

УДК 621.454.2;629.76;629.78(075.8)  
ББК 27.5.4  
Т38

*Рецензенты:* кафедра производства летательных аппаратов  
«МАТИ» – Российского государственного технологического университе-  
тата им. К.Э. Циолковского; академик РАН, проф. *Б.И. Каторгин*

**Технология** производства жидкостных ракетных двигателей:  
Учебник / В.А. Моисеев, В.А. Тарасов, В.А. Колмыков;  
А.С. Филимонов; Под ред. В.А. Моисеева и В.А. Тарасова. –  
М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 381 с.: ил. (Тех-  
нологии ракетно-космического машиностроения).

ISBN 978-5-7038-3166-3

Приведена конструктивно-технологическая характеристика  
элементов конструкции жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).  
Описаны физико-технологические основы критических техноло-  
гий, определивших успех создания современных ЖРД. Изложен  
опыт изготовления камер сгорания различных конструкций, форсу-  
ночных головок, турбонасосных агрегатов и газогенераторов.  
Представлены уникальные технологические решения общей сборки  
и производственных испытаний ЖРД.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, которые авто-  
ры читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Ракетные  
двигатели», а также аспирантов и специалистов, работающих в област-  
ти производства ЖРД.

УДК 621.454.2;629.76;629.78(075.8)  
ББК 27.5.4

ISBN 978-5-7038-3166-3

© Моисеев В.А., Тарасов В.А.,  
Колмыков В.А., Филимонов А.С., 2008  
© Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	7
<b>ЧАСТЬ I. Критические технологии производства жидкостных ракетных двигателей</b>	
1. Общая конструктивно-технологическая характеристика современных жидкостных ракетных двигателей .....	10
1.1. Историческая справка .....	10
1.2. Классификация и конструктивные схемы жидкостных ракетных двигателей .....	11
1.3. Конструктивно-технологическая характеристика камер сгорания жидкостных ракетных двигателей .....	20
1.3.1. Общая характеристика конструкций камер сгорания ЖРД .....	20
1.3.2. Материалы, применяемые при изготовлении КС .....	25
1.3.3. Общие технические требования к КС .....	32
1.4. Конструктивно-технологическая характеристика турбонасосного агрегата .....	34
1.5. Конструктивно-технологическая характеристика газогенераторов жидкостных ракетных двигателей .....	37
2. Критические технологии заготовительного производства .....	40
2.1. Технологии обработки давлением .....	40
2.1.1. Ротационная вытяжка .....	40
2.1.2. Технология гибки трубопроводов .....	54
2.1.3. Технология обработки импульсным магнитным полем ....	62
2.2. Технологии литейного производства .....	77
2.2.1. Общая характеристика методов литья в производстве ЖРД .....	77
2.2.2. Получение точных и вакуумно-плотных заготовок из высокопрочных материалов методом направленного затвердевания .....	85
2.2.3. Непрерывное литье алюминиевых сплавов в электромагнитные кристаллизаторы .....	87
2.2.4. Литье с применением ультразвуковой обработки расплава .....	99
2.2.5. Литейные композиционные материалы .....	107
3. Физико-химические методы обработки материалов .....	110
3.1. Электроэррозионная обработка .....	110
3.2. Электрохимическая обработка .....	121
3.3. Ультразвуковая размерная обработка .....	130
3.4. Лазерная обработка материалов .....	135
3.5. Электронно-лучевая обработка материалов .....	144
3.6. Плазменная обработка .....	148

3.6.1. Плазменная резка .....	149
3.6.2. Плазменное точение .....	150
3.6.3. Плазменно-механическая обработка .....	151
3.6.4. Плазменная сварка .....	152
3.6.5. Плазменная наплавка .....	153
3.6.6. Плазменное напыление покрытий .....	154
4. Технология пайки в производстве ЖРД .....	162
4.1. Общая характеристика паяных соединений .....	162
4.2. Способы пайки .....	170
4.2.1. Пайка паяльником .....	170
4.2.2. Пайка нагретым газом .....	171
4.2.3. Пайка в печи .....	171
4.2.4. Газопламенная пайка .....	174
4.2.5. Плазменная пайка .....	176
4.2.6. Индукционная пайка .....	176
4.3. Общая характеристика технологии пайки .....	178

## **ЧАСТЬ II. Технология изготовления и испытания агрегатов жидкостных ракетных двигателей**

5. Технология изготовления камер сгорания различной конструкции .....	182
5.1. Технология изготовления форсуночных головок .....	182
5.1.1. Особенности конструкции и технологии изготовления форсуночных головок .....	182
5.1.2. Особенности конструкции и технологии изготовления форсунок .....	186
5.1.3. Сборка форсуночной головки .....	201
5.2. Изготовление камеры сгорания с фрезерованными пазами .....	202
5.2.1. Особенности конструкции, требования и применяемые материалы .....	202
5.2.2. Изготовление элементов КС с фрезерованными пазами ....	203
5.3. Изготовление камер сгорания с выштамповками .....	218
5.3.1. Особенности конструкции и требования .....	218
5.3.2. Технологические способы получения выштамповок .....	219
5.3.3. Комплектация и сварка блоков КС с выштамповками .....	220
5.4. Изготовление КС с гофрированными прокладками .....	223
5.4.1. Особенности конструкции и требования .....	223
5.4.2. Изготовление гофрированных прокладок .....	225
5.4.3. Сборка КС под пайку .....	229
5.5. Изготовление камер сгорания трубчатой конструкции .....	236
5.5.1. Конструктивные особенности и требования .....	236
5.5.2. Сборка КС трубчатой конструкции .....	238
5.5.3. Пайка КС трубчатой конструкции .....	244
5.6. Центровка камеры сгорания .....	246
5.7. Механическая обработка камер сгорания в сборе .....	248

6. Изготовление турбонасосных агрегатов .....	250
6.1. Конструктивные особенности и технология изготовления крыльчаток .....	250
6.2. Технология изготовления деталей турбонасосных агрегатов .....	254
6.2.1. Основы технологии изготовления дисков роторов .....	255
6.2.2. Изготовление валов ТНА .....	258
6.2.3. Изготовление корпусных деталей ТНА .....	260
6.3. Балансировка вращающихся деталей и узлов ТНА .....	262
6.3.1. Основы статической балансировки деталей и узлов ТНА .....	262
6.3.2. Технологическое оборудование для статической балансировки деталей и узлов ТНА .....	264
6.3.3. Основы динамической балансировки .....	269
6.3.4. Станки для динамической балансировки .....	271
7. Особенности технологии изготовления газогенераторов .....	276
8. Конструктивно-технологическая характеристика и особенности изготовления узлов автоматики и трубопроводов .....	281
8.1. Узлы автоматики .....	281
8.2. Трубопроводы ЖРД .....	287
8.3. Особенности монтажа .....	295
9. Изготовление рам двигательных установок .....	296
9.1. Общая характеристика изготовления рам двигательных установок .....	296
9.2. Общая характеристика изготовления стержней из металлических композиционных материалов .....	299
9.2.1. Метод твердофазного компактирования матрицы и волокон .....	301
9.2.2. Метод жидкофазного компактирования матрицы и волокон .....	305
9.2.3. Компактирование методом осаждения-напыления .....	309
<b>ЧАСТЬ III. Общая сборка и испытания жидкостных ракетных двигателей</b>	
10. Общая сборка жидкостных ракетных двигателей .....	313
10.1. Характеристика технологического процесса общей сборки жидкостных ракетных двигателей .....	313
10.2. Технологический процесс общей сборки жидкостных ракетных двигателей и необходимые средства технологического оснащения .....	314
10.3. Требования к условиям проведения операций общей сборки жидкостных ракетных двигателей .....	320
10.3.1. Требования к комплектующим элементам и технологическим условиям сборочных помещений .....	320
10.3.2. Требования по технике безопасности при вращении блока вокруг оси на стапеле .....	320

10.3.3. Требования к монтажу трубопроводов .....	321
10.3.4. Общие требования при работе с технологической средой хладон-113 перед сборкой ЖРД и при испытаниях в бароаквариуме .....	322
10.3.5. Общие требования к операциям технологии сборки-сварки .....	323
11. Испытания жидкостных ракетных двигателей .....	326
11.1. Методы и средства технологического оснащения производственных испытаний жидкостных ракетных двигателей .....	326
11.1.1. Общая характеристика методов испытаний .....	326
11.1.2. Характеристика применяемых технологических процессов и технологического оснащения производственных испытаний ЖРД .....	336
11.2. Общие требования к условиям проведения испытаний блоков жидкостных ракетных двигателей .....	348
11.2.1. Технические требования .....	348
11.2.2. Требования по технике безопасности при проведении испытаний .....	350
11.2.3. Требования по технике безопасности при проведении сушки .....	350
11.2.4. Требования к завершающим операциям общей сборки двигателя .....	351
11.3. Огневые испытания жидкостных ракетных двигателей .....	351
12. Производственная система обеспечения качества жидкостных ракетных двигателей .....	355
Список литературы .....	377

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из задач обеспечения кадрами ракетно-космического машиностроения является подготовка специалистов в области производства ракетных двигателей, для изготовления которых характерно применение новых, часто труднообрабатываемых материалов с уникальными свойствами и большое разнообразие современных технологических процессов.

Список учебной литературы, посвященный производству жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) весьма ограничен и содержит учебные пособия, которые давно не переиздавались. Золотой фонд литературы составляют такие книги, как: «Основы технологии производства жидкостных ракетных двигателей» под редакцией Г.А. Киселева и В.А. Исаченко, «Технология сборки двигателей летательных аппаратов» А.Н. Никитина, «Технология производства двигателей летательных аппаратов» М.И. Евстигнеева, «Основы производства жидкостных ракетных двигателей» И.И. Горева, «Технология производства жидкостных ракетных двигателей» В.В. Воробья и В.Е. Логинова и др.

Цель данного учебника – систематизированное изложение современных технологий изготовления, контроля и испытания элементов конструкции ЖРД, технологического оборудования и организации процессов производства на передовых предприятиях Российской Федерации.

Содержание учебника соответствует учебному плану Государственного образовательного стандарта для студентов специальности 160302 «Ракетные двигатели», а также технологической подготовки инженеров-ракетчиков в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Книга состоит из трех частей. Первая часть посвящена критическим\* технологиям, определяющим выполнение ключевых требований к параметрам конструкции ЖРД. Приведены подробная конструктивно-технологическая характеристика основных типов ЖРД и важнейших элементов их конструкций, а также требования к параметрам конструкции ЖРД, которые во многом определяют построение технологических процессов. Изложены особенности пайки, дуговой и лучевой сварки, плазменного напыления покрытий. Особое внимание уделено специальным заготовительным

---

\* Под критическими понимаются технологии, без которых в принципе невозможно обеспечить техническое совершенство и технико-экономическую эффективность производства ЖРД.

процессам, без которых невозможен высокий уровень качества изделий. К ним относятся вакуумное литье и литье с направленной кристаллизацией, ротационная вытяжка сложнопрофильных осесимметричных оболочек (например, типа сопла), пространственная гибка трубопроводов и др.

Во второй части рассмотрены вопросы узловой и агрегатной сборки. Впервые подробно описаны операции механической обработки камер сгорания в сборе, а также технологии проливки элементов ЖРД и центровки камер сгорания. Приведен материал по технологии изготовления газогенераторов и балансировке роторов.

Отличительный признак предлагаемой книги – углубленное рассмотрение вопросов общей сборки и испытаний ЖРД, изложенных в третьей части. В ней представлена характеристика технологического процесса общей сборки ЖРД и проведен обзор необходимых средств технологического оснащения. Сформулированы требования к условиям проведения операций общей сборки ЖРД, затрагивающие широкий круг вопросов, включая требования к основным сборочным операциям (сварке, монтажу трубопроводов и т. д.), комплектующим элементам, технологическим условиям сборочных помещений, требования по технике безопасности и т. д. Изложен ряд практически значимых рекомендаций, дана характеристика методов испытаний ЖРД и приведены примеры технологических процессов и средств технологического оснащения, применяемых в производстве и не встречающихся в аналогичных изданиях. Затронуты проблемы обеспечения высокого качества и надежности ЖРД.

Основа учебника – курс «Технология производства жидкостных ракетных двигателей», введенный профессором Г.А. Киселевым.

В формировании учебника важную роль сыграли дискуссии о проблемах производства ЖРД на факультетах СМ и Э МГТУ им. Н.Э. Баумана. За конструктивные замечания и полезные советы авторы благодарят вице-президента РАК им. К.Э. Циолковского, генерального директора ФГУП «НПО Техномаш» В.В. Булавкина, контр-адмирала В.М. Апанасенко, капитанов 1-го ранга Р.А. Рухадзе и А.К. Назарько. Качество изложенного материала значительно улучшено благодаря материалам, предоставленным заместителем генерального директора ФГУП «Красмаш», профессором М.А. Лубним и профессором В.В. Стацурой.

Полезной были поддержка и внимание со стороны руководителя НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана В.В. Зеленцова, про-

ректора Сибирского аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева В.П. Назарова, а также директора ФГУП «КБ Химавтоматики» А.И. Фещенко.

Авторы благодарят за помощь в подготовке издания инженеров ЗАО «Компомаш-ТЭК» М.М. Романову, В.А. Панкратова, П.А. Котова, а также ассистента кафедры СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана В.А. Пузакова.

Считаем своим долгом выразить признательность рецензентам книги: генеральному конструктору ФГУП «НПО Энергомаш» им. В.П. Глушко академику РАН, профессору Б.И. Катаргину и коллективу кафедры «Технология производства летательных аппаратов» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского, возглавляемой доктором технических наук, профессором А.С. Чумадиным.

Особую благодарность авторы выражают редактору книги А.С. Водчиц.