

В.С. ЕГОРЫЧЕВ, В.С. КОНДРУСЕВ

**ТОПЛИВА ХИМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

В.С. ЕГОРЫЧЕВ, В.С. КОНДРУСЕВ

ТОПЛИВА ХИМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 629.7.036:662.62/75(075.8)

ББК 39.65

Е 307



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. В. А. Б о р и с о в,
канд. техн. наук, доц. А. А. Н о в и к о в

Е 307 **Егорычев В.С.**

Топлива химических ракетных двигателей: учеб. пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 72 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0512-7

Рассмотрены основные виды топлив ХРД и приведена их классификация. Даны систематизированные сведения о физико-химических и эксплуатационных свойствах, а также экологических характеристиках основных окислителей и горючих. Проведен анализ энергетических свойств и термодинамических характеристик наиболее распространенных химических ракетных топлив. Показаны пути совершенствования топлив и приведены параметры и свойства топлив перспективных ХРД, разрабатываемых или планируемых к разработке. Изложенный материал является обязательным разделом учебной дисциплины «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей».

Предназначено для самостоятельного изучения студентами факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности 16 03 02 – Ракетные двигатели, и необходимо при выполнении лабораторных и практических занятий, курсовых работ и дипломных проектов. Разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

УДК 629.7.036:662.62/75(075.8)

ББК 39.65

ISBN 978-5-7883-0512-7

© Егорычев В.С., Кондрусев В.С., 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

О Г Л А В Л Е Н И Е

Сокращения, условные обозначения и индексы.....	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХИМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И ИХ ТОПЛИВАХ	8
2. ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА	11
2.1. Основные понятия и классификация жидких ракетных топлив.....	11
2.2. Состав двухкомпонентного топлива.....	15
2.3. Требования к жидким ракетным топливам.....	17
2.3.1. Требования к энергетическим характеристикам ЖРТ.....	17
2.3.2. Требования к кинетическим свойствам топлива.....	19
2.3.3. Требования к эксплуатационным характеристикам.....	20
2.3.4. Требования к экономическим и экологическим свойствам.....	21
2.4. Основные применяемые окислители и их свойства.....	22
2.5. Перспективные окислители.....	26
2.6. Основные применяемые горючие и их свойства.....	28
2.7. Перспективные горючие.....	34
2.8. Характеристики основных применяемых топлив.....	35
2.9. Однокомпонентные ЖРТ.....	37
2.10. Пути совершенствования жидких ракетных топлив и перспективные топлива.....	39
3. ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА	45
3.1. Требования к твердым ракетным топливам.....	45
3.1.1. Требования к энергетическим характеристикам.....	46
3.1.2. Требования к внутрибаллистическим характеристикам.....	46
3.1.3. Требования к физико-механическим свойствам.....	47
3.1.4. Экономические и эксплуатационные требования.....	47
3.2. Двухосновные топлива.....	49

3.3. Смесевые топлива.....	54
3.4. Пути совершенствования твердых ракетных топлив.....	59
4. ГИБРИДНЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА.....	62
4.1. Требования к гибридным ракетным топливам.....	63
4.2. Окислители.....	63
4.3. Горючие.....	64
Контрольные вопросы.....	67
Библиографический список.....	69
Приложение.....	70

Сокращения, условные обозначения и индексы

С о к р а щ е н и я

ГРД – гибридный ракетный двигатель,
ЖРД – жидкостный ракетный двигатель,
ЖРТ – жидкое ракетное топливо,
РД – ракетный двигатель,
РДТТ – ракетный двигатель твердого топлива,
ТРТ – твердое ракетное топливо,
ХРД – химический ракетный двигатель,
ХРТ – химическое ракетное топливо.

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

$\alpha_{ок}$ – коэффициент избытка окислителя,
 ε – степень расширения рабочего тела в сопле,
 g – массовая доля,
 H_u – массовая низшая теплота сгорания топлива,
 I_y – удельный импульс тяги,
 α – мольное действительное соотношение компонентов топлива,
 α^o – мольное стехиометрическое соотношение компонентов,
 K_m – массовое действительное соотношение компонентов,
 K_m^o – массовое стехиометрическое соотношение компонентов,
 K_V – объемное действительное соотношение компонентов,
 K_V^o – объемное стехиометрическое соотношение компонентов,
 \dot{m} – массовый расход,
 μ – молярная масса,
 p – давление,
 R_o, R – универсальная и удельная газовые постоянные,
 r – объемная доля,
 ρ – плотность,
 T – температура,
 \dot{V} – объемный расход,
 W – скорость рабочего тела.

И н д е к с ы

- a – выход из сопла,
- Γ – горючее,
- \mathcal{J} – жидкость,
- k – камера или вход в камеру,
- m – минимальное сечение сопла,
- OK – окислитель,
- Π – в пустоте,
- c – сопло или вход в сопло,
- T – топливо,
- $*$ – критическое сечение сопла.

ВВЕДЕНИЕ

В учебной литературе по ракетным двигателям свойства и характеристики химических топлив рассматриваются достаточно кратко, обычно в объеме одной главы или небольшого раздела. Современному специалисту в области ракетного двигателестроения для разработки и создания конкурентоспособных на мировом рынке ХРД необходим значительно больший объем знаний по химическим топливам. Разработка, производство и успешная эксплуатация ракетных двигателей невозможна без детального изучения физико-химических свойств компонентов топлива, энергетических свойств, термодинамических параметров и экологических характеристик современных и перспективных химических ракетных топлив, знания путей их совершенствования.

Настоящее учебное пособие призвано ликвидировать этот недостаток знаний. В первой его главе даны общие сведения о ХРД и их топливах, а в следующих трех главах подробно рассмотрены жидкие, твердые и гибридные ракетные топлива, требования, предъявляемые к ним, основные свойства и характеристики и перспективы развития. Особое внимание уделено экологическим характеристикам топлив, их компонентов и продуктов сгорания.

Пособие предназначено для самостоятельного изучения студентами факультета двигателей летательных аппаратов, обучающимися по специальности 160302, и является обязательным разделом учебной дисциплины «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей». Оно необходимо студентам для подготовки и проведения лабораторных и практических занятий. Данные по химическим топливам нужны студентам при выполнении курсовых работ и дипломных проектов.

Изучению свойств, характеристик и особенностей применения химических ракетных топлив и посвящено это пособие.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХИМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И ИХ ТОПЛИВАХ

Ракетный двигатель – это автономный реактивный двигатель, работающий на бортовых ресурсах массы и энергии.

Основное назначение ракетного двигателя – создание тяги.

Тяга – это сила, развиваемая двигателем за счет отбрасывания массы рабочего тела с определенной скоростью в сторону, противоположную действию силы.

В соответствии с видом первичной энергии, используемой в РД и преобразуемой им в кинетическую энергию струи рабочего тела, истекающей из сопла, различают ракетные двигатели химические (ХРД), ядерные (ЯРД), электрические (ЭРД) и на прочих видах энергии.

Наибольшее распространение в настоящее время получили ХРД. Носителями химической энергии в них являются химические ракетные топлива (ХРТ).

ХРТ – это вещества или совокупность веществ, способные выделять теплоту в результате химических превращений. Основными являются следующие экзотермические реакции: горения (окислительно-восстановительные), разложения и рекомбинации.

В реакции горения обязательно участвуют окислительные и горючие химические элементы. Они могут входить в состав одного или нескольких веществ, образующих топливо.

К экзотермическому разложению способны отдельные индивидуальные вещества, при образовании молекул которых была затрачена теплота.

Теплота, выделяющаяся при рекомбинации, т.е. воссоединении атомов или радикалов в молекулы, значительна, поэтому заманчиво её использование в РД. Однако топлива на основе свободных атомов и радикалов пока не созданы, т.к. отсутствуют способы их получения и сохранения.

В ХРТ источник энергии и рабочего тела совмещены.

Рабочее тело – это вещество, с помощью которого осуществляется рабочий процесс ракетного двигателя.

Рабочим телом ХРД являются конечные продукты экзотермических химических реакций. Это продукты сгорания или разложения топлива. В процессе реакции химическая энергия топлива переходит в тепловую энергию. Выделившееся в камере сгорания те-

пло идет на нагрев образовавшихся продуктов реакции, т.е. рабочего тела. Сжатое и нагретое до высоких температур рабочее тело поступает в сверхзвуковое реактивное сопло, где оно ускоряется геометрическим способом до сверхзвуковой скорости. Потенциальная и тепловая энергия рабочего тела переходят в кинетическую энергию вытекающей из сопла струи газов. Схематически процесс преобразования энергии в камере ХРД показан на рис. 1.

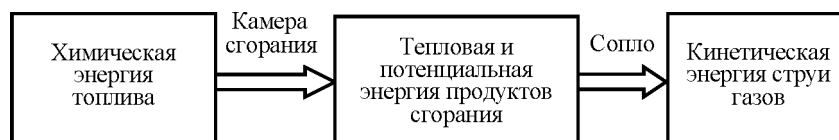


Рис.1. Схема преобразования энергии в камере ХРД

Химические ракетные топлива по исходному агрегатному состоянию подразделяются на твердые, жидкие, газообразные и гибридные (смешанные). Гибридное топливо представляет собой сочетание твердого и жидкого, либо газообразного, компонентов.

По агрегатному состоянию используемых топлив ХРД подразделяются:

- на жидкостные ракетные двигатели (ЖРД);
- ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ);
- гибридные ракетные двигатели (ГРД).

Наибольшее распространение получили ЖРД и РДТТ.

Компоненты ЖРТ размещают и хранят в баках, откуда их подают в двигатель. ТРТ или компонент гибридного топлива в твердом состоянии размещают непосредственно в камере сгорания двигателя в виде зарядов. Топлива и их компоненты в газообразном виде хранят в баллонах. Их чаще всего применяют во вспомогательных двигателях. Имеются ракетные двигатели, обеспечивающие газификацию ЖРТ перед подачей его в камеру сгорания.

Схемы трех основных типов ракетных двигателей на химическом топливе с указанием места хранения топлива представлены на рис. 2, 3, 4.

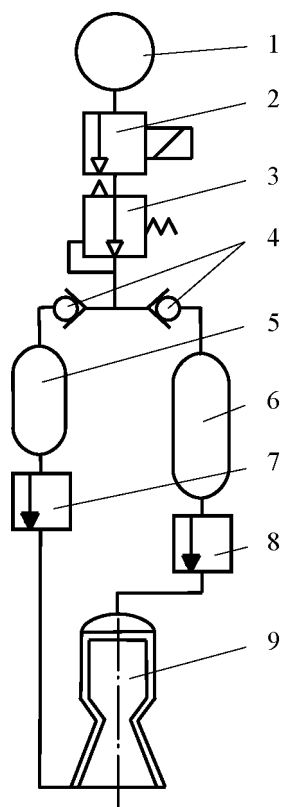


Рис. 2. Схема ЖРД с вытеснительной подачей топлива:

1 – газовый аккумулятор давления, 2 – пускоотсечной клапан, 3 – редуктор давления, 4 – обратные клапаны, 5 – бак горючего, 6 – бак окислителя, 7, 8 – главные клапаны горючего и окислителя соответственно, 9 – камера двигателя

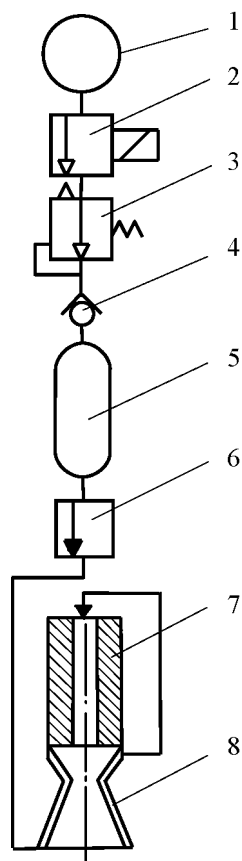


Рис.3. Схема ГРД:

1 – газовый аккумулятор давления, 2 – пускоотсечной клапан, 3 – редуктор давления, 4 – обратный клапан, 5 – бак жидкого компонента (окислителя), 6 – главный клапан, 7 – заряд твердого компонента (топлива), 8 – камера двигателя

Характеристики, особенности применения и требования к топливам ЖРД, РДТТ и ГРД существенно отличаются, поэтому мате-

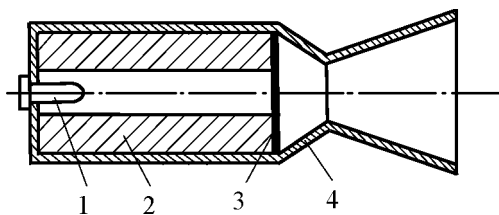


Рис. 4. Схема РДТТ:

1 – воспламенитель; 2 – заряд твердого ракетного топлива; 3 – бронирующее покрытие; 4 – камера двигателя

риал по каждому из указанных трёх видов топлива излагается в соответствующем разделе данного учебного пособия.

2. ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

2.1. Основные понятия и классификация жидких ракетных топлив

Жидкое ракетное топливо (ЖРТ) – это вещество или совокупность веществ в жидком состоянии, способных в результате экзотермических химических реакций образовывать высокотемпературные продукты, создающие реактивную силу при их истечении из сопла двигателя.

По своему назначению ЖРТ подразделяют на основные, пусковые и вспомогательные.

Основное жидкое ракетное топливо служит для получения всей или основной доли тяги ЖРД. Оно системой подачи топлива вводится непосредственно в камеру сгорания ЖРД или камеры сгорания, если двигатель многокамерный.

Пусковое жидкое ракетное топливо используется для химического воспламенения основного топлива в камере сгорания ЖРД, если последнее не способно к самовоспламенению при контакте его компонентов. Пусковое топливо используется только при запуске двигателя.

Вспомогательное жидкое ракетное топливо – это топливо, применяемое в РД для вспомогательных целей. Продукты сгорания

или разложения этого топлива, получаемые в газогенераторе, служат рабочим телом турбины турбонасосного агрегата, рулевых сопел и других агрегатов, не создающих непосредственно основную долю тяги двигателя.

Штатным ракетным топливом называют такое, которое наиболее распространено и с характеристиками которого принято сравнивать соответствующие характеристики рассматриваемого топлива.

ЖРТ могут состоять из одного или нескольких компонентов.

Компонент жидкого ракетного топлива (компонент топлива) – это его составляющая, отдельно хранимая и отдельно подводящая к камере ЖРД.

Компонент топлива может состоять из одного вещества или смеси индивидуальных химических веществ.

По числу компонентов различают однокомпонентные, двухкомпонентные и многокомпонентные топлива.

Однокомпонентное топливо – это топливо, которое подается в двигатель в виде одной жидкости. Оно может представлять собой индивидуальное вещество, однородную механическую смесь или раствор различных веществ.

Двухкомпонентные топлива являются наиболее характерным видом ЖРТ. Оно состоит из горючего и окислителя, которые вступают в камере сгорания в реакцию горения (окислительно-восстановительную).

Горючее – это компонент, который содержит в своем составе преимущественно горючие элементы, т.е. элементы с электроположительной валентностью. К горючим элементам относятся водород H, углерод C, бор B, алюминий Al, литий Li, бериллий Be и другие.

Окислитель – это компонент двухкомпонентного топлива, содержащий в своем составе преимущественно окислительные элементы, т.е. элементы с электроотрицательной валентностью. Окислительными элементами являются фтор F, кислород O, хлор Cl, бром Br и другие. Фтор и кислород значительно превосходят по эффективности другие окислительные элементы.

Окислитель и горючее будут называться простыми или элементарными, если в состав окислителя входят только окислительные элементы, а в состав горючего – только горючие элементы.

Сложные окислитель и горючее содержат в своем составе как окислительные, так и горючие элементы.

Примерами простого горючего и окислителя могут служить соответственно водород и кислород.

Сложным горючим является этиловый спирт C_2H_5OH . Из химической формулы видно, что в его состав помимо горючих элементов входит окислительный элемент – кислород. Сложным окислителем – азотная кислота HNO_3 , которая помимо окислительного элемента содержит горючий элемент – водород и нейтральный элемент – азот.

Современные трехкомпонентные топлива состоят из окислителя и двух горючих, хотя теоретически возможны и другие варианты. Третьим компонентом являются, как правило, легкие металлы и металлосодержащие соединения, подаваемые тем или иным способом в камеру сгорания в порошкообразном виде.

Жидкие ракетные топлива классифицируются также по эксплуатационным признакам.

По уровню температур кипения и затвердевания топлива и их компоненты подразделяются на *высококипящие* и *низкокипящие* или *криогенные*.

Высококипящие компоненты топлива имеют температуру кипения выше $298K$ ($25^{\circ}C$) и в обычных эксплуатационных условиях являются жидкостью. Они допускают хранение в баках ракеты или других емкостях при эксплуатационных температурах и давлениях без потерь компонентов в окружающую среду.

Низкокипящие компоненты при атмосферном давлении имеют температуру кипения ниже $298K$ и находятся в газообразном состоянии. В связи с этим жидкое состояние низкокипящего компонента достигается за счет принятия соответствующих мер и, в первую очередь, за счет поддержания при эксплуатации и хранении температуры компонента не выше его температуры кипения. Таким образом, низкокипящие или криогенные компоненты представляют собой сжиженные газы. К ним, например, относятся кислород, водород, фтор, метан и др.

По способности длительного хранения без потерь в окружающую среду топлива и их компоненты подразделяются на *стабильные* и *нестабильные*.

Стабильные топлива это такие, которые обладают свойством сохранения своих физико-химических свойств в течение требуемо-

го времени и допускают хранение в баках ракеты или других емкостях при эксплуатационных температурах и давлениях без существенных потерь компонентов в окружающую среду. Давление насыщенных паров компонентов стабильных топлив не должно превышать допустимый предел давления, обусловленный прочностью топливных баков, во всем диапазоне эксплуатационных температур.

Требование сохранения стабильности свойств компонентов при длительном их хранении является одним из важнейших при выборе топлива для боевых ракет, которые, в соответствии с технико-техническими требованиями, должны находиться в снаряженном состоянии в течение длительного времени. Выполнение данного требования обеспечивает высокую боеготовность ракетного комплекса. Требование стабильности топлива может возникать и при эксплуатации космических аппаратов – при полетах к дальним планетам, при хранении топлива в космосе и на других планетах.

Низкокипящие топлива могут быть как стабильными, так и нестабильными. Жидкий пропан является криогенным горючим стабильного топлива пропан и азотная кислота.

Нестабильные низкокипящие топлива в большинстве своем обладают более высокими, чем стабильные топлива, энергетическими характеристиками и обеспечивают большие значения удельного импульса тяги. Их существенный недостаток – значительные потери на испарение из-за низкой температуры кипения. Эти топлива широко применяются на ракетах, предназначенных для вывода на орбиту космических объектов. Так как подобные системы запускаются, как правило, в известное заранее время, то предстартовая подголовка ведется таким образом, чтобы ракета в заправленном состоянии находилась минимальное время и в этот же период времени осуществлялась ее дозаправка топливом.

По способности к самовоспламенению компонентов при их контакте в жидкой фазе топлива подразделяются:

- на *самовоспламеняющиеся*,
- *несамовоспламеняющиеся*.

Свойство самовоспламенения компонентов топлива является чрезвычайно важным, поскольку позволяет упростить конструкцию двигателя и существенно повысить его надежность, т.к. обеспечивает гарантийное воспламенение топливной смеси в камере сгорания двигателя. Некачественное воспламенение при использо-

вании несамовоспламеняющихся топлив в ряде случаев является причиной аварии при запуске двигателя. Наличие самовоспламенения облегчает также создание жидкостных ракетных двигателей малой тяги, предназначенных для работы в импульсных режимах и являющихся исполнительными органами систем управления космическими аппаратами.

2.2. Состав двухкомпонентного топлива

Состав двухкомпонентного ЖРТ определяется соотношением его компонентов окислителя и горючего.

Стехиометрическим соотношением компонентов будем называть такое, когда в топливе на один моль горючего приходится столько молей окислителя, что обеспечивается полное замещение валентностей горючих элементов валентностями окислительных элементов, т.е. происходит полное химическое взаимодействие (сгорание) горючих и окислительных элементов топлива. Это количество молей окислителя, приходящихся на один моль горючего, обозначают α^0 и называют мольным стехиометрическим соотношением компонентов топлива.

Величину α^0 определяют по высшим валентностям элементов, входящих в состав топлива. Это соответствует образованию продуктов только полного окисления.

По химическим формулам условных молекул горючего и окислителя мольное стехиометрическое соотношение компонентов определится

$$\alpha^0 = -\frac{\sum_{i=1}^m b_{i\Gamma} V_i}{\sum_{i=1}^m b_{i\text{ок}} V_i}, \quad (1)$$

где m – число химических элементов, входящих в состав топлива; $b_{i\Gamma}, b_{i\text{ок}}$ – числа атомов i – го химического элемента в условной молекуле горючего и окислителя соответственно; V_i – высшая валентность i – го химического элемента.

Массовое и объемное стехиометрические соотношения компонентов соответственно запишутся:

$$K_m^o = \mathfrak{a}^o \frac{\mu_{\text{ок}}}{\mu_{\text{г}}}, \quad (2)$$

$$K_V^o = K_m^o \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ок}}}, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{г}}$, $\mu_{\text{ок}}$ – молярные массы горючего и окислителя; $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{ок}}$ – их плотности соответственно.

Для конкретного химического ракетного топлива \mathfrak{a}^o , K_m^o , K_V^o – постоянные величины.

Топливная смесь, имеющая стехиометрическое соотношение компонентов, называется стехиометрической.

В реальном ракетном двигателе стехиометрическое соотношение компонентов топлива в камере не обеспечивает, как правило, требуемых параметров и характеристик двигателя.

Действительное (фактическое) массовое соотношение компонентов топлива в двигателе:

$$K_m = \frac{\dot{m}_{\text{ок}}}{\dot{m}_{\text{г}}}, \quad (4)$$

где $\dot{m}_{\text{ок}}$, $\dot{m}_{\text{г}}$ – массовые расходы окислителя и горючего соответственно.

По значению K_m легко определить, используя уравнения (2) и (3), действительные объемное и мольное соотношения компонентов

$K_V = \frac{\dot{V}_{\text{ок}}}{\dot{V}_{\text{г}}}$ и \mathfrak{a} , где $\dot{V}_{\text{ок}}$ и $\dot{V}_{\text{г}}$ – объемные расходы окислителя

и горючего.

На практике удобнее состав двухкомпонентного топлива определять коэффициентом избытка окислителя

$$\alpha_{\text{ок}} = \frac{K_m}{K_m^o} = \frac{K_V}{K_V^o} = \frac{\mathfrak{a}}{\mathfrak{a}^o}. \quad (5)$$

При $\alpha_{\text{ок}} = 1$ имеем стехиометрическое соотношение компонентов в топливе. Если $\alpha_{\text{ок}} > 1$, то в топливе избыток горючего, а если $\alpha_{\text{ок}} < 1$, то – избыток окислителя.

Массовые и объемные доли окислителя и горючего в топливе будут

$$g_{\text{ок}} = \frac{K_m}{1 + K_m} = \frac{\alpha_{\text{ок}} K_m^o}{1 + \alpha_{\text{ок}} K_m^o}, \quad g_{\text{г}} = \frac{1}{1 + K_m} = \frac{1}{1 + \alpha_{\text{ок}} K_m^o}, \quad (6), (7)$$

$$r_{\text{ок}} = \frac{K_V}{1 + K_V} = \frac{\alpha_{\text{ок}} K_V^o}{1 + \alpha_{\text{ок}} K_V^o}, \quad r_{\text{г}} = \frac{1}{1 + K_V} = \frac{1}{1 + \alpha_{\text{ок}} K_V^o}. \quad (8), (9)$$

2.3. Требования к жидким ракетным топливам

В природе имеется довольно много жидких веществ, способных вступать в экзотермические химические реакции, но лишь очень немногие из них удовлетворяют требованиям, предъявляемым к жидким ракетным топливам. Компоненты жидких ракетных топлив должны обладать такими свойствами и характеристиками, которые, в конечном итоге, обеспечивают возможность создания в заданные сроки ракетных двигателей, их эффективного функционирования и экологически безопасного создания и использования.

Предъявляемые к ЖРТ требования можно разделить на четыре следующие группы:

- к энергетическим характеристикам,
- кинетическим свойствам,
- эксплуатационным характеристикам,
- экономическим и экологическим свойствам.

2.3.1. Требования к энергетическим характеристикам ЖРТ

1. Высокое значение идеального удельного импульса тяги или массовой теплоты сгорания топлива.

Чем выше низшая массовая теплота сгорания топлива H_u , тем выше скорость истечения продуктов сгорания из сопла, а значит и удельный импульс тяги. Это следует из выражения для удельного импульса тяги РД на расчетном режиме работы

$$I_{y.p} = W_a = \sqrt{2H_u \eta_e}, \quad (10)$$

где η_e - эффективный КПД ракетного двигателя.

2. Большая плотность топлива.

Плотность топлива, наряду с удельным импульсом, оказывает основное влияние на важнейшую характеристику летательного аппарата – его конечную скорость, т.е. скорость в конце активного участка траектории полета в момент окончания работы двигателей. Это следует из уравнения Циолковского

$$V_k = I_y \ln(1 + \sigma_k \rho_T), \quad (11)$$

где ρ_T – плотность топлива, σ_k – коэффициент конструкторского совершенства летательного аппарата.

Следует также отметить, что при прочих равных условиях топливо с большей плотностью потребует для своего размещения меньшего объема баков, а это повысит коэффициент конструктивного совершенства аппарата σ_k .

В некоторых случаях, при запуске космических ракет, производят предварительное захлаживание компонентов топлива с целью повышения их плотности, а значит плотности топлива.

3. Высокое значение газовой постоянной продуктов сгорания топлива R_{oc} .

Это обеспечивает большее удельное газообразование топлива. Скорость истечения продуктов сгорания и удельный импульс тяги повышаются:

$$W_a = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R_{oc} T_{oc} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_{oc}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (12)$$

Значение газовой постоянной будет высоким, если в продуктах сгорания будет больше легких молекул, имеющих низкую величину молярной массы, например, молекул и атомов водорода. Это следует из выражения

$$R = \frac{R_o}{\mu}, \quad (13)$$

где R_o – универсальная газовая постоянная ($R_o = 8,3144$ Дж/моль·К),
 μ – молярная масса продуктов сгорания.

4. Низкое значение показателя адиабаты $k = \frac{C_p}{C_v}$ продуктов сгорания.

Анализ уравнения (12) показывает, что снижение k приводит к росту скорости истечения из сопла и удельному импульсу тяги.

5. Приемлемый уровень температуры продуктов сгорания в камере сгорания T_{oc} .

Из формулы (12) следует, что увеличение T_{oc} способствует росту скорости истечения, а следовательно и удельного импульса тяги (см. уравнение (10)). Современные химические топлива могут обеспечить температуру в камере сгорания до 6000 К, однако материалы стенок камеры такую температуру не выдерживают. Ни одна из известных в настоящее время систем охлаждения камеры не справляется с тепловыми потоками, возникающими при температурах выше 4000...4500 К. Поэтому температура продуктов сгорания T_{oc} должна находиться в указанном диапазоне.

2.3.2. Требования к кинетическим свойствам топлива

Эти требования, направленные на обеспечение надежного воспламенения топлива в камере сгорания, быстрого и полного его сгорания, следующие:

1. Возможность самовоспламенения топлива в камере сгорания при контакте его компонентов в жидком виде.

Выполнение этого требования существенно повышает надежность двигателя и упрощает его конструкцию, т.к. отпадает необходимость в специальной системе зажигания топлива.

2. Низкая температура воспламенения компонентов топлива.

Это способствует повышению надежности запуска ЖРД.

3. Малая задержка воспламенения.

Чем меньше время задержки воспламенения, тем меньше будет в камере сгорания непрореагировавшего топлива в момент воспламенения и тем более плавным, т.е. без заброса давления, будет запуск двигателя. При большой задержке воспламенения может произойти взрыв большой массы топливной смеси в камере сгорания и разрушение двигателя.

4. Высокая скорость сгорания топлива, т.е. высокая скорость протекания химических реакций.

Чем выше скорость сгорания, тем меньше время пребывания топлива в камере сгорания. Это позволяет уменьшить длину и объем камеры сгорания, а значит уменьшить габаритные размеры и массу двигателя.

2.3.3. Требования к эксплуатационным характеристикам

Требования к эксплуатационным характеристикам топлива можно подразделить на две группы:

- 1) требования к топливу как охладителю камеры;
- 2) требования, обусловленные обслуживанием и отработкой двигателя.

Требования первой группы призваны обеспечить надежное охлаждение камеры двигателя. Они применительно к компонентам топлива, используемым во внешней регенеративной системе охлаждения камеры, следующие:

1. Высокая удельная теплоемкость.

При высокой удельной теплоемкости единицей массы охлаждаемого компонента будет поглощаться большее количество тепла.

2. Хорошая теплопроводность.

Жидкость, обладающая высокой теплопроводностью, способна пропускать и распределять по объему большие тепловые потоки.

3. Высокая температура кипения.

Это требование обеспечит надежное охлаждение камеры без вскипания компонента и более высокий теплосъем на единицу расхода охлаждающей жидкости. Последний, при прочих равных условиях, определяется разностью температур $T_{кип} - T_{вх}$, где $T_{кип}$ – температура кипения охлаждающей жидкости, а $T_{вх}$ – температура жидкости на входе в систему охлаждения камеры.

4. Значительная химическая стойкость при контакте с огневой стенкой камеры, нагретой до температуры 570...970 К.

На стенках проточной части внешней регенеративной системы охлаждения камеры не должно образовываться нагара или кокса, которые ухудшают отвод тепла от стенки к охлаждающему ее компоненту.

5. Низкая вязкость.

При высокой вязкости охлаждающего компонента увеличивается гидравлическое сопротивление тракта охлаждения камеры. Это требует повышения мощности топливных насосов.

Требования второй группы, связанные с обслуживанием и отработкой двигателя, следующие:

6. Стойкость при длительном хранении.

Компоненты топлива при хранении не должны улетучиваться, расслаиваться, изменять свою структуру и химический состав, выделять осадки.

7. Минимальная коррозионная активность по отношению к материалам системы подачи топлива двигательной установки.

8. Низкая температура замерзания.

Желательно, чтобы температура замерзания была не выше -40°C .

9. Высокая температура кипения.

Температура кипения должна быть не ниже $+50^{\circ}\text{C}$.

Выполнение двух последних требований упрощает обслуживание и использование ЖРД во всем эксплуатационном диапазоне температур окружающей среды.

10. Высокие взрывобезопасность и пожаробезопасность.

При контакте с воздухом и различных импульсных воздействиях, например тепловом, световом или механическом ударе, топливо и его компоненты не должны воспламеняться или взрываться.

2.3.4. Требования к экономическим и экологическим свойствам

Эти требования, обеспечивающие безопасность эксплуатации двигателей и их конкурентоспособность на мировом рынке, следующие:

1. Низкая стоимость.

2. Недефицитность.

3. Обеспеченность сырьевой базой.

Компоненты топлива должны изготавливаться по возможности из отечественного сырья и на отечественных заводах.

4. Простота изготовления.

5. Возможность использования топлива, его компонентов и их производных в народном хозяйстве.

6. Компоненты топлива и продукты их сгорания не должны быть токсичными.

7. Производство и эксплуатация двигателей и топлива должны быть экологически безопасными.

В заключение необходимо отметить, что не существует ни одного топлива, которое удовлетворяло бы всем перечисленным требованиям. Поэтому при подборе компонентов топлива приходится искать компромиссы и находить оптимальные решения. При формировании целевой функции прежде всего следует обращать внимание на выполнение основных требований. Наибольшие трудности вызывает выбор окислителя, так как почти все окислители являются малоустойчивыми, взрывоопасными, токсичными и дорогими.

2.4. Основные применяемые окислители и их свойства

Основными используемыми в ЖРД окислителями являются кислород O_2 , перекись водорода H_2O_2 , азотная кислота HNO_3 , четырехокись азота или азотный тетраоксид N_2O_4 и смеси азотной кислоты и четырехокси азота. Из них кислород является простым, или элементарным, окислителем, а остальные – сложными.

Рассмотрим физико-химические свойства и экологические характеристики этих окислителей. Наиболее важные из них для основных окислителей приведены в приложении (табл. П1).

Жидкий кислород $O_{2ж}$

Это высокоэффективный криогенный окислитель. Он не имеет запаха, в тонких слоях прозрачный и бесцветный, а в толстых слоях приобретает голубоватый цвет. Температура его кипения $T_{кип} = 90 \text{ К}$ (-183°C), плавления $T_{пл} = 46 \text{ К}$ (-227°C), плотность $\rho = 1140 \text{ кг/м}^3$.

Кислород считается нетоксичным газом, но длительное пребывание в его атмосфере не рекомендуется. Контакт с жидким кислородом приводит к обмораживанию.

Кислород не является коррозионно-активным, и поэтому выбор конструкционных материалов не ограничен. Однако в связи с низкой температурой жидкий кислород может вызвать охрупчивание материала, т.е. материал теряет пластичность и его сопротивление нагрузке падает.

Жидкий кислород обладает хорошей текучестью, способен проникать через очень малые зазоры и поэтому является очень хорошим смазывающим материалом для подшипников турбонасосных агрегатов. Динамическая вязкость жидкого кислорода $\eta = 0,189$ мПа·с.

Жидкий кислород является дешевым окислителем, его производят из воздуха по достаточно простой технологии.

К недостаткам жидкого кислорода следует отнести:

1. Большие потери на испарение при хранении и транспортировке. Они составляют 0,3...0,6% объема жидкости в час.

2. Высокое давление насыщенных паров, значительно увеличивающееся с ростом температуры. Поэтому для предотвращения разрушения кислородные баки должны дренироваться в атмосферу.

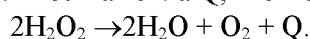
3. Воспламеняемость и взрывоопасность с некоторыми органическими веществами, в том числе с маслами нефтяного происхождения и жирами. В связи с этим все емкости и магистрали для хранения и подачи жидкого кислорода должны тщательно обезжириваться.

Перекись водорода H_2O_2

Стопроцентная перекись водорода представляет собой бесцветную жидкость без запаха с температурами кипения 424 К, плавления 272,3 К, с высокой плотностью 1442 кг/м³ и динамической вязкостью 1,16 мПа·с. Она содержит в своем составе 94% кислорода.

Существенным эксплуатационным недостатком стопроцентной H_2O_2 является ее высокая температура плавления. Последняя может быть несколько понижена за счет разбавления перекиси водой, т.е. понижения её концентрации. Температура плавления 80% перекиси водорода составляет 250,8 К. Однако уменьшение концентрации H_2O_2 сопровождается снижением удельного импульса тяги топлив на её основе.

Вследствие непрочности молекулярных связей перекись водорода склонна к разложению на воду и кислород с выделением значительного количества тепла Q , что можно записать:



Количество выделяющегося тепла зависит от концентрации перекиси водорода.

В присутствии катализатора процесс разложения перекиси водорода сильно ускоряется. Это позволяет использовать ее как однокомпонентное топливо.

В качестве катализатора чаще всего используются перманганат калия или натрия. Каталитическое действие на перекись водорода оказывают также технологическая грязь, органические примеси и некоторые металлы, например свинец, медь, хром и другие. В связи с этим чрезвычайно важным является вопрос подбора конструктивных материалов для работы с перекисью водорода и особенно для её хранения.

Наилучшими конструктивными материалами для работы с перекисью водорода являются чистый алюминий и нержавеющая сталь.

При хранении и транспортировке перекиси необходим постоянный контроль ее состояния.

Перекись водорода слаботоксична. Пары перекиси водорода вызывают слезотечение и ожог глаз, раздражение слизистой оболочки носа, горла, насморк и обильное выделение мокроты. Предельно допустимая концентрация (ПДК) паров перекиси водорода в воздухе рабочей зоны составляет 1 мг/м^3 , ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ) в атмосфере воздуха населенных мест составляет $0,02 \text{ мг/м}^3$ (ГН 2.1.6.696.98). Класс опасности четвертый.

Перекись водорода взрывоопасна и обладает высокой коррозионной активностью.

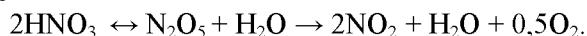
Применение перекиси водорода как окислителя признается перспективным для углеводородных горючих в связи с такими ее качествами как высокая плотность, слабая токсичность, возможность длительного хранения.

Перекись водорода является не только окислителем, но и унитарным топливом, где водород – горючий элемент, а кислород – окислительный элемент.

Азотная кислота HNO₃

Техническая азотная кислота – подвижная жидкость, имеющая окраску от светло-желтой до темно-бурой в зависимости от количества растворенных в ней окислов азота. Обладает специфическим едким запахом. Азотная кислота нашла широкое распространение в качестве окислителя. Ее температура кипения 359 К, плавления 230 К, плотность 1500 кг/м³. Динамическая вязкость азотной кислоты составляет 0,79 мПа·с. Азотная кислота содержит 76% кислорода.

Стопроцентная азотная кислота является неустойчивой и быстро разлагается при комнатной температуре до 98...99%-й по уравнению



После этого процесс разложения замедляется образовавшейся водой.

Серьезным недостатком азотной кислоты является ее высокая коррозионная активность по отношению ко многим конструктивным материалам. Устойчивыми к азотной кислоте являются алюминий и его сплавы, нержавеющие стали, кобальтовые, хромистые и хромоникелевые стали.

Азотная кислота является токсичной. Вдыхание ее паров вызывает раздражение дыхательных путей, головную боль, отек легких и может привести к отравлению со смертельным исходом. При попадании на кожу вызывает сильные долго не заживающие ожоги. Предельно допустимая концентрация максимальная разовая (ПДК_{м.р.}) HNO₃ в атмосфере воздуха населенных мест 0,4 мг/м³, среднесуточная (ПДК_{с.с.}) 0,15 мг/м³, а ПДК в воздухе рабочей зоны 2 мг/м³. Класс опасности у азотной кислоты четвертый.

Азотная кислота абсолютно невзрывоопасная, в пожарном отношении также является безопасной, если нет непосредственного контакта с самовоспламеняющимися веществами. Ее транспортировка и хранение не вызывают особых затруднений. Является дешевой и широко применяется в народном хозяйстве.

Четырехокись азота (азотный тетраоксид) N₂O₄

Азотный тетраоксид представляет собой светло-оранжевую жидкость, переходящую с повышением температуры в бурую с запахом азотной кислоты.

Широко используется в настоящее время в качестве стабильного жидкого ракетного окислителя. Температура кипения азотного

тетроксида 294 К, плавления 262 К, плотность 1440 кг/м³, динамическая вязкость 0,39 мПа·с. Он содержит в своем составе приблизительно 70% кислорода.

Четырехокись азота в несколько раз менее агрессивна к конструкционным материалам, чем азотная кислота. При использовании четырехокси азота применяют те же материалы, что при работе с азотной кислотой.

Четырехокись азота менее токсична. ПДК в воздухе рабочей зоны 5 мг/м³, а в атмосфере воздуха населенных мест ПДК_{м.р} = 0,4 мг/м³, ПДК_{сс} = 0,06 мг/м³.

Азотный тетраоксид невзрывоопасен. Существенным его недостатком является узкий температурный диапазон жидкофазного состояния от -11 до +21°С, что в ряде случаев усложняет эксплуатацию и требует применения термостатирования.

Смеси азотной кислоты HNO₃ и азотного тетраоксида N₂O₄

В качестве азотнокислотных окислителей используются также растворы азотного тетраоксида в азотной кислоте. Широкое распространение получили окислители, содержащие 27 или 20% N₂O₄. Это окислители АК-20 и АК-27. В них улучшены те или иные свойства, присущие исходным продуктам, например, для окислителя АК-20 температуры кипения и плавления составляют соответственно 321 К и 203 К, а удельный импульс тяги на 10...12% выше, чем в случае топлива на основе азотной кислоты.

Из группы сложных окислителей наиболее распространенными являются азотная кислота, азотный тетраоксид и перекись водорода. Эти окислители относятся к категории стабильных или высококипящих компонентов.

2.5. Перспективные окислители

Жидкий фтор F_{2ж}

Жидкий фтор является самым высокоэффективным криогенным окислителем. Это жидкость желтого цвета с резким запахом, похожим на смесь запахов хлора и озона, которая обеспечивает самовоспламенение с любым горючим. Температура его кипения 85 К, плавления 53 К, плотность 1510 кг/м³.

Фтор является чрезвычайно токсичным, что затрудняет его применение, особенно для двигателей первых ступней ракет. ПДК в воздухе рабочей зоны составляет $0,03 \text{ мг/м}^3$, а в атмосфере воздуха населенных мест $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 0,02 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 0,005 \text{ мг/м}^3$. Фтор отнесён ко второму классу опасности. Из-за своей исключительной химической активности поражает кожные покровы, слизистые оболочки, особенно дыхательных путей, и обладает парализующим действием. При сжигании с водородом образует токсичный и коррозионно-активный фтористый водород HF.

Он является также чрезвычайно взрыво- и пожароопасным. Все органические и многие неорганические вещества воспламеняются в присутствии фтора.

Коррозионная активность фтора очень велика, что вызывает сложности при подборе конструкционных материалов для работы с ним. Наиболее стойкими во фторе являются медь, никель, чистый алюминий и некоторые марки нержавеющей стали и бронзы.

Производство фтора достаточно развито в связи с широким применением ряда его производных – фреона, фторопласта и др. Транспортировка и хранение жидкого фтора осуществляются в баках с экранно-вакуумной изоляцией, охлаждаемых жидким азотом. Испаряющийся при хранении фтор направляется в специальные системы конденсации паров фтора. При малых количествах возможна нейтрализация паров фтора.

Моноокись фтора OF₂

В газообразном состоянии моноокись фтора бесцветна, в жидком виде – бело-желтого цвета, очень подвижна и гигроскопична, обладает резким неприятным запахом фтора. Она представляет собой химическое соединение двух активных окислительных элементов – кислорода и фтора, в котором массовая доля фтора составляет 72%.

Моноокись фтора является слабокриогенным окислителем. Температура её кипения 128 К , плавления 49 К , плотность 1520 кг/м^3 . При нагревании до 575 К медленно разлагается на фтор и кислород с малым поглощением тепла.

Моноокись фтора очень токсична, она более токсична, чем чистый фтор. ПДК монооксида фтора в воздухе рабочей зоны составляет $0,01 \text{ мг/м}^3$. Класс опасности второй.

Взрывоопасность и пожароопасность несколько меньше, чем у фтора. Все материалы, пригодные для фтора, могут использоваться с моноокисью фтора.

Трифторид хлора ClF₃

Он представляет собой светло-зеленую жидкость со специфическим запахом, напоминающим запах горчицы. В отличие от перечисленных ранее окислителей имеет высокую температуру кипения 285 К, температуру плавления 190 К, плотность 1810 кг/м³. Трифторид хлора высокотоксическое вещество. Он оказывает очень сильное действие на кожу, глаза и особенно на дыхательные пути. ПДК трифторида хлора в воздухе рабочей зоны составляет 0,01 мг/м³. Класс опасности второй.

Взрыво- и пожароопасность при работе с трифторидом хлора очень высоки. Практически он воспламеняется при контакте со всеми органическими материалами, причем в ряде случаев – со взрывом. Небольшая добавка его к другому окислителю гарантирует надежное самовоспламенение топлива в условиях космического пространства. При реакции его с водой происходит очень сильный взрыв. При работе с трифторидом хлора категорически запрещается использовать стекло, так как всякий контакт с ним вызывает взрыв.

Коррозийная активность трифторида хлора несколько меньше, чем чистого фтора, и поэтому при работе с ним могут использоваться дополнительно такие материалы как магний, цинк, олово, свинец, кальций и некоторые другие.

2.6. Основные применяемые горючие и их свойства

Основными широко применяемыми в ЖРТ горючими являются: водород H₂, керосин C_{7,21}H_{13,29}, гидразин N₂H₄, несимметричный диметилгидразин (CH₃)₂N–NH₂, аэрозин –50, тонка, этиловый спирт C₂H₅OH. Водород является простым горючим, а все остальные – сложными.

Рассмотрим физико-химические свойства, экологические и эксплуатационные характеристики этих горючих. Наиболее важные из них для основных горючих приведены в приложении (табл. П2).

Жидкий водород Н_{2ж}

Он представляет собой бесцветную жидкость без запаха с высокой степенью криогенности. Его температура кипения 20,4 К, плавления 14 К, т.е. в жидком состоянии он находится в диапазоне шесть градусов. Плотность жидкого водорода очень низкая и составляет 71 кг/м³. Это является одним из главных недостатков его как горючего. Динамическая вязкость $0,136 \cdot 10^{-3}$ мПа·с.

Водород является высокоэффективным жидкий горючим. Его удельная массовая теплота сгорания в 2,6 раза выше, чем у керосина. Он обеспечивает получение очень высоких значений идеального удельного импульса тяги топлив на его основе.

Необходимо отметить также способность водорода сжиматься при увеличении давления, хотя обычно жидкости несжимаемы. Изменение его объема приблизительно отвечает уравнению Клапейрона-Менделеева $pV = RT$. Сжимаемость водорода приводит к определенным трудностям при создании насосов ТНА. Их приходится выполнять многоступенчатыми.

К другим недостаткам жидкого водорода относятся:

- Большие потери на испарение.

При заливке водорода в топливные баки происходит испарение первых порций, равных 1,0-1,5 объема заливаемой емкости. Далее идет нормальное испарение, составляющее 3% объема в час. Кроме того, при заправке жидкого водорода баки должны быть тщательно очищены от посторонних примесей, влаги и воздуха. Воздух, особенно влажный, почти мгновенно конденсируется и застывает. Образовавшиеся твердые частицы могут закупорить трубопроводы и повредить ТНА. В связи с этим перед заправкой топливных баков их предварительно вакуумируют.

- Повышенная пожароопасность и взрывоопасность.

Испаряющийся водород образует с кислородом и воздухом легковоспламеняющиеся смеси в широком диапазоне концентраций. Например, массовые доли водорода в смеси с воздухом составляют от 12 до 84%. Водород горит бесцветным пламенем, что создает значительную опасность контакта с ним.

Жидкий водород не обладает коррозионной активностью по отношению к конструкционным материалам, но может вызвать разрушение материала за счет его охрупчивания из-за очень низкой температуры. Кроме того, при работе с жидким водородом может

происходить "наводораживание" материала, т.е. проникновение молекул водорода в кристаллическую решетку материала. Для конструктивных материалов глубина наводораживания составляет 4...6 мм, а при их нагартовке –1,5...2,0 мм. Это отрицательное явление, ухудшающее свойства материала.

Водород не токсичен. Он вызывает значительные ожоги при контакте по причине сильного замораживания тканей.

Несмотря на ряд отрицательных свойств, жидкий водород находит все большее распространение в качестве горючего современных ЖРД вторых и верхних ступеней ракет.

Керосин $C_{7,21}H_{13,29}$

Керосин – углеводородное горючее, представляющее собой смесь индивидуальных углеводородов, получаемых при перегонке нефти. Это прозрачная желтовато-зеленая жидкость с характерным запахом. Он нашел широкое применение в современных ракетных двигателях.

Температура кипения керосина 420...550 К, плавления 213 К, средняя плотность 820...850 кг/м³ в зависимости от его марки. Динамическая вязкость керосина составляет примерно 1,5 мПа·с.

Керосин обеспечивает получение высокого удельного импульса тяги со многими окислителями, например, с жидким кислородом.

Керосин является слаботоксичным, ПДК его паров в воздухе рабочей зоны составляет 300 мг/м³, ориентировочный безопасный уровень воздействия в атмосфере воздуха населенных мест составляет 1,2 мг/м³. Керосин относится к четвертому классу опасности.

Имеет относительно невысокую пожаро- и взрывоопасность. Но из-за большой летучести его паров и при наличии мелких брызг могут образовываться с воздухом опасные, легко воспламеняющиеся смеси.

Керосин является дешевым горючим, хорошо хранится и является удовлетворительным охладителем. В то же время следует отметить, что стабильность керосина при длительном хранении и его охлаждающие свойства, т.е. отсутствие коксообразования, в значительной степени зависят от состава керосина. Эти качества ухудшаются, если в керосине содержатся парафинистые углеводороды и сера. Для получения ракетных керосинов применяются соответствующие сорта нефти и специальная технология ее переработки.

Керосин не обладает коррозионной активностью, поэтому не имеет ограничений по использованию конструкционных материалов. Однако при наличии в керосине воды, сернистых соединений или органических кислот его коррозионная активность становится заметной, особенно по отношению к алюминиевым сплавам и стали в присутствии меди, латуни, свинца.

В настоящее время проводятся широкие исследования и начато применение синтетических углеводородных горючих, обладающих улучшенными по сравнению с керосином свойствами: повышенным удельным импульсом, плотностью и термостабильностью.

Гидразин N_2H_4

Гидразин представляет собой в нормальных условиях бесцветную маслянистую жидкость, дымящуюся на воздухе и имеющую запах, слабо напоминающий запах аммиака. Он гигроскопичен, при нагревании распадается на смесь азота, водорода и аммиака. Разлагается под действием облучения и легко поддается каталитическому разложению, поэтому гидразин используется также в качестве унитарного топлива.

Температура кипения гидразина 386,5 К, плавления 274,6 К, плотность 1009 кг/м³, динамическая вязкость 0,91 мПа·с.

Гидразин является стабильным горючим, допускающим длительное хранение. Он самовоспламеняется со всеми азотно-кислотными окислителями и окислителями на основе фтора.

Гидразин очень токсичен. Длительное воздействие его паров на глаза вызывает их сильное раздражение и даже проходящую слепоту. Состояние отравления гидразином проявляется только через несколько часов. Признаки такого отравления – продолжительная жировая инфильтрация печени, поражение почек и иногда анемия. ПДК паров гидразина в воздухе рабочей зоны составляет 0,1 мг/м³. Гидразин отнесен к первому классу опасности.

Гидразин и его следующие ниже производные очень гигроскопичны, поэтому следует применять меры, исключающие их контакт с воздухом.

Несимметричный диметилгидразин $H_2N - N(CH_3)_2$

Несимметричный диметилгидразин (НДМГ) представляет собой при обычных условиях бесцветную высокोगигроскопичную жидкость с запахом аммиака. Он получается действием азотной кислоты на солянокислый диметиламин в присутствии водорода.

Температура кипения НДМГ 335 К, плавления 216 К, плотность равна $791,4 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $0,51 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

НДМГ достаточно стойкое и стабильное вещество, способное к термическому разложению.

Коррозионная активность его невелика, с ним нормально работают стали, алюминий и его сплавы, титан. Сплавы меди применять не рекомендуется.

При повышенном давлении контакт НДМГ с кислородом воздуха может привести к взрыву, поэтому для надува баков следует применять инертные газы. При контакте с воздухом НДМГ медленно окисляется даже при комнатной температуре.

Токсичность НДМГ высока и последствия отравления очень тяжелы. Возможна почти полная потеря работоспособности при слабом отравлении и расстройство деятельности нервной системы при более сильных отравлениях. Токсичное действие НДМГ может передаваться через одежду. ПДК паров НДМГ в воздухе рабочей зоны составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$. Класс опасности первый.

Монометилгидразин $\text{H}_2\text{N} - \text{N}(\text{CH}_3)$

Монометилгидразин представляет собой бесцветную, прозрачную и подвижную жидкость. Температура его кипения 360 К, плавления 220,6 К, плотность 870 кг/м^3 , динамическая вязкость $0,78 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Монометилгидразин обладает хорошей стабильностью и большой летучестью. По своим свойствам монометилгидразин мало отличается от НДМГ.

Взрывоопасен, в пожарном отношении значительно опаснее гидразина и несимметричного диметилгидразина.

Монометилгидразин высокотоксичен. Характер воздействия на организм человека и признаки отравления аналогичны НДМГ. ПДК паров монометилгидразина в воздухе рабочей зоны составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$. Он относится к первому классу опасности.

Коррозионная активность незначительна. Выбор конструкционных материалов для работы с монометилгидразином тот же, что и для НДМГ.

Аэрозин-50

В состав аэрозина-50 входит по массе 50% гидразина и 50% несимметричного диметилгидразина. Использование такой смеси вызвано рядом практических соображений. Энергетические показате-

ли и плотность чистого гидразина выше, чем у двух его производных, однако он обладает очень высокой температурой плавления (271,3 К). Температура плавления аэрозина-50 составляет 265,7 К.

Токсичность аэрозина-50 одинакова с гидразином и НДМГ.

Тонка

Тонка представляет собой смесь по массе 50% триэтиламина ($C_2H_5)_3N$ и 50% ксилидина $C_6H_3(CH_3)_2NH_2$. Это маслянистая прозрачная жидкость желтоватого цвета. При длительном хранении приобретает буроватый оттенок. Имеет характерный запах, напоминающий запах аммиака.

Тонка имеет хороший диапазон температур жидкофазного состояния. Её температура кипения 362 К, плавления 203 К, плотность 847 кг/м³.

Она обеспечивает надежное самовоспламенение с азотно-кислотными окислителями.

Тонка является стойкой жидкостью при хранении в герметичных условиях. Коррозионная активность средняя, но практически для сталей, алюминия и его сплавов ограничений нет, не следует применять медь и латунь.

Является дешевой, применяется в основном на ракетах ближнего действия.

Токсичность тонки выше, чем исходных её продуктов. Она является сильным ядом, действующим на кровь и центральную нервную систему. Её действие избирательно. Тонка несколько сильнее действует на мужчин, чем на женщин. ПДК её паров в воздухе рабочей зоны 3 мг/м³, а в воздухе населенных мест ПДК_{м.р} = 0,14 мг/м³, ПДК_{с.с} = 0,14 мг/м³. Класс опасности третий.

Этиловый спирт C₂H₅ОН

Он представляет собой прозрачную легкоподвижную высококипящую жидкость с алкогольным запахом. В качестве горючего ЖРТ используются водно-спиртовые смеси 96% и более низкой концентрации.

Температура кипения этилового спирта 351,3 К, с увеличением концентрации она увеличивается до 373 К, плавления 158,6 К, плотность 785 кг/м³, динамическая вязкость 1,40 мПа·с.

Этиловый спирт является хорошим охладителем, он коррозионно не активен с большинством конструкционных материалов.

Этиловый спирт слаботоксичен. ПДК его паров в воздухе рабочей зоны составляет 1000 мг/м^3 , а в атмосфере воздуха населенных мест $\text{ПДК}_{\text{м.р}} = 5 \text{ мг/м}^3$. Класс опасности четвертый.

2.7. Перспективные горючие

Жидкие метан CH_4 , пропан C_3H_8 и этан C_2H_6

Это стабильные слабо криогенные углеводородные горючие. Наиболее перспективным из них, особенно в паре с кислородом, является метан.

Температура кипения метана 112 К , плавления 91 К , что существенно снижает остроту проблемы охрупчивания конструкционных материалов при их контакте с горючими, плотность 420 кг/м^3 , динамическая вязкость $0,098 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Хранение этих углеводородных горючих возможно под давлением собственных паров, при этом суточные потери составляют около $0,2\%$ по массе.

Низшая массовая теплота сгорания данных горючих на $5\dots 6\%$ выше теплоты сгорания керосина, однако из-за малой плотности ($\rho = 420\dots 580 \text{ кг/м}^3$) их объемная теплота сгорания ниже, что требует увеличения объема топливных баков на летательном аппарате.

Пары криогенных углеводородных горючих оказывают слабое токсическое воздействие на организм человека. При высоких концентрациях в воздухе могут вызвать отравление. Ориентировочный безопасный уровень воздействия в атмосфере воздуха населенных мест составляет 50 мг/м^3 . Класс опасности четвертый. Содержание вредных примесей в продуктах сгорания этих горючих меньше, чем в продуктах сгорания керосина, что позволяет считать их достаточно чистыми в экологическом плане.

Жидкий метан является хорошим охладителем и позволяет получать восстановительный генераторный газ, не содержащий конденсированной фазы.

В качестве горючего могут применяться не только указанные выше чистые вещества, но и сжиженный природный газ, представляющий собой смесь из нескольких газов. Содержание метана в нем составляет по массе не менее 76% .

Пентаборан B_5H_9

Пентаборан представляет собой бесцветную достаточно стабильную жидкость без запаха. Он позволяет получать высокое значение идеального удельного импульса тяги, но при течении продуктов сгорания по соплу из-за выпадения конденсированной фазы действительный удельный импульс снижается.

Температура плавления пентаборана 227 К, кипения 335 К, плотность 620 кг/м^3 , динамическая вязкость $0,32 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Очень токсичен, ПДК его паров в воздухе рабочей зоны составляет 1000 мг/м^3 , отнесен ко второму классу опасности.

Пентаборан является плохим охладителем из-за способности разлагаться при нагреве. Взрыво- и пожароопасен, при контакте с воздухом может самовоспламениться. Обладает низкой коррозионной активностью по отношению к конструкционным материалам и поэтому не имеет ограничений по применению сталей, бронз, алюминия и его сплавов.

По группе бороводородных горючих сейчас проводятся исследовательские работы в направлении поиска подходящих окислителей и режимов работы, позволяющих достигать этим топливам высокого идеального удельного импульса тяги.

2.8. Характеристики основных применяемых топлив

Произвольное сочетание в ЖРТ рассмотренных выше окислителей и горючих является недопустимым. Это может привести к неудовлетворительным, энергетическим и эксплуатационным характеристикам топлив.

В табл. 1 представлены свойства продуктов сгорания различных топлив, используемых в современных двигателях или являющихся перспективными, при давлении в камере сгорания $p_k = 15 \text{ МПа}$, степени расширения рабочего тела в сопле $\varepsilon = 300$ и оптимальном для получения максимального удельного импульса соотношении компонентов топлива. Эти условия достаточно характерны для двигателей первых ступеней ракет. Их анализ позволяет сделать вывод об эффективности основных окислителей и горючих.

Из таблицы видно, что окислители по возрастанию эффективности располагаются в следующей последовательности: HNO_3 ,

N_2O_4 , $O_{2ж}$, $F_{2ж}$, а горючие – в следующей: керосин, НДМГ, B_5H_9 , $H_{2ж}$.

Таблица 1
Термодинамические характеристики некоторых топлив современных ЖРД при $p_k = 15$ МПа и $\varepsilon = 300$

Горючее	Окислитель	$\alpha_{ок}$	K_m	T_k , К	$I_{у.н.ид}$, м/с	ρ_t , г/см ³
Керосин	HNO_3	0,70	3,757	2914	2870	1,285
Керосин	АК-20	1,00	5,370	3200	3029	1,384
Керосин	$O_{2ж}$	0,80	2,726	3799	3475	1,036
НДМГ	АК-20	1,00	3,368	3204	3123	1,283
НДМГ	N_2O_4	0,95	2,919	3516	3291	1,189
НДМГ	$O_{2ж}$	0,90	1,923	3799	3586	0,988
$H_{2ж}$	$O_{2ж}$	0,70	5,556	3483	4378	0,345
$H_{2ж}$	$F_{2ж}$	0,80	15,08	4971	4616	0,670
B_5H_9	$O_{2ж}$	0,70	2,128	4215	3751	0,898

В настоящее время наибольшее распространение получили на практике лишь три следующих топлива:

1. НДМГ и N_2O_4 ;
2. Керосин и $O_{2ж}$;
3. $H_{2ж}$ и $O_{2ж}$.

Первое топливо является эффективным по удельному импульсу тяги и плотности. Оно стабильно и относится к категории долгохраняемых, поэтому может использоваться на ракетах, которые должны находиться длительное время в заправленном состоянии. Это требование, как известно, является основным для боевых ракет. Применение вместо N_2O_4 более эффективного окислителя жидкого кислорода приведет к снижению боеготовности ракеты и повышению потерь окислителя на испарение в процессе заправки ракеты и её подготовки к запуску.

В топливе НДМГ и N_2O_4 вместо НДМГ могут использоваться монометилгидразин или азрозин-50, имеющие близкие к НДМГ характеристики.

Высокая токсичность как горючего, так и окислителя в данном топливе является значительным его недостатком, который, однако,

не стал решающим для запрета его применения в ЖРД боевых ракет.

Следующие два топлива нашли широкое распространение на ракетах-носителях или космических ракетах. Они обладают высоким идеальным удельным импульсом тяги и являются либо слаботоксичными, либо нетоксичными. Топлива приемлемы и с точки зрения экологической безопасности. Нестабильность их не играет решающей роли, поскольку заправка космических ракет производится к определенному времени старта ракеты.

Топливо водород и кислород обеспечивает очень высокий удельный импульс, но из-за малой плотности его трудно использовать на первых ступенях ракет. Двигатели этих ступеней работают, как правило, на топливе керосин и кислород, а двигатели верхних ступеней – на топливе водород и кислород.

Применение фтора вместо кислорода резко ухудшает эксплуатационные характеристики ракетной системы из-за его большой токсичности и значительной экологической опасности. Отрицательным фактором является также значительная величина температуры продуктов сгорания в камере.

2.9. Однокомпонентные ЖРТ

В ЖРД и ЖРДМТ наряду с двухкомпонентными топливами нашли применение и однокомпонентные ЖРТ. Их по типу протекающей химической реакции можно подразделить на две следующие группы:

1. Топлива, в которых горючее и окислитель объединены в одном жидком веществе в виде раствора химических соединений или устойчивой эмульсии. Это унитарные топлива.

2. Топлива, представляющие собой устойчивые вещества, способные под воздействием повышенных температур или катализатора экзотермически разлагаться, образуя газообразное высокотемпературное рабочее тело.

Однокомпонентные ЖРТ характеризуются однородностью состава и, значит, постоянством основных термодинамических и теплофизических свойств образующихся продуктов сгорания или разложения. Это обеспечивает постоянство идеальных параметров двигателя, таких как тяга и удельный импульс тяги.

При использовании однокомпонентного топлива можно существенно упростить систему подачи топлива и снизить массу ракетного двигателя по сравнению с двигателем, работающим на двухкомпонентном топливе.

Унитарные топлива не получили широкого распространения из-за присущей им значительной взрывоопасности при достаточно высоком идеальном удельном импульсе тяги.

Из унитарных топлив распространение получили нитрометан CH_3NO_2 , нитроглицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$, растворы в азотной кислоте или четырехоксида азота тетранитрометана и растворы других окислителей с горючими.

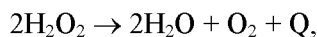
Нитрометан представляет собой высокоэффективное унитарное топливо. Это прозрачная жидкость с желтоватым оттенком, которая получается нитрованием метана. Его температура кипения 383 К, плавления 244 К, плотность 1130 кг/м^3 .

Нитрометан взрывоопасен, очень чувствителен к удару. Коррозионно малоактивен. Стабилен при температурах не выше 323 К, может длительно храниться и перевозиться в стальных бочках.

Он слабо токсичен и относится к четвертому классу опасности. ПДК его паров в воздухе рабочей зоны составляет 30 мг/м^3 .

Из однокомпонентных ЖРТ получили распространение перекись водорода H_2O_2 и гидразин N_2H_4 , которые способны разлагаться в присутствии соответствующего катализатора на высокотемпературные газообразные продукты. Для перекиси водорода в качестве катализатора широко применяется перманганат калия KMnO_4 .

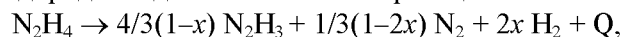
Экзотермическая реакция разложения перекиси водорода записывается



где Q – выделившееся тепло.

При разложении одного килограмма 98%-й перекиси водорода образуется $3,8 \text{ м}^3$ газообразных продуктов с температурой 1239 К. При истечении их из сопла с $\epsilon = 1000$ идеальный удельный импульс в пустоте составляет 1830 м/с.

Гидразин разлагается в присутствии катализатора на аммиак, азот и водород с выделением тепла по реакции



где x – степень разложения аммиака, показывающая количественно в продуктах разложения N_2 и H_2 .

Из одного килограмма гидразина образуется примерно $2,9 \text{ м}^3$ газа с температурой 1635 К , который создает идеальный удельный импульс в пустоте 2563 м/с при $\varepsilon = 1000$. В качестве катализатора используется таблетированная пористая окись алюминия Al_2O_3 с площадью поверхности до $160 \text{ м}^2/\text{г}$, пропитанная иридием.

Перекись водорода и гидразин широко применяются в ЖРДМТ системы управления космическими аппаратами. Для маршевых двигателей большой тяги эти топлива являются малопригодными из-за сравнительно низкого удельного импульса тяги.

2.10. Пути совершенствования жидких ракетных топлив и перспективные топлива

Несмотря на то, что сейчас уже освоены наиболее эффективные жидкие компоненты, такие как водород, кислород и др., исследовательские работы по совершенствованию жидких ракетных топлив ведутся постоянно в двух основных направлениях:

- улучшение эксплуатационных характеристик;
- повышение энергетических характеристик топлив.

В работах первого направления большое внимание уделяется поиску мероприятий по снижению потерь на испарение криогенных компонентов, которые, как об этом уже говорилось, обладают очень высокими энергетическими характеристиками.

Существенное уменьшение потерь на испарение криогенных компонентов достигается за счет их переохлаждения, при котором температура компонента устанавливается ниже температуры его кипения. Например, температура кипения жидкого кислорода равна 90 К , а он переохлаждается до температуры $85 \dots 87 \text{ К}$ и при этой температуре перевозится, хранится и используется.

Переохлаждение криогенных компонентов топлива может осуществляться:

- применением теплообменников и использованием в них другой криогенной жидкости, имеющей более низкую температуру кипения, например, жидкий кислород переохлаждают жидким азотом, температура кипения которого равна 77 К ;
- применением постороннего холодильного цикла;

- барботированием криогенной жидкости охлажденным газом, имеющим более низкую температуру кипения, например гелием, у которого температура кипения равна 4 К.

Переохлаждение выгодно еще и тем, что при этом повышается плотность компонента.

Проводятся интенсивные работы по использованию в качестве горючего для ЖРД шугообразного водорода, который представляет собой смесь жидкого и твердого водорода в равных долях по массе (50% жидкого и 50% твердого).

Для получения шуги достаточно переохладить водород на 0,7 градуса. В переохлажденном водороде происходит "старение" шуги, которое продолжается 15...17 часов. При этом шуга, являющаяся вначале пористой и имеющая неправильную форму твердых частиц, уплотняется, и твердые частицы водорода приобретают шарообразную форму. Диаметр этих круглых частиц находится в пределах от 0,5 до 6 мм.

Шуга не ухудшает текучести водорода, но в то же время и не приводит к повышению теоретического удельного импульса тяги топлив на его основе. Плотность шугообразного водорода достигает 87 кг/м^3 , в то время как у жидкого водорода она составляет 70 кг/м^3 . Одновременно возрастает охлаждающая способность горючего. Указанные два фактора позволяют улучшить характеристики летательного аппарата. Так, например, проведенные в США исследования показали, что использование шугообразного водорода в качестве горючего для воздушно-космического аппарата NASP позволяет за счет увеличения плотности на 16% и охлаждающей способности на 18% уменьшить стартовую массу аппарата на 30%.

Потери шугообразного водорода из баков составляют 0,44% начального объема в час, в то время как для жидкого водорода они равны примерно 3%.

В научных исследованиях, направленных на совершенствование эксплуатационных характеристик топлив, значительное внимание уделяется также улучшению их экологических характеристик. Работают над созданием эффективных нетоксичных долго хранимых топлив для боевых ракет взамен штатного ракетного топлива – несимметричный диметилгидразин и азотный тетраоксид.

Ведутся работы по внедрению в практику ракетного двигателестроения вместо керосина сжиженных метана, этана и пропана. Ранее отмечалось, что в продуктах их сгорания с кислородом имеется

меньше вредных веществ. Эти горючие дешевы, сырьевая база практически не ограничена.

Существенным недостатком этих горючих является пониженная по сравнению с керосином плотность, что требует большего объема баков.

Для сравнения и анализа в табл. 2 приведены термодинамические характеристики топлив керосин $C_{7,21}H_{13,29}$ и жидкий кислород $O_{2ж}$, жидкий этан C_2H_6 и жидкий кислород $O_{2ж}$, при оптимальном соотношении компонентов, давлении в камере сгорания 10 МПа и степени расширения газа в сопле 1000, характерных для двигателей верхних ступеней ракет.

Таблица 2

Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания ЖРТ керосин и кислород, этан и кислород

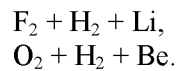
Горючее	Окислитель	$\alpha_{ок}$	K_m	$T_{oc},$ К	$I_{у.н.и\delta},$ м/с	$\rho_T,$ г/см ³
Керосин	$O_{2ж}$	0,9	3,067	3754	3654	1,061
Этан	$O_{2ж}$	0,9	3,352	3686	3733	0,910

Второе направление исследований по совершенствованию жидких ракетных топлив заключается в улучшении их энергетических характеристик, т.е. повышение идеального удельного импульса тяги.

Для достижения максимального значения идеального удельного импульса тяги ракетные топлива должны иметь высокую температуру торможения продуктов сгорания на входе в сопло T_{oc} и низкую их молярную массу, так как приближенно с погрешностью 10...20% имеем

$$I_{у.н.и\delta} = 260 \cdot \sqrt{\frac{T_{oc}}{\mu_c}}$$

Существенное увеличение удельного импульса может быть получено путем использования *трехкомпонентных топлив*. При этом третьим компонентом могут служить легкие металлы и, в первую очередь, алюминий, бериллий, бор и литий. Наилучшими характеристиками обладают следующие трехкомпонентные топлива:



Данные по этим топливам в сравнении с высокоэффективными двухкомпонентными топливами кислород и водород, озон и водород приведены в табл. 3 при давлении в камере сгорания 10 МПа и степени расширения рабочего тела в сопле 1000.

Таблица 3

Термодинамические характеристики некоторых
трехкомпонентных топлив в сравнении с
высокоэффективными двухкомпонентными

Горючее	Окис- литель	$\alpha_{ок}$	K_m	$T_{ос},$ К	$I_{у.н.ид},$ м/с	$\rho_{г},$ г/см ³
55%Н ₂ +45%Li	F _{2ж}	0,1	1,160	2430	5144	0,230
50%Н ₂ +50%Be	O _{2ж}	0,2	0,971	2888	5287	0,241
Н _{2ж}	O _{2ж}	0,7	5,556	3448	4545	0,345
Н _{2ж}	O _{3ж}	0,6	4,762	3565	4931	0,327

Количество подмешиваемого металлического горючего подбиралось из условия получения наибольшего значения идеального удельного импульса тяги. Для трехкомпонентных ракетных топлив с использованием водорода оптимальное соотношение компонентов такое, при котором окислитель расходуется в основном на стехиометрическое сгорание металла, а водород лишь нагревается до высокой температуры и, благодаря большой газовой постоянной, позволяет получать высокие значения идеального удельного импульса тяги.

Применение трехкомпонентных топлив в РД ставит ряд проблем, одной из которых является необходимость хранения и подачи металлического горючего в камеру сгорания. Расход металла должен находиться в строгом соответствии с расходом других компонентов, а эпюра расходонапряженности в поперечном сечении камеры должна быть равномерной. Металл должен быть тонко измельчен, размер его частичек находиться в пределах 0,8...3,0 мкм.

Если металл помещать в виде порошка в бак с жидким горючим, то он станет оседать, подача компонентов в камеру будет неравномерной и нарушится требуемое соотношение компонентов.

В некоторых случаях этот недостаток устраняется за счет применения гелеобразных топлив. Они решают задачи создания хранимой однородной суспензии металлов в жидких компонентах топлива, увеличения срока хранения криогенных компонентов в космическом пространстве, улучшения эксплуатационных характеристик топлив.

Гелируют жидкие топлива введением в них специальных добавок. Обычно используют химически активные или механические гелеобразователи.

В статических условиях при небольших нагрузках и умеренных температурах гель ведет себя подобно твердому телу. Его течение начинается после приложения сдвиговых напряжений, достаточных для разрушения структуры. После снятия нагрузки происходит восстановление разрушенной структуры в результате столкновения частиц в броуновском движении. Это свойство геля разрушаться при сдвиге и вновь восстанавливаться в статических условиях называется тиксотропией.

В качестве примера гелеобразного компонента можно назвать алюминизин. Его состав в массовых долях следующий: гидразина – 65,5%, алюминия – 33%, гелирующей добавки (модифицированной полиакриловой кислоты) – 0,5%. Плотность такого горючего по сравнению с гидразином повышается с 1000 кг/м^3 до 1270 кг/м^3 . Одновременно возрастает его низшая массовая теплота сгорания.

Второй способ подачи металлического компонента в камеру сгорания заключается в использовании метода псевдооживления топлива.

Псевдожидкий компонент состоит из порошкообразного вещества, которое флюидизируется газом высокого давления и подается подобно кипящей жидкости в камеру сгорания через специальные форсунки. Трудность реализации этого метода заключается в усложнении конструкции двигателя и в необходимости создания системы подачи порошкообразного компонента с чрезвычайно высоким входным давлением, потому что давление в камерах сгорания современных ЖРД достаточно высоко и находится в диапазоне $7,0 \dots 25,0 \text{ МПа}$.

В перспективе для повышения удельного импульса рассматривается также возможность использования в качестве окислителя жидкого озона O_3 . Температура его кипения 162 К , плавления 22 К , плотность 1460 кг/м^3 .

Термодинамические характеристики топлива озон и водород приведены в табл. 3. Видно, что удельный импульс тяги этого топлива примерно на 8% превышает удельный импульс топлива водород и кислород при незначительно меньшей плотности.

Озон обладает очень высокой реакционной способностью, поэтому значительные трудности возникают с подбором конструктивных материалов. Допустимо применение чистого алюминия и его сплавов, титана, нержавеющей сталей.

Жидкий озон очень взрывоопасен и токсичен. По токсичности он близок к фтору. В связи с этим практическое применение его зависит, прежде всего, от решения вопросов, связанных с хранением, перевозкой и перекачкой жидкого продукта.

Получают озон из кислорода под действием слабого электрического разряда.

Идеальным ракетным топливом является атомарный водород. При протекании реакции рекомбинации атомов водорода в молекулу



выделяется тепловая энергия, позволяющая обеспечить идеальный удельный импульс в пустоте $I_{y.n.uo} = 16000$ м/с.

Атомарный водород получают путем продувания молекулярного водорода через высокотемпературный разряд, затем его сразу конденсируют при температуре жидкого гелия. Для стабилизации атомарного водорода необходимо сильное магнитное поле, которое ориентирует спины электронов атомов водорода в одном и том же направлении и таким образом предупреждает рекомбинацию с образованием молекул при его хранении.

Работы по применению атомарного водорода в ракетных двигателях еще не вышли в настоящее время за рамки научных исследований.

3. ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

Твердое ракетное топливо (ТРТ) состоит из веществ, содержащих в своем составе как горючие, так и окислительные элементы, способные вступать в экзотермическую окислительно-восстановительную реакцию, реакцию горения.

Весь запас топлива, необходимый для выполнения программы полета, размещается в камере сгорания ракетного двигателя в виде одного или нескольких блоков, называемых зарядом. Заряд может быть либо свободно вложенным в камеру, либо прочно скрепленным с ее стенками. В первом случае для фиксации заряда предусматриваются различные удерживающие устройства – диафрагмы, решетки, ребра, колосниковые решетки.

Воспламенение заряда ТРТ при запуске двигателя осуществляется воспламенителем. Задача воспламенителя – поднять давление в камере сгорания до необходимой величины, обеспечивающей стабильное горение ТРТ, и прогреть поверхность заряда до температуры воспламенения.

Поверхности заряда ТРТ, не предназначенные для горения, покрываются специальным составом, т.е. бронируются.

Массовый расход топлива или приход образующихся при горении заряда продуктов сгорания зависит от плотности топлива, скорости его горения и площади поверхности горения.

По физической структуре ТРТ делятся на два основных класса:

- *двухосновные* или *гомогенные*;
- *смесевые* или *гетерогенные*.

Основные требования являются одинаковыми для топлив обоих классов.

3.1. Требования к твердым ракетным топливам

Требования к ТРТ обусловлены необходимостью создания в минимальные сроки ракеты, обладающей высокой надежностью, минимальной стартовой массой и габаритами при заданной массе полезной нагрузки, дальности полета и эксплуатационных условиях.

Все предъявляемые к ТРТ требования можно подразделить на следующие четыре группы.

3.1.1. Требования к энергетическим характеристикам

Эти требования следующие:

1. Высокое значение идеального удельного импульса тяги или массовой теплоты сгорания топлива.

Настоящее требование рассматривается как основное. Оно определяет экономичность работы двигателя.

2. Большая плотность топлива.

Она позволяет уменьшать массу и габариты РДГТ, поскольку все необходимое для выполнения программы полета топливо размещается в камере сгорания двигателя. Плотность освоенных ТРТ находится в пределах 1400...1900 кг/м³.

Требования повышения идеального удельного импульса тяги и плотности топлива определяют основные направления разработок новых ТРТ.

3.1.2. Требования к внутрибаллистическим характеристикам

1. Получение требуемой скорости горения топлива.

Скорость горения является важнейшей характеристикой ТРТ, определяющей характер внутрикамерных процессов и уровень основных параметров РДГТ. В зависимости от назначения двигателя могут ставиться требования получения как высокой, так и низкой скорости горения при номинальном давлении в камере сгорания. Высокая скорость горения необходима для двигателей, создающих большую тягу в течение короткого времени, например, для антиракет и ракет перехвата систем противоракетной обороны. Требования малой скорости горения возникают в случае необходимости иметь большое время работы двигателя.

2. Обеспечение устойчивого горения заряда ТРТ в заданном диапазоне изменения давления в камере сгорания, особенно при достаточно низком давлении.

3. Минимальная зависимость скорости горения от давления и начальной температуры заряда во всем эксплуатационном диапазоне значений этих параметров.

4. Надежное воспламенение топлива при запуске двигателя.

5. Хорошая воспроизводимость характеристик топлива и, в первую очередь, минимальный разброс скорости горения ТРТ одного состава или одной партии.

3.1.3. Требования к физико-механическим свойствам

1. ТРТ должно позволять создавать заряды необходимой конфигурации, сохранять зарядам заданную форму и сплошность при их хранении, воспламенении и горении.

2. Топлива, используемые для изготовления скрепленных с корпусом двигателя зарядов, должны быть достаточно эластичными, чтобы не происходило разрушения заряда под действием термических напряжений или при деформации их вместе с корпусом под действием давления в камере и полетных нагрузок.

Это требование возникает в связи с тем, что коэффициент теплопроводности ТРТ примерно в сто раз меньше, чем стали. Поэтому топливо хорошо защищает стенки камеры от перегрева, но в то же время оно подвержено опасным термическим напряжениям при изменении окружающей температуры и механическим напряжениям из-за разности коэффициентов линейного расширения ТРТ и корпуса.

3. Должно быть исключено растрескивание заряда при его транспортировке или хранении в изменяющихся внешних условиях, а также при воспламенении и горении, когда заряд подвергается тепловому удару и действию больших градиентов давления.

3.1.4. Экономические и эксплуатационные требования

1. Должна обеспечиваться стабильность физико-механических, внутрибаллистических и энергетических свойств ТРТ в условиях длительного хранения и эксплуатации.

Стабильность характеристик топлива определяет гарантийный срок его хранения, который может достигать 15...20 лет. При этом лимитирующими могут быть как физические, так и химические процессы в топливе. Физические проявляются в пластических деформациях, диффузии, образовании трещин, а химические – в раз-

ложении топлива в результате медленно протекающих окислительных реакций. Причем продукты разложения, накапливаясь, ускоряют процесс разложения. Для замедления процесса разложения в топливо вводят специальные вещества – *стабилизаторы*, которые повышают его химическую стойкость. Кроме того, они химически связывают выделяющиеся продукты разложения.

2. Требования служебной безопасности сводятся к тому, что заряды ТРТ не должны:

- возгораться при непродолжительном нахождении в пламени;
- детонировать при падении на жесткое основание и при простреле пулями и осколками снарядов;
- подвергаться разрушительному воздействию микроорганизмов, таких как плесень, грибки и т.п.

3. ТРТ и продукты их сгорания должны быть малотоксичными и экологически безопасными.

4. В продуктах сгорания должно быть пониженное содержание или отсутствие дымовых частиц.

Данное требование особенно важно для двигателей тактических ракет.

5. ТРТ должны быть недефицитными и недорогими.

6. Сырьевая база для изготовления ТРТ должна быть достаточно развитой, а технология изготовления – несложной и не дорогостоящей, допускающей серийное производство в необходимых масштабах.

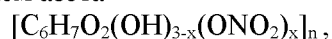
Анализируя все перечисленные требования, можно прийти к выводу, что некоторые из них являются противоречивыми. Поэтому выбор топлива производится в соответствии с условиями будущего применения двигателя. Для оптимизации выполнения некоторых из перечисленных требований в состав топлива вводят присадки, влияющие, например, на скорость горения, механические характеристики, воспламенение, стабильность при хранении, технологичность при изготовлении зарядов и др.

В зависимости от физико-механических свойств, внутрибаллистических характеристик и геометрии заряда устанавливается допустимый диапазон изменения внешней температуры, в котором могут храниться заряды и применяться снаряженные двигатели.

3.2. Двухосновные топлива

Двухосновные топлива представляют собой твердые растворы органических веществ, молекулы которых содержат горючие и окислительные элементы. Они являются однородными, гомогенными системами. Их называют также коллоидными, гомогенными или порохами.

Первой основой этих топлив является нитроцеллюлоза с различным содержанием азота



где $x = 1, 2, 3$ – число нитратных групп ONO_2 в молекуле, определяющее степень нитрации целлюлозы.

Нитроцеллюлозу получают путем обработки целлюлозы, условная химическая формула которой $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$, азотной кислотой HNO_3 . При этом в целлюлозе ряд гидроксильных групп OH замещается нитратными группами ONO_2 .

Свойства нитроцеллюлозы зависят от количества в её молекуле нитратных групп ONO_2 , т.е. от процентного содержания в ней азота. Обычно в нитроцеллюлозе, идущей на изготовление твердых ракетных топлив, азота содержится 12...13%. При содержании азота менее 11% энергетические характеристики топлива оказываются неудовлетворительными.

Нитроцеллюлоза является также унитарным топливом, т.к. содержит в себе как горючие, так и окислительные элементы. Однако она имеет отрицательный кислородный баланс, т.е. окислительных элементов недостаточно для полного окисления горючих элементов. Кроме того, горение чистой нитроцеллюлозы неустойчивое и легко переходит в детонационное (взрывное) горение.

Для устранения указанных недостатков, а именно отрицательного кислородного баланса и повышенной взрывоопасности, нитроцеллюлозу обрабатывают некоторыми растворителями, обладающими положительным кислородным балансом.

Второй основой коллоидных топлив служат вещества, такие как нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$, диэтиленгликольдинитрат $C_4H_8O(ONO_2)_2$ и др., которые выполняют роль растворителя. В них растворяется нитроцеллюлоза, образуя коллоидные системы.

Нитроглицерин имеет положительный кислородный баланс, и часть горючих элементов нитроцеллюлозы окисляется избыточным кислородом нитроглицерина. Энергетические характеристики ТРТ

улучшаются с увеличением содержания в них нитроглицерина. Однако предельное содержание в топливе нитроглицерина не должно превышать 45%, т.к. при большем его количестве резко ухудшаются его физико-химические свойства. Топливо становится студнеподобным, текучим. Затрудняется его производство из-за высокой взрывоопасности.

Помимо указанных энергетических основ в состав двухосновных топлив входят в небольших количествах различные компоненты, называемые добавками. Они изменяют в нужную сторону те или иные свойства и характеристики ТРТ.

При хранении ТРТ происходит медленное самопроизвольное разложение нитроцеллюлозы. Выделяющиеся при этом окислы азота ускоряют химический процесс разложения, в результате чего увеличивается как взрывоопасность, так и склонность заряда к растрескиванию. Этот процесс усиливается при повышении температуры заряда. Для увеличения химической стойкости в период хранения в топливо вводят *стабилизаторы*. Соединяясь с выделяющимися окислами азота, они превращают их в химически нейтральные вещества. В качестве стабилизаторов применяют этилцентралит $C_{17}H_{20}ON_2$ и дифениламин $C_{12}H_{11}N$.

Весь допустимый срок хранения заряда подразделяется на период химически безопасного хранения и период хранения, в течение которого изменение характеристик топлива является допустимым с точки зрения применения РДТТ по назначению. Для некоторых топлив период химически безопасного хранения при заданной температуре определяется как время, в течение которого израсходуется половина начального содержания специальных стабилизирующих присадок. Срок хранения зарядов, содержащих стабилизаторы, достигает 15...20 лет.

Для увеличения скорости и устойчивости процесса горения в топливо вводят присадки, называемые *катализаторами*. В качестве катализаторов используют соединения свинца, меди, титана и их окислы, сернокислый калий и др. Они позволяют увеличить скорость горения топлива в 1,5...2,0 раза. Кроме того, они способствуют повышению устойчивости горения при минимальном давлении в камере сгорания.

Для уменьшения взрывоопасности и снижения скорости горения в топливо могут добавляться *флегматизаторы*. В качестве последних могут использоваться, например, некоторые органические

смолы. С помощью флегматизаторов можно снизить скорость горения в 1,5...2,0 раза.

Для улучшения термопластичности топлива при прессовании заряда в его состав вводят так называемые *пластификаторы*. В качестве пластификаторов используют воск, вазелин, минеральные масла и др. Они увеличивают эластичность зарядов и уменьшают их чувствительность к детонации.

С целью уменьшения гигроскопичности нитроцеллюлозы, в топливо вводят диэтил - и дибутилфталаты. Это жидкости, которые способствуют процессу желатинизации.

Некоторые добавки выполняют сразу несколько функций. Так, например, вазелин, используемый как пластификатор, оказывает также стабилизирующее действие, а такие стабилизаторы, как централит и дифениламин, выполняют в определенной степени функции катализаторов горения.

В отдельных случаях в топливо вводят также технологические добавки, облегчающие процесс прессования зарядов, сажу и графитовый порошок, а также красители. Сажа способствует увеличению лучистого теплового потока от очага пламени к заряду. Количество сажи составляет в двухосновном топливе обычно 0,05...0,2%.

Необходимо знать, что наличие добавок приводит к некоторому ухудшению энергетических характеристик ТРТ.

Двухосновные топлива, содержащие нитроцеллюлозу и нитроглицерин, по содержанию азота в нитроцеллюлозе подразделяются:

- на *баллиститы* – топлива с низким содержанием азота;
- *кордиты* – топлива с содержанием азота 13% и более.

Состав некоторых марок двухосновных топлив приведен в табл. 4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания этих топлив, а также линейные скорости их горения приведены в табл. 5 для давления в камере сгорания 7,0 МПа и степени расширения рабочего тела $\varepsilon = 70$, что является характерным для РДТТ.

Преимуществом двухосновных топлив является бездымность их продуктов сгорания, а недостатком – более низкий, по сравнению со смесевыми топливами, идеальный удельный импульс и ограниченный диапазон скоростей горения топлива.

Таблица 4
Состав некоторых марок
двухосновных ТРТ

Марка топлива	Компонент	Массовая доля, %
IPN	Нитроцеллюлоза	51,5
	Нитроглицерин	43,0
	Диэтилфтолат	3,2
	Добавки	2,3
SC (кордит)	Нитроцеллюлоза	49,5
	Нитроглицерин	41,5
	Стабилизатор	9,0
H	Нитроцеллюлоза	57,0
	Нитроглицерин	28,0
	Динитротолуол	11,0
	Стабилизатор	3,0
	Добавки	1,0
HM-2	Нитроцеллюлоза	54,0
	Нитроглицерин	27,0
	Динитротолуол	15,0
	Добавки	4,0

Процесс изготовления двухосновных топлив представлен на схеме рис. 5.

Исходные компоненты топлива (нитроцеллюлозу, нитроглицерин и необходимые добавки) помещают в лопастной смеситель 1. Здесь они перемешиваются в водной среде. Никаких химических взаимодействий между компонентами в смесителе не происходит. Идет пропитка нитроцеллюлозы растворителями - пластификаторами и частичное растворение компонентов.

Затем масса освобождается от воды в центрифуге 2 и подается на цилиндрические вальцы (коландры) 3, через которые пропускается несколько раз. Здесь при повышенном давлении и температуре ускоренно протекают процессы желатинизации нитроцеллюлозы и испарение ос-

Таблица 5
Характеристики продуктов сгорания некоторых марок
двухосновных ТРТ

Марка топлива	ρ_r , г/см ³	u_{os} , мм/с	$T_{ос}$, К	n	$I_{y.n.ид}$, м/с	$p_{к.min}$, МПа	$t_{o.з}$, °С
IPN	1,62	16,77	3085	1,21	2431	>2	-30...+60
SC	1,57	7,79	2553	1,24	2287	2...21	-30...+50
H	1,60	9,06	2371	1,25	2217	>4	-40...+50
HM-2	1,60	9,06	2351	1,24	2193	>3	-40...+50

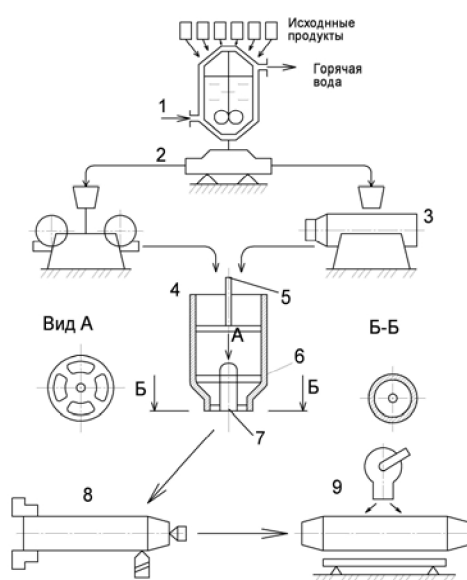


Рис. 5. Схема изготовления зарядов двухосновного топлива:
1 – смеситель; 2 – центрифуга; 3 – вальцы; 4 – пресс; 5 – плунжер; 6 – матрица; 7 – филлера; 8 – станок для мехобработки; 9 – контроль качества

татков воды. Проколанд-рованная масса выходит после вальцов в форме полотна, которое свертывается в рулоны и передается на пресс 4.

Формирование заряда различной формы производится на гидравлическом прессе при пропускании топлива через соответствующую филлеру 7 с помощью плунжера 5 и матрицы 6.

После прессования отрезают заряды заданной длины и, если это необходимо, обрабатывают на станке 8.

На поверхности, по которым заряд не должен гореть, например торцевые, наносится бронировующее покрытие.

Все изготовленные заряды проходят обязательный контроль 9. После чего из изготовленной партии отбирается часть зарядов, которые подвергаются испытаниям на соответствие требованиям технических условий (ТУ). Выполнение требований ТУ фиксируется в паспорте на изготовленную партию.

Для получения твердотопливных зарядов, скрепляемых по поверхности с корпусом РДТТ, используется метод отливки. Для скрепления заряда с корпусом внутреннюю поверхность камеры сгорания покрывают тонким слоем эпоксидной смолы, с которой при заливке и отверждении топливная масса образует прочную связь.

Значительно увеличить идеальный удельный импульс двухосновных топлив позволяет введение в их состав окислителей и высокоэффективных веществ, например перхлората аммония, октогена, гексогена. Эти топлива получили название смесевых модифи-

цированных двухосновных топлив. Они обладают повышенным идеальным удельным импульсом, но диапазон скоростей горения изменяется у них незначительно в сравнении с двухосновными.

3.3. Смесевые топлива

Смесевые ТРТ представляют собой механические смеси (конгломераты) окислителя, горючего и различных добавок.

Современные смесевые топлива состоят из трех основных компонентов: кристаллического минерального окислителя, полимерного горючего, выполняющего роль связующего, и порошкообразного металла.

Окислителями обычно служат твердые соли хлорной и азотной кислот, богатые кислородом. Наибольшее распространение в качестве окислителя смесевых топлив получил перхлорат аммония NH_4ClO_4 . Применяют широко и его эффективные производные, например, монометилперхлорат аммония $\text{CH}_3\text{NH}_2\text{ClO}_4$, перхлорат калия KClO_4 , нитрат натрия NaNO_3 и другие.

Применение перхлората аммония позволяет получать топлива с достаточно высокими энергетическими характеристиками. Температура разложения перхлората аммония 723 К. При разложении выделяется около 46% свободного кислорода. Скорость горения топлив на основе перхлората аммония находится в пределах от 4 до 20 мм/с и зависит от массовой доли окислителя и размера его частиц. При уменьшении размеров частиц окислителя скорость горения повышается, но при этом увеличивается вязкость топлива, что усложняет технологии его производства.

На практике обычно используется полидисперсный окислитель, содержащий как крупные, так и мелкие фракции частиц. Соотношение этих фракций подбирается таким, чтобы обеспечивалась высокая скорость горения при сохранении требуемой вязкости топлива.

Горючее выполняет в смесевых топливах роль связки. В качестве горючего могут быть использованы различные вещества органического происхождения. Это тяжелые нефтепродукты (асфальты, битумы); современные полимеры (полиэфирные, фенольные и эпоксидные смолы); пластмассы (полиамид, поливинилхлорид, по-

лиизобутилен и др.); каучуки (полисульфидный, полиуретановый, полиизобутиленовый, бутадиевстирольный) и другие вещества.

Выбор горючего-связующего в основном определяется требованием получения заданных энергетических и физико-механических характеристик, а также технологией изготовления.

Горючее-связующее должно иметь высокую удельную теплоту сгорания, обладать хорошей связующей способностью и сохранять эластичность в широком температурном интервале при достаточной механической прочности.

Очень хорошими свойствами обладают топлива, в которых в качестве горючего используется полиуретановый каучук. Эти топлива сохраняют эластичность до температуры 223К и имеют идеальный удельный импульс 2440 м/с и более при давлении в камере сгорания 7 МПа и степени расширения рабочего тела в сопле 70.

Относительное содержание окислителя и горючего в смесевых топливах может изменяться в довольно широких пределах. Однако для большинства топлив максимум удельного импульса и температуры в камере сгорания получается при содержании горючего-связки до 15%. Содержание минерального окислителя обычно не превышает 85%. При увеличении его количества ухудшаются физико-механические свойства топлива в процессе его изготовления и эксплуатации, возрастает склонность некоторых топлив к детонации.

Смесевые топлива без добавок обеспечивают идеальный удельный импульс того же порядка, что и двухосновные. Повышение удельного импульса смесевых ТРТ может быть достигнуто за счет введения в него определенного количества металлического горючего.

В качестве металлических добавок используются мелкодисперсные порошки алюминия, магния, бериллия, циркония, бора, сплавов алюминия с магнием и др. Наибольшее распространение получили топлива с алюминием. Количество его увязывают с содержанием остальных компонентов топлива таким образом, чтобы получить наибольший прирост удельного импульса и плотности. При этом желательно иметь необходимые физико-механические свойства. Обычно алюминия вводят до 20% от общей массы.

Алюминий легко окисляется в присутствии кислорода воздуха с образованием на его поверхности устойчивой окисной пленки, которая снижает активность алюминия. Для повышения активности

частиц порошкообразного алюминия их гранулируют и покрывают тонкой полимерной пленкой.

Кроме чистых металлов в состав топлива могут вводиться гидриды алюминия, лития, бериллия и др. Гибриды металлов при горении образуют продукты с малой молекулярной массой вследствие высокого содержания водорода. Это способствует повышению идеального удельного импульса тяги.

Следует отметить, что применение топлива с бериллием сдерживается высокой токсичностью продуктов сгорания и большой стоимостью бериллия.

Введение в топливо металлических добавок повышает идеальный удельный импульс тяги на 100...400 м/с. Плотность металлизированных смесевых топлив может достигать 1700...1800 кг/м³.

В смесевые топлива так же, как и в двухосновные, для улучшения физико-механических свойств, внутриваллистических характеристик и эксплуатационных качеств вводят различные добавки. Это катализаторы, стабилизаторы, флегматизаторы, пластификаторы, ингибиторы, красители и т.д.

Применение катализаторов позволяет существенно увеличить скорость горения. В качестве катализаторов используются окислы различных металлов, например, меди, хрома, железа, фториды, соли хромовой и метахромовой кислот, металлоорганические соединения.

Эффективным оказалось применение комбинации нескольких катализаторов.

При необходимости замедлить скорость горения в топливо вводят такие соединения, как двуокись магния и трехфтористый бром, называемые ингибиторами.

Стабилизаторы и пластификаторы вводятся в смесевые топлива с теми же целями, что и в двухосновные.

За счет введения специальных добавок улучшают эксплуатационные качества топлив и подавляют нежелательные эффекты, например, уменьшают длину и температуру факела продуктов сгорания при догорании их в атмосфере и снижают дымообразование за соплом.

Состав некоторых типичных марок смесевых топлив приведен в табл. 6, а термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания этих топлив и скорости их горения приведены

Таблица 6
Состав некоторых марок
смесевых ТРТ

Марка топлива	Компонент	Массовая доля, %
ТР-Н-3062	Перхлорат аммония	72,0
	Полиуретан	12,0
	Алюминий	16,0
ARCIT-373D	Перхлорат аммония	58,90
	Поливинилхлорид	8,62
	Ди-(2Этилгексил)-адипинат	10,79
	Алюминий	21,00
	Добавки	0,69
EREC	Гексанитроэтан	52,3
	Татраксидифторо-аминобутан	21,5
	Каучук $[C_4H_6(NF_2)_{1,7}]_n$	15,0
	Бор	11,2
LTF-3	Нитрат аммония	61,00
	Триацетат целлюлозы	10,15
	Ацетилтриэтилцитрат	11,60
	2,4-динитрофеноксид-этанол	10,25
	Добавки	7,00

в табл. 7 при давлении в камере сгорания 7,0 МПа и степени расширения рабочего тела в сопле $\varepsilon = 70$.

Производство смесевых топлив может вестись по различным технологиям, но в любом случае процесс начинается с перемешивания в смесителе 1 тонкоизмельченных окислителя, металла и специальных добавок с горючим-связующим в виде вязкой жидкости.

Таблица 7
Характеристики продуктов сгорания некоторых марок
смесевых ТРТ

Марка топлива	ρ_r , г/см ³	$u_{o,}$ мм/с	$T_{oc,}$ К	n	$I_{y.n.иo,}$ м/с	$p_{k.min,}$ МПа	$t_{o,3,}$ °С
ТР-Н-3062	1,82	5,11	3642	1,13	2564	> 0,14	-40...+55
ARCIT-373D	1,77	8,91	3324	1,12	2532	> 0,14	-13...+50
EREC	1,74	27,6	4302	1,18	2865	> 0,14	-50...+55
LTF-3	1,55	2,06	1256	1,15	1799	> 0,70	-40...+60

Производство зарядов двухосновных ТРТ осуществляется либо циклическим способом, либо непрерывным.

Схема изготовления топливного заряда непрерывным способом представлена на рис. 6.

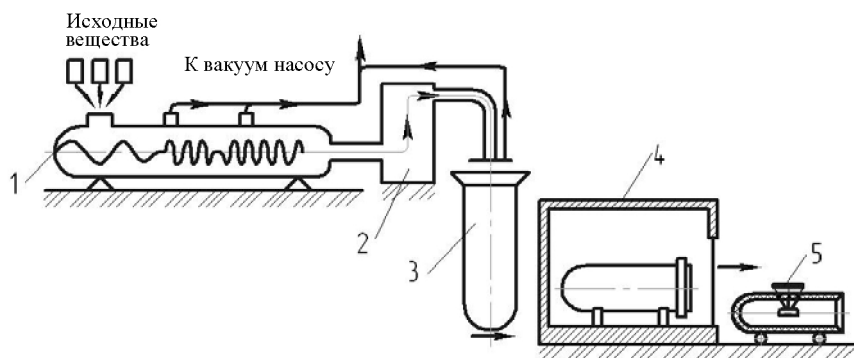


Рис. 6. Схема изготовления заряда смешанного топлива непрерывным способом:

1 – смеситель; 2 – анализатор качества смеси; 3 – контейнер; 4 – термостат; 5 – дефектоскоп

Между топливными компонентами в процессе их перемешивания и далее не происходит химических взаимодействий. Горючесвязующее, первоначально представляющее собой мономер, под воздействием каталитических добавок начинает полимеризоваться. При этом происходит разогрев массы. Для замедления процесса полимеризации стенки смесителя охлаждаются водой. Горючесвязующее в процессе перемешивания обволакивает и связывает частицы окислителя и металлического порошка.

После перемешивания и контроля качества процесса смесь загружается в контейнер 3. Для удаления пузырьков воздуха смешение компонентов и заливка топлива выполняются с вакуумированием.

Заливка ТРТ может производиться либо непосредственно в корпус ракеты, либо в специальную форму, если заряд изготавливается отдельно от корпуса.

После заливки топливо выдерживается в термостате 4 при повышенной температуре и избыточном давлении. Время полимеризации

зации в зависимости от принятого технологического процесса может длиться от нескольких часов до нескольких суток. Скорость полимеризации заряда существенно влияет на его качество. При больших скоростях охлаждения возможно растрескивание заряда.

По завершению процесса полимеризации осуществляется контроль качества заряда как путем визуального осмотра, так и различными методами дефектоскопии – такими как рентген, ультразвук, гамма-дефектоскопия и др.

Наибольшее распространение получили следующие способы изготовления топливных зарядов, скрепленных с корпусом двигателя:

- непосредственная заливка топливной массы в подготовленный корпус двигателя;
- вклеивание готового заряда в разъемный корпус двигателя;
- обмотка готового заряда стеклолентой, пропитанной смолой с последующей полимеризацией.

Обмотка ведется до получения заданной толщины слоя стеклоленты, которая выполняет роль корпуса РДТТ.

Заряды смесового топлива могут изготавливаться и методом прессования.

Смесевые топлива имеют ряд преимуществ по сравнению с двухосновными. Они дешевле, технологичнее, позволяют создавать заряды, плотно прилегающие к стенке камеры сгорания. При наличии металлических добавок смесевые топлива обеспечивают большой по величине идеальный удельный импульс тяги. Они позволяют путем изменения рецептуры получить более широкий диапазон эксплуатационных условий, в которых сохраняются удовлетворительные качества топлива.

3.4. Пути совершенствования твердых ракетных топлив

Основной целью совершенствования ТРТ является увеличение идеального удельного импульса тяги и плотности при сохранении или улучшении физико-механических и эксплуатационных свойств зарядов.

Важным направлением совершенствования является повышение эластичности топлив, что позволяет обеспечить их работо-

способность при отрицательных температурах и в условиях повышенных деформаций корпусов камер двигателей, с которыми скрепляются заряды.

Улучшение характеристик существующих смесевых топлив может быть достигнуто путем замены основных компонентов более эффективными. Считают перспективным замену используемых горючих на синтетические горючие, в которых металлы химически связаны с другими химическими элементами, а основную металлическую добавку алюминий Al на бериллий Be или гидриды металлов.

Путем модификации основных компонентов улучшают и эксплуатационные качества используемых топлив.

Повысить идеальный удельный импульс тяги двухосновных топлив можно введением в них металлического порошка.

Возможно применение топлив смешанного типа, включающих в себя элементы как смесевых, так и двухосновных топлив. К этой группе может быть отнесено модифицированное двухосновное топливо, в состав которого входят пластифицированная нитроцеллюлоза – нитрозол (5...20%), нитроглицерин (25...40%), перхлорат аммония (40...50%) и порошкообразные металлические присадки (до 20%). Это топливо называется также нитрозольным. Оно имеет более высокое значение идеального удельного импульса, чем у двухосновных и некоторых смесевых топлив. Недостаток его заключается в том, что продукты сгорания имеют более высокую температуру, чем у смесевых полибутADIеновых и полиуретановых ТРТ.

Совершенствование смесевых топлив идет путем поиска и использования более эффективных окислителей, горючих-связующих и металлов. Подбирается рецептура ТРТ, позволяющая улучшить требуемую характеристику топлива без ухудшения остальных. Например, более высокий идеальный удельный импульс тяги можно получить, если заменить перхлорат аммония NH_4ClO_4 на перхлорат нитрония NO_2ClO_4 или диперхлорат гидразина $\text{N}_2\text{H}_6(\text{ClO}_4)_2$. Однако эти более эффективные окислители имеют недостаток. Они нестабильны, взрывоопасны и плохо совместимы с применяемыми в настоящее время горючими. Поэтому исследовательские работы в области новых высокоэффективных окислителей направлены на повышение стабильности их в составе ТРТ.

Замена в смесевых топливах традиционных окислителей нитроаминами, такими как октоген $C_4H_8O_8N_8$ или гексоген $C_3H_6O_6N_6$, повышает энергетические характеристики и одновременно снижает в продуктах сгорания количество дымовых частиц.

Удельный импульс ТРТ на основе гексогена выше, а температура горения ниже, чем у смесевых топлив на основе перхлората аммония. Продукты сгорания этого топлива не содержат соляной кислоты, частиц углерода и практически не образуют дымного следа, что затрудняет возможность уничтожения ракеты средствами противоракетной обороны. При горении таких ТРТ "первичный дым" не образуется, а "вторичный дым", образующийся в присутствии водяного пара, появляется лишь при температуре окружающей среды ниже $-30^{\circ}C$.

Однако при увеличении содержания в топливе октогена и уменьшении размера его частиц ухудшаются механические свойства смесевых ТРТ, одновременно снижается полнота сгорания алюминия.

Исследуются смесевые твердые топлива на основе комплексных окислителей, в которых содержание октогена не превышает 10 %, а основную массу окислителя составляет перхлорат аммония. В состав таких топлив входит 16...20% алюминия, в качестве горючего-связующего в сочетании с октогеном хорошо зарекомендовал себя полибутadiен с концевыми гидроксильными группами.

Следует отметить, что повышение скорости горения смесевых топлив может быть достигнуто повышением диаметра частиц окислителя. Такой состав топлива обеспечивает требуемые механические характеристики при высокой энергетической эффективности.

Важную роль в последнее время приобретают экологические проблемы. Продукты сгорания современных смесевых ТРТ содержат опасный для человека и окружающей среды очень токсичный хлористый водород HCl . Содержание его в продуктах сгорания может быть исключено или значительно снижено заменой перхлората аммония в составе ТРТ нитратами, нитроаминами или смесями этих окислителей с перхлоратом аммония.

Перспективным считается применение в качестве горючих-связующих органических нитросоединений, содержащих большое количество кислорода.

4. ГИБРИДНЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

Гибридным ракетным топливом (ГРТ) или смешанным (СРТ) называется такое, компоненты которого находятся в разных агрегатных состояниях, причем один из компонентов является обязательно твердым, а другой – жидким или газообразным. Двигатели, работающие на таком топливе, называются гибридными ракетными двигателями (ГРД) или ракетными двигателями смешанного топлива (РДСТ).

Характерными отличительными особенностями ГРД являются:

– размещение заряда твердого компонента, необходимого для выполнения программы полета, в камере сгорания двигателя;

– горение заряда твердого компонента горючего или окислителя происходит при омывании его поверхности вторым жидким или газообразным компонентом.

Существенным достоинством ГРТ является возможность сочетания в них таких компонентов, которые не могут применяться в жидких и твердых ракетных топливах. Связано это с тем, что максимальная величина произведения $I_y \rho_T^c$, а следовательно и максимальная скорость полета ракеты в конце активного участка траектории, т.е. её эффективность, может быть достигнута при использовании компонентов топлива, находящихся в различном агрегатном состоянии. В то же время ряд твердых компонентов топлива, обладающих хорошими энергетическими характеристиками и высокой плотностью, по условиям совместимости не могут быть использованы в качестве топлива РДТТ.

В ГРТ представляется возможным обеспечить оптимальное соотношение горючего и окислителя, что практически не может быть достигнуто в РДТТ.

Итак, по уровню удельного импульса ГРД приближаются к лучшим ЖРД, но при этом плотность смешанных топлив значительно превосходит плотность топлив, состоящих только из жидких компонентов.

ГРД обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, несколько уступая в этом отношении РДТТ, но превосходя ЖРД.

По конструктивному исполнению ГРД отличаются большим разнообразием. Принципиально все ГРД выполняются по двум основным схемам:

– *прямой*, когда в камере сгорания размещается заряд твердого горючего, а окислитель подается туда в жидком или газообразном виде;

– *обратной*, когда в камере сгорания размещается заряд твердого окислителя, а подается в камеру жидкое или газообразное горючее.

К настоящему времени большее распространение получили двигатели прямой схемы. Они лучше разработаны и позволяют получить более высокий удельный импульс тяги. Кроме того, потребный объем горючего обычно меньше потребного объема окислителя, что позволяет в случае прямой схемы иметь более компактную и меньшей массы камеру сгорания, находящуюся под высоким давлением.

4.1. Требования к гибридным ракетным топливам

Общие требования к ГРТ совпадают с общими требованиями к ЖРТ и ТРТ. Дополнительно к ним предъявляются следующие специфические требования:

1. Самовоспламеняемость компонентов топлива.
2. Возможность использования жидкого компонента для охлаждения сопла двигателя.
3. Определенную скорость газификации твердого компонента, обеспечивающую требуемую скорость горения топлива, компоновку двигателя и его регулирование.

4.2. Окислители

В качестве жидких окислителей в ГРД могут быть использованы практически все окислители, которые применяются или рассматриваются как возможные для применения в топливах ЖРД. Это азотная кислота HNO_3 , азотный тетраоксид N_2O_4 , кислород O_2 , перекись водорода H_2O_2 , фтор F_2 , трифторид хлора ClF_3 .

Эффективным и удобным окислителем для ГРД является перекись водорода. Она способна к быстрому каталитическому разложению с образованием горячего окислительного газа, который может использоваться в камере сгорания ГРД с различными твердыми горючими.

Современные твердые окислители содержат в качестве основного окислительного элемента кислород, а иногда в небольшом количестве хлор. Твердые соединения фтора существуют, но количество свободного фтора в них незначительно и поэтому в качестве твердых окислителей они не применяются.

Большинство твердых окислителей представляют собой нитраты либо перхлораты таких элементов и веществ как натрий, калий, литий, гидразин, аммоний, нитроний.

Некоторые из твердых окислителей при повышенных давлениях способны к самостоятельному горению. Перхлорат аммония горит без каких-либо добавок при давлении свыше 2,2 МПа. При повышенных давлениях в камере и наличии примесей горение твердых окислителей может переходить во взрыв.

Все твердые окислители представляют собой кристаллические порошки, поэтому изготовление из них зарядов с необходимыми механическими свойствами затруднительно. Производство зарядов твердого окислителя требует введения в его состав некоторого количества горючего-связующего. Обычно для этого используют различные каучуки и смолы. Известен твердый окислитель, содержащий 90% перхлората аммония и 10% добавок.

4.3. Горючие

В качестве жидких горючих ГРТ могут быть использованы практически все как криогенные, так и высококипящие горючие ЖРТ. Наиболее пригодными из них являются жидкий водород H_2 , гидразин N_2H_4 , несимметричный диметилгидразин $H_2N-N(CH_3)_2$, керосин $C_{7,21}H_{13,29}$, пентаборан B_5H_9 . Однако последний обладает высокой токсичностью и способностью к самовоспламенению на воздухе. Сейчас уже найдены присадки, повышающие более чем на сто градусов его температуру самовоспламенения.

В качестве твердых горючих могут применяться самые различные вещества и, в первую очередь, полимерные соединения. Они используются в твердых топливах в качестве горючих-связующих.

В настоящее время в США разработана и применяется ракета "АМРОК" для выведения коммерческих грузов, на которой установлены гибридные двигатели. В качестве горючего в них используется твердый синтетический углеводород полибутадиен, а в качестве окислителя – жидкий кислород, вытесняемый гелием.

Для улучшения энергетических характеристик твердых горючих в них добавляются такие металлы как алюминий, бериллий, бор, литий. Однако применение чистых металлов неудобно по ряду причин. Так, например, литий легко плавится ($T_{пл} = 459$ К), бериллий имеет высокую теплопроводность и поэтому температуру его поверхности трудно поднять до температуры воспламенения и т.д. Считается поэтому, что лучше использовать в качестве горючих не чистые металлы, а их соединения и, в первую очередь, гидриды. Наиболее перспективными из них являются LiH, BeH₂, AlH₃.

К весьма перспективному относится стабильное гибридное топливо гидрид бериллия BeH₂ и перекись водорода H₂O₂. Термодинамические характеристики его в сравнении с жидким ракетным топливом водород и кислород приведены в табл. 8 при $p_k = 10$ МПа и $\varepsilon = 1000$.

Таблица 8

Термодинамические характеристики гибридного
и жидкого ракетных топлив

Горю- чее	Окисли- тель	$\alpha_{ок}$	K_m	$T_{ос},$ К	$I_{у.п.ид},$ м/с	$\rho_{г},$ г/см ³
BeH ₂	98% H ₂ O ₂	0,3	1,888	3488	4313	0,994
H _{2ж}	O _{2ж}	0,7	5,556	3448	4545	0,345

Из топлив для ГРД обратной схемы высокими энергетическими характеристиками обладает перхлорат нитрония NO₂ClO₄ и гидразин N₂H₄, удельный импульс которого на 4% выше, чем у штатного долгохраняемого ЖРТ НДМГ и N₂O₄. При этом плотность гибри-

ного топлива составляет 1450 кг/м^3 по сравнению с 1180 кг/м^3 для жидкого ракетного топлива.

Практически все существующие и перспективные гибридные топлива содержат значительное количество металла, поэтому для уменьшения потерь удельного импульса тяги важно обеспечить достаточно полное сгорание металла и иметь малые потери при течении двухфазных продуктов сгорания в сопле.

Контрольные вопросы

К главе «Общие сведения о химических ракетных двигателях и их топливах»

1. Каково основное назначение ракетного двигателя?
2. Какие ракетные двигатели называют химическими?
3. Изобразите схему преобразования энергии в камере ХРД.
4. Нарисуйте схему РДТТ и укажите его состав.

К главе «Жидкие ракетные топлива»

5. Что понимается под жидким ракетным топливом (ЖРТ) и какие виды ЖРТ Вам известны?
6. Что понимается под горючим и окислителем ЖРТ?
7. Что такое стехиометрическое мольное соотношение компонентов топлива и как его определить?
8. Что такое действительное массовое соотношение компонентов топлива и коэффициент избытка окислителя?
9. Как можно классифицировать ЖРТ?
10. Сформулируйте основные требования к ЖРТ.
11. Охарактеризуйте основные окислители ЖРТ.
12. Дайте характеристику жидкому кислороду.
13. Дайте характеристику азотному тетраоксиду.
14. Охарактеризуйте основные горючие ЖРТ.
15. Дайте характеристику азотно-водородным горючим.
16. Дайте характеристику жидкому водороду.
17. Назовите наиболее широко применяемые в настоящее время топливные композиции и кратко охарактеризуйте их.
18. Что понимается под однокомпонентными топливами и каковы их особенности?
19. Приведите пример однокомпонентного топлива и охарактеризуйте его.
20. Каковы пути совершенствования жидких ракетных топлив?
21. Назовите трехкомпонентные топлива и укажите особенности их реализации.

К главе «Твердые ракетные топлива»

22. Сформулируйте основные требования к ТРТ.
23. Какие виды ТРТ Вам известны?
24. Охарактеризуйте двухосновные твердые топлива.
25. Какие добавки вводятся в твердые топлива помимо основных компонентов и с какой целью?
26. Охарактеризуйте смесевые твердые топлива.
27. Какие пути совершенствования твердых ракетных топлив Вам известны?

К главе «Гибридные ракетные топлива»

28. Что такое гибридные ракетные топлива и каковы их особенности?
29. Какие окислители могут использоваться в гибридных ракетных двигателях прямой и обратной схем?
30. Какие горючие могут использоваться в гибридных ракетных двигателях прямой и обратной схем?

Библиографический список

1. Добровольский, В.М. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / В.М. Добровольский. 2-е изд., перераб. и доп.; под ред. Д.А. Ягодникова.–М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 448с.
2. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин.–М.: Машиностроение, 1989.–457 с.
3. Беляев, Н.М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов / Н.М. Беляев, Н.П. Велик, Е.И. Уваров.–М.: Машиностроение, 1979.–230 с.
4. Волков, Е.Б. Ракетные двигатели на комбинированном топливе / Е.Б. Волков, Г.Ю. Мазинг.–М.: Машиностроение, 1973.–48 с.
5. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник. В 10 т. / под ред. В.П. Глушко. АН СССР, 1971-1979 гг.
5. Технические условия ТУ 51-03-03-85.
6. Тимнат, Т. Ракетные двигатели на химическом топливе / Т. Тимнат.–М.: Мир, 1990.–292 с.
7. Фахрутдинов, И.Х. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива / И.Х. Фахрутдинов, А.В. Котельников.–М.: Машиностроение, 1987.–325 с.
8. Шевелюк, М.И. Теоретические основы проектирования жидкостных ракетных двигателей / М.И. Шевелюк.–М.: Оборонгиз, 1960.–683 с.
9. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей / М.С. Штехер.–М.: Машиностроение, 1976.–301с.

Таблица П1

Некоторые физико-химические свойства и экологические
характеристики основных окислителей ЖРТ

Окислители	ρ , г/см ³	$T_{\text{кип}}$, К	η , мПа·с	σ , мН/м	p_n , кПа	ПДК мг/м ³	Кл. оп.
Жидкий кислород (O _{2ж})	1,14	90	0,189 (90 К)	13,0	100	–	–
Перекись водорода 98% (H ₂ O ₂)	1,43	424	1,20	75,5	0,27	1	4
Азотная кислота (HNO ₃)	1,50	359	0,79	41,0	8,4	2	3
Азотный тетраоксид (N ₂ O ₄)	1,44	294	0,39	26,0	124	5	3
АК–27И	1,48	321	0,69	26,0	87	2	3
Жидкий фтор (F _{2ж})	1,51	85	0,26	15,0	101	0,02	2
Трифторид хлора (ClF ₃)	1,85	285	0,412	24,5	172	0,01	2

Таблица П2

Некоторые физико-химические свойства и экологические
характеристики основных горючих ЖРТ

Горючие	ρ , г/см ³	$T_{кип}$, К	η , мПа·с	σ , мН/м	p_n , кПа	ПДК мг/м ³	Кл. оп.
Жидкий во- дород (H _{2ж})	0,71	20,4	0,136 ·10 ⁻³	2,30	92	–	–
Керосин (C _{7,21} H _{13,29})	0,82... 0,85	420... 550	1,50	27,5	5,0	300	4
Спирт этило- вый (C ₂ H ₅ OH)	0,785	351	1,10	–	7,7	1000	4
Гидразин (N ₂ H ₄)	1,01	386,5	0,91	73	1,86	0,1	1
НДМГ ((CH ₃) ₂ N-NH ₂)	0,79	335	0,51	25	21	0,1	1
Монометил- гидразин H ₂ N-NH(CH ₃)	0,87	360	0,78	35	6,62	0,1	1
Аэрозин-50 (50% N ₂ H ₄ + 50% НДМГ)	0,90	343	0,89	31	17,5	0,1	1
Тонка-250	0,85	362	0,89		10,7	3	3
Метан (CH ₄)	0,42	91	0,098	13,7	100	–	–

Учебное издание

Егорычев Виталий Сергеевич
Кондрусев Виктор Семёнович

ТОПЛИВА ХИМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Научный редактор С. В. Л у к а ч е в
Редакторская обработка Т. К. К р е т и н и н а
Корректорская обработка Н. С. К у п р и я н о в а
Доверстка Е. А. Л а р и о н о в а

Подписано в печать 9.10.07 . Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,5.

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-12/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

