 254

- – без дожигания 255, 301
- –, запуск и останов 237, 259
- – многокамерная 302
- –, наддув баков 261
- –, основные элементы 254
- –, размещение ТНА 351, 353
- – с вытеснительной подачей (см. вытеснительная система подачи) 254
- – с дожиганием (см. двигательная установка с замкнутой схемой) 371
- – – –, потребная мощность ТНА 373

- , предельное давление в камере 376
- , схема без ЖГГ 388
- , – «газ + газ» 393
- , – «газ + жидкость» 372
- , типы замкнутых схем 371
- с предварительной заправкой 446
- с турбонасосной подачей 301
- , тяга и удельный импульс 263

**Ж****Жидкостный ракетный двигатель**

10

- , классификация 11
- , области применения 12
- , определение 10
- , основные параметры 15
- , топливо (см. топлива ЖРД) 12, 15
- , тяга 16
- , удельный импульс 16
- , характеристики (см. характеристики ЖРД) 21
- , утолщенный 446

**З**

Заборные устройства 267

Зажигание (воспламенение) 238

Замкнутая схема (см. двигательная установка с дожиганием) 371

**Запуск двигателя** 237

- , жесткость 239
- , пик (заброс) давления 239
- плавный 238
- пушечный 238
- ступенчатый 238

**И**

Импульс последействия 243

Испарение топлива 73

**К**

Кавитация в насосах 322

Кавитационный запас 323

Кавитационные характеристики 324

Камера двигателя 10

**Камера сгорания** 222

- изобарическая 223
- кольцевая 222, 228
- коническая 222, 228
- , объем 229
- , распределение компонентов по сечению 115
- , расходонапряженность 223
- , – относительная 223
- , расчеты на прочность 248
- скоростная 224
- трубчатая 225
- цилиндрическая 222
- шарообразная 222

Карданная подвеска 299

Клапаны 272

**Комплекс  $\beta$** 

- , действительное значение 17
- , теоретическое значение 23
- Конвективный теплообмен (см. теплообмен в ЖРД) 143

**Коэффициент** быстроходности 316

- избытка окислителя 13
- камеры 23
- линейного расширения 142
- оребрения 197
- геометрический 200
- полноты давления 23
- потерь 24
- на входе 24, 35
- из-за рассеяния 24, 30
- из-за трения 24, 32
- на тепловое сопротивление 23
- расхода струйной форсунки 81
- центробежной форсунки 93
- сопла 24
- стеснения (загромождения) 320
- теплоотдачи 173
- тяги 17
- в пустоте 18
- удельного импульса камеры 22

**Коэффициенты импульсные** 22

- энергетические 22

**КПД насоса** 315

– турбины 340

Кривая преобразования (выгорания)

77

Критический коэффициент кавитации 324

- Л**  
 Лучистый (радиационный) теплообмен 180
- М**  
 Масса удельная ДУ 251  
 Мембраны 274  
**Мощность насоса** 315  
 – турбины 338  
 – потребная 316, 338  
 – располагаемая 338
- Н**  
**Насосы** 312  
 –, давление на входе 314  
 –, кавитация (см. кавитация в насосах) 322  
 –, колесо центробежное 313  
 –, коэффициент быстроходности 316  
 –, КПД 315  
 –, мощность 315  
 –, напор 321  
 – объемные 312  
 –, объемный расход 314  
 – осевые 313  
 –, порядок расчета 325  
 –, примеры 355  
 –, совместная работа с турбиной 346  
 – струйные 312  
 –, характеристики 329  
 – центробежные 313  
 – шнековые 313  
 Недорасширение 54  
 Неустойчивое горение 231  
**Неустойчивость** высокочастотная 234  
 – низкочастотная 232
- О**  
**Объем** аккумулятора давления 401, 403  
 – баков 270  
 – камеры сгорания 229  
 – ПГГ 363  
 Окислитель 14  
 Оребренные охлаждающие тракты 197  
 Останов двигателя 243  
 Отрыв потока от стенок сопла 50  
 Охлаждающие тракты 190  
**Охлаждение двигателя** (см. теплообмен в ЖРД) 134  
 – абляционное 141  
 – внутреннее 136  
 – водородом 315  
 – наружное 134  
 –, особенности 128  
 –, порядок расчета 168, 176, 206  
 – радиационное 140, 211  
 – смешанное 129  
 –, способы 134  
 – транспирационное 137, 139
- П**  
 Парогазогенератор 358, 360  
 Перерасширение 54  
 Пересчет тепловых потоков 178, 450  
 Период индукции воспламенения 76  
 Полутепловое сопло 222, 224  
 Пороховой аккумулятор давления 255, 350, 399  
**Потери** в камере 23  
 – в клапанах 291  
 – в сопле 24, 29  
 – в турбине 340  
 – на тепловое сопротивление 24  
 – удельного импульса 22  
 Приведенная (характеристическая) длина 230  
 Пристеночный слой 174  
 Прочностные расчеты 248
- Р**  
 Равновесная температура стенки 211  
 Распыление 70  
 Расходный комплекс 17  
**Редукторы** обратного хода 411  
 –, прямого хода 411, 414, 412  
 –, расчет 428, 431  
 –, характеристики 415  
 Регулирование 277
- С**  
**Системы** заправки и слива 277  
 – запуска и останова 259  
 – наддува 261  
 – обеспечения режима работы 296  
 – опорожнения баков 297  
 – подачи 312  
 – смесеобразования 106  
 – управления и регулирования 293

**Сопло 38**

- идеальное 38
  - исходное 38
  - кольцевое 28
  - коническое 27,37
  - круглое 28
  - оптимальное 42
  - профилированное 28
  - саморегулирующееся 55
  - с угловым входом 28
  - с центральным телом 28
  - , охлаждение 66, 220
  - , преимущества и недостатки 66
  - , расчет 58, 62
  - укороченное 61
  - , характеристики 38, 41
  - тарельчатое 28, 57
  - укороченное 41
  - штыревое 28, 53
- Стартер 350
- Степень** парциальности 337
- расширения сопла геометрическая 19
  - газа в сопле 19

**Т**

Тарельчатое сопло 28, 57

Твердое топливо 435

**Теплообмен** в ЖРД 128

- конвективный 143
- радиационный 180

Теплопроводность 197

**Топлива** ЖРД 15

- , горючие 12, 14
- , окислители 12, 14
- , основные свойства 15

Трубопроводы 285

**Турбины** 333

- активные 335
- , выбор противодействия 339
- , выбор числа оборотов 351
- , газогенераторы 358
- , классификация 333
- , компоновка 351
- , КПД 340
- многоступенчатые 336
- , мощность 338
- , – на 1 Н тяги 338
- одноступенчатые 336
- парциальные 337

- , потребная мощность 338
- , примеры 353, 354
- , работа располагаемая 334
- радиальные 335
- , раскрутка 348
- реактивные 335
- , совместная работа с насосами 346
- , степень реактивности 335
- , – расширения газа 339
- , характеристики 344

Турбонасосная система подачи 254

**Тяга** 16

- в пустоте 16
- двигательной установки 263
- двигателя 263
- литровая 229

**У**

Удельный импульс 16

Условное время пребывания 229

**Ф****Форсунки** 79

- геометрическая, характеристика 92
  - двухкомпонентные 102
  - , коэффициент расхода 81, 93
  - , размещение 110
  - с пересекающимися струями 84
  - струйные 79
  - центробежные 80
- Фронт пламени эффективный 165, 166

**Х**

Характеристика отрыва потока 50

**Характеристики**

- гидравлические насосов 329
- ЖРД
- редукторов 415
- сопел с центральным телом 54
- турбин 344
- – высотная 20
- – дроссельная 20

Характеристическая длина (см. приведенная длина) 230

**Ц**

Центробежные насосы (см. насосы)

313

- Центробежные форсунки 86  
-- , геометрическая характеристика 92  
-- двухкомпонентные 102  
-- , классификация 87  
-- , расчет 99  
-- тангенциальные 87  
-- шнековые 87  
-- эмульсионные 102
- Э  
Эквивалентный (гидравлический)  
диаметр 288  
Эффективная скорость 16  
-- температура 149  
Эффективный фронт пламени 185,  
186

# Оглавление

---

---

<b>Предисловие председателя редакционного совета</b> .....	5
<b>Из предисловия к первому изданию</b> .....	7
<b>Предисловие ко второму изданию</b> .....	8
<b>Глава 1. Общие сведения о ЖРД</b> .....	10
1.1. Классификация ЖРД. Топлива .....	10
1.2. Основные параметры ЖРД .....	15
1.3. Системы коэффициентов потерь удельного импульса. Расход топлива и основные размеры сопла .....	22
<b>Глава 2. Сопла ЖРД</b> .....	27
2.1. Типы сопел и основные требования к ним .....	27
2.2. Потери удельного импульса в сопле ЖРД .....	29
2.3. Проектирование конических сопел .....	37
2.4. Основные исходные положения при построении профилированного сопла .....	38
2.5. Укороченные и оптимальные сопла .....	41
2.6. Приближенный метод построения контура оптимального сопла .....	45
2.7. Работа сопла на нерасчетных режимах при больших противодав- лениях .....	49
2.8. Работа и характеристики сопел с центральным телом .....	52
2.9. Расчет сопел с центральным телом .....	58
<b>Глава 3. Смесеобразование и смесительная головка камеры ЖРД</b> .....	68
3.1. Основные стадии процессов смесеобразования и горения топлив .....	68
3.2. Струйные форсунки .....	79
3.3. Центробежные форсунки .....	86
3.4. Двухкомпонентные форсунки .....	102
3.5. Головки камер ЖРД .....	106
3.6. Влияние конструкции головки на смесеобразование и удельный импульс .....	112
<b>Глава 4. Охлаждение ЖРД</b> .....	128
4.1. Теплообмен в ЖРД .....	128
4.2. Способы охлаждения ЖРД .....	134
4.3. Процесс конвективной теплоотдачи от газа к стенке .....	143
4.4. Интегральные соотношения энергии и импульсов для пограничного слоя .....	150
4.5. Решение интегрального соотношения энергии .....	162
4.6. Расчет конвективного теплообмена в ЖРД .....	168
4.7. Пересчет конвективных тепловых потоков .....	178
4.8. Определение лучистых тепловых потоков .....	180
4.9. Определение теплоотдачи от стенки к охлаждающей жидкости .....	187
4.10. Формы охлаждающих трактов камер ЖРД .....	190
4.11. Расчет теплоотдачи в обретенном охлаждающем тракте .....	197
4.12. Расчет охлаждения ЖРД .....	206
4.13. Некоторые специальные случаи охлаждения ЖРД .....	211
<b>Глава 5. Камеры сгорания ЖРД</b> .....	222
5.1. Формы и примеры выполненных камер сгорания ЖРД .....	222
5.2. Определение объема камеры сгорания .....	229

5.3. Неустойчивое горение .....	231
5.4. Запуск и останов двигателя .....	237
5.5. Импульс последействия .....	243
5.6. Расчет камеры двигателя на прочность .....	248
5.7. Дополнительные замечания .....	251
<b>Глава 6. Двигательные установки .....</b>	<b>254</b>
6.1. Системы подачи .....	254
6.2. Двигательные установки с турбонасосной системой подачи .....	256
6.3. Тяга и удельный импульс двигательной установки .....	263
6.4. Топливные баки .....	266
6.5. Арматура системы подачи .....	272
6.6. Определение давления подачи и гидравлических характеристик системы подачи .....	287
6.7. Системы управления и регулирования ЖРД .....	293
6.8. Примеры выполненных двигателей без дожигания с турбонасосной подачей .....	301
<b>Глава 7. Турбонасосные агрегаты .....</b>	<b>312</b>
7.1. Насосы для подачи компонентов в ЖРД .....	312
7.2. Расчет и характеристики насосов ЖРД .....	325
7.3. Турбины ТНА .....	333
7.4. Совместная работа турбины и насосов .....	346
7.5. Газогенераторы .....	358
<b>Глава 8. Двигательные установки с дожиганием .....</b>	<b>370</b>
8.1. Замкнутая схема «газ + жидкость» .....	371
8.2. Двигатель с дожиганием без ЖГГ .....	387
8.3. Схема «газ + газ» .....	392
8.4. Основные параметры ЖРД с дожиганием .....	396
<b>Глава 9. Двигательные установки с вытеснительной системой подачи .....</b>	<b>397</b>
9.1. Газобаллонная система подачи .....	398
9.2. Примеры двигательных установок с газобаллонной подачей .....	405
9.3. Редукторы давления газа .....	409
9.4. Характеристики редукторов .....	414
9.5. Расчет редуктора .....	427
9.6. Вытеснительные системы подач с пороховым и жидкостным аккумуляторами давления .....	433
9.7. Двигательные установки с предварительной заправкой .....	445
<b>Список литературы .....</b>	<b>447</b>
<b>Информация по ракетным двигателям в сети Интернет .....</b>	<b>449</b>
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>450</b>
<b>Приложение .....</b>	<b>455</b>

*Учебное издание*

**Добровольский Мстислав Владимирович**

## **ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

### **Основы проектирования**

Редактор *Н. И. Воронина*  
Технический редактор *Э. А. Кулакова*  
Художник *А. С. Ключева*  
Корректор *Э. Я. Ахадова*  
Компьютерная графика *Т. Ю. Кутузовой*  
Компьютерная верстка *М. А. Гольдман*

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 01.09.2015. Формат 70×100 1/16.  
Усл. печ. л. 37,7 + 0,65 цв. вкл. Тираж 500 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru) [www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1  
[baumanprint@gmail.com](mailto:baumanprint@gmail.com)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана**  
вышло в свет учебное пособие  
В. Н. Охитина, С. С. Меньшакова  
**«Фугасное действие боеприпасов»**



Раскрыты основные понятия и определения, классификация и постановка задач теории действия взрыва. Приведены решения внутренней задачи, в качестве которой рассмотрена одномерная детонация заряда взрывчатых веществ различной плотности, а также некоторые аналитические решения внешней задачи названной теории. Кроме того, даны решения граничной задачи теории действия взрыва в частной постановке при контактном и близком неконтактном взрыве и оценка фугасного действия на элементы конструкций.

Для студентов, обучающихся по специальности «Боеприпасы и взрыватели».

**Год издания:** 2015

**Тип издания:** Учебное пособие

**Объем:** 120 стр. / 7,5 п.л.

**Формат:** 60x90/16

**ISBN:** 978-5-7038-3969-0

---

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана

**[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)**

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана**  
вышло в свет 2-е издание учебника  
В.В. Селиванова, И.Ф. Кобылкина, С.А. Новикова  
**«Взрывные технологии»**



**Год издания:** 2014  
**Тип издания:** Учебник  
**Объем:** 520 стр. / 42 п.л.  
**Формат:** 70x100/16  
**ISBN:** 978-5-7038-3992-8

Описаны практически все известные взрывные технологии, имеющие промышленное значение: упрочнение, сварка, штамповка, прессование с помощью энергии взрыва и динамический синтез сверхтвердых материалов, а также рассмотрены технологии разделения на фрагменты стальных конструкций с помощью как удлиненных кумулятивных зарядов, так и ударных волн. Изложены основные представления об экологически безопасных взрывных методах разборки и уничтожения боеприпасов. Рассмотрены способы защиты от действия взрыва, а также приведены простые инженерные методики расчета конструктивных характеристик взрывных устройств, реализующих соответствующие взрывные технологии, и расчета взрывных камер на прочность. В последней части учебника рассказывается о применении мирных ядерных взрывов с целью решения научных и промышленных задач.

Учебник написан на основе материалов лекций по учебным дисциплинам, объединенным под общим названием «Взрывные технологии», которые авторы в течение многих лет читают студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана и Саровского государственного физико-технического института.

Для студентов технических университетов и машиностроительных вузов. Может быть полезен аспирантам втузов и инженерно-техническим работникам, занимающимся разработкой и применением взрывных технологий.

---

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:  
телефон: 8 499 263-60-45;  
факс: 8 499 261-45-97  
e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
А. Ф. Третьякова, Л. В. Тарасенко  
«Материаловедение и технология  
обработки материалов»**



**Год издания:** 2014  
**Тип издания:** Учебное  
пособие  
**Объем:** 544 стр. / 34 п.л.  
**Формат:** 60x90/16  
**ISBN:** 978-5-7038-3889-1

Изложены физико-механические основы материаловедения, закономерности формирования строения материалов в процессе кристаллизации, пластической деформации, термической обработки. Особое внимание уделено фазовым превращениям в твердом состоянии, механизмам упрочнения. Приведены технологические способы управления строением и свойствами сплавов, основные свойства конструкционных и инструментальных материалов.

Рассмотрены процессы, протекающие при изготовлении изделий в парогазовой, жидкой, твердо-жидкой и твердой фазах. Даны рекомендации по обеспечению технологичности заготовок и деталей машин при их проектировании. Уделено внимание основам технологий получения заготовок сваркой и механической обработкой резанием. Приведены примеры конструирования и изготовления деталей с учетом механических и технологических свойств используемых сплавов и типа производства.

Для студентов технических университетов, обучающихся по машиностроительным направлениям, а также для преподавателей и инженеров.

---

Информацию о других новых книгах можно получить  
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:  
телефон: 8 499 263-60-45;  
факс: 8 499 261-45-97  
e-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)