

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

В.С. ЕГОРЫЧЕВ, В.Н. МАТВЕЕВ

ТЕОРИЯ, РАСЧЁТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ТЕКСТ ЛЕКЦИЙ

электронный ресурс

САМАРА 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Рекомендуемый библиографический список.....	5
Основные сокращения, условные обозначения и индексы	6
ЧАСТЬ ВТОРАЯ	9
ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
ЖРД, РДТТ и ГРД.....	9
ЛЕКЦИЯ № 1.....	10
8. ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ	10
8.1. Общие сведения, состав и устройство ЖРД.....	10
8.2. Классификация жидкостных ракетных двигателей.....	11
8.3. Вытеснительная подачи топлива и классификация их систем	13
8.4. Схемы ЖРДУ с вытеснительной подачей топлива и принцип их работы.....	15
ЛЕКЦИЯ № 2.....	17
8.5. ЖРДУ с насосной системой подачи топлива, их схемы и принцип работы.....	17
9. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В	
КАМЕРЕ СГОРАНИЯ.....	21
9.1. Общая картина и характеристика процесса	21
ЛЕКЦИЯ № 3.....	23
9.2. Протекание элементарных составляющих рабочего процесса в камере сгорания	23
9.2. Обобщённые характеристики процессов в камере сгорания.....	25
9.3. Топливные форсунки ЖРД.....	28
ЛЕКЦИЯ № 4.....	29
9.3.1. Теория струйных форсунок.....	29
9.3.2. Центробежные форсунки.....	34
ЛЕКЦИЯ № 5.....	39
9.3.2. Двухкомпонентные форсунки.....	39
9.4. Распыление компонентов топлива	41
ЛЕКЦИЯ № 6.....	47
9.5. Смешение компонентов топлива.....	47
ЛЕКЦИЯ № 7.....	53
9.6. Прогрев и испарение топлива, особенности массообмена между фазами.....	53
9.7. Воспламенение и горение топлива	56
9.8. Оценка заброса давления в камере сгорания при запуске ЖРД.....	58
ЛЕКЦИЯ № 8.....	60
9.9. Оценка совершенства процессов в камере сгорания.....	60
9.10. Обобщённые характеристики процессов в камере сгорания.....	62
9.11. Действительные значения удельного импульса и расхода топлива	64
ЛЕКЦИЯ № 9.....	67
10. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРД.....	67

10.1. Понятие о статистических и динамических характеристиках РД ..	67
10.2. Дроссельная характеристика	70
ЛЕКЦИЯ № 10	73
10.3. Высотная характеристика	73
10.4. Высотная характеристика камеры с регулируемым двухпозиционным соплом	74
10.5. Создание управляющих сил и моментов	75
11. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД	76
11.1. Общие сведения о неустойчивости рабочего процесса и виды неустойчивости	76
ЛЕКЦИЯ № 11	79
11.2. Качественный механизм возникновения неустойчивости	79
11.3. Низкочастотная неустойчивость. Физическая картина и механизм возбуждения низкочастотных колебаний	82
ЛЕКЦИЯ № 12	85
11.4. Высокочастотная неустойчивость, механизм возбуждения высокочастотных колебаний	85
11.5. Механизм возбуждения высокочастотных колебаний	87
11.6. Границы устойчивости ЖРД	89
11.7. Мероприятия по борьбе с НЧ, СЧ и ВЧ устойчивостью	90
11.7.1 Мероприятия по борьбе с НЧ, СЧ неустойчивостью	90
ЛЕКЦИЯ № 13	92
11.7.2 Мероприятия по борьбе с ВЧ неустойчивостью	92
11.8. Способы оценки склонности ЖРД к ВЧ неустойчивости	94
12. РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ТВЁРДОМ ТОПЛИВЕ (РДТТ)	96
12.1. Общие сведения о РДТТ, отличительные особенности, состав и принцип их работы	96
ЛЕКЦИЯ № 14	99
12.2. Основные преимущества и недостатки РДТТ	99
12.3. Заряды в РДТТ и их горение	100
12.4. Твёрдые ракетные топлива и требования к ним, их классификация, состав и свойства	101
12.5. Механизм горения двухосновных ТРТ	102
ЛЕКЦИЯ № 15	104
12.6. Механизм горения смесевых ТРТ	104
12.7. Зависимость скорости горения ТРТ от основных факторов	107
12.7.1. Зависимость скорости горения ТРТ от давления в камере сгорания	108
12.7.2. Зависимость скорости горения от начальной температуры заряда ТРТ	109
12.7.3. Зависимость скорости горения от скорости обдува поверхности заряда ТРТ потоком рабочего тела	111

ЛЕКЦИЯ № 16	112
12.7.4. Влияние на скорости горения напряжённого состояния заряда, состава ТРТ технологии изготовления	112
12.7.5. Зависимость скорости горения ТРТ от перегрузок	113
12.8. Нормальное и аномальное горение в РДТТ	114
12.9. Основы расчета РДТТ	115
12.9. Основные способы тепловой защиты элементов конструкции РДТТ и изменение величины и направления тяги двигателя	118
ЛЕКЦИЯ № 17	119
13. ГИБРИДНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ГРД)	119
13.1. Общие сведения, отличительные особенности и преимущества гибридных ракетных двигателей	119
13.2. Схемы, состав и принцип работы ГРД	120
13.2. Гибридные ракетные топлива, требования к ним, их свойства и состав	124

Рекомендуемый библиографический список

1. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов вузов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко.– М.: Машиностроение, 1989.– 464 с.: ил.
2. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / М.В. Добровольский; под ред. Д.А. Ягодникова. 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.– 448 с.: ил.
3. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. /Под ред. В. М. Кудрявцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 704 с.: ил.
4. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин [и др.]; под общ. ред. Г.Г. Гахуна.– М.: Машиностроение, 1978, 1989.– 424 с.: ил.
5. Сточек, Н.П. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро.– М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.: ил.
6. Штехер, М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей / М.С. Штехер.– М.: Машиностроение, 1976.– 301 с.
7. 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.
8. Егорычев, В.С. Проектный расчёт двухкомпонентной центробежной эмульсионной форсунки / В.С. Егорычев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 24-26 июня 2009г.– В 2 ч. Ч.1.– с. 151...152.– Самара: СГАУ, 2009.– 266 с.: ил.
9. Егорычев, В.С. Термодинамический расчёт и проектирование камер ЖРД: учеб. пособие / В.С. Егорычев, В.С. Кондрусев.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009.– 108 с. : ил.

Основные сокращения, условные обозначения и индексы

С о к р а щ е н и я

БД – база данных;
ГГ – газогенератор;
ДУ – двигательная установка;
ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;
ЖРДУ – жидкостная ракетная двигательная установка;
КС – камера сгорания;
ЛА – летательный аппарат;
РД – ракетный двигатель;
РТ – рабочее тело;
ТНА – турбонасосный агрегат.

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

A – геометрическая характеристика центробежной форсунки;
 D, d – диаметр;
 F – площадь;
 f – удельная площадь;
 \bar{F} – относительная площадь сечения камеры;
 H – шаг между форсунками;
 I_y – удельный импульс тяги;
 K_m – массовое действительное соотношение компонентов;
 K_m^o – массовое стехиометрическое соотношение компонентов;
 L, l – длина;
 m – масса;
 \dot{m} – массовый расход;
 N – мощность;
 n – средний показатель изоэнтропы расширения, число форсунок;
 P – тяга;
 p – давление;

R_o, R – универсальная и удельная газовые постоянные соответственно;
 r – радиус;
 T – температура;
 φ – коэффициент заполнения жидкостью сопла форсунки на выходе;
 φ_1 – коэффициент удельного импульса;
 φ_k – коэффициент камеры сгорания;
 φ_c – коэффициент сопла;
 W – скорость рабочего тела;
 Z – степень укорочения сопла;
 α – угол;
 $\alpha_{ок}$ – коэффициент избытка окислителя;
 β – расходный комплекс, угол;
 ε – степень расширения рабочего тела в сопле;
 λ – приведённая скорость;
 μ – коэффициент расхода, молярная масса;
 π_T – степень расширения газа в турбине;
 ρ – плотность;
 σ_f – коэффициент восстановления полного давления;
 τ – время;
 ξ – коэффициент потерь удельного импульса тяги.

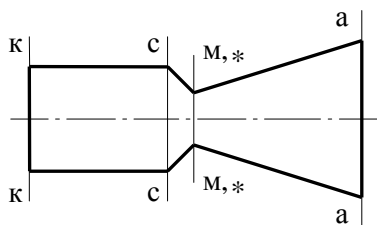
И н д е к с ы

а – выход из сопла;
 вд – высокое давление;
 вх – вход;
 вых – выход;
 г – горючее;
 газ – газовый;
 гг – газогенератор;
 ж – жидкость;
 з – завеса;
 ид – идеальный;
 к – камера или вход в камеру;

кз – камера закручивания;
 маг – магистраль;
 н – насос, атмосферный;
 ок – окислитель;
 о – параметр торможения;
 опт – оптимальный;
 п – в пустоте;
 пр – пристенок;
 р – расчётный;
 с – вход в сопло;
 ср – среднее значение;
 ст – стенка;
 т – турбина;
 ф – форсунка;
 я – ядро.

Сечения камеры

к – вход в камеру;
 с – вход в сопло;
 м – минимальное сечение сопла;
 * – критическое сечение сопла;
 а – выход из сопла.



ЧАСТЬ ВТОРАЯ

**ТЕОРИЯ, МЕТОДЫ РАСЧЁТА И
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖРД, РДТТ И ГРД**

ЛЕКЦИЯ № 1

8. ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

8.1. Общие сведения, состав и устройство ЖРД

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) – это наиболее развитый и обширный класс химических ракетных двигателей.

ЖРД называют такой химический ракетный двигатель, который работает на жидком ракетном топливе, т.е. компоненты топлива поступают в двигатель в жидком агрегатном состоянии.

ЖРД в самом общем случае состоит из одной или нескольких камер, агрегатов системы подачи топлива (ТНА, газогенератор и т.д.) и автоматики, рамы, магистралей, устройств, создающих управляющие усилия и моменты, а также вспомогательных устройств и агрегатов.

ЖРД, состоящий из нескольких камер, называется многокамерным.

Важной отличительной частью камеры (сгорания) ЖРД является смесительная головка. Она является и частью камеры жидкостного газогенератора (ЖГГ).

Смесительная головка камеры (газогенератора) представляет собой устройство для ввода компонентов топлива или продуктов газогенерации в огневое пространство камеры сгорания, распыления и первоначального перемешивания между собой жидких компонентов и распределения их по объему камеры сгорания (КС). Важными элементами смесительной головки являются форсунки различных типов.

Воспламенение топливной смеси в камере сгорания осуществляется принудительно химическими, пиротехническими или электрическими способами (средствами), если компоненты не являются самовоспламеняющимися.

При сгорании топлива образуются высокотемпературные продукты сгорания (3000...4000 К), ускоряемые в сверхзвуковом сопле (сопле Лавалия). Чтобы не было прогара стенки, камера ЖРД обычно охлаждается регенеративно одним из компонентов топлива, протекающим до поступления в камеру сгорания через проточную часть

тракта охлаждения камеры. Тракт охлаждения камеры – пространство между внутренней (огневой) стенкой и наружной силовой рубашкой, связанными между собой различными силовыми способами.

Система подачи представляет собой совокупность агрегатов, обеспечивающих требуемый расход компонентов в двигатель в заданном отношении. Применяют в ЖРД два вида системы подачи:

- ✓ *вытеснительную;*
- ✓ *насосную.*

Агрегаты автоматики входят в систему регулирования ЖРД. Последняя осуществляет автоматическое поддержание или программное изменение параметров двигателя (тяги, соотношения компонентов), поддерживает устойчивую работу ЖРД, управляет переходными режимами, такими как запуск и выключение (остановка) двигателя.

Жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) состоит из одного или нескольких ЖРД, системы хранения и подвода топлива, включая топливные баки и агрегаты их наддува, рулевых приводов соединительных магистралей и вспомогательных устройств.

8.2. Классификация жидкостных ракетных двигателей

Приведем на рисунке 1 одну из возможных классификаций ЖРД. Признаки классификации:

- ① – тип применяемого топлива;
- ② – способ подачи топлива;
- ③ – способность компонентов топлива к самовоспламенению;
- ④ – температура рабочего тела вытеснения и способ его получения;
- ⑤ – способ организации рабочего процесса;
- ⑥ – род топлива газогенератора;
- ⑦ – схема организации рабочего процесса в камере или агрегатное состояние компонентов, подаваемых в камеру сгорания;
- ⑧ – использование компонентов основного топлива для получения РТ турбины ТНА;
- ⑨ – соотношение компонентов топлива в газогенераторе.

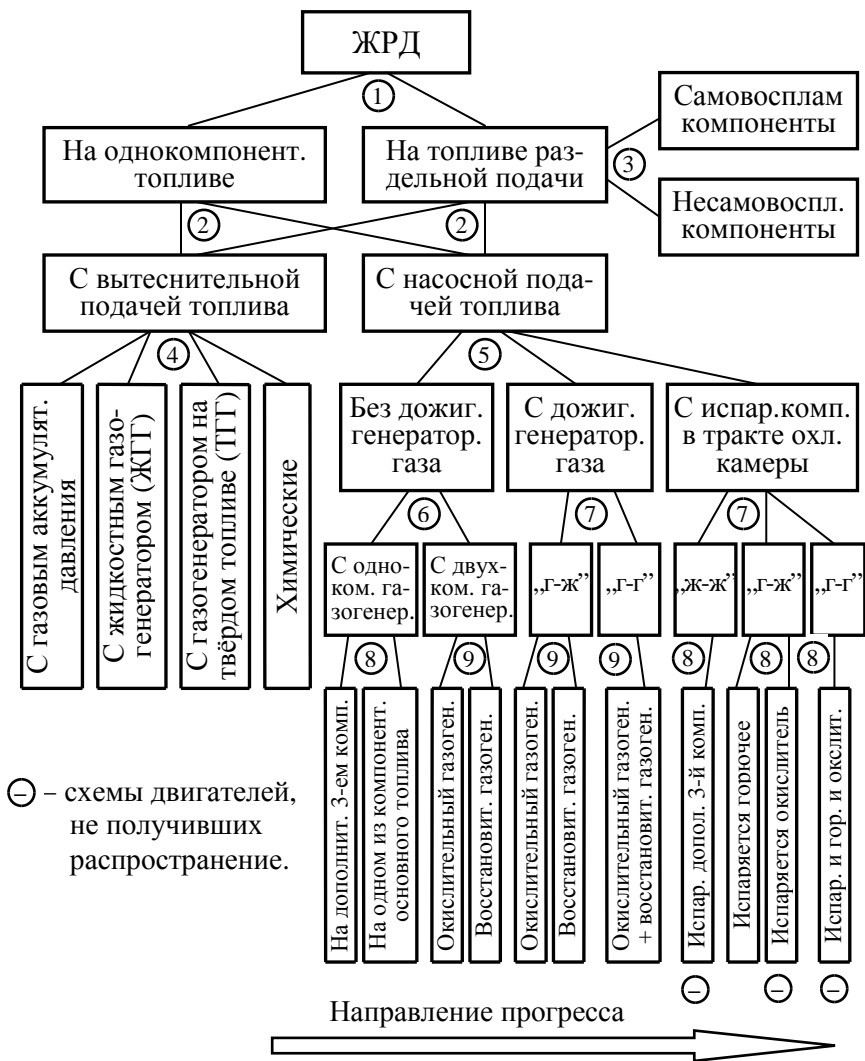


Рис. 1. Классификация жидкостных ракетных двигателей

Химическая вытеснительная подача топлива – это такая подача, когда газ вытеснения (РТ системы) получается в результате протекания контролируемой реакции в баке между находящимся там компонентом топлива и впрыскиваемым туда реагентом. Реагент хранится в отдельном баке. В частности, при самовоспламеняющихся компонентах основного топлива в бак горючего может подаваться окислитель, а в бак окислителя – горючее.

ЖРД с насосной подачей топлива по способу организации рабочего процесса бывают без дожигания генераторного газа, с дожиганием и испарением компонентов в тракте охлаждения камеры.

В двигателях без дожигания генераторного газа последний после турбины выбрасывается в окружающую среду через патрубки или утилизационные сопла, иногда являющимися рулевыми или верньерными. Из-за низкой температуры генераторного газа и малой степени его расширения в соплах использование вспомогательного топлива, идущего на привод ТНА, для создания тяги оказывается малоэффективным.

В двигателях с дожиганием генераторного газа в основной камере этот газ, пройдя турбину ТНА, направляется по газопроводу в камеру сгорания. ЖРД с дожиганием генераторного газа энергетически более выгодны, чем без дожигания т.к. в них все топливо используется при оптимальном для двигателя соотношении компонентов и высокой степени расширения.

8.3. Вытеснительная подачи топлива и классификация их систем

Вытеснительная подача топлива (ВПТ) осуществляется вытеснением компонентов из соответствующих баков рабочим телом (газом), давление которого превышает давление в камере сгорания.

Изобразим на рисунке 36 одну из возможных классификаций систем ВПТ.

Признаки классификации:

① – температура и природа подаваемого в баки рабочего тела (газа вытеснения);

Холодным РТ называют газ, температура которого близка к температуре компонента в баке.

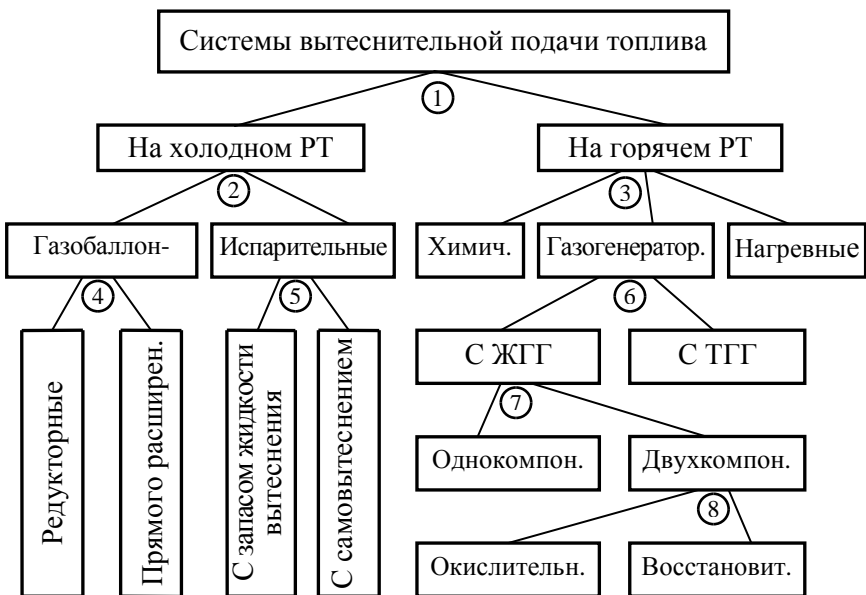


Рис. 36. Классификация систем вытеснительной подачи топлива

② – способ хранения и получения холодного РТ вытеснения;

В испарительных системах РТ получают испарением жидкостей, имеющих в диапазоне изменения температуры эксплуатации давлением насыщенных паров, равным или превышающим давление подачи. Иногда вытеснение компонента топлива производится давлением насыщенных паров самого компонента.

③ – способ получения горячего рабочего тела вытеснения;

В нагревных системах ВПТ рабочее тело получают в тракте охлаждения камеры РД.

④ – метод снижения давления РТ до рабочего;

В системах ВПТ с прямым расширением регулирующий элемент в магистрали газа вытеснения вообще отсутствует, либо выполнен в виде расходной дроссельной диафрагмы. Поэтому в них давление в баке, а значит и тяга РД непрерывно уменьшаются по времени работы.

⑤ – использование давления насыщенных паров испаряемой жидкости вытеснения или самого компонента;

⑥ – агрегатное состоянием его топлива газогенератора;

В газогенераторах на твердом топлива (ТГГ) используются медленно горящие твердые топлива или специальные пиротехнические составы. Продукты их горения или разложения поступают в топливные баки.

⑦ – вид топлива ЖГГ.

В однокомпонентном ЖГГ горячий газ вытеснения получают путем реакции разложения одного компонента.

⑧ – соотношение компонентов топлива в газогенераторе.

В окислительном жидкостном газогенераторе топливо содержит в избытке окислитель, в восстановительном – горючее. За счёт этого температура продуктов сгорания имеет требуемую для рабочего тела турбины величину.

8.4. Схемы ЖРДУ с вытеснительной подачей топлива и принцип их работы

Изобразим две типичные схемы жидкостных ракетных двигательных установок с ВПТ:

- ✓ газобаллонную редукторного типа (рис. 37),
- ✓ на двухкомпонентных ЖГГ (рис. 38),

На рисунках изображены:

1 – камера, 2 – бак окислителя, 3 – бак горючего, 4 – баллон с газом или воздушный аккумулятор давления (ВАД), 5 – газовый пускоотсечной клапан, 6 – газовый редуктор давления, 7 – обратный клапан, 8 – пускоотсечной клапан окислителя, 9 – пускоотсечной клапан горючего, 10 – бак окислителя ЖГГ, 11 – бак горючего ЖГГ, 12 – ЖГГ надува бака горючего, 13 – ЖГГ надува бака окислителя.

Принцип действия ЖРДУ с ВПТ достаточно прост. Рассмотреть этот вопрос студентам самостоятельно.

Основной недостаток ЖРДУ с ВПТ большая толщина стенок баков компонентов топлива, находящихся под рабочим давлением вытеснения, превышающим давление в камере сгорания, а значит большая масса ДУ.

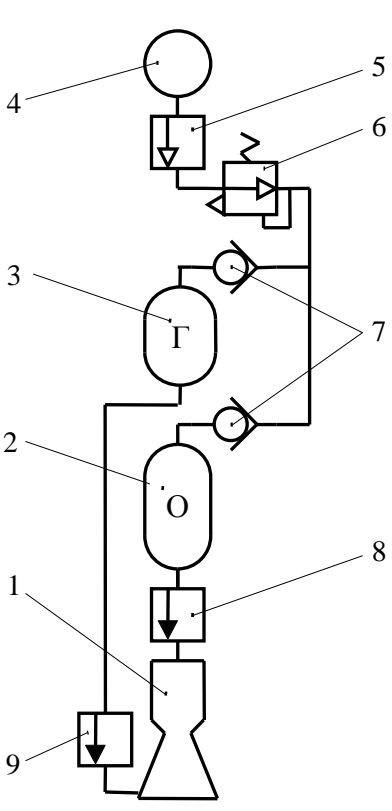


Рис. 37. Схема ЖРДУ с газобаллонной системой ВПТ редуторного типа:
 1 – камера, 2 – бак окислителя, 3 – бак горючего, 4 – баллон с газом или воздушный аккумулятор давления (ВАД), 5 – газовый пускоотсечной клапан, 6 – газовый редутор давления, 7 – обратный клапан, 8 – пускоотсечной клапан окислителя, 9 – пускоотсечной клапан горючего.

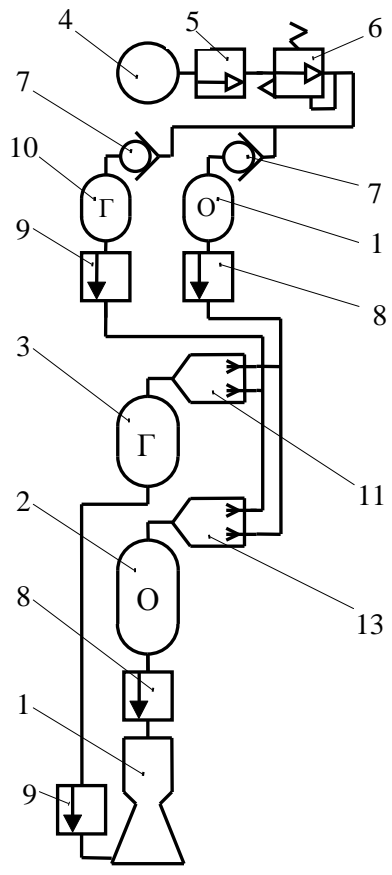


Рис. 38. Схема ЖРДУ с ВПТ на двухкомпонентных ЖГГ
 1...9 – обозначения тех же элементов, что и на рис.37; 10 – бак окислителя ЖГГ, 11 – бак горючего ЖГГ, 12 – ЖГГ надува бака горючего, 13 – ЖГГ надува бака окислителя.

ЛЕКЦИЯ № 2

8.5. ЖРДУ с насосной системой подачи топлива, их схемы и принцип работы.

Вытеснительная система подачи топлива становится нецелесообразной при значительной тяге и большом времени работы ЖРД. При $p_k > 3.0$ МПа применяется только насосная система подачи топлива. Она нашла большое распространение в ЖРД. Все маршевые ЖРД имеют насосную систему подачи топлива.

Характерным для ЖРД с насосной подачей топлива (НПТ) является наличие турбонасосного агрегата (ТНА).

ТНА представляют собой единую компоновку насосов компонентов топлива и турбины, приводящей их во вращение.

В большинстве случаев рабочее тело для турбины ТНА получают в жидкостных газогенераторах (ЖГГ) в один или двухкомпонентный, иногда – в твердотопливных газогенераторах (ТГГ).

Изобразим три пневмогидравлические системы ЖРДУ с насосной подачей топлива:

✓ без дожигания генераторного газа с двухкомпонентным ЖГГ на основных компонентах топлива со схемой организации рабочего процесса в камере «жидкость-жидкость» («ж-ж») (рис.39).

✓ с дожиганием генераторного газа с двухкомпонентным ЖГГ на компонентах основного топлива с организацией рабочего процесса в камере «г-ж»(рис.40).

✓ с получением рабочего тела турбины испарением горючего в тракте охлаждения камеры и организацией рабочего процесса в камере «г-ж» (рис.41).

На рисунках 39, 40, 41 изображены:

1...13 – те же обозначения, что и на рис. 37 и 38, 14 – регулятор соотношения компонентов в КС, 15 – насос горючего, 16 – турбина, 17 – регулятор тяги, 18 – жидкостный газогенератор (ЖГГ) двухкомпонентный, 19 – насос окислителя, 20 – ТНА, 21 – пусковая турбина ТНА, 22 – пусковой ТГГ или пиростартер, 23- смеситель.

Принцип действия ЖРДУ с НПТ вполне очевиден.

Введение ТНА усложняет двигатель, но позволяет разгрузить баки горючего и окислителя, а значит выиграть в массе ДУ при значительных давлениях в КС и временах работы двигателя.

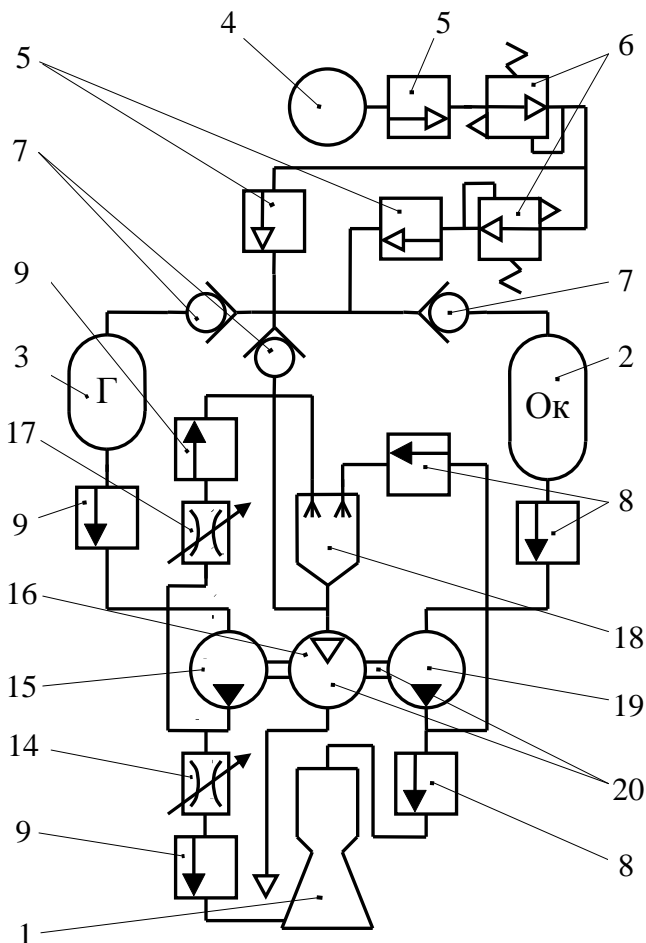


Рис. 39. Схема ЖРДУ с НПТ без дожига генераторного газа с двухкомпонентным ЖГГ и схемой организации рабочего процесса в КС «жидкость – жидкость»:

1 – камера; 2 – бак окислителя; 3 – бак горючего; 4 – баллон с газом; 5 – газовый клапан; 6 – газовый редуктор давления; 7 – обратный клапан; 8 – пускоотсечной клапан окислителя; 9 – пускоотсечной клапан горючего; 14 – регулятор соотношения компонентов в КС; 15 – насос горючего; 16 – турбина; 17 – регулятор тяги; 18 – жидкостный газогенератор (ЖГГ); 19 – насос окислителя; 20 – ТНА;

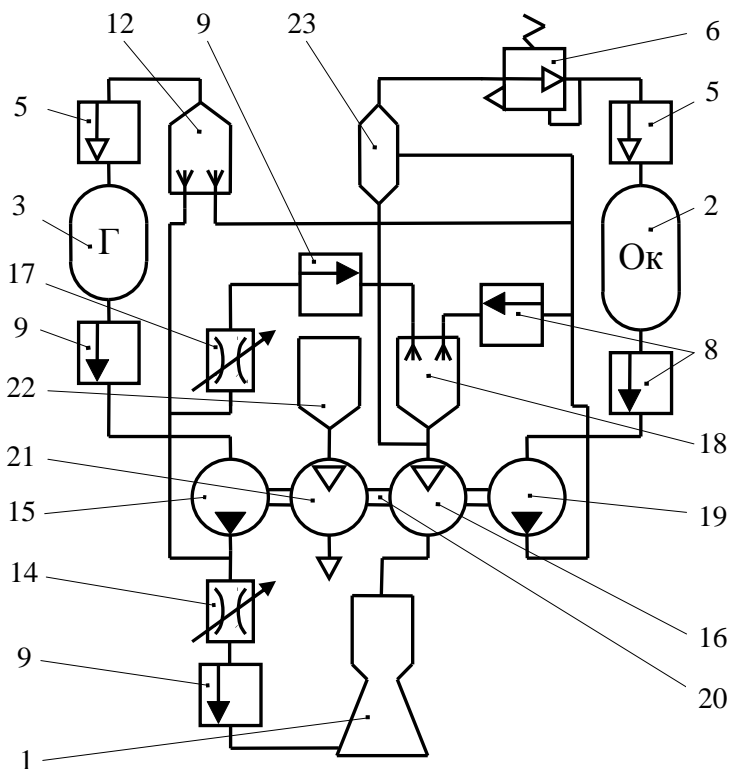


Рис.40. Схема ЖРДУ с НПТ без дожигания генераторного газа с двухкомпонентным ЖГГ и схемой организации рабочего процесса в КС «газ – жидкость»:

1 – камера; 2 – бак окислителя; 3 – бак горючего; 5 – газовый пускоотсечной клапан; 6 – газовый редуктор давления; 8 – пускоотсечной клапан окислителя; 9 – пускоотсечной клапан горючего; 14 – регулятор соотношения компонентов в КС; 15 – насос горючего; 16 – турбина; 17 – регулятор тяги; 18 – жидкостный газогенератор (ЖГГ); 19 – насос окислителя; 20 – ТНА; 21 – пусковая турбина ТНА; 22 – пусковой ТГГ или пиростартёр; 23 – смеситель.

Раскрутка ТНА при запуске осуществляется либо воздушным стартером (рис. 39), либо пиростартером или пусковым ТГГ (рис. 40 и 41).

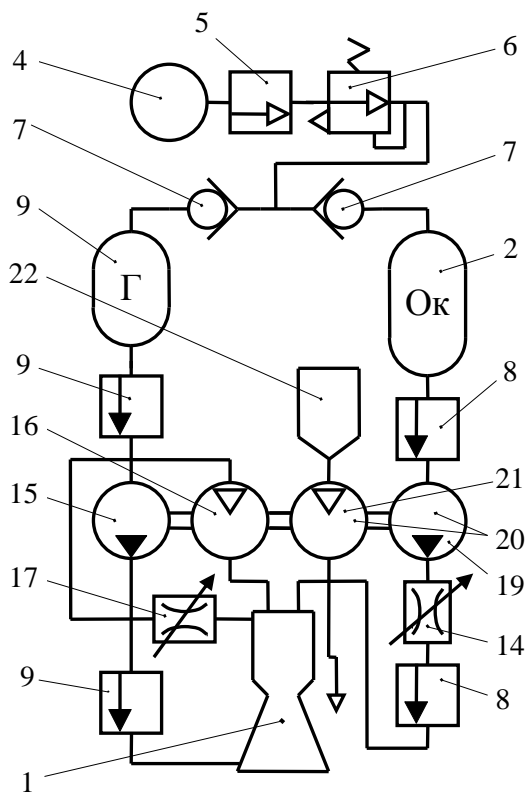


Рис. 41. Схема ЖРДУ НТП с испарением горючего в тракте охлаждения камеры и схемой организации рабочего процесса в КС

«газ – жидкость»:

- 1 – камера; 2 – бак окислителя; 3 – бак горючего; 4 – баллон с газом; 5 – газовый пускоотсечной клапан; 6 – газовый редуктор давления; 7 – обратный клапан; 8 – пускоотсечной клапан окислителя; 9 – пускоотсечной клапан горючего; 14 – регулятор соотношения компонентов в КС; 15 – насос горючего; 16 – турбина; 17 – регулятор тяги; 19 – насос окислителя; 20 – ТНА; 21 – пусковая турбина ТНА; 22 – пусковой ТГГ или пиростартёр.

Схема ЖРД, где рабочее тело для бины получают испарением горючего в тракте охлаждения камеры (рис.41) достаточно совершенна. По ней работает кислородно-водородный ЖРД RL-10А

тягой 77кН фирмы United Technologies Pratt and Whitney (USA). Камера таких ЖРД работает по схеме „г-ж”. В водородно-кислородных ЖРД большой тяги для получения оптимальных частот вращения насосов горючего и окислителя, что объясняется существенным отличием компонентов по плотности, могут предусматриваться два ТНА и два восстановительных газогенератора.

Возможна схема ЖРД, когда в одном из двух газогенераторов получают восстановительный газ, а в другом – окислительный. Тогда в камеру

поступают и сгорают два компонента в газовой фазе, т.е. реализуется схема рабочего процесса в камере типа „газ-газ” („г-г”).

9. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

9.1. Общая картина и характеристика процесса

Рабочий процесс в камере сгорания ЖРД должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить:

- максимальную полноту сгорания топлива;
- устойчивость протекания процессов в камере для надежной и безопасной работы двигателя;
- защиту стенок камеры от перегрева и прогорания.

В самом общем случае рабочий процесс в камере сгорания представляет собой совокупность сложных взаимосвязанных физико-химических процессов преобразования топлива в конечный продукт сгорания, а именно: впрыск, распыление и дробление компонентов, первоначальное смешение и распределение компонентов в объеме КС, прогрев и испарение капель за счёт теплоты из зоны горения, смешение газообразных горючего и окислителя, горение, т.е. протекание экзотермических химических реакций как гомогенных, так и гетерогенных, турбулентное и диффузное перемешивание продуктов сгорания и выравнивание их состава.

В зависимости от агрегатного состояния подаваемых в камеру сгорания компонентов различают три схемы организации рабочего процесса в камере:

- ✓ „жидкость–жидкость” („ж–ж”), при которой оба компонента (впрыскиваются) подаются в КС в жидком виде;
- ✓ „газ–жидкость” („г–ж”), когда один из компонентов подается в камеру сгорания в виде газа, а второй – в жидком виде;
- ✓ „газ–газ” („г–г”), при которой оба компонента подаются в КС в газообразном состоянии.

Реальная картина рабочего процесса в камере сгорания зависит природы топлива, схемы организации рабочего процесса, конструкции КС и системы смесеобразования.

Изобразим в самом общем случае картину рабочего процесса в КС, т.е. схему превращения жидких самовоспламеняющихся компонентов топлива в продукты сгорания (рис. 42).

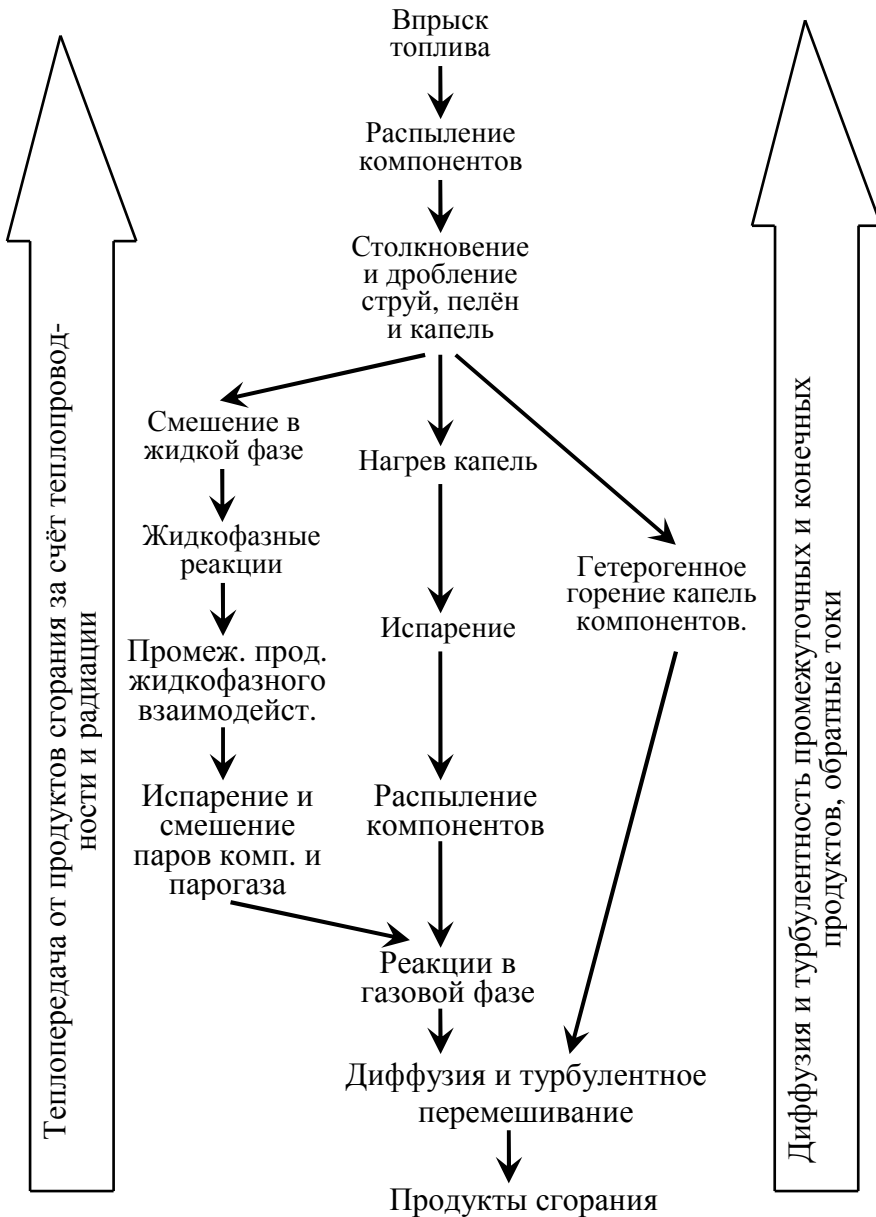


Рис. 42. Схема организации рабочего процесса в КС ЖРД

Характерным для самовоспламеняющихся топлив являются экзотермические реакции в жидкой фазе, происходящие при контакте капель пелен горючего и окислителя. Выделяющееся тепло способствует прогреву и испарению капель компонентов. Одновременно с гомогенным горением протекает, как правило, и гетерогенное горение.

Гетерогенное горение – это горение капель одного компонента в парах другого. Оно реализуется в КС ЖРД, когда один из компонентов испаряется значительно быстрее второго или когда имеется заметное различие в размере капель компонентов.

Гомогенное горение – это горение газообразной топливной смеси.

Из рассмотренной общей схемы физической картины рабочего процесса в камере сгорания легко получить схемы для несамовоспламеняющихся компонентов и других организации рабочего процесса в камере типа „г–ж” и „г–г”. Сделать это студентам самостоятельно, помня что в камерах, реализующих схемы типа „г–ж” и „г–г”, процессы связанные с нагревом и газификацией одного или обоих компонентов, отсутствуют.

ЛЕКЦИЯ № 3

9.2. Протекание элементарных составляющих рабочего процесса в камере сгорания

Процессы подготовки топлива к горению и собственно горения тесно взаимосвязаны. Между отдельными процессами не существует определённых границ ни в пространстве, ни во времени. Покажем это на рис. 43.

На рисунке 43 изображены следующие элементарные процессы:

- 1 – распыливания (распыла) и первоначального перемешивания,
- 2 – подогрева и испарения капель,
- 3 – смешения паров окислителя и горючего,
- 4 – горения, т.е. протекания химических реакций.

В камере сгорания ЖРД можно условно выделить две зоны I и II (рис. 43). Границей раздела этих зон является сечение КС, вблизи которого располагается фронт пламени.

В первой зоне протекают интенсивно подготовительные процессы распыливания, перемешивания, подогрева и испарения. К концу зоны они практически завершаются и возникают начальные очаги горения. Затем на очень коротком участке камеры интенсивно сгорает подготовленная основная масса топлива, образуя так называемый фронт пламени.

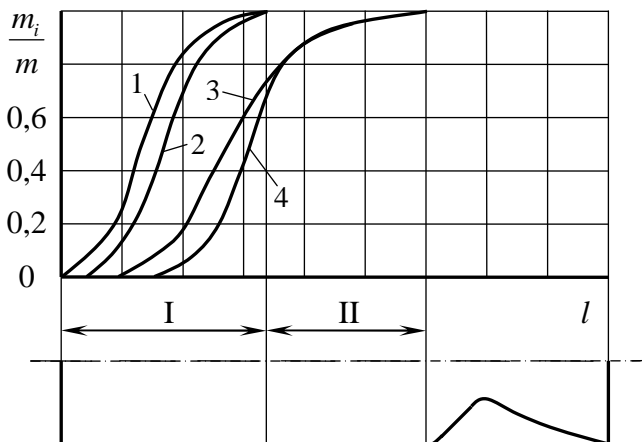


Рис. 43. Схема протекания элементарных процессов в камере сгорания

Во второй зоне (II) происходит догорание топлива и продуктов неполного окисления и выравнивания состава рабочего тела за счет диффузии и турбулентного перемешивания.

Первая зона в ядре потока имеет небольшую протяженность. У маршевых ЖРД она не более 100мм.

Важной характеристикой рабочего процесса в КС является время преобразования $\tau_{пр}$.

$\tau_{пр}$ – промежуток времени от впрыска топлива до полного превращения его в продукты сгорания (см. рис. 44).

На рис.44 $\psi = \frac{m_{ПС}}{m}$ – относительная масса прореагировавшего топлива.

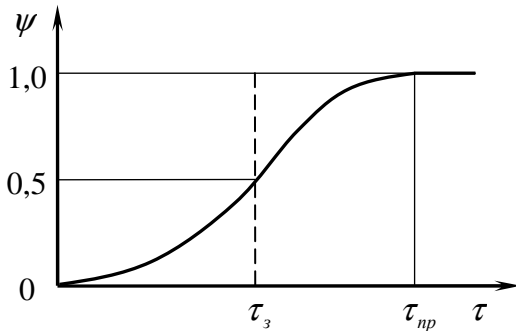


Рис. 44. Зависимость относительной массы сгоревшего топлива в КС ψ по времени

Время преобразования $\tau_{пр}$ определяется в основном временем протекания самых медленных из рассмотренных элементарных процессов. При $T > 2000$ К время протекания химических реакций горения составляет $10^{-6} \dots 10^{-7}$ с ($0,1 \dots 1$ мкс), а наиболее медленными будут процессы испарения и

смешения ($\tau_{исп} = 10^{-3}$ с = 1 мс). $\tau_{исп}$

Интенсифицировать испарение можно увеличив теплоотдачу каплям компонентов от продуктов сгорания из зоны реакции, а также разлив поверхность компонентов, т.е. мельче их распылив.

Сильно развитая турбулентность потока и процесс диффузии ускоряют протекание как подготовительных процессов, так и процесса горения.

Часто при решении задач динамики камеры ЖРД процесс постепенного преобразования топлива в продукты сгорания представляют ступенчатым процессом, когда топливо, поступившее в КС, переходит в продукты сгорания мгновенно по истечении времени запаздывания $\tau_з$ (см. рис.44).

9.3. Обобщённые характеристики процессов в камере сгорания

Обобщенные характеристики необходимы для определения размеров камеры сгорания на стадии проектирования. Наиболее распространенными обобщенными характеристиками являются следующие:

1. Среднее время пребывания в камере сгорания τ_n .

τ_n – это отношение массы продуктов, заполняющих камеру сгорания, к массовому расходу топлива через камеру, т. е.

$$\tau_n = \frac{m_{\text{КС}}}{\dot{m}} = \frac{V_{\text{КС}} \bar{\rho}}{\dot{m}}, \quad (227)$$

где $m_{\text{КС}}$ – масса РТ, расположенного в камере сгорания; $V_{\text{КС}}$ – объем камеры сгорания, который принято определять как объем до минимального сечения, $\bar{\rho}$ – средняя плотность продуктов в КС.

Величину $\bar{\rho}$ заменяют обычно величиной $\rho_{o.c}$, известной из термодинамического расчета, тогда

$$\tau_n = \frac{V_{\text{КС}} \rho_{o.c}}{\dot{m}}, \quad (228)$$

Действительное время пребывания больше вычисленного по формуле (228) особенного для камер, работающих по схеме „ж–ж” и „г–ж”.

Величина τ_n , обеспечивающая высокую полноту сгорания топлива, зависит:

- ✓ от природы топлива;
- ✓ системы смесеобразования;
- ✓ параметров рабочего процесса;
- ✓ размерности камеры сгорания.

Для выполненных ЖРД $\tau_n = 0,001 \dots 0,008 \text{ с} = 1 \dots 8 \text{ мс}$.

Обязательно для всех камер ЖРД должно выполняться условие

$$\tau_n \geq \tau_{np}. \quad (229)$$

2. Приведенная длина камеры сгорания L_{np} .

$$L_{np} = \frac{V_{\text{КС}}}{F_m}, \quad (230)$$

где F_m – площадь минимального сечения сопла.

Учитывая, что $\rho_{o.c} = \frac{p_{o.c}}{R_{o.c} T_{o.c}}$, а $\beta = \frac{p_{o.c} F_m}{\dot{m}}$, выражение для τ_n

получим в виде

$$\tau_n = \frac{V_{\text{КС}} \beta}{F_{\text{М}} R_{\text{о.с}} T_{\text{о.с}}} = \frac{L_{\text{нр}}}{\beta A^2(n)}. \quad (231)$$

Из полученного выражения (230) следует, что для выбранного топлива приведённая длина КС прямо пропорциональна среднему времени пребывания в камере сгорания, т.к. $\beta, A(n) = \text{const}$ и $\frac{\beta}{R_{\text{о.с}} T_{\text{о.с}}} = \text{const}$.

Характерные значения $L_{\text{нр}} = 1,2 \dots 3,0$ м для камер, работающих по схеме:

- ✓ „ж – ж” $L_{\text{нр}} = 1,2 \dots 3,0$ м;
- ✓ „г – ж” $L_{\text{нр}} = 0,8 \dots 1,5$ м;
- ✓ „г – г” $L_{\text{нр}} = 0,2 \dots 1,0$ м.

3. Расходонапряжённость камеры сгорания \dot{m}_F .

\dot{m}_F – это отношение массового расхода продуктов сгорания \dot{m} к площади поперечного сечения камеры на входе $F_{\text{к}}$.

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}}{F_{\text{к}}}. \quad (232)$$

Для цилиндрической камеры сгорания $F_{\text{к}} = F_{\text{с}}$ и расходонапряжённость определяют так

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}}{F_{\text{с}}} = \frac{p_{\text{к}} F_{\text{м}}}{\beta F_{\text{с}}}. \quad (233)$$

Так как \dot{m}_F прямо пропорциональна $p_{\text{к}}$, то в расчетах обычно применяют относительную расходонапряжённость

$$\bar{\dot{m}}_F = \frac{\dot{m}_F}{p_{\text{к}}}. \quad (234)$$

Значения $\bar{\dot{m}}_F$ в ЖРД могут составлять $(0,8 \dots 2,5) \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{Нс}}$ или $0,08 \dots 0,25 \frac{\text{г}}{\text{Нс}}$. Меньшие значения относительной расходонапря-

жённости КС относятся к ЖРД без дожигания генераторного газа.

Обобщенные характеристики процессов в КС связаны между собой. Основным источником информации об этих величинах служат статистические данные, накапливаемые в двигательных ОКБ.

9.4. Топливные форсунки ЖРД

Форсунки являются основными элементами смесительной головки камеры ЖРД или газогенератора.

Форсунка – это устройство, предназначенное для подачи (впрыска) в камеру сгорания компонентов топлива, их распыления и первоначального распределения по объёму камеры.

Форсунки, применяемые в ЖРД, можно классифицировать по следующим признакам.

1. Особенности устройства и конструкции:

- ✓ струйные;
- ✓ центробежные;
- ✓ щелевые.

Практически всё многообразие форсунок ЖРД представляет собой различные комбинации двух основных типов струйных и центробежных.

2. Агрегатному состоянию подаваемых компонентов топлива:

- ✓ жидкостные;
- ✓ газовые;
- ✓ газожидкостные.

3. Числу компонентов, вводимых одной форсункой:

- ✓ однокомпонентные;
- ✓ двухкомпонентные.

Для качественного (хорошего) смесеобразования в КС форсунки должны обеспечить качественный распыл, который определяется следующими параметрами:

- тонкостью распыла, оцениваемой некоторым средним размером капель, получаемых при распылении;
- однородностью распыла, определяемой диапазоном изменения размеров капель в факеле распыленного топлива;
- дальностью факела – глубиной проникновения распыленного компонента (факела распыла) в газовую струю;

- равномерностью расходонапряжённости, т.е. однородностью распределения жидкости в площади факела распыла;
- среднем углом распыла $2\bar{\alpha}_\phi$, измеряемым у среза сопла форсунки.

Форсунки должны обеспечивать требуемый расход компонентов и их качественный распыл при умеренном перепаде давления на них.

Для форсунок камер ЖРД перепад давления составляет 0,3...3,0 МПа. Увеличение перепада давления на форсунках нежелательно из-за роста массы системы подачи топлива.

Перепад давления на форсунках газогенератора можно выбирать несколько меньше.

ЛЕКЦИЯ № 4

9.3.1. Теория струйных форсунок

Струйные форсунки чрезвычайно просты по устройству. Они выполняются в виде:

- отверстия в днище или стенки камеры;
- трубки;
- цилиндрического насадка.

Изобразим эти виды струйных форсунок на рис. 45.

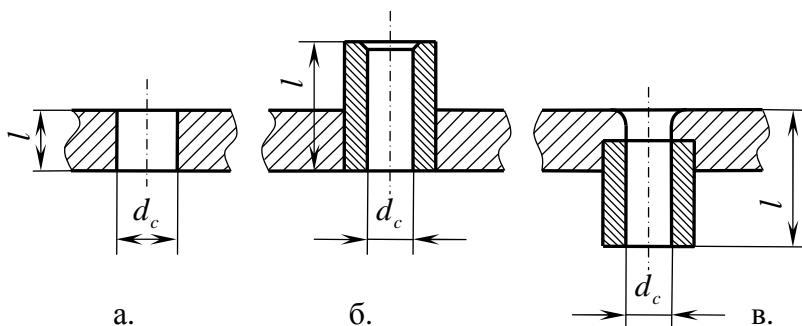


Рис. 45. Струйные форсунки:
а – отверстие в стенке; б – трубка; в – цилиндрический насадок

Основными геометрическими параметрами струйной форсунки являются:

- ✓ диаметр выходного отверстия d_c ;
- ✓ длина канала l ;
- ✓ форма кромки канала на входе.

Кромка канала на входе может быть (см. рис. 45):

- ✓ *острая* (а),
- ✓ *с фаской* (б),
- ✓ *закругленная* (в).

Покажем на рис. 46 физическую картинку течения жидкости через струйную форсунку с острой входной кромкой.

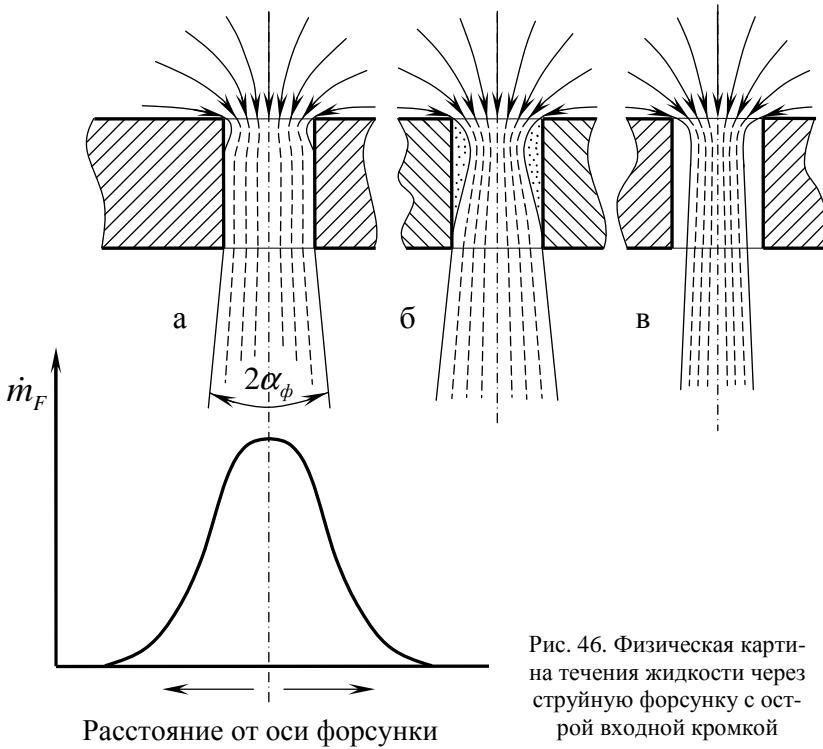


Рис. 46. Физическая картина течения жидкости через струйную форсунку с острой входной кромкой

В идеальном случае, который соответствует одномерному невязкому течению, массовый расход через струйную форсунку запишется

$$\dot{m}_{\phi,ид} = F_{\phi} \rho_{ж} W_{к,ид}, \quad (235)$$

где $F_{\phi} = \frac{\pi d_c^2}{4}$ – площадь выходного отверстия или среза сопла струйной форсунки, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, $W_{к,ид}$ – идеальная скорость истечения.

Идеальная скорость истечения определяется из уравнения Бернулли

$$\frac{p_{ex}}{\rho_{ж,ex}} + \frac{W_{ex}^2}{2} = \frac{p_{к}}{\rho_{ж,к}} + \frac{W_{к,ид}^2}{2}. \quad (236)$$

Для несжимаемой жидкости, когда $\rho_{ж,ex} = \rho_{ж,к} = \rho_{ж}$ получаем

$$\dot{m}_{\phi,ид} = F_{\phi} \rho_{ж} \sqrt{2\Delta H}, \quad (237)$$

где
$$\Delta H = \frac{p_{ex} - p_{к}}{\rho_{ж}} + \frac{W_{ex}^2}{2}.$$

Параметры с индексом „вх” соответствуют условиям на входе в форсунку, а с индексом „к” – условиям на входе в камеру сгорания, на выходе из форсунки.

Поскольку $W_{ex} \ll W_{к}$, то можно принять $W_{ex} = 0$, тогда

$$\dot{m}_{\phi,ид} = \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2\rho_{ж} \Delta p_{\phi}}, \quad (238)$$

где Δp_{ϕ} перепад давления на форсунке, который определяется

$$\Delta p_{\phi} = p_{ex} - p_{к}. \quad (239)$$

В последнем выражении p_{ex} – давление жидкости (компонента топлива) перед форсункой.

Действительный массовый расход жидкости через струйную форсунку запишется

$$\dot{m}_{\phi} = \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2\rho_{ж} \Delta p_{\phi}}, \quad (240)$$

где, μ_{ϕ} – коэффициент расхода форсунки.

Коэффициент расхода форсунки представляет собой отношение действительного массового расхода жидкости через форсунку \dot{m}_ϕ к идеальному расходу.

$$\mu_\phi = \frac{\dot{m}_\phi}{\dot{m}_{\phi,ид}}. \quad (241)$$

Жидкость втекает в канал форсунки как в осевом направлении, так и вдоль стенки (см. рис. 46). В итоге жидкость вытекает из форсунки в направлении близком к осевому, поэтому втекающие вдоль стенки частицы жидкости должны развернуться примерно на 90° . Для этого к ним в соответствие с законом механики нужно приложить центростремительную силу. Последняя создается за счет градиента давления по радиусу кривизны траектории движения частиц жидкости. Пограничные линии тока отклоняются от стенки форсунки. У стенки создается область с пониженным давлением, где устанавливается вихревое течение. Струя жидкости сжимается к оси, образуя минимальное сечение на расстоянии $(0,25 \dots 0,50) d$ от входной кромки.

Отклонение линий тока от стенки у струйных форсунок с острой входной кромкой происходит при числах Рейнольдса $Re > 5$, т.е. очень малых перепадах давления на форсунке. С увеличением Re застойная область удлиняется, а давление в ней понижается.

У струйных форсунок с острой входной кромкой возможны следующие режимы работы:

➤ если $\frac{l}{d_c} \geq 1,5$:

1. Безотрывный режим истечения (рис.46, а), когда струя заполняет все выходное сечение форсунки. Коэффициент расхода форсунки на этом режиме $\mu_\phi = 0,8 \dots 0,9$. Он может быть определен с

помощью зависимости $\mu_\phi = f(Re, \frac{l}{d_c})$, являющейся теоретической

при ламинарном режиме течения и эмпирической – при турбулентном режиме.

2. Отрывный режим истечения (рис.46, в), когда струя не касается стенок канала на выходе.

Коэффициент расхода форсунки на этом режиме $\mu_\phi = 0,60 \dots 0,62$.

Смена режима истечения происходит скачком при достижении на форсунке перепада давления $\Delta p_{omp} = f\left(\frac{l}{d_c}, p_\kappa\right)$.

3. Кавитационный режим истечения (рис.4б, б), когда давление в вихревой области становится ниже давления насыщенных паров рабочей жидкости, и возникает кавитационная каверна.

Условие существования кавитационного режима истечения

$$\alpha \leq \alpha_{кр} . \quad (242)$$

где α – число кавитации, $\alpha_{кр}\left(\frac{l}{d_c}, Re\right)$ – критическое число кавитации.

Число кавитации определяется

$$\alpha = \frac{p_\kappa - p_n}{\Delta p_\phi} , \quad (242)$$

где p_n – давление насыщенного пара рабочей жидкости.

Коэффициент расхода на кавитационном режиме истечения

$$\mu_\phi = \varepsilon \sqrt{1 + \alpha} , \quad (243)$$

где $\varepsilon = \frac{F_{жс}}{F}$ – коэффициент сжатия струи в области за входным сечением. Обычно $\varepsilon = 0,61 \dots 0,62$.

➤ если $\frac{l}{d_c} < 1,5$:

4. Неустойчивый режим истечения, когда имеет место различная степень замыкания вихревой области на стенке канала.

Разброс коэффициента расхода на этом режиме работы при одном и том же перепаде давления на форсунке может достигать 10%.

Угол распыла струйных форсунок составляет $2\alpha_\phi = 3 \dots 15^\circ$. Дальнобойность струи большая. Струя при характерных для ЖРД перепадах давления распадается на капли крупных размеров. Улуч-

шить смесеобразование можно, обеспечив соударение струй компонентов топлива или натекание струй на преграду.

Струйные форсунки являются практически единственными, используемыми для подачи генераторного газа в камеру сгорания, работающую по схеме „г – ж” и „г – г”. Так как газ сжимаемый, то массовый расход генераторного газа через форсунку согласно теории газовой динамики запишется:

$$\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \rho_{ex} \left(\frac{p_\kappa}{p_{ex}} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{2 \frac{n}{n-1} R_{ex} T_{ex} \left[1 - \left(\frac{p_\kappa}{p_{ex}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} \quad (244)$$

где R_{ex} – газовая постоянная генераторного газа на входе, n – средний показатель изэнтропы расширения.

В ЖРД диаметры струйных форсунок жидких компонентов составляют от 2 до 6 мм, а газообразных – от 1 до 18 мм.

9.3.2. Центробежные форсунки

Центробежная форсунка отличается от струйной тем, что в ней жидкость получает предварительную закрутку. Вращение жидкости достигается либо за счет её тангенциального подвода в камеру закручивания, либо за счет использования шнека.

Изобразим на рис. 47 схему простейшей центробежной форсунки и физической картины течения жидкости в ней.

В идеальном случае для частицы идеальной жидкости постоянной массы, вращающейся на радиусе r в камере закручивания форсунки, уравнения сохранения момента количества движения и энергии запишутся

$$W_u r = W_{ex} R_{ex} = const, \quad (245)$$

$$p + \frac{\rho}{2} (W_u^2 + W_r^2 + W_a^2) = p_{ex} + \frac{\rho W_{ex}^2}{2}, \quad (246)$$

где p – статическое давление в жидкости на радиусе r ; W_u, W_r, W_a – окружная, радиальная и осевая составляющие скорости движения частицы жидкости соответственно.

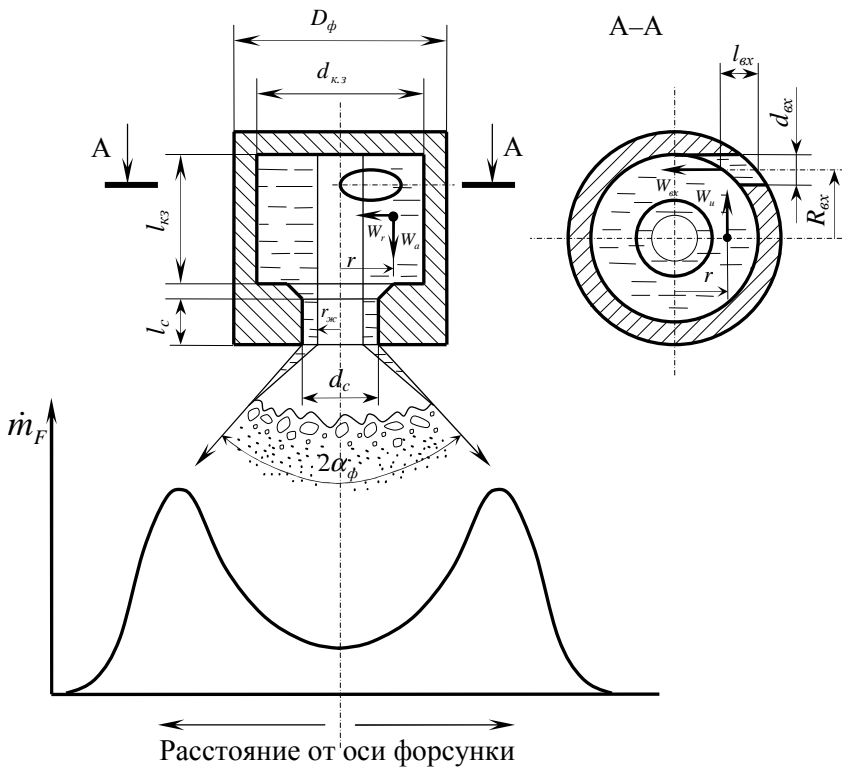


Рис.47. Схема простейшей однокомпонентной центробежной форсунки и физическая картина течения жидкости в ней

Из выражений (245) и (246) следует, что при уменьшении радиуса r ($r \downarrow$), т.е. приближении к оси форсунки, окружная составляющая скорости движения частицы жидкости W_u увеличивается ($W_u \uparrow$), а статическое давление в жидкости p снижается ($p \downarrow$). Практически давление жидкости снижается до давления среды p_κ , куда происходит истечение. Центральная часть форсунки заполняется рабочим телом (газом) этой среды с давлением p_κ . Этот газ вра-

щается, образуя вихрь с радиусом $r_{жс}$. Течение жидкости по соплу форсунки будет осуществляться не через всю площадь геометрического сечения диаметром d_c , а лишь через кольцевую площадь сечения от радиуса $r_c = \frac{d_c}{2}$ до радиуса $r_{жс}$, называемую живым сечением сопла форсунки.

Коэффициент заполнения жидкостью выходного сечения сопла форсунки или живого сечения форсунки

$$\varphi = \frac{F_{жс}}{F_c} = 1 - \frac{r_{жс}^2}{r_c^2}. \quad (247)$$

На выходе из центробежной форсунки образуется пелена, имеющая вид конуса или, точнее, однополостного гиперболоида вращения. Она распадается на мелкие капли, образуя факел распыления (распыла).

Теория простейшей центробежной форсунки была разобрана Г.Н. Абрамовичем. Он рассматривал течение невязкой несжимаемой жидкости в форсунке с одним тангенциальным каналом, когда вся масса входящей жидкости сосредоточена на оси входного канала.

Был определен критерий подобия процессов течения жидкости в центробежных форсунках, названный геометрической характеристикой центробежной форсунки A

$$A = \frac{R_{вх} r_c}{r_{вх}^2}. \quad (248)$$

Из уравнения энергии и закона сохранения момента количества движения (245) и (246) были получены следующие зависимости для коэффициента расхода и среднего угла распыла центробежной форсунки

$$\mu_\phi = \frac{1}{\sqrt{\frac{A^2}{1-\varphi} + \frac{1}{\varphi^2}}}, \quad (249)$$

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha}_\phi = \frac{W_{u,cp}}{W_a} = \frac{2\mu_\phi A}{\sqrt{(1 + \sqrt{1-\varphi})^2 - 4\mu_\phi^2 A^2}}. \quad (250)$$

Учитывая зависимость

$$A = \frac{1 - \varphi}{\sqrt{\varphi^3/2}}, \quad (251)$$

можно сделать вывод, что параметры центробежной форсунки μ_φ , $2\bar{\alpha}_\varphi$ и φ являются функцией лишь её геометрической характеристики A . Изобразим эти зависимости графически на рис. 48.

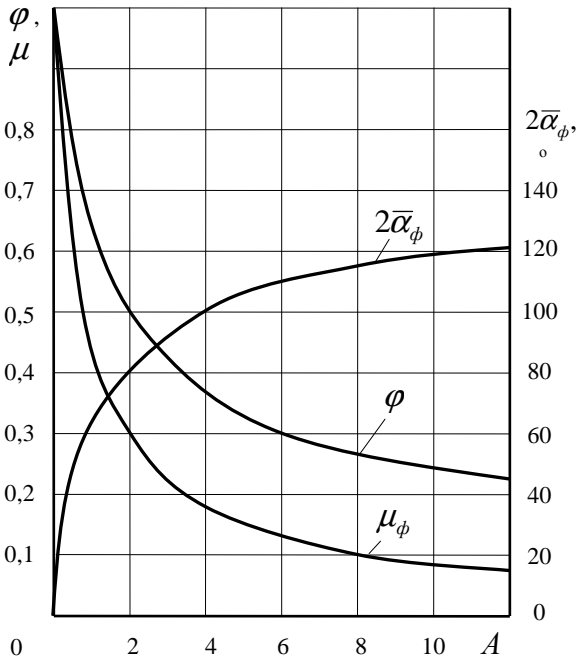


Рис. 48. Расчётная зависимость коэффициентов расхода μ , живого сечения φ и среднего угла факела распыла $2\bar{\alpha}_\varphi$ от геометрической характеристики центробежной форсунки A

Увеличение A приводит к повышению степени закрутки потока, т.е. росту отношения W_u/W_a , а это вызывает уменьшение коэффициента расхода μ_φ и увеличение среднего угла распыла $2\bar{\alpha}_\varphi$.

Коэффициент расхода центробежных форсунок существенно меньше, чем у струйных. У центробежных форсунок со значениями $A = 1 \dots 6$ коэффициент расхода $\mu_\phi = 0,45 \dots 0,14$. Это существенный недостаток центробежных форсунок, приводящий к уменьшению пропускной способности смесительной головки камеры. Средний угол распыла таких форсунок $2\bar{\alpha}_\phi = 60 \dots 110^\circ$.

Второй недостаток центробежных форсунок – их конструктивная сложность.

Геометрически реальная центробежная форсунка может отличаться от рассмотренной простейшей наличием нескольких входных каналов с осью, наклоненной под углом β к оси сопла форсунки, наличием шнека и др.

Эти отличия учитывает обобщённое выражение для геометрической характеристики

$$A = \frac{\pi R_{ex} r_c}{n F_{ex}} \sin \beta \quad (252)$$

где F_{ex} – площадь проходного сечения одного входного канала, n – число входных каналов или заходов резьбы шнека. При использовании шнека β – угол наклона винтовой линии.

Центробежные форсунки обеспечивают высокую тонкость распыла.

Конструктивно центробежные форсунки выполняются либо закрытыми, либо открытыми, у которых радиус сопла равен радиусу вихревой камеры. Изобразим закрытую со шнековым завихрителем (рис. 49) и открытую с тангенциальным подводом (рис. 50) центробежные форсунки.

Число входных отверстий в тангенциальной форсунке может быть от 1 до 12. Если их много, то они располагаются в двух или трёх поперечных сечениях (ярусах).

В реальных центробежных форсунках из-за вязкости жидкости возникают силы трения. Это приводит к снижению момента количества движения, а значит увеличению коэффициента живого сечения форсунки φ и коэффициента расхода форсунки μ_ϕ и снижению угла распыла форсунки $2\alpha_\phi$.

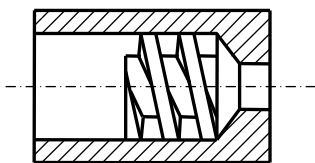


Рис. 49. Закрытая центробежная форсунка со шнеком

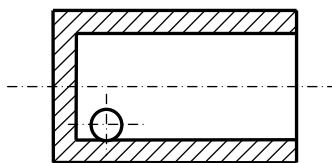


Рис. 50. Открытая центробежная форсунка с тангенциальным входным отверстием

Влияние вязкости реальной жидкости на параметры форсунки можно учитывать, используя эквивалентную геометрическую характеристику

$$A_3 = \frac{A}{1 + \frac{\lambda}{2} \left[\frac{(R_{ex} + r_{ex})^2}{n \cdot r_{ex}^2} - A \right]}, \quad (253)$$

где λ - коэффициент трения.

Подставляя A_3 вместо A в выражение (249), (250) и (251), определяем режимные параметры реальной центробежной форсунки φ , μ_φ и $2\bar{\alpha}_\varphi$.

ЛЕКЦИЯ № 5

9.3.2. Двухкомпонентные форсунки

Наряду с однокомпонентными форсунками, в ЖРД нашли широкое распространение двухкомпонентные форсунки. Через них подаются в КС сразу оба компонента в требуемом соотношении ядерном или пристеночном. Именно поэтому двухкомпонентная форсунка является элементарным смесителем.

Двухкомпонентные центробежные форсунки могут быть как с внешним, так и с внутренним смешением. Такие форсунки изображены на рис 51.

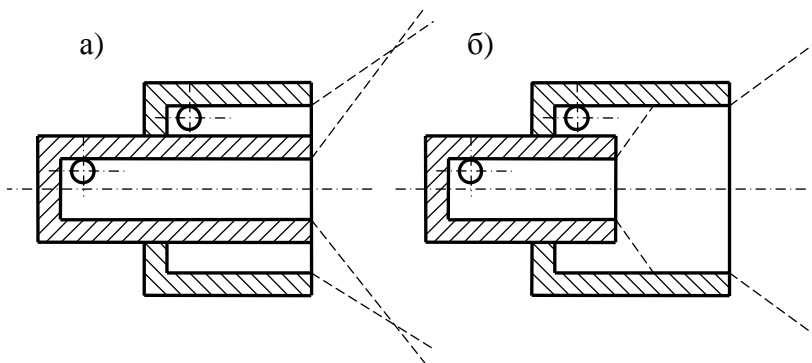


Рис. 51. Двухкомпонентные центробежные тангенциальные форсунки со смещением компонентов:
а) – внешним; б) – внутренним

В двухкомпонентной форсунке с внутренним смещением (рис.51,б) перемешивание компонентов топлива начинается в самой форсунке до их поступления в КС. Внутри форсунки образуется раствор или эмульсионная смесь компонентов, поступающая в камеру сгорания. Поэтому такие форсунки часто называют эмульсионными.

Двухкомпонентные форсунки с внутренним смещением можно применять только для несамовоспламеняющихся топлив.

Двухкомпонентные центробежно-центробежные форсунки проектируются так, чтобы внутренняя форсунка находилась в пределах газового вихря наружной форсунки. в этом случае внутренняя форсунка не нарушает нормальную работу наружной форсунки. однако превышение диаметра газового вихря над диаметром внутренней форсунки должно быть минимальным, иначе возможен прогар стенки внутренней форсунки из-за проникновения туда высокотемпературных продуктов сгорания из КС.

В двигателях с дожиганием генераторного газа используется двухкомпонентные струйно-центробежные форсунки. Изобразим такие форсунки на рис. 52.

В струйно-центробежной форсунке по струйной форсунке подается газовый компонент или генераторный газ, а по центробежной □ жидкий компонент.

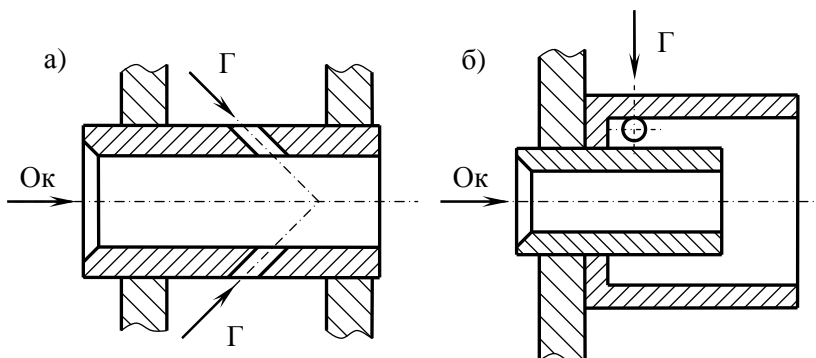


Рис.52. Двухкомпонентные форсунки:
а) – струйно-струйная; б) – струйно-центробежная

Пропускная способность смесительной головки с двухкомпонентными форсунками выше, чем с однокомпонентными центробежными.

Увеличить пропускную способность позволяют струйно-центробежные однокомпонентные форсунки. За счет различной дальности и углов распыла струйной и центробежной форсунок представляется возможным рассредоточивать процесс горения по длине КС.

9.4. Распыление компонентов топлива

Под распылением компонентов топлива понимается процесс распада струй или пелен компонентов, истекающих из форсунок, на капли и дальнейшее их дробление на более мелкие капли (вторичное дробление). Оба явления обусловлены воздействием на струю, пленку и каплю ряда внешних и внутренних сил.

К внешним силам относятся:

- ✓ сила взаимодействия со средой, в которую производится впрыск жидкости. Величина этой силы пропорциональна квадрату относительной скорости жидкости, плотности окружающей среды и квадрату диаметра капли;

- ✓ силы, возникающие при взаимном соударении струи, пелен и капель или при ударе их о препятствие.

К внутренним силам относятся:

- ✓ инерционные силы, которые приводят к потере устойчивости жидкости,
- ✓ турбулентные силы,
- ✓ молекулярные силы (силы вязкости и поверхностного натяжения).

Степень турбулентности жидкости определяется как естественной турбулентностью, так и особенностями конструкции форсунок, шероховатостью и формой каналов, возмущениями на входе в форсунки и другими причинами. В центробежной форсунке турбулентность создается закручиванием потока жидкости.

Силы инерции возникают при движении жидкости по каналам форсунки. Они способствуют распаду струи и пелены жидкости.

Силы вязкости препятствуют дроблению струи, т.к. они уменьшают её турбулентность и поглощают часть энергии движущейся жидкости.

Силы поверхностного натяжения также препятствуют распаду струй и капель, потому, что они стремятся свести к минимуму (min) поверхность данного объема жидкости.

Действие внутренних молекулярных сил тока бывает при повышении температуры.

Покажем на рис. 53 и 54 механизм распыления жидкости струйной и центробежной форсунками соответственно.

Под действием внешних и внутренних сил в струях и пелёнах возникают поверхностные возмущения, рост которых приводит к неустойчивости и разрушению

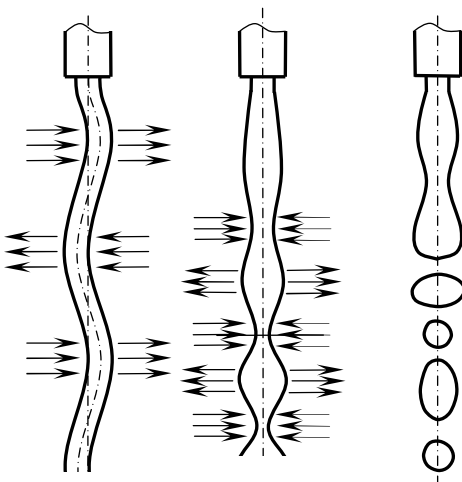


Рис. 53. Механизм распыления жидкости струйной форсункой

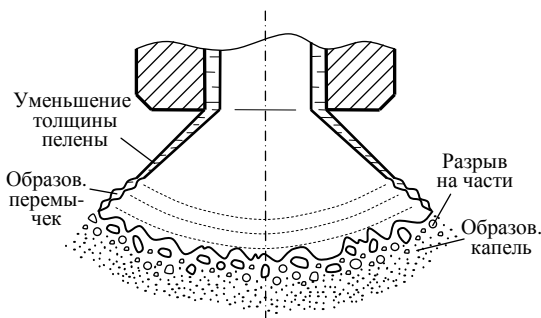


Рис. 54. Механизм распыления жидкости центробежной форсункой

струи и пелен. На рис. 53 показано, что при увеличении перепада давления на струйной форсунке сплошная струя сначала искривляется, затем образуются пучности и узлы (перемычки) и, наконец, струя распадается на капли.

В центробежной форсунке (см. рис. 54) под влиянием внешних и внутренних сил на поверхности пелены возникают волны малой длины. При возрастании амплитуды колебаний пелена теряет устойчивость и распадается на отдельные капли.

Характеристиками процесса распыления являются:

- ✓ тонкость или мелкость,
- ✓ однородность,
- ✓ дальнобойность факела,
- ✓ форма факела распыла,
- ✓ распределение расходонапряжённости в поперечном сечении камеры сгорания.

Тонкость распыления характеризуют некоторым средним размером капель. Используют среднемассовый, среднеобъемный и средний объёмно-поверхностный диаметры. Чаще всего применяют медианный диаметр капель, который определяется из условия, что суммарная масса капель, диаметр которых меньше или равен медианному составляет половину массы всех капель факела распыла.

Для лучшего понимания покажем это на массовых кривых распределения жидкости при распылении центробежной форсункой по размерам капель, которые называются спектрами распыла жидкости (рис. 55).

Спектры распыла получают опытным путем.

Медианный диаметр капель d_m у центробежных форсунок составляет обычно 25...250 мкм. Это означает, что 1 см³ жидкости де-

лится при $d_m = 70$ мкм примерно на 5 млн. капель. У струйных форсунок d_m равен 200...500 мкм.

Тонкость распыления наиболее существенно зависит от перепада давления на форсунке, который определяет скорость впрыска жидкости $W_{жс}$ и вязкости жидкости. Значение d_m уменьшается с увеличением Δp_ϕ . При одинаковом перепаде давлений на форсунке распыл более вязкой жидкости является менее тонким.

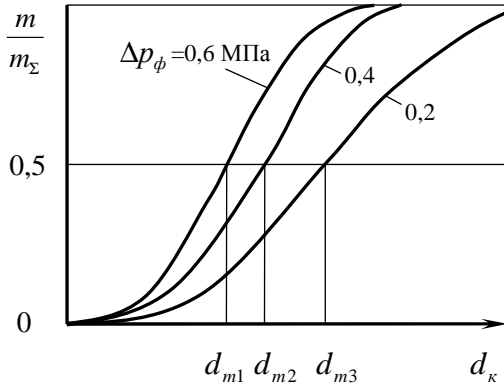


Рис. 55. Спектр распыла жидкости центробежной форсункой

Увеличение давления в камере сгорания, т.е. возрастание плотности среды, (куда) в которую впрыскивается жидкость, способствует уменьшению среднего диаметра капель.

Значительное влияние на тонкость распыливания центробежной форсункой оказывает величина геометрической характеристики A . Чем больше A , тем меньше коэффициент живого сечения ϕ . Значит толщина пелены жидкости, вытекающей из форсунки, уменьшается, а это ведет к более мелкому дроблению её на капли, т.е. улучшению тонкости распыления.

Однородность распыления определяется диапазоном изменения диаметра капель в факеле распыления: чем меньше разность между максимальным и минимальным диаметрами капель, тем больше однородность. Для оценки однородности распыла также нужно знать спектр распыла жидкости. Чем ближе к оси ординат располагается характеристика распыления, тем тоньше распыл и больше однородность.

Дальнобойность \square глубина проникновения факела распыленного топлива в газовую среду. Желательно иметь минимальную дальность

бойность, поскольку при этом для завершения процесса горения требуется минимальный объем камеры сгорания. Увеличение перепада давления на струйных форсунках приводит к увеличению дальности, что нежелательно. Но при этом увеличивается скорость истечения, способствующая более мелкому дроблению струи. Поэтому необходимо находить оптимальную величину Δp_ϕ .

Увеличение давления в камере сгорания снижает дальность факела из-за возрастания аэродинамического сопротивления.

Дальность факела у центробежной форсунки значительно меньше, чем у струйной.

К преимуществам центробежной форсунки можно отнести также способность изменять дальность факела за счет изменения её геометрической характеристики A . Увеличение A ведет к возрастанию угла конуса распыления. При этом поверхность топливного факела становится более развитой, возрастает сопротивление среды, ускоряется процесс распада пелены и, как следствие, уменьшается дальность.

Форма факела распыла обуславливается типом, геометрическими и гидравлическими параметрами форсунок.

Важной характеристикой процесса распыления является распределение расходонапряженности по радиусу и окружности топливного факела.

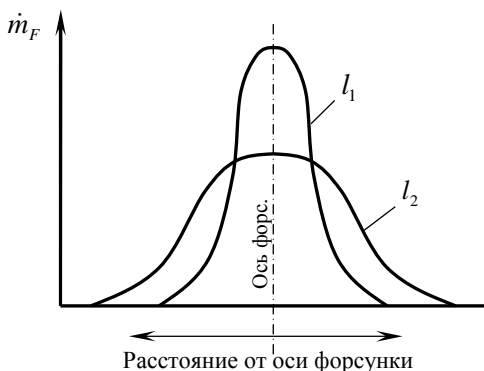


Рис. 56. Эпюра расходонапряженности по радиусу факела распыла струйной форсунки для двух расстояний от сопла ($l_1 > l_2$)

Расходонапряжённость представляет собой

$$\dot{m}_F = \frac{dm}{dF}. \quad (254)$$

Покажем на рис. 56 и 57 эпюру расходонапряжённости по радиусу факела распыла струйной и центробежной форсунки для двух расстояний от сопла.

В большинстве случаев форсунки не обеспечивают равномерного распределения жидкости в

факеле распыла.

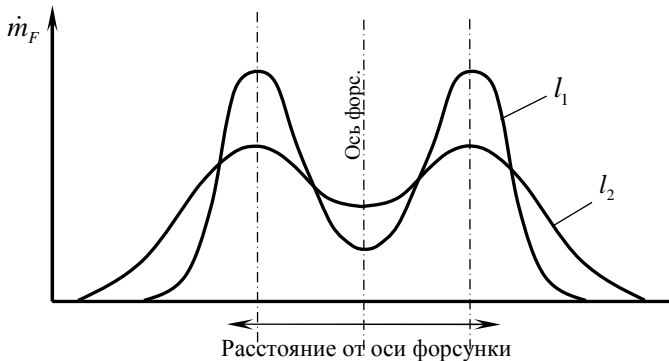


Рис. 57. Эпюра расходонапряжённости по радиусу факела распыла центробежной форсунки для двух расстояний от среза сопла ($l_2 > l_1$)

Типичным для струйной форсунки является максимум расходонапряжённости на её оси. По мере удаления от среза сопла форсунки эпюра становится более сглаженной.

Для центробежной форсунки характерно наличие минимума расходонапряжённости на оси форсунки и максимума на некотором удалении от нее.

Неравномерность расходонапряжённости по окружности топливного факела у центробежной форсунки (см. рис 58) зависит главным обра-

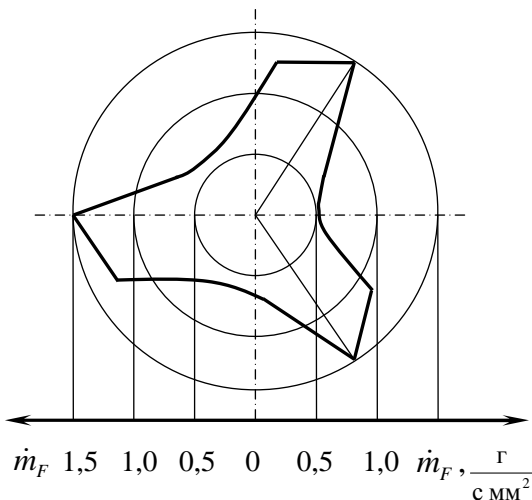


Рис. 58. Эпюра расходонапряжённости по окружности факела распыла центробежной форсунки

зом от конструктивных особенностей форсунки (количества и площади входных тангенциальных каналов), качества её изготовления.

Практика показывает, что с увеличением A ухудшается качество распределения расходонапряженности по окружности факела. Неравномерное распределение жидкости по окружности возрастает при наличии эксцентриситета сопла и камеры закручивания, увеличение шероховатости смачиваемых поверхностей форсунок и пр.

Следует отметить, что различные факторы, определяющие характеристики процесса распыления топлива, взаимосвязаны. Их необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить наивыгоднейшие характеристики ЖРД.

ЛЕКЦИЯ № 6

9.5. Смешение компонентов топлива

Смесительная головка камеры ЖРД должна обеспечить:

- ✓ смешение горючего и окислителя в оптимальности соотношения;
- ✓ равномерное распределение соотношения компонентов и расходонапряженности $\left(m_F = \frac{d\dot{m}}{dF} \right)$ по площади камеры в ядре потока и пристеночном слое;
- ✓ обеспечение надежной теплозащиты стенок камеры при минимальных потерях удельного импульса.

При оптимальном равномерном распределении соотношения компонентов в поперечном сечении камеры сгорания топливо сгорает в минимальном объеме с высокой полнотой сгорания (полного тепловыделения). Небольшая неравномерность распределения топлива выравнивается за счет турбулентных пульсаций. В то же время крупная неравномерность, масштаб которой превосходит шаг между форсунками, не выравнивается по длине камеры, что приводит к неполному сгоранию топливной смеси.

Качество смешения компонентов определяется смесительной головкой камеры. Совершенство работы смесительной головки во

многим зависит от работы элементарных смесителей и порядка размещения их на головке.

Элементарным смесителем называют наименьшую группу форсунок, обеспечивающих смещение горячего и окислителя в заданном соотношении.

Простейшим элементарным смесителем является двухкомпонентная форсунка.

Обычно стремятся разместить элементарные смесители на головке равномерно.

Однокомпонентные форсунки чаще всего располагают в сотовом или шахматном порядке с переходом к концентрическим окружностям на периферии. На рис. 12. приведены возможные схемы расположения однокомпонентных форсунок на смесительной головке камеры ЖРД.

Элементарные смесители:

- ✓ при шахматном расположении форсунок ABCD – одна форсунка горячего окружена 4 форсунками окислителя;
- ✓ сотовом расположении – ABCDEF – одна форсунка горячего окружена 6 форсунками окислителя.

Соотношение компонентов, обеспечивает смесительным элементом.

$$\text{ABCD} \quad K_m = \frac{4 \frac{1}{4} \dot{m}_{\text{ф.ок}}}{\dot{m}_{\text{ф.г}}} = \frac{\dot{m}_{\text{ф.ок}}}{\dot{m}_{\text{ф.г}}},$$

$$\text{ABCDEF} \quad K_m = \frac{6 \frac{1}{3} \dot{m}_{\text{ф.ок}}}{\dot{m}_{\text{ф.г}}} = \frac{2 \dot{m}_{\text{ф.ок}}}{\dot{m}_{\text{ф.г}}}.$$

При составном расположении форсунок и одном и том же соотношении компонентов K_m расход через форсунку окислителя уменьшается в два раза, чем при шахматном, и образуется шесть пучков капель, а не четыре. Первое, учитывая плотности и расходы компонентов, позволяет сблизить количества движений струй окислителя и горячего, а всё вместе – более равномерно распределить топливо в поперечном сечении камеры сгорания. Это обстоятельство

во является существенным преимуществом сотового расположения форсунок по сравнению с шахматным.

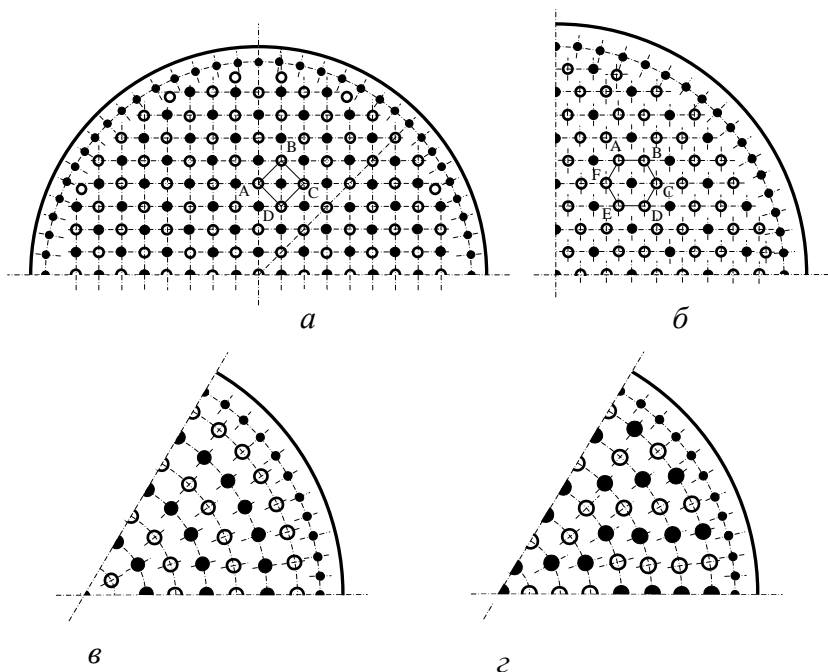


Рис. 59. Схемы расположения однокомпонентных форсунок на смеси-
тельной головке камеры ЖРД:
a – шахматное; *б* – сотовое; *в* – по концентрическим окружностям;
г – концентрически-шахматное:
 ○ – форсунки окислителя; ● – форсунки горючего; ● – пристеночные форсун-
 ки горючего меньшего расхода

Расход окислителя всегда больше расхода горючего (в несколько раз), и плотность окислителя больше плотности горючего. Поэтому при равном числе форсунок окислителя и горючего мощная струя (пелена) окислителя плохо смешивается с относительно слабой струей (пеленой) горючего, сбивая её в сторону. В этом можно убедиться, рассмотрев качественную картину гидродинамического

взаимодействия конусов распыла горючего и окислителя, изображённую на рис. 60.

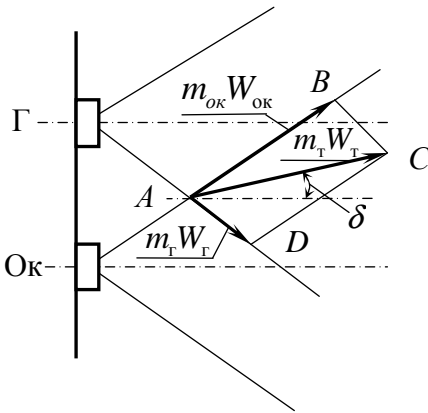


Рис. 60. Качественная картина гидродинамического взаимодействия факелов распыла форсунок горючего и окислителя

После столкновения конусов распыла горючего и окислителя, дальнейшее движение пучка капель жидкой смеси (топливной смеси) определяется по закону сложения количества движения. Так как количество движения окислителя обычно больше, чем количество движения горючего, то траектория полёта жидких частиц после столкновения отклоняется от осевого на угол δ в сторону форсунки горючего. При дальнейшем движении в направлении AC пучки капель вновь пересекаются с

аналогичными пучками и направление их движения приближается к осевому.

Двухкомпонентные форсунки располагают по концентрическим окружностям.

Для обеспечения надежного охлаждения стенки камеры сгорания у её внутренней поверхности создаётся пристеночный слой с пониженной температурой продуктов сгорания. Для этого на периферии смесительной головки создается зона при нестехиометрическом соотношении компонентов. Обычно создается пристеночный слой с избытком горючего. Однако при соответствующем выборе материала или покрытий стенок возможны варианты окислительного пристеночного слоя.

Изобразим на рис. 61 теоретическую и действительную эпюры массового соотношения компонентов топлива K_m по радиусу в поперечном сечении камеры сгорания для равномерного распределения компонентов □ а) и с пристеночной зоной □ б).

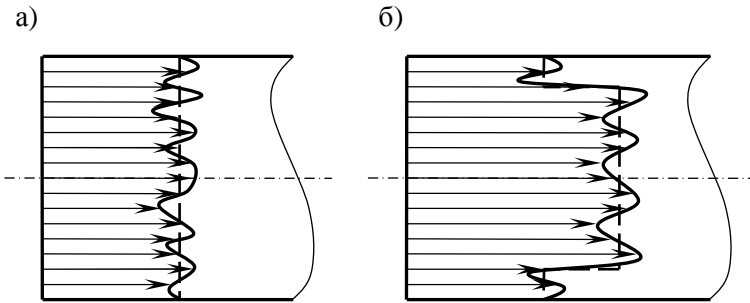


Рис.61. Эпюры массового соотношения компонентов топлива K_m по радиусу в поперечном сечении камеры сгорания:
 а) \square равномерная; б) \square с пристеночной зоной; — — — \square теоретическая;
 ————— \square действительная

В первом приближении можно принять, что рабочее тело движется по камере в каждой i -ой струйке, не перемешиваясь, тогда можно получить:

$$\beta = \sum_i q_i \beta_{уд.i}, \quad (255)$$

$$I_{yn} = \sum_i q_i I_{y.n.уд.i} \quad (256)$$

где $q_i = \frac{m_i}{m}$ \square относительная доля массового расхода топлива в i -ой струйке.

Коэффициент удельного импульса, учитывающий потери в КС из-за некачественного смешения компонентов топлива, или коэффициент смешения запишется

$$\varphi_{см} = \frac{I_{y.n}}{I_{y.n.уд}}, \quad (257)$$

где $I_{y.n.ид}$ — идеальный удельный импульс в пустоте для теоретической эпюры K_m в камере сгорания; $I_{y.n}$ — действительный удельный импульс в пустоте.

При двухслойном распределении на ядро и пристеночный слой $\varphi_{см}$ равен

$$I_{y.n.ид} = I_{y.n.y.ид} g_y + I_{y.n.ст.ид} g_{ст}, \quad (258)$$

где $g_y + g_{ст} = 1$.

$$\varphi_{см} = \frac{\sum_i g_i I_{y.n.идi}}{I_{y.n.y.ид} - g_{ст} (I_{y.n.y.ид} - I_{y.n.ст.ид})}. \quad (259)$$

Для создания пристенка в периферийной зоне головки нарушается принятая для ядра закономерность чередования форсунок. Непосредственно у стенки размещаются форсунки горючего и чаще всего по концентрическим окружностям (см. рис. 59).

Стараются не допустить локальных повышений температуры в пристеночном слое. При наличии свободного окислителя это может привести к прогару камеры сгорания. Поэтому ближайшие к стенке форсунки окислителя должны быть прикрыты форсунками горючего.

Задача надежной тепловой защиты стенок при минимальных потерях удельного импульса решается проще в случае, когда пристеночные форсунки рассчитываются на уменьшенный по сравнению с ядерными расход компонента, а их число увеличивается.

Очень важно при проектировании смесительной головки камеры сгорания оценить, а если требуется, то и скорректировать, соотношение компонентов в пристеночной и переходной зоне (между ядром потока и простенком). Из-за нарушения закономерности чередования форсунок в этих зонах смесительные элементы усложняются. Они не имеют правильные геометрические формы. Соотношение компонентов в них может выйти за допустимые пределы.

Для расчета соотношения компонентов в этих элементарных смесителях используется геометрический метод. Площадь смесительной головки у стенки разбивается на участки, за границы которых принимаются центры форсунок окислителя (см. рис. 7). Для каждого участка определяется число приходящихся на него форсунок

окислителя ($n_{ок}$) и горючего ($n_{г}$). Если часть форсунок находится на границе участка, то число форсунок может быть дробным.

Коррекция соотношения компонентов может быть выполнена путем применения нескольких групп форсунок, имеющих различный расход компонентов или путем изменения схемы их расположения в простенке или переходной зоне.

Значение действительного массового соотношения компонентов K_m для каждого из выделенных участков в переходной и пристеночной зонах определится

$$K_{m.эл} = \frac{\sum_i n_{ок.i} \dot{m}_{ф.ок.i}}{\sum_j n_{г.j} \dot{m}_{ф.г.j}}; \quad (260)$$

где i и j — i -я и j -я группа форсунок окислителя и горючего.

Двухкомпонентные форсунки располагают обычно по concentрическим окружностям. При этом ядерная форсунка рассчитывается на оптимальное соотношение компонентов, а пристеночная — на избыток горючего, который обеспечивает требуемое снижение температуры газа в простенке.

Для камер, работающих по схеме газ — жидкость, смешение компонентов происходит в некотором объеме камеры сгорания при переносе и газификации капель в продуктах газогенерации, неполного горения или парах компонента.

Окончательное смешение компонентов топлива происходит в газовой фазе и обеспечивается газофазными процессами — в основном турбулентной диффузией.

ЛЕКЦИЯ № 7

9.6. Прогрев и испарение топлива, особенности массообмена между фазами

Массообмен между жидкой и газовой фазами компонентов протекает совместно с теплообменом и сопровождается химическими реакциями в газовой, а иногда и в жидкой фазах.

Требуемое для прогрева и испарения распыленных компонентов количество теплоты при докритическом давлении может быть довольно значительным.

На режиме запуска двигателя теплоподвод для подогрева и испарения части несамовоспламеняющихся компонентов осуществляется от специального зажигательного устройства. На установившемся режиме – из зоны развитого горения. Причем лишь незначительная часть тепла подводится из зоны горения лучеиспусканием и теплопроводностью, основная же ее часть поступает за счет конвективного переноса. Решающую роль в этом явлении играют так называемые «обратные токи». Изобразим на рис. 62 обратные токи у смесительной головки камеры.

Обратные токи возникают в результате эжектирующего действия струй компонентов, истекающих из форсунок. Компонент увлекает за собой окружающий газ, образуя попутные потоки. Одновременно с этим появляются и обратные токи газа из зоны горения в зону разряжения.

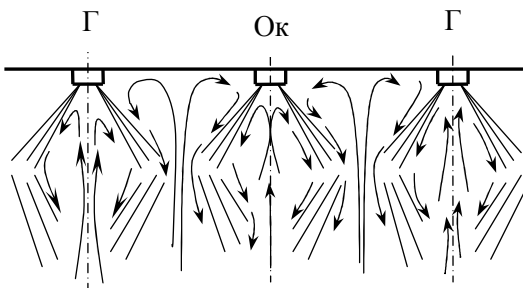


Рис. 62. Обратные токи у смесительной головки камеры

Они состоят из непрореагировавшей газовой фазы компонентов и продуктов сгорания и имеют высокую температуру. Тепло этих газов идет на подогрев и испарения капель горючего и окислителя.

Интенсивные обратные токи способствуют быстрому прогреву и испарению компонентов топлива на малой длине камеры сгорания, и позволяют сократить габариты КС.

При малом шаге между форсунками область вблизи форсуночного днища плотно заполняется факелами распыла. Зона обратных токов сужается, и условия конвективного теплопровода из зоны горения ухудшается. Это приводит снижению скорости испарения компонентов и может явиться причиной неполного и неустойчивого горения.

Чрезмерное увеличение шага между форсунками помимо ухудшения смешения может также существенно затруднить теплозащиту огневого днища смесительной головки. Оно в этом случае может оказаться слишком „открытым” для горячих обратных токов.

Следует отметить, что увеличение давления в камере сгорания во всех случаях способствует интенсификации конвективного переноса тепла.

Исследования движения испаряющихся одиночных капель в среде продуктов сгорания показывают, что длина участка КС, необходимая для полного испарения капель определенного размера, сокращается:

- ✓ при уменьшении начальной скорости капель;
- ✓ увеличении давления в камере сгорания;
- ✓ повышении скорости рабочего тела (газа), что может быть достигнуто, например, уменьшением относительной площади КС \bar{F}_c ($\bar{F}_c = F_c/F_m$);
- ✓ увеличении начальной температуры компонентов топлива.

Показано, что сравнительно большое (значительное) изменение температуры продуктов сгорания в КС не оказывает заметного влияния на скорость испарения.

Естественно, что с уменьшением диаметра капель возрастает скорость их испарения. Как показали эксперименты, каплям радиусом 25 мкм для своего испарения требуется в 25 раз меньшая длина, чем каплям с радиусом 250 мкм. Это еще раз подтверждает необходимость тонкого и однородного распыла компонентов.

Скорость испарения, а следовательно и длина КС, необходимая для этого процесса, зависит от физических свойств компонентов, а именно:

- ✓ вязкости,
- ✓ поверхностного натяжения,
- ✓ давления насыщенных паров p_s ,
- ✓ удельной теплоемкости,
- ✓ удельной теплоты испарения.

Самостоятельно проанализировать, как эти параметры влияют на скорость испарения.

Давление в камере сгорания современных ЖРД часто превышает критическое давление впрыскиваемого туда жидкого компонента.

Тогда, после нагрева капли до критической температуры, она сразу переходит в газообразное состояние. В этом случае распределение концентрации вещества капли по радиусу R в момент времени τ можно определить по формуле

$$C(R, \tau) = \frac{r_k^3 \rho_{жк}}{\sqrt[3]{4\pi} (RD)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4D\tau}\right), \quad (261)$$

где D – коэффициент турбулентной диффузии.

9.7. Воспламенение и горение топлива

Температура воспламенения подготовленной к горению газовой топливной смеси (паров компонентов) находится обычно в пределах 550...770 К. Эта температура достигается различными путями.

Самовоспламеняющиеся компоненты начинают реагировать уже в жидкой фазе при контакте струй, плен или капель компонентов. Жидкофазные реакции – экзотермические. Тепло этих реакций идет на нагрев и испарение капель, которые не реагировали в жидкой фазе, т.к. не сталкивались с каплями другого компонента, и на нагрев паров компонентов и парогаза до температуры воспламенения. Происходит их воспламенение и дальнейшее течение химических реакций в газовой фазе, приводящих к образованию конечных продуктов сгорания. Такое воспламенение называют химическим воспламенением.

Очень важной характеристикой самовоспламеняющихся топлив является период задержки воспламенения.

Под периодом задержки воспламенения понимается отрезок времени от момента соприкосновения жидких компонентов топлива до момента появления видимого очага пламени. В ЖРДМТ это практически период от начала открытия топливных клапанов до момента начала резкого роста давления в камере сгорания.

При использовании несамовоспламеняющихся компонентов топлива, тепло необходимое для их нагрева, испарения и воспламенения подводится от внешнего источника – зажигательного (воспламенительного) устройства. Такое воспламенение паров топлива называется термическим.

Термическое воспламенение также характеризуется периодом задержки воспламенения. Последний определяется как интервал времени от момента впрыска распыленного топлива в зону высокой температуры до момента появления видимого пламени.

Период задержки воспламенения $\tau_{з.б}$ находится в пределах 0,001...0,2 с. Величина

$\tau_{з.б}$ зависит:

- от природы топлива,
- соотношения компонентов топлива,
- начальной температуры компонентов топлива,
- начального давления в камере сгорания или предкамере,
- опережения подачи одного из компонентов топлива в камеру,
- разбавления компонентов топлива балансирующими примесями. Оно сопровождается

увеличением времени задержки воспламенения, например, разбавление H_2O_2 водой.

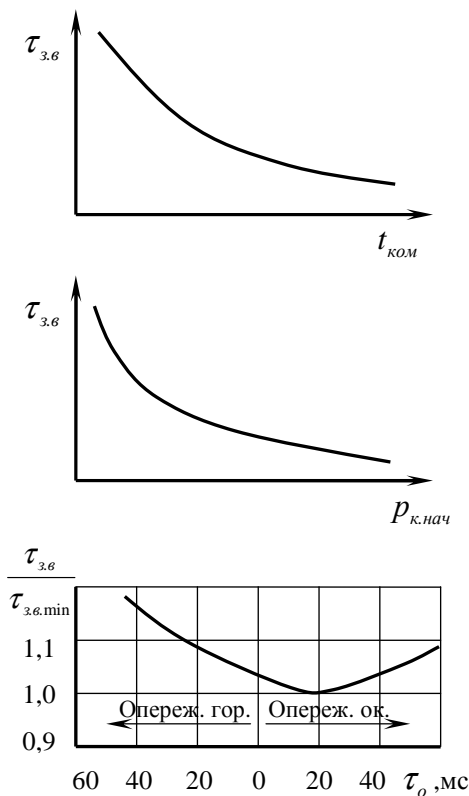


Рис. 63. Зависимость периода задержки воспламенения топлива $\tau_{з.б}$ от начальной температуры компонентов $t_{ком}$, начального давления в КС $p_{к.нач}$ и опережения подачи одного из компонентов τ_o

Покажем некоторые из этих зависимостей графически на рис. 63.

От величины $\tau_{з.в}$ существенно зависит надежность двигателя при запуске и на переходных режимах. Основное требование к этим режимам – отсутствие забросов давления в камере.

9.8. Оценка заброса давления в камере сгорания при запуске ЖРД

Изобразим на рис. 64 типичную картину изменения давления в камере сгорания при запуске ЖРД.

Причиной заброса давления является скопление в камере сгорания большого количества топлива и последующего практически мгновенного его сгорания.

Увеличение периода задержки воспламенения $\tau_{з.в}$ приводит к росту $p_{к.мах}$. Большие периоды задержки воспламенения могут привести к взрыву камеры.

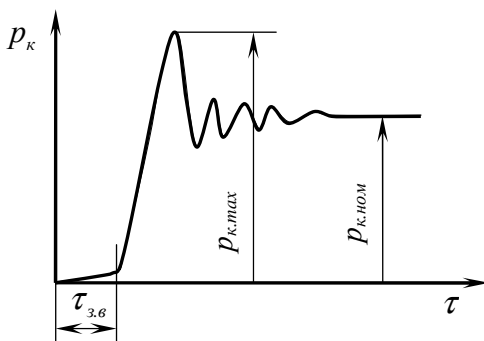


Рис. 64. Изменение давления в КС по времени при запуске двигателя

Оценить величину максимального давления в камере сгорания при запуске двигателя $p_{к.мах}$ можно следующим образом.

На установившемся режиме работы давление в КС двигателя составит

$$p_k = \frac{m_{кc} R_k T_k}{V_{кc}}, \tag{262}$$

где $m_{кc}$ – масса топлива в КС, $V_{кc}$ – объём КС.

Масса топлива в КС составит

$$m_{кc} = \tau_n \dot{m},$$

где τ_n – время пребывания продуктов сгорания в КС. Тогда

$$p_k = \frac{\tau_n \dot{m} R_k T_k}{V_{kc}}.$$

За время, равное $\tau_{3.6}$ в камеру сгорания поступит масса топлива

$$\int_0^{\tau_{3.6}} \dot{m} d\tau \approx \bar{m}_{\text{пуск}} \tau_{3.6},$$

где $\bar{m}_{\text{пуск}}$ — среднее значение массового расхода топлива при запуске двигателя за время $\tau_{3.6}$.

При условии мгновенного сгорания этого топлива максимальное давление в КС будет

$$p_{k\text{max}} = \frac{\tau_{3.6} \bar{m}_{\text{пуск}} R_k T_k}{V_{kc}}. \quad (263)$$

Отношение максимального давления при запуске к давлению на номинальном режиме запишется

$$\frac{p_{k\text{max}}}{p_k} = \frac{\tau_{3.6} \bar{m}_{\text{пуск}}}{\tau_n \dot{m}}.$$

Для конкретной камеры величины \dot{m} , p_k и τ_n ($\tau_n = 2 \dots 4$ мс) являются заданными и постоянными, поэтому снизить заброс давления при запуске можно уменьшая $\tau_{3.6}$ или $\bar{m}_{\text{пуск}}$.

Можно снизить $\tau_{3.6}$ за счет опережения подачи окислителя, предварительного подогрева одного или обоих компонентов топлива.

Снизить пусковой расход топлива можно путем применения специальных регулирующих устройств. В этом случае будет иметь место ступенчатый запуск ЖРД с предварительным выходом на промежуточную предварительную ступень с пониженным расходом топлива и давлением в камере сгорания $p_{k,пр}$ (см. рис. 65.)

Процесс стационарного горения на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований можно представить следующим образом.

Горение является в основном гомогенным с существенной химической неоднородностью и турбулентностью, характер которых полностью определяется системой смесеобразования. Определенная часть топлива в форме наиболее крупных капель компонентов выгорает по закономерности гетерогенного или квази-гетерогенного горения. Наблюдается зона горения довольно значительной протяженности с размытыми очертаниями. Однако, на некотором удалении от смесительной головки, порядка нескольких десятков мм, можно выделить условный фронт пламени небольшой протяженности, где выделяется основная часть теплоты.

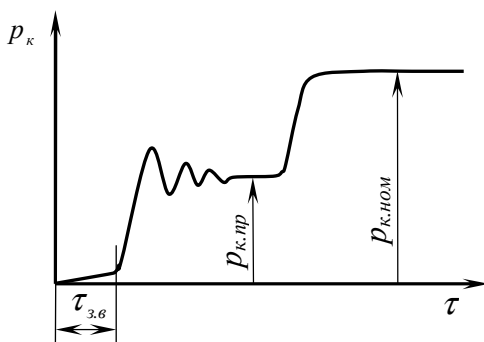


Рис. 65. Изменение давления в КС по времени при ступенчатом запуске двигателя

ЛЕКЦИЯ № 8

9.9. Оценка совершенства процессов в камере сгорания

Нетонкий и неоднородный распыл, неполное перемешивание, неравномерное распределение соотношения компонентов, и расхода напряженности по поперечному сечению камеры, неполное горение и другие причины уменьшают тепловыделение и приводят к уменьшению удельного импульса тяги по сравнению с идеальной моделью процесса: однородный поток РТ при полном адиабатном горении.

Степень отличия реального процесса в КС от идеального, т.е. совершенство процессов в камере сгорания, оценивается:

1. Коэффициентом камеры сгорания φ_k .

Коэффициент КС представляет собой отношение действительной характеристической скорости в камере к идеальной, рассчитан-

ной при тех же значениях соотношения компонентов K_m и давления в камере сгорания p_k

$$\varphi_k = \frac{C^*}{C_{*u\partial}}. \quad (264)$$

Для идеального случая, т.е. камеры сгорания идеального РД, когда можно принять $\mu_c = 1$, $p_{o.m} = p_{o.c} = p_k$, $\dot{m} = \dot{m}_{u\partial}$, $F_M = F_*$, имеем

$$C_{*u\partial} = \frac{p_{o.m} F_M \mu_c}{\dot{m}} = \frac{p_k F_M}{\dot{m}} = \frac{p_k F_*}{\dot{m}_{u\partial}} = p_k f_* = \beta_{u\partial}.$$

Следовательно $C_{*u\partial} = \beta_{u\partial}$, а значение $\beta_{u\partial}$ находят в результате термодинамического расчёта РД.

Используя выражение $\dot{m}_{u\partial} = A(n) \frac{p_{oc} T_{oc}}{\sqrt{R_{oc} T_{oc}}}$,

где $A(n) = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}} \sqrt{n}$, можно получить выражение для φ_k

$$\varphi_k = \frac{\sqrt{R_{oc} T_{oc}}}{\sqrt{(R_{oc} T_{oc})_{u\partial}}}. \quad (265)$$

У современных ЖРД $\varphi_k = 0,96 \dots 0,99$

2. Потерей удельного импульса из-за несовершенства процессов в камере сгорания

$$\xi_k = \frac{I_{y.n.u\partial} - I_{y.n}}{I_{y.n.u\partial}}. \quad (266)$$

Очевидно, что $\varphi_k = 1 - \xi_k$. (267)

Это утверждение справедливо, если отклонение реальных процессов в КС от идеальных процессов не влияет на эффективность расширения рабочего тела в сопле, т.е. когда коэффициент тяги сопла в пустоте не изменяется ($K_{Tn} = const$).

3. Коэффициентом полноты расходного комплекса φ_β

$$\varphi_{\beta} = \frac{\beta}{\beta_{\text{ид}}} = \frac{\beta_{\text{э}}}{\beta_{\text{ид}}}, \quad (268)$$

где $\beta_{\text{э}}$ – экспериментальное значение расходного комплекса.

Можно записать

$$C_* = \frac{P_{ом} F_M \mu_c}{\dot{m}} = \frac{\sigma_f \sigma_c P_K F_M \mu_c}{\dot{m}} = \mu_c \sigma_f \sigma_c \beta, \quad (269)$$

где $\sigma_f = \frac{P_{oc}}{P_K}$ и $\sigma_c = \frac{P_{ом}}{P_{oc}}$ – коэффициенты восстановления полного

давления в КС и докритической части сопла. Тогда взаимосвязь между коэффициентами φ_{β} и φ_K определяется соотношением

$$\varphi_K = \mu_c \sigma_f \sigma_c \varphi_{\beta}. \quad (270)$$

Значение φ_{β} не позволяет определить непосредственно эффективность процесса горения топлива в КС. Однако использование φ_{β} удобнее на практике для сравнения совершенства различных вариантов смесительных головок при доводке камер, для анализа стабильности характеристик при изготовлении камер.

Сравнение различных по конструкции камер ЖРД необходимо вести по коэффициенту камеры сгорания φ_K .

Качество смешения компонентов было определено коэффициентом смешения $\varphi_{см}$, тогда степень совершенства остальных процессов в КС может быть оценена коэффициентом полноты горения $\varphi_{гор}$. Тогда можно записать

$$\varphi_K = \varphi_{см} \varphi_{гор}. \quad (271)$$

$\varphi_{гор}$ оценивает совершенство процессов испарения, смешения в газовой фазе и, собственно, горения.

9.10. Обобщённые характеристики процессов в КС

Обобщенные характеристики процессов необходимы для определения размеров камеры сгорания. Наиболее распространенными

обобщенными характеристиками являются:

1. Среднее время пребывания в камере сгорания τ_n

$$\tau_n = \frac{m_{\text{КС}}}{\dot{m}}, \quad (271)$$

где $m_{\text{КС}}$ – масса продуктов, находящихся в КС.

Приближённо можно записать

$$\tau_n = \frac{V_{\text{КС}} \bar{\rho}}{\dot{m}}, \quad (272)$$

где $V_{\text{КС}}$ – объем камеры сгорания до минимального сечения, $\bar{\rho}$ – средняя плотность газа в камере сгорания. Эта приближенная величина τ_n оценивает время нахождения в КС газообразных продуктов сгорания.

Величину $\bar{\rho}$ обычно заменяют величиной $\rho_{\text{о.с}}$, т.к. последняя определяется в термодинамическом расчете, в этом случае

$$\tau_n = \frac{V_{\text{КС}} \rho_{\text{о.с}}}{\dot{m}}. \quad (273)$$

Действительное время пребывания больше вычисленного по формуле (273).

Для камер ЖРД $\tau_n = 1 \dots 8$ мс.

2. Приведенная длина камеры сгорания $L_{\text{нр}}$.

$$L_{\text{нр}} = \frac{V_{\text{КС}}}{F_{\text{М}}}. \quad (274)$$

$$L_{\text{нр}} = \frac{V_{\text{КС}} \rho_{\text{о.с}} \dot{m}}{F_{\text{М}} \rho_{\text{о.с}} \dot{m}} = \tau_n \frac{\dot{m}}{F_{\text{М}} \rho_{\text{о.с}}} = \tau_n \frac{\dot{m} R_{\text{о.с}} T_{\text{о.с}}}{F_{\text{М}} p_{\text{о.с}}} = \frac{\tau_n}{\beta} R_{\text{о.с}} T_{\text{о.с}} \frac{A^2(n)}{A^2(n)}.$$

В конечном виде получаем

$$L_{\text{нр}} = \tau_n \beta A^2(n). \quad (275)$$

Для выбранного топлива β и $A(n) = \text{const}$, поэтому $L_{\text{нр}}$ пропорциональна τ_n .

Для КС современных ЖРД $L_{\text{нр}} = 1 \dots 2$ м.

Меньшие значения относятся к камерам ЖРД с дожиганием генераторного газа и схемой организации рабочего процесса в камере «Г□Г»

3. Расходонапряжённость камеры сгорания \dot{m}_F

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}}{F_\kappa} \quad (276)$$

где \dot{m} – массовый расход продуктов сгорания, F_κ – площадь камеры сгорания у смесительной головки.

У цилиндрической камеры сгорания $F_\kappa = F_c$ и расходонапряжённость определяют по уравнению

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}}{F_c} = \frac{p_\kappa F_M}{\beta F_c} = \frac{p_\kappa}{\beta F_c} \quad (277)$$

Из уравнения (277) следует, что с увеличением p_κ растет расходонапряжённость КС.

В расчетах обычно применяют относительную расходонапряжённость $\overline{\dot{m}}_F$, представляющую отношение расходонапряженности

КС к давлению в ней
$$\overline{\dot{m}}_F = \frac{\dot{m}_F}{p_\kappa} \quad (278)$$

Для камер ЖРД $\overline{\dot{m}}_F = 0,08 \dots 0,25 \frac{\Gamma}{\text{Нс}}$. Меньшие значения отно-

сятся к камерам двигателей без дожигания генераторного газа.

Все обобщенные характеристики процессов связаны между собой. Источником информации об этих величинах служат статистические данные, накапливаемые в КБ.

9.11. Действительные значения удельного импульса и расхода топлива

Действительный удельный импульс тяги всегда ниже идеального, полученного термодинамическим расчетом, из-за потерь, имеющих место в камере сгорания и сопле.

Коэффициент удельного импульса, отражающий несовершенство процессов камере сгорания и сопле φ_I , запишется

$$\varphi_I = \frac{I_{y.n}}{I_{y.n.ид}} = \varphi_k \varphi_c. \quad (279)$$

где $I_{y.n}$ — действительный удельный импульс в пустоте, φ_k и φ_c — коэффициенты камеры сгорания и сопла соответственно.

Величина идеального удельного импульса в пустоте $I_{y.n.ид}$ должна быть определена для камеры с учетом преднамеренной неоднородности распределения соотношения компонентов при наличии пристеночного слоя или завесного охлаждения

$$I_{y.n.ид} = I_{y.n.я.ид} - g_{ст} (I_{y.n.я.ид} - I_{y.n.ст.ид}). \quad (280)$$

При проектировании двигателя коэффициенты камеры сгорания φ_k назначают на основе известных статистических данных, полученных на камерах подобного типа, с учетом влияния ожидаемых мероприятий по совершенствованию процессов в камере сгорания.

Коэффициент сопла φ_c определяется как произведение коэффициентов, учитывающих потери в сопле из-за трения, рассеяния, неравновесности течения, многофазности, прочих потерь

$$\varphi_c = \varphi_{тр} \varphi_p \varphi_n \varphi_s \varphi_{пр}. \quad (281)$$

Соответствующие составляющие φ_c определяются расчетным путем по имеющимся методикам. С этими методиками вы знакомы и использовали их при выполнении курсовой работы.

Значение действительного (ожидаемого) удельного импульса в пустоте $I_{y.n}$ при проведении проектного расчета определяется по известной из термодинамического расчета величине $I_{y.n.ид}$.

$$I_{y.n} = \varphi_I I_{y.n.ид}. \quad (282)$$

Наиболее точно коэффициент идеального импульса может быть определен по экспериментальному значению $I_{y.n.э}$, полученному при огневом испытании двигателя,

$$\varphi_l = \frac{I_{y.n.\varepsilon}}{I_{y.n.\delta}}. \quad (283)$$

Если величина коэффициента сопла φ_c вычислена достаточно точно, то можно получить уточненное значение коэффициента камеры сгорания

$$\varphi_k = \frac{\varphi_l}{\varphi_c}. \quad (284)$$

Расход топлива, необходимый для получения заданной тяги в пустоте, находится

$$\dot{m} = \frac{P_n}{I_{y.n}}. \quad (285)$$

После определения массового расхода топлива находятся размеры камеры сгорания и сопла, проводится профилирование внутреннего контура камеры. Методика этих проектных операций подробно изложена в учебном пособии к курсовой работе “Термодинамический расчет и проектирование камеры ЖРД”.

ЛЕКЦИЯ № 9

10. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРД

10.1. Понятие о статистических и динамических характеристиках РД

Статистическими характеристиками ЖРД называют зависимость выходных параметров от внешних и внутренних параметров, определяющих работу двигателя на установившемся режиме работы.

Зависимости, связывающие указанные параметры РД при работе на неустановившихся режимах (запуск, останов, регулирование), называют динамическими характеристиками.

К выходным параметрам ЖРД относятся тяга, импульс тяги, удельный импульс тяги и другие.

К внешним параметрам относятся температура компонентов топлива, их плотность, давление компонентов на входе в двигатель, давление и температура окружающей среды, температура конструкции, положение регулирующих органов, распределение давления по внешней поверхности камеры.

К внутренним параметрам относятся точность изготовления элементов двигателя, чистота поверхности обработки деталей, КПД насосов и турбины, массовый расход топлива, соотношение компонентов топлива, давление в КС и другие параметры внутрикамерных процессов, отклонение размеров и формы гидравлических трактов агрегатов и трубопроводов от проектных (расчетных) и т.д.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на выходные параметры РД тягу и удельный импульс тяги, являются:

- массовый расход компонентов топлива,
- давление в камере сгорания,
- соотношение компонентов топлива,
- давление окружающей среды или высота полета.

Соотношение компонентов топлива не используется как параметр регулирования двигателя, поскольку его отклонение от принятого значения всегда сопровождается снижением эффективности летательного аппарата ($\rho_T^C I_y = \max$) и может привести к выходу из строя двигателя. Изменение соотношения компонентов произво-

дится лишь для обеспечения одновременности выработки компонентов топлива из баков.

В связи с этим наибольший практический интерес представляют две эксплуатационные статические характеристики ЖРД:

1. Дроссельная – зависимость тяги, удельного импульса и других выходных параметров от давления в КС p_k или массового расхода топлива \dot{m} при постоянных p_n и K_m .

$$(P, I_y = f(p_k) \text{ или } P, I_y = f(\dot{m}) \text{ при } p_n \text{ и } K_m = const).$$

2. Высотная – зависимость тяги, удельного импульса и других выходных параметров двигателя от давления окружающей среды p_n или высоты полёта H при постоянных давлении в камере сгорания p_k и соотношении компонентов топлива K_m , т.е. при постоянном режиме работы двигателя

$$(P, I_y = f(p_n) \text{ или } P, I_y = f(H) \text{ при } p_k \text{ и } K_m = const).$$

Высотную и дроссельную характеристики камеры рассчитывают по уравнениям тяги и удельного импульса камеры

$$P = \dot{m}W_a + p_a F_a - p_n F_a = P_n - p_n F_a, \quad (286)$$

$$I_y = I_{y.n} - \frac{p_n F_a}{\dot{m}}, \quad (287)$$

где W_a , p_a – скорость и статическое давление продуктов сгорания в выходном сечении сопла соответственно; F_a – площадь выходного сечения сопла; p_n – давление окружающей среды; P_n и $I_{y.n}$ – тяга и удельный импульс тяги в пустоте.

Учитывая выражения для:

- ✓ коэффициента тяги сопла в пустоте

$$K_{T.n} = \frac{P_n}{p_{o.m} F_m \mu_c} = \frac{I_{y.n}}{c_*}, \quad (288)$$

- ✓ коэффициента сопла $\varphi_c = \frac{K_{T.n}}{K_{T.n.ид}}$, (289)

- ✓ давления торможения в минимальном сечении сопла

$$P_{a.m} = \sigma_f \sigma_c P_k, \quad (290)$$

где μ_c – коэффициент расхода сопла; c_* – характеристическая скорость в камере; p_k – давление в камере сгорания на входе у смешительной головки; F_M – площадь минимального сечения сопла; $\sigma_f = p_{a.c}/p_k$, $\sigma_c = p_{a.m}/p_{a.c}$ – коэффициенты восстановления полного давления в камере сгорания и докритической части сопла соответственно, выражение (10) запишется:

$$P = \mu_c \varphi_c \sigma_f \sigma_c F_M K_{T.n.и\delta} P_k - p_n F_a. \quad (291)$$

Установим связь между массовым расходом топлива и давлением в камере сгорания, используя понятие характеристической скорости в камере.

$$c_* = \frac{p_{a.m} F_M \mu_c}{\dot{m}}, \quad (292)$$

откуда
$$\dot{m} = \frac{\mu_c \sigma_f \sigma_c F_M P_k}{\varphi_c c_{*и\delta}}, \quad (293)$$

где $\varphi_k = c_*/c_{*и\delta}$ – коэффициент камеры сгорания.

Тогда выражение (11) окончательно запишется

$$I_y = \varphi_k c_{*и\delta} \left(\varphi_c K_{T.n.и\delta} - \frac{F_a}{\mu_c \sigma_f \sigma_c F_M} \frac{p_n}{p_k} \right). \quad (294)$$

Для камеры ЖРД постоянной геометрии величины $K_{T.n.и\delta}$, $c_{*и\delta}$, μ_c , σ_f , σ_c , φ_k , φ_c можно считать постоянными для всех режимов работы. Это допущение приводит к ошибкам не превышающим 3%. В этом случае можно записать:

$$P = A p_k - p_n F_a, \quad (295)$$

$$I_y = B - C \frac{p_n}{p_k} = I_{y.n} - C \frac{p_n}{p_k}, \quad (296)$$

$$\dot{m} = D p_k, \quad (297)$$

где A, B, C, D – постоянные величины.

Характеристики двигателя могут отличаться от характеристик камеры более сложными зависимостями из-за расхода вспомога-

тельного или основного топлива в системе подачи топлива для двигателей без дожигания генераторного газа и из-за наличия нескольких камер, используемых в определённых сочетаниях.

10.2. Дроссельная характеристика

Её называют также расходной или регулировочной, подчёркивая этим возможность регулирования величины тяги. Необходимая степень регулирования тяги определяется задачами, стоящими перед ЛА. Например, для маневрирования на лунной орбите

$$K_{др} = \frac{P_{max}}{P_{min}} \approx 6, \text{ для спуска и взлета с Луны} - 10.$$

Построим на рис. 66 теоретическую дроссельную характеристику ЖРД, используя полученными зависимостями (295) и (296).

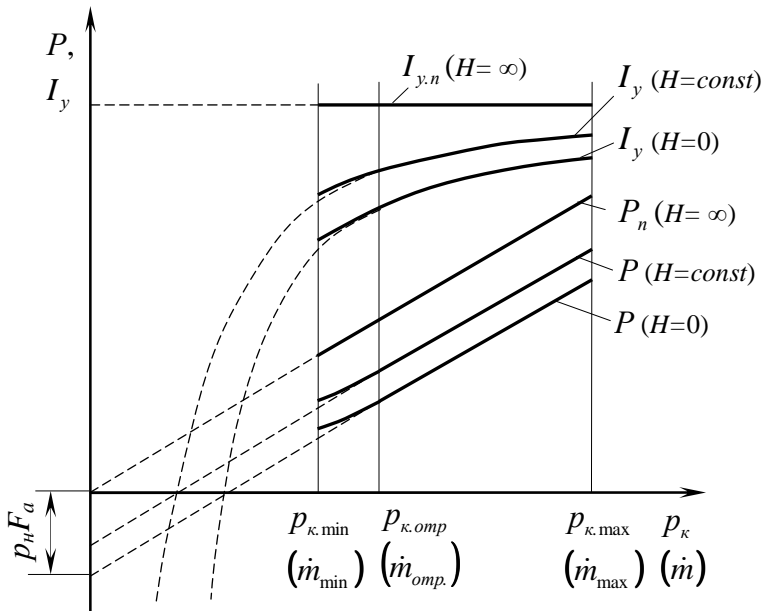


Рис. 66. Дроссельная характеристика ЖРД

1. $H = \infty$ ($p_n = 0$), тогда $P_n = A p_\kappa$ – прямая пропорциональная зависимость, а $I_{y.n} = B$ – удельный импульс в пустоте постоянен и не зависит от давления в камере сгорания.

2. $H = 0$ ($p_n = p_{n.max}$), тогда $P = P_n - p_n F_a = A p_\kappa - p_n F_a$ – линейная зависимость, представляющая собой прямую, параллельную прямой $P_n = A p_\kappa$ и смещенную от неё вниз на величину $p_n F_a$.

$$I_y = B - C \frac{p_n}{p_\kappa} = B - \frac{E}{p_\kappa}, \text{ где } E = const \text{ – уравнение гиперболы с}$$

асимптотами: 1) $I_y = I_{y.n}$ при $p_\kappa \rightarrow \infty$;

$$2) p_\kappa = 0 \text{ – ось ординат при } p_\kappa \rightarrow 0 (I_y \rightarrow -\infty).$$

3. $H = const$, ($p_n = const$), тогда $P = A p_\kappa - p_n F_a$,

$$I_y = B - C \frac{p_n}{p_\kappa} = B - \frac{E}{p_\kappa}. \text{ Имеем тоже, что и во втором случае,}$$

только при меньшей величине давления окружающей среды p_n .

Из уравнения (21) следует, что массовый расход топлива \dot{m} изменяется прямо пропорционально давлению в камере сгорания p_κ , поэтому дроссельную характеристику можно построить по \dot{m} . Вид характеристики при этом не меняется (см. рис. 6б).

Дроссельную характеристику обычно получают в виде зависимости тяги и удельного импульса от давления в камере сгорания, а не от массового расхода топлива, т.к. давление в камере сгорания нагляднее характеризует изменение режима работы двигателя и точнее может быть измерено при испытаниях.

Для каждого конкретного камеры ЖРД имеется действительный диапазон реализуемой на практике дроссельной характеристики от $p_{\kappa.min}$ до $p_{\kappa.max}$.

Максимально допустимый (форсированный) режим $p_{\kappa.max} (\dot{m}_{max})$ определяется прочностью и жаропрочностью камеры двигателя. На него рассчитываются все агрегаты системы подачи топлива. Режим $p_{\kappa.min} (\dot{m}_{min})$ определяется порогом эффективной и устойчивой ра-

боты камеры двигателя, снижением надежности регенеративного охлаждения из-за перегрева компонента в рубашке охлаждения камеры.

На рис. 66 показан пунктирной линией участок теоретической дроссельной характеристики для случая безотрывного течения продуктов сгорания по соплу. При уменьшении p_k снижается давление на срезе сопла p_a . Если отношение p_a/p_n становится меньше 0,3...0,5, то нормальная работа сопла нарушается. В сопло входит косой скачок уплотнения и поток продуктов сгорания отрывается от стенок сопла. Критическая величина отношения p_a/p_n зависит от состава продуктов сгорания, типа пограничного слоя (ламинарный или турбулентный) и числа Маха потока на срезе сопла. Тяга и удельный импульс тяги камеры возрастают, т.к. из работы выключается участок сопла, создающий отрицательную тягу из-за перерасширения на нём рабочего тела. Дроссельная характеристика с отрывом потока в сопле при $p_k < p_{k,отр}$ показана на рис. 66 сплошной линией.

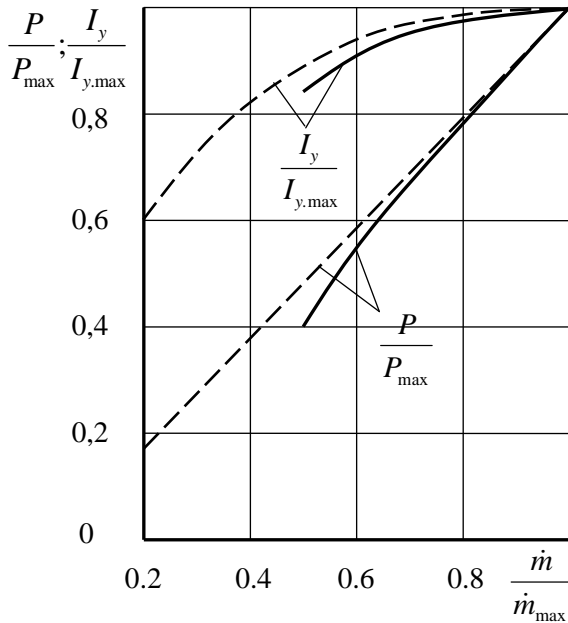


Рис. 67. Сравнение расчётной и экспериментальной дроссельных характеристик камер ЖРД:
 ————— □ теория, - - - - - □ эксперимент

Дроссельную характеристику можно получить экспериментально при огневом стендовом испытании двигателя. Сравнение расчетной и экспериментальной дроссельных характеристик показано на рисунке 67.

При уменьшении массового расхода топлива ($\dot{m} \downarrow$) удельный импульс тяги в эксперименте становится ниже расчётного ($I_{yэ} < I_{yр}$), т.к. снижается коэффициент камеры сгорания φ_k из-за ухудшения процессов распыливания и перешивания топлива (смесеобразования). Последнее объясняется значительным уменьшением Δp_ϕ , который изменяется пропорционально квадрату расхода жидкости через форсунки ($\dot{m}_\phi = \mu_\phi F_\phi \sqrt{2\rho_{жс} \Delta p_\phi}$).

Важно отметить, что опытные и расчетные значения тяги как функции p_k совпадают во всем диапазоне режимов, поскольку ухудшение процессов в КС при пониженных расходах топлива одинаково влияет на давление в камере сгорания и тягу. Имеется возможность непосредственно контролировать тягу ЖРД в полете по регулируемому параметру – давлению в камере сгорания.

ЛЕКЦИЯ № 10

10.3. Высотная характеристика

Построим на рис. 68 теоретическую высотную характеристику камеры с фиксированным соплом по давлению окружающей среды p_n , используя полученные ранее зависимости (295) и (296).

Для расчета характеристики по высоте полета H необходимо иметь зависимость атмосферного давления от высоты $p_n = p(H)$. Эту зависимость принимают по данным стандартной атмосферы (СА). ГОСТ 4401, ИСО 2533.

Если сопло имеет большую степень расширения, то на малых высотах из-за сильного перерасширения рабочего тела скачки уплотнения входят в сопло и происходит отрыв потока от внутренней поверхности стенки сопла. При этом тяга и удельный импульс несколько возрастают, о чем свидетельствует пунктирная линия на рисунке 69.

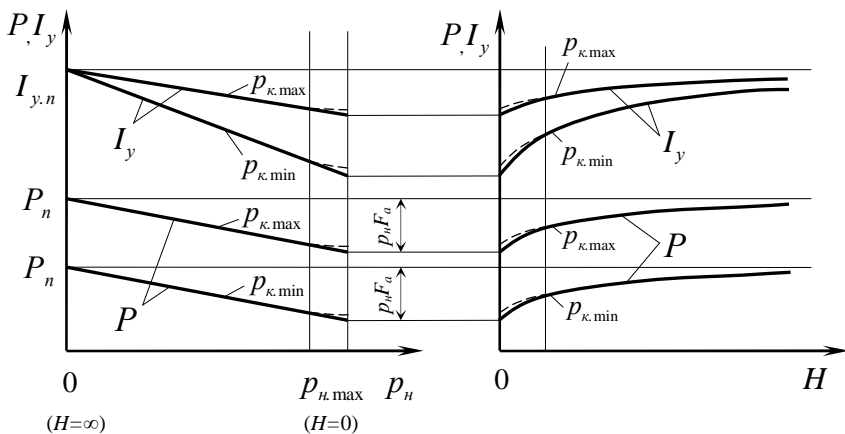


Рис. 68. Высотная характеристика ЖРДМТ:

— — безотрывное течение РТ в сопле;
 - - - - отрывное течение.

Представлять высотную характеристику в виде зависимости от p_n имеет смысл, т. к ЖРД могут работать и при давлениях, превышающих атмосферное у поверхности Земли, например, подводный старт ракеты.

10.4. Высотная характеристика камеры с регулируемым двухпозиционным соплом

Изобразим на рис. 69 камеру РД с регулируемым двухпозиционным соплом и покажем на рис. 70 её высотную характеристику.

На высотной характеристике изображены:

- 1 □ высотная характеристика камеры с соплом 1;
- 2 □ высотная характеристика камеры с соплом 2;

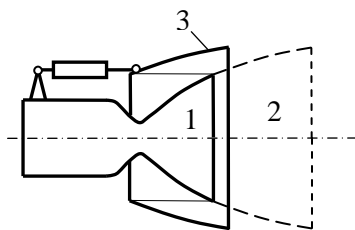


Рис. 69. Схема камеры с регулируемым двухпозиционным соплом

3 □ высотная характеристика камеры с двухпозиционным соплом, площадь которого изменяется скачком на высоте полета $H_{пер}$

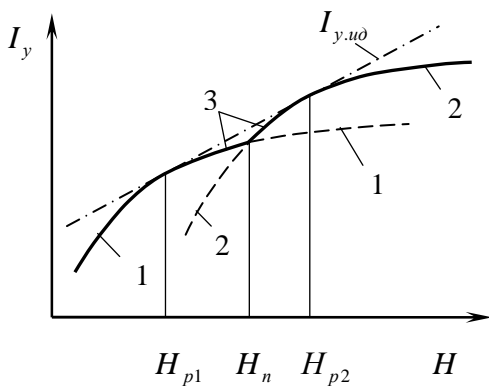


Рис. 70. Высотная характеристика камеры с регулируемым двухпозиционным соплом

Сопло постоянной геометрии имеет лишь один расчетный режим, когда $p_a = p_n$. Для поддержания расчетного режима на каждой высоте полета с ее увеличением площадь выходного сечения сопла должна непрерывно возрастать.

$I_{y,ид} = f(H)$ □ высотная характеристика камеры с таким идеально регулируемым соплом.

Камера с двухпозиционным соплом имеет преимущества по высотной характеристике перед камерой с соплом 1 в области $H > H_{пер}$, а перед камерой соплом 2 □ в области $H < H_{пер}$.

Имеются различные конструктивные решения для получения двухпозиционного сопла с помощью выдвижной юбки сопла.

Кольцевые и тарельчатые сопла имеют преимущества перед соплами Лавалья, т.к. на режимах перерасширения они обладают способностью к саморегулированию.

10.5. Создание управляющих сил и моментов

Изучить студентам самостоятельно по учебнику [1], страницы

11. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖРД

11.1. Общие сведения о неустойчивости рабочего процесса и виды неустойчивости

Опыт создания, доводки и эксплуатации ЖРД показывает, что при определённых условиях рабочий процесс двигателя становится неустойчивым. Он сопровождается колебаниями давления, температуры рабочего тела в КС и других параметров двигателя. Возможные колебания давления в камере ЖРД показаны на рис. 71.

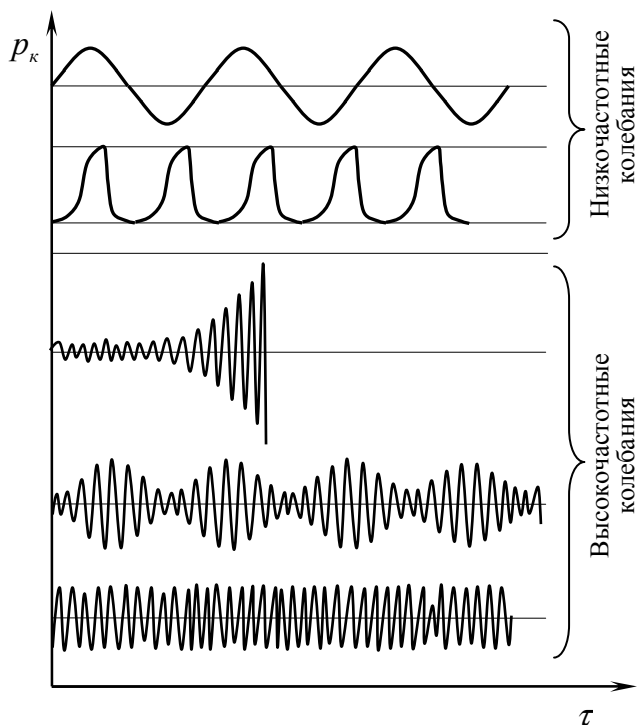


Рис. 71. Колебания давления в камере ЖРД

Характер колебаний по форме, амплитуде и частоте может изменяться в самых широких пределах. По форме – от синусоидальных до очень сложных форм, по частоте – от десятков до тысяч герц, по амплитуде – от нескольких процентов до ста и даже более процентов.

Небольшие колебания давления практически всегда имеют место в камере сгорания ЖРД, но лишь когда амплитуда колебаний становится достаточно большой и колебания принимают постоянный периодический характер, процесс становится неустойчивым.

Неустойчивость рабочего процесса ЖРД является весьма вредным явлением. Ей сопутствуют:

- сильные вибрации двигателя;
- механические повреждения частей двигателя и его систем;
- выгорание и оплавление внутренних стенок камеры по причине возрастания интенсивности тепловых потоков;
- ненормальная работа некоторых систем и агрегатов ЖРД, например, системы регулирования, приводящая к снижению надежности работы;
- механическое разрушение камеры по характеру близкое к взрывному и взрыв камеры.

По диапазону частот автоколебаний различают неустойчивость:

- низкочастотную (НЧ) ($f \leq 100$ Гц),
- среднечастотную (СЧ) ($100 < f < 1000$ Гц),
- высокочастотную (ВЧ) ($f \geq 1000$ Гц).

Диапазоны частот указаны для ЖРД тягой 0,1...5,0 МН. Следует помнить, что в зависимости от размерности двигателя (тяги) неустойчивость рабочего процесса определенной частоты может быть отнесена к тому или иному характерному виду неустойчивости.

В чем же принципиальное отличие этих видов неустойчивости? Для этого рассмотрим НЧ и ВЧ колебания рабочего тела в КС, представленные на рис. 72.

а) НЧ-неустойчивость.

$$\text{Длина волны } \lambda_{\text{нч}} = \frac{a}{f}, \lambda_{\text{нч}} = \frac{1000 \text{ м/с}}{100 \text{ 1/с}} = 10 \text{ м}.$$

$$\text{Период колебаний } T = \frac{1}{f}, T = \frac{1}{100 \text{ 1/с}} = 10 \text{ мс}.$$

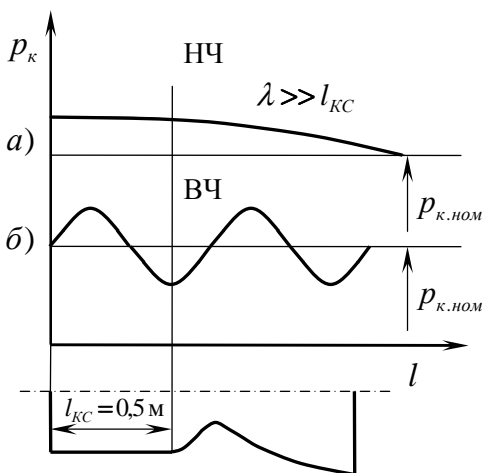


Рис. 72. Принципиальное отличие видов неустойчивости

При низкочастотных колебаниях длина волны превосходит размеры камеры сгорания ($l_{KC} = 0,5$ м, а $\lambda_{НЧ} = 10$ м), а период колебаний – время пребывания в КС ($T = 10$ мс, а $\tau_n = 2 \dots 4$ мс), поэтому можно считать, что газ колеблется в КС как одно целое. Отсюда изменение давления в различных частях камеры сгорания происходит одновременно. Значит параметры рабочего тела во всем объеме камеры (газогенератора) в любой момент времени практически

одинаковы.

б) ВЧ-неустойчивость.

$$\lambda_{НЧ} = \frac{1000 \text{ м/с}}{1000 \text{ 1/с}} = 1 \text{ м}, \quad T = \frac{1}{1000 \text{ 1/с}} = 1 \text{ мс}.$$

При высокочастотных колебаниях длина волны вполне сопоставима с размерами КС, а период колебаний имеет тот же порядок, что и τ_n . Поэтому изменение давления в различных частях КС происходит в соответствии с распределением волны давления по камере.

Для ВЧ-неустойчивости обычно характерны поперечные моды автоколебаний. Частота колебаний зависит от акустических свойств газа в объеме КС.

Для среднечастотной неустойчивости рабочего процесса характерные продольные колебания параметров рабочего тела в контурах: ГГ – подводящие магистрали, газовод – камера сгорания и т.п.

Общедвигательные низкочастотные колебания могут возникнуть из-за кавитационных явлений в насосах, автоколебаний регулирующих агрегатов, колебаний корпуса ракеты.

Внутрикамерная неустойчивость рабочего процесса низкочастотная, среднечастотная и высокочастотная – результат резонансного взаимодействия колебаний давления в КС с подачей топлива или процессом горения.

ЛЕКЦИЯ № 11

11.2. Качественный механизм возникновения неустойчивости

Колебания в ЖРД представляют собой механические колебания упругой среды – газа в КС и жидкости в трубопроводах и полостях системы подачи. Они, как всякие механические колебания в реальной системе, осуществляются с потерями (рассеянием) колебательной энергии:

- ✓ из-за выноса энергии с газом, покидающим КС через сопло;
- ✓ наличия в рабочем теле молекулярного и турбулентного трения;
- ✓ диссипации энергии на упругих элементах (стенках камеры и головки, твердых частицах, жидких каплях и т.д.).

Следовательно, для поддержания и развития колебаний в КС, как и в любой механической колебательной системе, необходимо иметь:

- источник энергии, который бы пополнял энергию колебаний по мере её рассеяния;
- механизм, осуществляющий согласованное взаимодействие источника энергии с колебаниями.

Главным источником энергии, необходимой для поддержания колебаний или их развития в ЖРД служит процесс горения, т.е. выделяющаяся в процессе горения топлива тепловая энергия.

В зависимости от соотношения между потерями или расходом колебательной энергии (E_p) и её притоком или восполнением (E_{np}) ЖРД по характеру возбуждения колебаний условно можно классифицировать:

- 1) на устойчивые,
- 2) неустойчивые,
- 3) условно устойчивые или с „жёстким” возбуждением.

1. Устойчивые двигатели.

Характер возбуждения колебаний в устойчивых ЖРД показан на рис. 73.

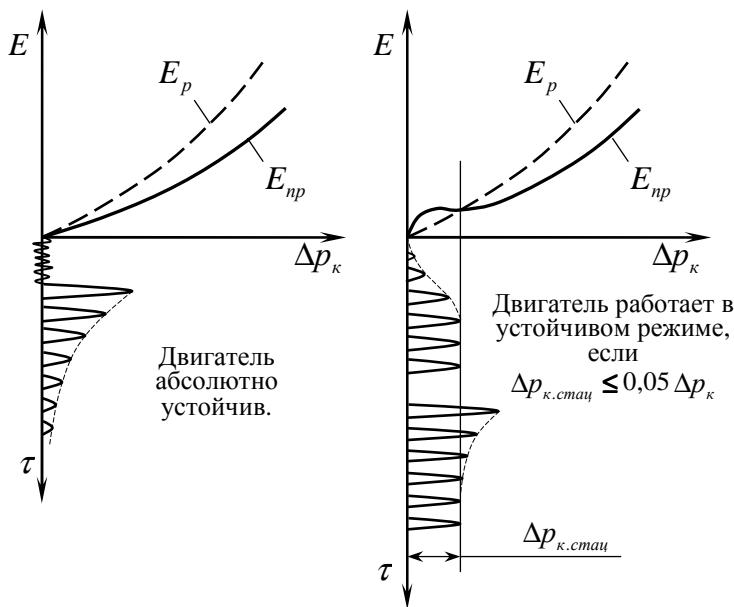


Рис. 73. Устойчивые ЖРД

У устойчивых ЖРД либо вообще невозможно возбуждение колебаний давления в КС, либо возможно возбуждение стационарных колебаний с небольшой амплитудой, порядка 5% от среднего давления в КС.

2. Неустойчивые двигатели.

Характер возбуждения колебаний в неустойчивых ЖРД показан на рис. 74.

У двигателей, где с самого начала появления колебаний приток энергии превышает её расход, возникшие колебания будут постоянно увеличивать свою амплитуду. Последняя растет сначала медленно, а затем всё быстрее по причине увеличения разницы между притоком энергии и её расходом. По этой причине такие двигатели называют двигателями с мягким возбуждением.

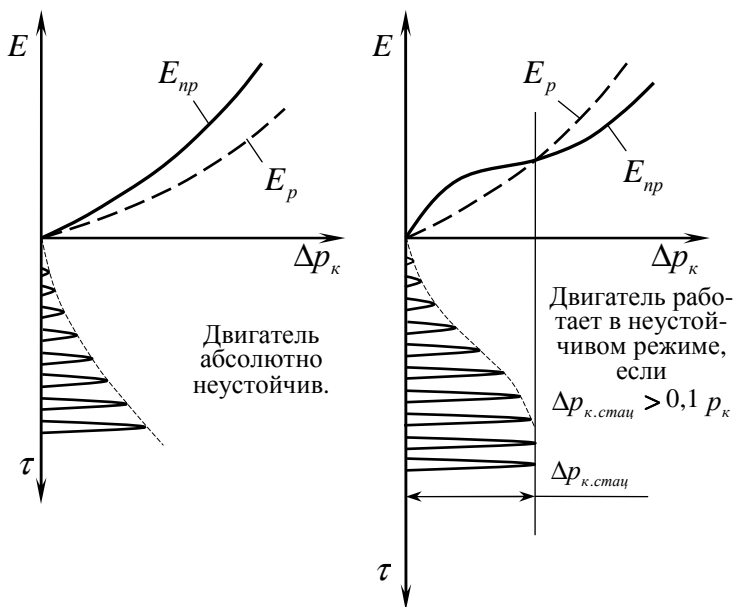


Рис. 74. Неустойчивые ЖРД

3. Условно устойчивые двигатели или с жёстким возбуждением.

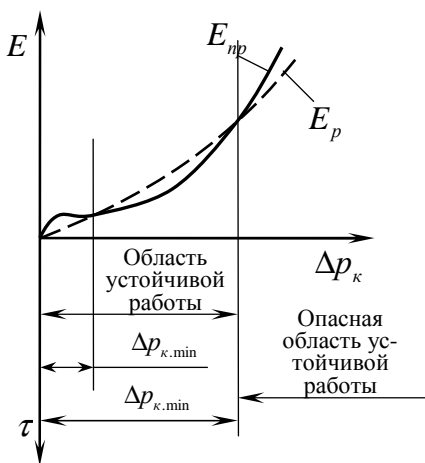


Рис. 75. Условно устойчивые ЖРД

В двух областях приток энергии превышает её расход при амплитудах меньших $\Delta p_{\kappa \min}$ и больших $\Delta p_{\kappa \max}$. В области устойчивой работы возможно возбуждение стационарных колебаний с небольшой амплитудой $\Delta p_{\kappa \min}$. Переход из области устойчивости в область неустойчивой работы происходит скачком при появлении импульсов давления, превышающих $\Delta p_{\kappa \max}$.

11.3. Низкочастотная неустойчивость. Физическая картина и механизм возбуждения низкочастотных колебаний

Низкочастотная неустойчивость отличается тем, что газ в КС колеблется как одно целое, т.е. параметры во всем объеме камеры в любой момент времени практически одинаковы.

Для НЧ-неустойчивости характерны продольные автоколебания параметров.

Взаимодействие между процессом горения, гидродинамикой в системе подачи топлива и расходом топлива обуславливает различные механизмы обратной связи, управляющей притоком энергии.

Рассмотрим следующий возможный механизм обратной связи, когда колебания давления в камере у смесительной головки влияют на расход топлива через форсунки \dot{m} , а процесс горения топлива не зависит от p_k , т.е. время преобразования $\tau_{np} = \text{const}$.

Случайно возникшие в КС синусоидальные колебания давления (см. рис. 76) посредством перепада давления на форсунках $\Delta p_\phi = p_{ex} - p_k$ изменяют расход топлива \dot{m} , через форсунки. Из-за инерционности движения жидких компонентов по трубопроводам колебания расхода будут происходить с запаздыванием τ_m по отношению к колебаниям перепада давления на форсунках Δp_ϕ . Величина τ_m у различных двигателей бывает порядка 0,001...0,01 с (1...10 мс). Продукты сгорания от поступившего топлива будут образовываться в камере сгорания с запаздыванием на время преобразования топлива τ_{np} . Изменение поступления продуктов сгорания вызовет изменение давления в КС со сдвигом по времени, равным времени пребывания в камере сгорания τ_n .

Если $\tau_m + \tau_{np} + \tau_n = \frac{T}{2}$ или $\tau_m + \tau_{np} + \tau_n = (1, 3, 5, \dots) \frac{T}{2}$, то имеет место условие резонанса, т.е. совпадение по фазе начальных и вынужденных колебаний. Это приводит к удержанию или усилению колебаний в камере.

Частота колебаний $f = \frac{1}{2(\tau_m + \tau_{np} + \tau_n)}$.

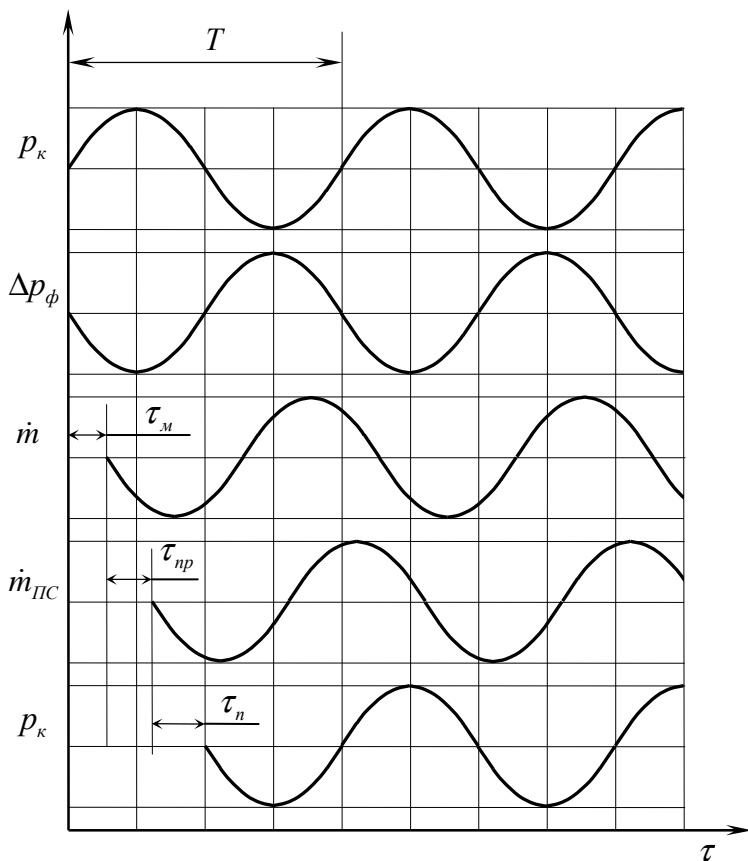


Рис. 76. Механизм обратной связи при НЧ-неустойчивости

Подсчитаем численное значение f .

$$\tau_m = \frac{l_{mp}}{a_{mp}}; \tau_m = \frac{2,4 \text{ м}}{1200 \text{ м/с}} = 0,002 \text{ с}; \tau_{np} = 0,001 \text{ с}; \tau_n = 0,003 \text{ с}$$

$$\text{Тогда } f = \frac{1}{2(0,002 + 0,001 + 0,003)} = 83,3 \text{ Гц.}$$

Имеется и другой механизм обратной связи, приводящий к возникновению низкочастотных колебаний давления в КС. Он осуществляется через сам процесс горения топлива, когда расход топлива не зависит от колебаний давления, а $\tau_{np} = f(p_k, T_k, \dot{m}, K_m, \dots)$.

Л. Крокко предложил эмпирическую зависимость τ_{np} от p_k

$$\tau_{np} = \frac{a}{p_k^n},$$

где a – константа, зависящая от рода топлива и системы смесеобразования, n – показатель степени ($n > 0$). По оценке экспертов величина $n = 0,8 \dots 1,2$.

Уменьшение давления в КС приводит к увеличению τ_{np} . Это объясняется замедлением подготовительных процессов и скоростей протекания химических реакций преобразования топлива.

Учитывая, что $\tau_{np} = f(p_k)$, возможно возникновение колебаний при постоянном расходе топлива. При возникновении в камере сгорания случайных гармонических колебаний давления массовый приход продуктов сгорания в неё будет изменяться, оказывая влияние на изменение давления в камере. Определенная величина τ_{np} может привести к резонансу, т.е. совпадению по фазе начальных и вынужденных колебаний в камере.

Рассмотренный ме-

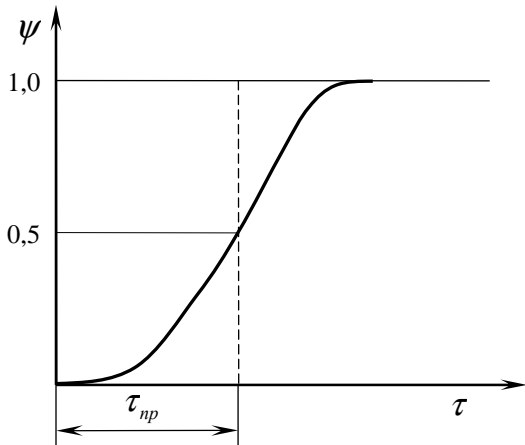


Рис. 77. Замена действительной кривой выгорания топлива ступенчатым законом

ханизм обратной связи приводит к возникновению низкочастотной внутрикамерной неустойчивости.

В основе рассмотренных механизмов развития колебаний лежит замена действительной кривой выгорания ступенчатым законом с чистым запаздыванием τ_{np} . (см. рис. 77). Предложил это упрощение М.С. Натанзон в 1949 году.

Проведенные исследования показали, что неустойчивость в диапазоне частот колебаний 30...60 Гц связана в основном с влиянием системы подачи топлива, а в диапазоне частот колебаний 100...150 Гц вызывается взаимодействием колебаний давления в камере с процессом горения.

ЛЕКЦИЯ № 12

11.4. Высокочастотная неустойчивость, механизм возбуждения высокочастотных колебаний

При ВЧ-неустойчивости колебания давления близки к собственным частотам акустических колебаний рабочего тела в объеме КС. Это частоты более 1000 Гц. Время пребывания в камере сгорания становится соизмеримым с периодом колебаний, а длина волны – с размерами камеры сгорания.

ВЧ колебания различают:

- продольные,
- поперечные.

Последние в свою очередь делятся на:

- радиальные,
- тангенциальные.

На рис. 78 изобразим продольные, а на рис. 79 поперечные ВЧ-колебания.

z , m , n - порядок функции Бресселя, число узлов давления. Они определяют моду (гармонику) колебаний.

Согласно теории колебаний (акустики) в КС в результате процесса сложения прямых и отраженных волн давления устанавливаются так называемые стоячие волны. Последние отличаются от бегущих волн тем, что сечения с наибольшей амплитудой колебания-

пучности и сечения с нулевой плитудой – узлы устанавливаются в определенных областях пространства КС и с течением времени своего положения не изменяют.

Картина неустойчивости в ЖРД осложняется возможностью возникновения в камере одновременно нескольких видов колебаний давления, а так же их наложением друг на друга. Наиболее распространенным видом колебаний, встречающимся в доводке ЖРД, являются поперечные высокочастотные колебания.

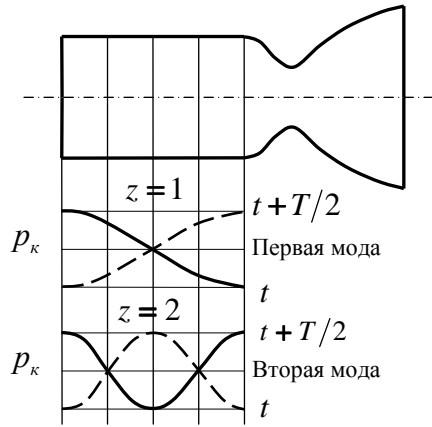


Рис. 78. Продольные ВЧ-колебания

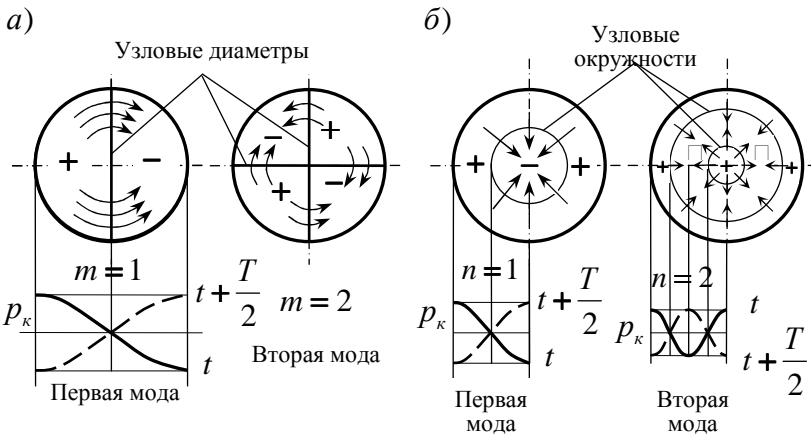


Рис. 79. Поперечные ВЧ-колебания:
 а) □ тангенциальные; б) □ радиальные

Поперечные колебания имеют наибольшее значение вблизи смесит головок, постепенно ослабевая к соплу.

Согласно теории акустики собственные частоты акустических колебаний в КС цилиндрической формы длиной $l_{кс}$ и радиусом $R_{кс}$

$$f = a \sqrt{\left(\frac{Z}{2l_{к.с}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{m.n}}{2R_к}\right)^2}, \quad (298)$$

где a – скорость звука в КС, Z – число узловых точек по длине КС при продольных колебаниях, $\alpha_{m.n}$ – параметр, значение которого определяется соответствующими модами поперечных колебаний, n – число узловых окружностей при радиальных колебаниях, m – число узловых диаметров при тангенциальных колебаниях.

Для определения $\alpha_{m.n}$ имеются справочные таблицы в учебниках [1] и [3].

В КС ЖРД имеют место “чистые” колебания:

- продольные, когда $Z \neq 0$, $m = 0$, $n = 0$;
- радиальные, когда $n \neq 0$, $Z = 0$, $m = 0$;
- тангенциальные, когда $m \neq 0$, $Z = 0$, $n = 0$.

11.5. Механизм возбуждения высокочастотных колебаний

Механизм возникновения высокочастотных колебаний в принципе аналогичен механизму возбуждения внутрикамерных колебаний низкой частоты. При ВЧ колебаниях $\tau_m = 0$, т.к. колебания не вызывают изменения расхода топлива, а $\tau_n = const$, поскольку давление в КС не выравнивается за время периода колебаний.

Возникшие в силу каких-либо причин гармонических колебаний в КС оказывают влияние через изменение времени преобразования

$$\tau_{np} = \frac{a}{p_к^n} \text{ на массовый приход в кс продуктов сгорания.}$$

Увеличение $p_к$ ведет к снижению τ_{np} и возрастанию $\dot{m}_{ПС}$ (см. рис. 80). Повышение прихода продуктов сгорания вызовет в свою очередь увеличение давления в локальной зоне камеры сгорания. Этим объясняется, что колебания давления при ВЧ неустойчивости близки к собственным частотам акустических колебаний рабочего тела в объеме КС.

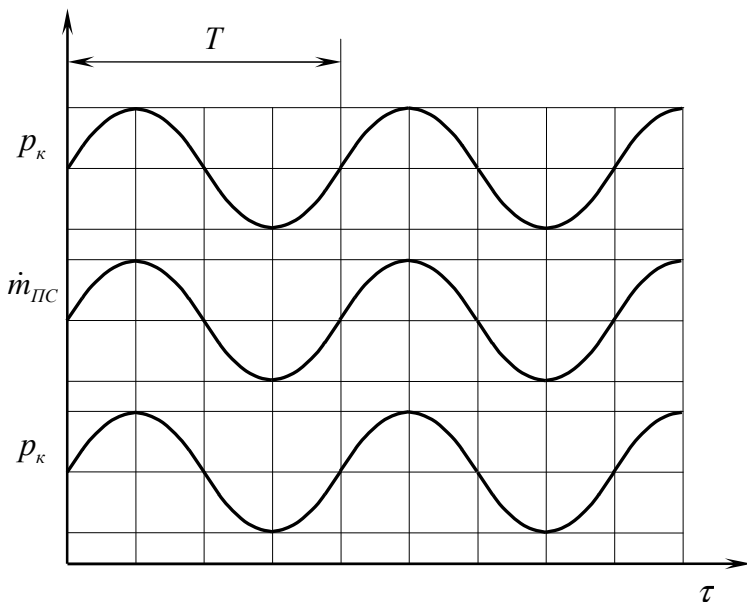


Рис. 80. Механизм возбуждения ВЧ-колебаний:

Имеются два необходимых условия возбуждения высокочастотных колебаний:

- временное, заключающееся в совпадении акустических частот КС с частотой начальных случайно возникших колебаний в камере;
- пространственное, заключающееся в том, что процесс горения оказывает наибольшее влияние на колебания давления, когда зона горения располагается в области пучности, где амплитуда колебаний максимальна. Если же фронт горения будет располагаться в зоне узла, то ВЧ неустойчивость не возникнет

Только при соблюдении временного и пространственного необходимых условий будут возникать локальные колебания газовыделения, поддерживающие или усиливающие процесс колебания давления в камере.

ВЧ неустойчивость чаще всего возникает:

- при высоких давлениях в КС;
- использовании химически высокоактивных топлив;
- качественном распылении топлива (очень мелком и однородном);
- больших продольных и поперечных размерах камеры сгорания.

11.6. Границы устойчивости ЖРД

Поскольку НЧ, СЧ и ВЧ колебания в ЖРД зависят от большого

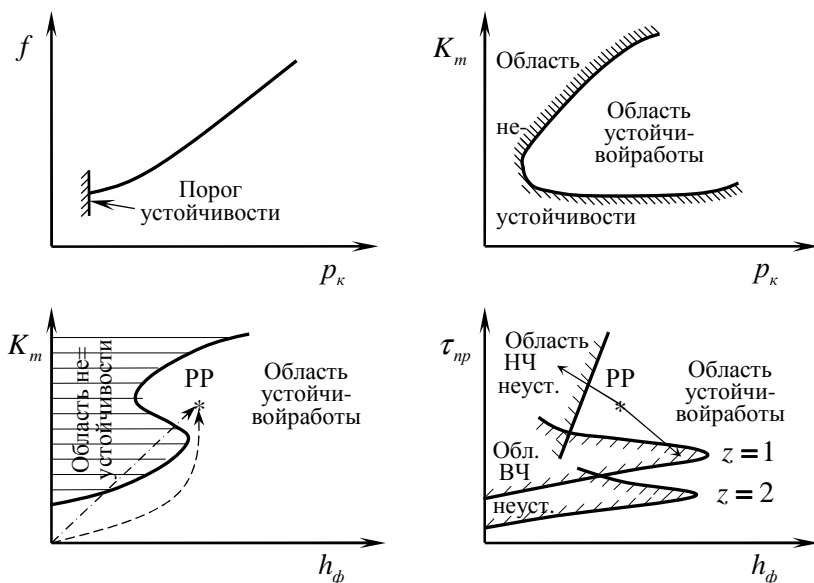


Рис. 81. Границы неустойчивости ЖРД

числа параметров, наиболее важными из которых являются Δp_ϕ , τ_{np} , K_m , p_k , то обычно границу устойчивости строят для ЖРД в координатах $K_m = f(p_k)$, $K_m = f(h_\phi)$, $\tau_{np} = f(h_\phi)$, где h_ϕ — относительный удвоенный перепад давления на форсунках

$$h_{\phi} = \frac{2\Delta p_{\phi}}{p_{\kappa}} = \frac{2(p_{\text{вх}} - p_{\kappa})}{p_{\kappa}}. \quad (299)$$

Теории неустойчивости рабочего процесса в ЖРД, позволяющей с достаточной для практики точностью объяснять влияние отдельных параметров и наблюдаемых фактов, а также рассчитывать границы устойчивости для эксплуатируемых и вновь проектируемых двигателей, не существует. Её создание наталкивается на серьёзные трудности.

11.7. Мероприятия по борьбе с НЧ, СЧ и ВЧ неустойчивостью

Борьба с неустойчивостью рабочего процесса производится путём изменения составляющих колебательного контура (цепи): источник энергии □ характеристики колебательной системы □ обратная связь или же путём демпфирования колебаний.

11.7.1 Мероприятия по борьбе с НЧ и СЧ неустойчивостью

Основные мероприятия по борьбе с НЧ, СЧ устойчивостью рабочего процесса в ЖРД следующие:

1. Изменения в схеме смесеобразования.

Факторы, влияющие на процесс преобразования топлива, в той или иной степени оказывают влияние и на возможность устранения автоколебаний низкой и средней частоты.

2. Уменьшение τ_{np} .

При уменьшении времени преобразования область устойчивой работы расширяется, частота возникающих колебаний возрастает, а их амплитуда уменьшается.

Сократить τ_{np} можно увеличив давление в КС, выбрав более активные компоненты топлива, улучшив смесеобразование, например, уменьшив медианный диаметр капель, и т.д.

3. Увеличение перепада давления на форсунках Δp_{ϕ} .

С увеличением Δp_ϕ меньшее влияние оказывают колебания давления в КС на изменения расхода топлива, ослабевают внешние воздействия на процесс горения, повышается тонкость распыла.

4. Увеличение приведенной длины КС $L_{np} = \frac{V_{КС}}{F_M}$.

С увеличением L_{np} постоянная времени камеры $T_1 = \beta \cdot L_{np} / R_k T_k$ возрастает, т.е. камера становится менее “динамичной”, а частота колебаний уменьшается.

5. Уменьшение относительной расходонапряжённости \dot{m}_F / p_k .

Влияние относительной расходонапряжённости на устойчивость камеры к низким частотам противоположно влиянию L_{np} .

6. Установка в топливных магистралях дроссельных диафрагм с большим перепадом давления.

Ослабевает внешнее воздействие на процесс горения.

7. Установка специальных гидравлических демпферов в магистралях подачи компонентов топлива.

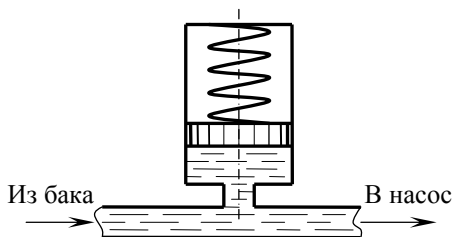


Рис. 82. Гидравлический демпфер в магистрали подачи компонента

Демпфером служит конструкция, имеющая массоупругий элемент (см. рис. 82). Он обычно устанавливается перед входом в насос. За счет расогласования собственных частот системы подачи топлива и конструкции ракеты развитие общедвигательных НЧ колебаний подавляется.

8. Изменение динамических характеристик топливных магистралей.

Оказывают влияние, например, длина, диаметр, форма трубопроводов, наличие упругих элементов в магистралях и т.д.

В настоящее время методы устранения низко- и среднечастотной неустойчивости рабочего процесса отработаны в удовлетворительной для практики степени.

ЛЕКЦИЯ № 13

11.7.2 Мероприятия по борьбе с ВЧ неустойчивостью

Мероприятия по борьбе с высокочастотной неустойчивостью базируются в основном на нарушении пространственного или временного необходимого условия возбуждения ВЧ колебаний. Основные мероприятия следующие:

1. Изменение в организации смесеобразования.

Схема и конструкция смесительной головки, тип и схема размещения смесительных элементов по её поверхности определяют характеристики подготовительных процессов и тем самым \square чувствительность процесса горения к возмущениям.

Нарушается временное условие самовозбуждения в основном за счет изменения величины времени преобразования $\tau_{пр}$.

2. Снижение расходонапряжённости \dot{m}_F .

При высокой расходонапряжённости в КС в зоне возникновения возмущения находится относительно большее количество несгоревшего топлива, часть химической энергии которого идет на подпитку первоначального возмущения.

3. Оптимальное распределение процесса горения по объему КС.

Для случая продольных колебаний необходимо растягивать зону горения вдоль камеры сгорания. При этом в области, наиболее благоприятной для проявления связи между колебаниями и процессами горения, выделяется меньше энергии, что повышает устойчивость камеры.

Для обеспечения более устойчивой работы ЖРД к поперечным колебаниям можно регулировать распределение процесса горения и в направлении, перпендикулярном оси камеры сгорания.

4. Изменение геометрии КС и докритической (сужающейся) части сопла.

Наибольшее влияние оказывают отношения длины КС к её диаметру $\frac{l_{КС}}{D_{\kappa}}$ и относительная площадь входного сечения сопла \bar{F}_c .

Это влияние неоднозначно. Оно зависит от типа колебаний. Так, увеличение \bar{F}_c снижает запас устойчивости для продольных колебаний и повышает для поперечных колебаний.

5. Уменьшение количества непрореагировавшего топлива по периферии камеры сгорания у огневой стенки.

Это мероприятие повышает устойчивость КС к тангенциальным модам колебаний.

6. Применение антипульсационных перегородок.

Антипульсационные перегородки (см. рис. 83), перегородаживая часть объема камеры сгорания, изменяют акустические характеристики камеры и предохраняют предпламенную зону от воздействия колебаний.

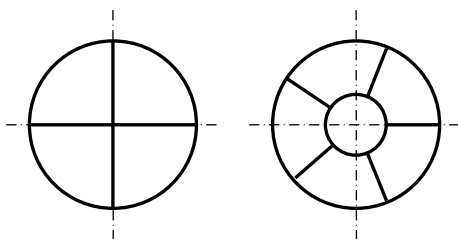


Рис. 83. Антипульсационные перегородки на огневом днище смесительной головки

7. Добавление к горючему твердых частиц.

Они демпфируют колебания.

8. Использование аблирующих покрытий на стенках камеры.

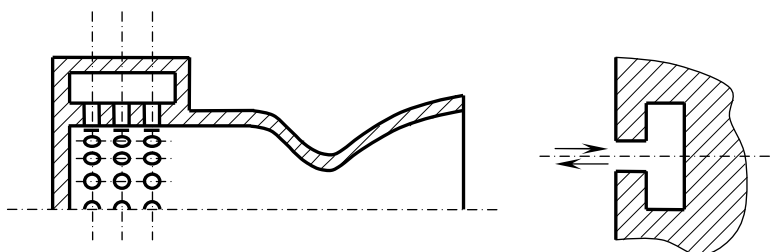


Рис. 84. Акустические поглотители на стенке камеры сгорания

9. Установка акустических поглотителей (см. рис. 84).

Они способствуют поглощению энергии колебаний.

Размеры акустических поглотителей подбираются таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное демпфирование на опасных частотах.

Последние три меры способствуют лишь подавлению колебаний, а не их устранению.

11.8. Способы оценки склонности ЖРД к ВЧ неустойчивости

Так как ВЧ колебания являются очень опасными и могут привести к быстрому разрушению двигателя, то возникновение их в процессе эксплуатации недопустимо. Поэтому очень важно на этапе конструкторско-доводочных испытаний двигателей оценить их надежность в отношении ВЧ неустойчивости. Такая оценка представляет определенную сложность, поскольку высокочастотные пульсации зачастую являются невоспроизводимыми, т.е. не всегда удастся вызвать их созданием условий, например, по $\alpha_{ок}$, p_k , $t_{ком}$, при которых они ранее возникали. В настоящее время применяют два основных способа оценки склонности двигателя к ВЧ неустойчивости.

Первый способ. При завершении опытной отработки двигателя проводятся специальные испытания нескольких экземпляров данного типа двигателя за пределами “рабочего квадрата” (см. рис.85). Под последним понимается область допустимых режимов в условиях эксплуатации. Если испытываемые двигатели работают устойчиво на утяжеленных режимах, то это является гарантией, что все двигатели

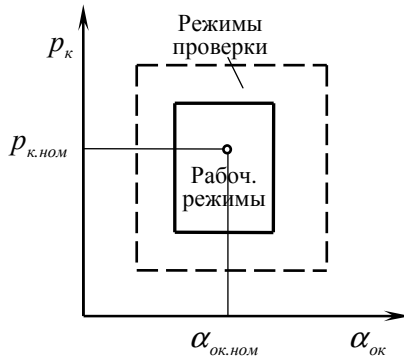


Рис. 85. Первый способ оценки склонности ЖРД к ВЧ неустойчивости

данной конструкции на более легких рабочих режимах будут работать устойчиво.

Второй способ. Проверке подвергается каждый конкретный двигатель. При огневых стендовых испытаниях создается резкое повышение давления в КС путем подрыва небольшой навески пороха в специальном патроне, соединенным каналом с КС. Если ЖРД не отозвался на данное возмущение давления, то он не склонен к неустойчивой работе. Если же возникает ВЧ неустойчивость, то двигатель отбраковывается.

12. РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ТВЁРДОМ ТОПЛИВЕ (РДТТ)

12.1. Общие сведения о РДТТ, отличительные особенности, состав и принцип их работы

Ракетным двигателем твёрдого топлива (РДТТ) называют такой химический ракетный двигатель (ХРД), который работает на топливе, находящемся в твёрдом агрегатном состоянии.

После ЖРД РДТТ самый распространённый химический ракетный двигатель.

Отличительными особенностями РДТТ являются:

- размещение в камере сгорания всего запаса твёрдого ракетного топлива, необходимого для выполнения программы полёта, в виде зарядов самой различной формы;
- отсутствие системы подачи топлива в камеру сгорания;
- камера РДТТ не имеет смесительной головки.

Твёрдое ракетное топливо (ТРТ) имеет в своём составе окислитель и горючее (окислительные и горючие элементы), вступающие в химическую реакцию горения.

На рис 90 приведена конструктивная схема современного РДТТ.

В состав РДТТ входят: 1 □ заряд твёрдого ракетного топлива; 2 □ бронирующее покрытие заряда; 3 □ корпус-обечайка камеры; 4 □ теплозащитное покрытие; 5 □ поворотное сопло; 6 □ сопловой вкладыш в минимальном сечении из тугоплавкого или аблирующего материала; 7 □ устройство крепления и фиксации заряда ТРТ; 8 □ воспламенительное устройство; 9 □ переднее днище; 10 □ сопловое днище или сопловой блок; 11 □ привод поворота сопла.

Принцип работы РДТТ.

Для запуска двигателя на воспламенительное устройство 8 подаётся управляющий электрический сигнал. Задача воспламенительного устройства поднять давление в камере сгорания до величины, обеспечивающей отсутствие аномального (прерывистого) горения заряда ТРТ и нагреть незабронированную поверхность заряда до температуры, превышающей температуру воспламенения. После срабатывания воспламенительного устройства происходит горение

заряда ТРТ 1 по поверхностям, незащищённым бронирующее покрытие 2.

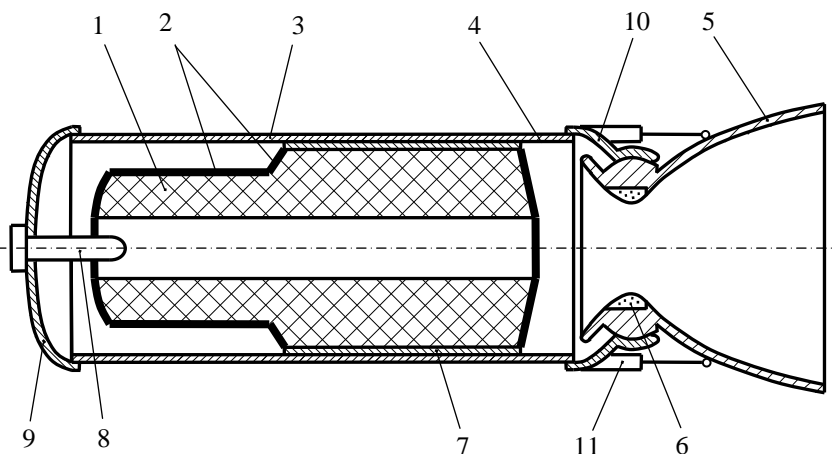


Рис. 90. Схема современного РДТТ:

- 1 □ заряд твёрдого ракетного топлива; 2 □ бронирующее покрытие заряда; 3 □ корпус-обечайка камеры; 4 □ теплозащитное покрытие; 5 □ поворотное сопло; 6 □ сопловой вкладыш в минимальном сечении сопла из тугоплавкого или аблирующего материала; 7 □ устройство крепления и фиксации заряда; 8 □ воспламенительное устройство; 9 □ переднее днище; 10 □ сопловое днище или сопловый блок; 11 □ привод поворота сопла

В результате протекания экзотермической окислительно-восстановительной реакции химическая энергия твёрдого ракетного топлива переходит в тепловую энергию, которая подводится к образовавшимся в результате реакции продуктам сгорания, нагревая их до высокой температуры.

Рабочее тело, представляющее собой сжатые высокотемпературные продукты сгорания ТРТ и обладающее значительным теплосодержанием, поступает в сверхзвуковое сопло (сопло Лавалья). Здесь оно ускоряется геометрическим способом. Его потенциальная и тепловая энергия преобразуются в кинетическую энергию вытекающей струи продуктов сгорания. Отбрасывая массу рабочего тела с большой сверхзвуковой скоростью, РДТТ создаёт тягу.

Заряды ТРТ либо прочно скрепляются со стенками камеры, либо свободно вкладываются в неё, крепятся и фиксируются там с помощью удерживающих устройств 7. таких как диафрагмы, решётки, колосниковые решётки, полозья.

В зависимости от числа камер РДТТ могут быть:

- однокамерными;
- многокамерными.

В многокамерных РДТТ отдельные камеры соединяются между собой специальными газоводами для выравнивания давления и скорости горения твёрдого ракетного топлива.

Внутренние поверхности камеры, омываемые продуктами сгорания, обычно покрываются теплозащитными покрытиями 4. Это неметаллические или тугоплавкие металлические материалы и их сочетания. Теплозащитные покрытия в значительной степени снижают отвод тепла от рабочего тела в окружающую среду.

Сопло с вкладышем и исполнительным органом его поворота называют сопловым блоком. Сопло может быть частично погружено в КС для уменьшения продольных габаритов двигателя.

РДТТ как правило не регулируются. Однако может быть применено иногда регулирование давления в КС и тяги следующими путями:

- 1) профилированием заряда, т.е. изменением поверхности его горения по времени;
- 2) впрыском жидкости или вдувом газа в сопловый блок;
- 3) изменением площади минимального сечения сопла с помощью перемещения вдоль оси сопла центрального тела □ груши.

РДТТ отличаются большим разнообразием по конструктивному исполнению, уровню тяги, длительности работы и другим характеристикам.

По выполняемым ими функциям РДТТ подразделяются:

- на маршевые;
- вспомогательные.

РДТТ, выполняя вспомогательные функции, иногда используются в качестве:

- ✓ пороховых аккумуляторов давления (ПАД),
- ✓ бортовых источников питания (БИП),

- ✓ устройств разделения ступеней и т.д.

Для изготовления корпуса РДТТ, являющегося как правило и корпусом ракеты (ЛА), применяются различные металлические и неметаллические материалы, например, стеклоткань с эпоксидной смолой, картон или папье-маше.

ЛЕКЦИЯ № 14

12.2. Основные преимущества и недостатки РДТТ

Основные преимущества РДТТ следующие:

- чрезвычайная простота конструкции, кроме поворотных сопел нет трущихся и вращающихся частей;
- удобство, дешевизна и простота эксплуатации;
- постоянная готовность к действию (высокая боеготовность), что очень важно для боевых ракет;
- возможность длительного хранения (15...20 лет);
- способность работать в условиях больших перегрузок при маневрах ЛА на траектории полёта;
- высокая надёжность ($P = \prod_i^n P_i$).

У современных РДТТ $P > 0.999$.

К основным недостаткам РДТТ можно отнести следующие:

- сравнительно низкий удельный импульс $I_y = 2200...2800$ м/с;
- дороговизна новейших современных ТРТ;
- сложность регулирования РДТТ, например регулирование тяги по величине и направлению;
- большие трудности обеспечения многократности запуска;
- значительная зависимость давления в камере p_k и времени работы двигателя τ от начальной температуры заряда T_o , что приводит к разбросу выходных параметров РДТТ.

12.3. Заряды в РДГТ и их горение

Заряды для РДГТ получают прессованием и отливкой в изложницу или непосредственно в корпус камеры двигателя.

Достаточно условно заряды делят на 3 типа:

- ✓ с горением по торцевой поверхности,
- ✓ с горением по боковым поверхностям,
- ✓ комбинированные с горением одновременно по различным поверхностям.

Изобразим на рис. 86 возможные формы зарядов ТРТ:

Линейная скорость горения или просто скорость горения – скорость перемещения поверхности горения по нормали

$$u = \frac{de}{d\tau}. \quad (300)$$

Массовая скорость горения

$$u_m = \rho_T \frac{de}{d\tau} = u \rho_T, \quad (301)$$

где ρ_T – плотность ТРТ.

Если Ω – поверхность горения, то массовый расход топлива (приход ПС)

$$\dot{m} = \Omega u \rho_T. \quad (302)$$

В зависимости от характера изменения поверхности горения во времени имеются типы зарядов (см. рис. 87), обеспечивающих:

- a) прогрессивное горение, когда поверхность горения

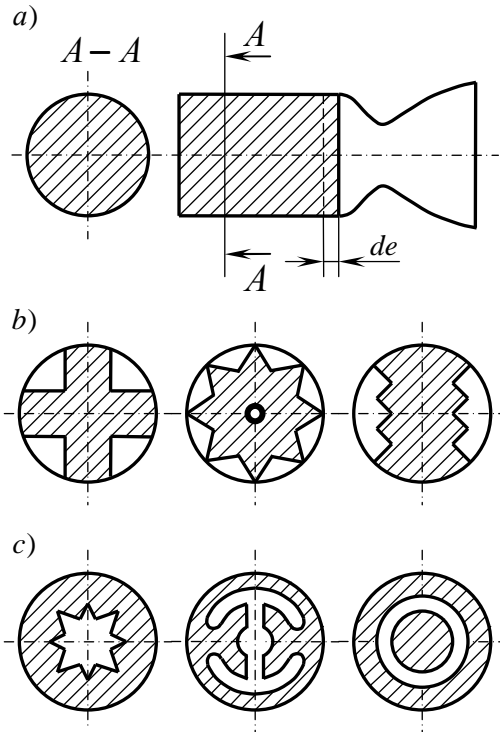


Рис. 86. Возможные формы зарядов ТРТ:
 а) с горением по торцевой поверхности;
 б) горением по внешним боковым поверхностям;
 в) горением по внутренним боковым поверхностям.

Ω по времени работы двигателя увеличивается ($\Omega \uparrow$), а значит растут давление в камере сгорания p_k и тяга P .

Его обеспечивает цилиндрический канальный заряд, горящий по внутренней боковой поверхности.

b) \square регрессивное горение, когда по времени работы двигателя поверхность горения Ω снижается, а поэтому уменьшаются p_k и P .

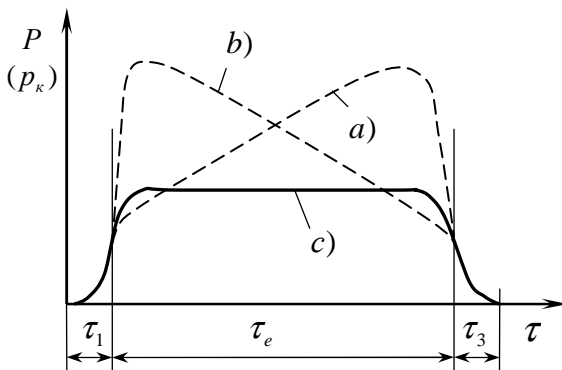


Рис. 87. Типы зарядов ТРТ, обеспечивающих:
 a) \square прогрессивное горение; b) \square регрессивное горение;
 c) \square нейтральное горение

Его обеспечивает цилиндрический канальный заряд, горящий по наружной боковой поверхности.

c) \square нейтральное горение, когда по времени работы двигателя $\Omega = \text{const}$, поэтому $p_k = \text{const}$ и $P = \text{const}$. Его обеспечивает торцевое горение цилиндрического заряда или горение цилиндрического канального заряда одновременно по наружной и внутренней боковым поверхностям и забронированных торцевых поверхностях.

Возможно изменение поверхности горения, а значит и тяги двигателя с экстремумом или скачкообразно. Самостоятельно студентам нарисовать формы зарядов ТРТ, обеспечивающих такое изменение тяги РДТТ.

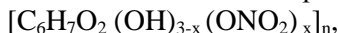
12.4. Твёрдые ракетные топлива и требования к ним, их классификация, состав и свойства

Этот раздел изучить студентам самостоятельно по учебному пособию [7].

12.5. Механизм горения двухосновных ТРТ

Двухосновные топлива – твердые растворы органических веществ, содержащих горючие и окислительные элементы.

Первой основой таких топлив является нитроцеллюлоза



где $x = 1, 2, 3$ – степень нитрации целлюлозы. Как правило используют целлюлозу с содержанием азотане менее 11 %.

Второй основой таких топлив являются вещества типа нитроглицерина $C_3H_5(ONO_2)_3$ (динитратдиэтиленгликоль, динитратолуол), которые являются растворителями.

Помимо основных компонентов для получения требуемых физико-механических свойств, внутрибаллистических и эксплуатационных характеристик в состав коллоидных ТРТ вводят различные добавки: стабилизаторы, пластификаторы, катализаторы, флегматизаторы, красители и т.д.

Однородность структуры двухосновного топлива предопределяет однородность процесса его горения. Топливо горит параллельными слоями.

В то же время процесс горения является многостадийным. Основные реакции горения происходят в газовой фазе. Однако им предшествует процессы термодинамического разложения (пиролиза) и газификации поверхностного слоя топлива за счет теплоподвода от продуктов сгорания.

Детальное описание всех трансформаций компонентов топлива во фронте горения невозможно. Это вынуждает выделить отдельные последовательные стадии и зоны горения.

Энергетической основой процессов механизма горения является теплота химических реакций, подводимая от ПС во все остальные зоны.

Одномерная модель горения двухосновного топлива такова приведенаоказана на рис.88.

На схеме механизма горения заряда двухосновного ТРТ выделены следующие зоны:

I – зона прогрева поверхностного слоя топлива и протекания реакций в твердой фазе.

Здесь начинается плавление и разложение твердой фазы. Тепло экзотермических реакций разложения ускоряет процесс газифика-

ции ТРТ. Скорость газификации на этой стадии описывается уравнением Аррениуса

$$u = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right), \quad (303)$$

где A – коэффициент, зависящий от состава топлива; E_a – энергия активации, это энергия возбуждения молекул, приводящая их в химически активное состояние; R – удельная газовая постоянная; T_s – температура поверхности заряда ТРТ, т.е. на границе раздела твердой и газовой фазы.

Толщина зоны I составляет десятые доли миллиметра. При увеличении скорости горения ТРТ u толщина зоны I уменьшается.

II – зона газификации, где протекают экзотермические предпламенные реакции и выделяются промежуточные продукты неполного сгорания.

Зона II делится на области:

1. парогазовая, где протекают реакции разложения в жидкой фазе;
2. накопления продуктов разложения и начало реакций в газовой фазе.

III – зона пламенных реакций горения между газообразными промежуточными продуктами неполного сгорания.

IV – зона равновесных продуктов сгорания.

При низких давлениях в камере сгорания ($< 3\text{МПа}$) продукты сгорания могут не находиться в состоянии химического равновесия, т.е. реакции горения за время пребывания газа в камере могут не

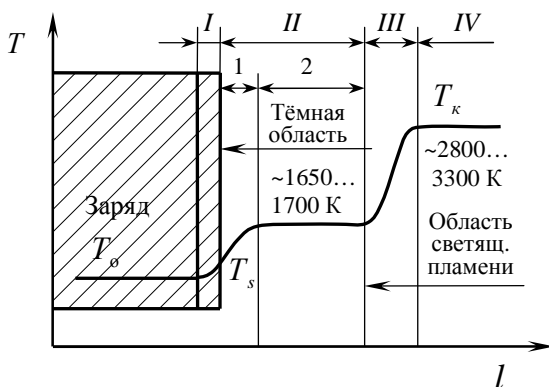


Рис. 88. Схема механизма горения заряда двухосновного ТРТ

завершиться. В этом случае в продуктах сгорания будут содержаться окислы азота (NO), а тепловой эффект сгорания топлива, вследствие недогорания CO и H₂ до CO₂ и H₂O соответственно, окажется значительно ниже расчетного. Это приводит к снижению удельного импульса тяги I_y .

Следует отметить, что разбивка процесса горения двухосновного топлива на зоны имеет, в определенной степени, условный характер, т.к. в действительности зоны не всегда четко выражены, а физико-химические преобразования в них могут протекать не только последовательно, но и параллельно.

ЛЕКЦИЯ № 15

12.6. Механизм горения смесевых ТРТ

Смесевые топлива □ представляют собой механические смеси (конгломераты) твёрдых окислителя и горючего. Чаще всего используют в настоящее время три основных компонента:

1. минеральный окислитель;
2. органическое горючее;
3. металлическая добавка.

В качестве окислителей обычно используются твёрдые соли хлорной и азотной кислот:

- ✓ NH₄ClO₄ – перхлорат аммония (до 80% смесевых ТРТ США),
- ✓ NH₄NO₃ – нитрат аммония,
- ✓ KClO₄ – перхлорат калия,
- ✓ NaNO₃ – нитрат натрия и т.д.

горючих–связующих применяют:

- ✓ тяжёлые нефтепродукты (асфальты, битумы),
- ✓ полимеры (эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы),
- ✓ пластмассы (поливинилхлорид, полиамид),
- ✓ каучуки (полисульфидный, полиуретановый, бутадиенстирольный).

В качестве металлической добавки используют:

- ✓ алюминий Al,
- ✓ магний Mg,

- ✓ бериллий Be,
- ✓ цирконий Zr.

Чаще всего применяют Al как наиболее распространённый и дешёвый.

Для получения требуемых физико-механических свойств, внутриваллистических и эксплуатационных характеристик в смесевые ТРТ вводят различные добавки: пластификаторы, стабилизаторы, катализаторы, флегматизаторы, красители и т.д.

При разработке механизма горения смесевых топлив исходят из положения, что скорости термического разложения твёрдых горючего и окислителя определяются уравнением Аррениуса

$$u = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right).$$

В то же время естественно предположить, что устойчивость горения смесового топлива будет иметь место в случае, когда скорости разложения частиц горючего и окислителя в первом приближении будут равны, т.е. $u_{\Gamma} = u_{ок}$. Это можно записать

$$A_{\Gamma} \exp\left(-\frac{E_{a,\Gamma}}{R_{\Gamma} T_{s,\Gamma}}\right) = A_{ок} \exp\left(-\frac{E_{a,ок}}{R_{ок} T_{s,ок}}\right). \quad (304)$$

Так как для горючего и окислителя константы A и уровни энергии активации E_a не равны между собой ($A_{\Gamma} \neq A_{ок}$, $E_{a,\Gamma} \neq E_{a,ок}$, $R_{\Gamma} \neq R_{ок}$), то из равенства (304) следует, что в общем случае температура частиц окислителя на поверхности горения должна отличаться от температуры горючего ($T_{s,\Gamma} \neq T_{s,ок}$).

Это так называемый «постулат двух температур» теории горения смесевых топлив.

Наиболее распространенной моделью горения смесевых топлив является модель гранулярно-диффузионного пламени Саммерфилда. Эта модель так же является одномерной.

Согласно модели Саммерфилда горение происходит в тонкой зоне диффузионного пламени, примыкающей к твердой поверхности, на которой протекают реакции разложения вещества. Физически процесс протекает таким образом, что продукты термического раз-

ложения горючего и окислителя образуются в виде отдельных объемов («карманов»), величина которых определяется массой кристаллов окислителя, и затем сгорают.

Наличие частиц алюминия в составе смесевых топлив приводит к некоторым особенностям процесса горения. Исследования показали, что горение частиц алюминия является диффузионным. Оно происходит в зоне, окружающей частицу металла, куда диффундируют кислород из внешнего потока и пары с плавящейся частицы. При этом пары металла вступают в реакцию с кислородом. Некоторые частицы плавятся на поверхности топлива и при этом могут сливаться в более крупные, осуществляется процесс агломерации. На процесс горения алюминия существенно влияние оказывает диаметр частиц. Мелкие частицы плавятся непосредственно на поверхности ТРТ, а крупные, диаметр которых составляет несколько десятков микрометров, плавятся и воспламеняются уже в зоне пламени, куда они уносятся газовым потоком.

При разложении горючего и окислителя возникают направленные от поверхности заряда потоки горючего и окислительного газов. Химической реакции между газообразными компонентами должно предшествовать их смешение.

Естественно, что неоднородная структура смесевое ТРТ будет приводить к аналогичной неоднородности на поверхности горения и в области фронта пламени.

Изобразим на рис. 89 одномерную модель горения смесевое топлива.

На схеме механизма горения смесевое ТРТ условно показаны следующие зоны:

I □ зона прогрева заряда ТРТ и начала разложения в твердой фазе;

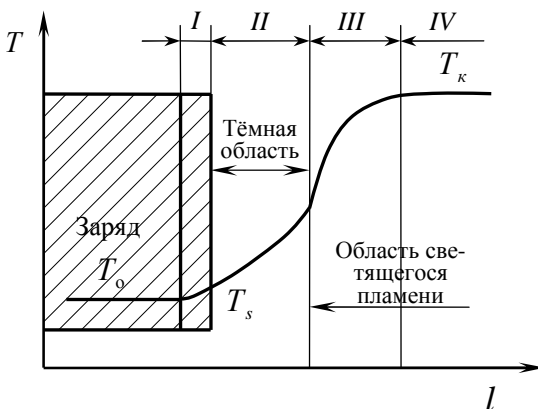


Рис. 89. Схема механизма горения заряда смесевое ТРТ

- II □ зона газификации и перемешивания;
- III □ зона горения;
- IV □ зона равновесных продуктов сгорания.

Область нарастания температуры в газовой среде является очень узкой, причем характерным является отсутствие зоны подготовки.

Толщина зоны разложения очень мала и составляет 0,001...0,01 мм, а диффузионное горение происходит в зоне, протяженностью ~ 0.1мм от поверхности топлива.

Следует отметить, что процесс разложения и газификации твердой фазы существенно зависит от интенсивности теплоподвода к поверхности твердого топлива. Все факторы, увеличивающие теплоподвод, ускоряют разложение и газификацию поверхностного слоя ТРТ.

Таким образом, скорость горения будет зависеть от природы топлива, от давления в камере сгорания, от начальной температуры заряда, скорости движения газа вдоль поверхности горения.

В заключении следует отметить, что теория горения смесевых топлив разработана еще недостаточно, основывается, главным образом, на эмпирических данных и используется для объяснения процесса, а не предсказывает его характеристики.

12.7. Зависимость скорости горения ТРТ от основных факторов

Из приведенных механизмов горения двухосновных и смесевых ТРТ следует, что все факторы, увеличивающие теплоподвод к поверхности горения, ускоряют процессы разложения, пиролиза, возгонки и газификации твердой фазы, а значит повышают скорость горения. Отсюда явствует зависимость скорости горения от следующих факторов:

- ✓ природы топлива, его элементарного состава;
- ✓ давления в камере, т.е. давления, при котором осуществляется горение;
- ✓ начальной температуры заряда;
- ✓ скорости движения РТ (ПС) вдоль поверхности горения;
- ✓ технологии изготовления;
- ✓ напряжение заряда ТРТ и др.

12.7.1. Зависимость скорости горения ТРТ от давления в камере сгорания

Давление в камере сгорания p_k является важнейшим фактором, воздействующим на скорость горения ТРТ. Наблюдается возрастание скорости при повышении давления.

Покажем графически (см. рис. 90) как изменяется расстояние от высокотемпературной зоны пламени до поверхности ТРТ с изменением давления в камере.

Высокотемпературная зона пламени (зоны III и IV) приближается к поверхности ТРТ при увеличении давления за счет сокращения размеров зоны газификации.

Увеличение p_k приводит к приближению высокотемпературной зоны пламени (зоны III IV) к поверхности ТРТ за счет сокращения размеров зоны газификации и возрастанию интенсивности теплоотдачи от продуктов сгорания. Скорость реакций, протекающих в конденсированной и газовой фазах, при этом увеличивается.

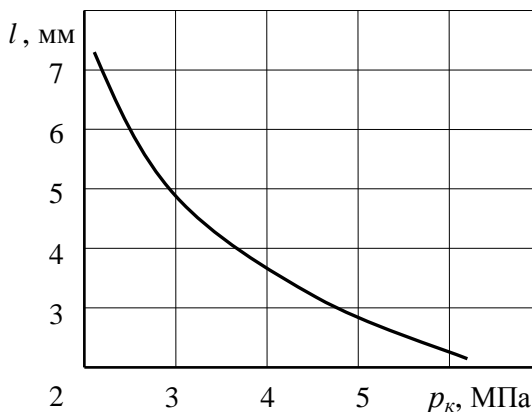


Рис.95. Влияние давления в КС на расстояние от зоны пламени до поверхности горения

Как показали исследования, зависимость $u = f(p_k)$ имеет вид:

$$u = B p_k^v \text{ (степенная функция) или } \quad (305)$$

$$u = A + C p_k, \quad (306)$$

где A, B, C – постоянные, зависящие от структуры, состава и начальной температуры заряда, ν – показатель степени, зависящий от природы топлива.

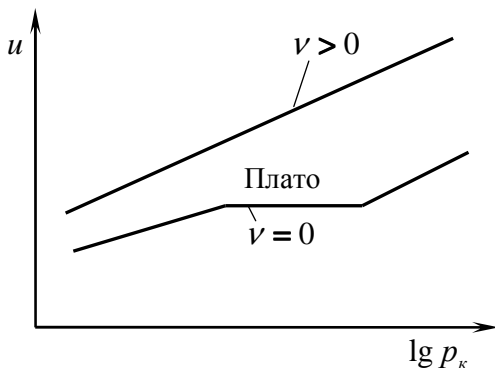


Рис. 96. Зависимость скорости горения ТРТ от давления

Изобразим на рис. 96 зависимость $u = f(p_k)$ для двух различных двухосновных ТРТ.

В некотором интервале изменения давления в камере сгорания скорости горения ТРТ u может не зависеть для отдельных топлив от p_k ($\nu = 0$). Плато имеют двухосновные топлива с

катализатором.

Для смесевых топлив Саммерфилдом была получена зависимость

$$\frac{1}{u} = \frac{a}{p_k} + \frac{b}{\sqrt[3]{p_k}} \quad \text{или} \quad (307)$$

$$u = \frac{1}{a p_k^{-1} + b p_k^{-\frac{1}{3}}}, \quad (308)$$

где a, b – коэффициенты, учитывающее влияние соответственно кинетических и диффузионных факторов.

12.7.2. Зависимость скорости горения от начальной температуры заряда ТРТ

Температура топлива влияет на скорость протекания гомогенных и гетерогенных химических реакций. При повышении начальной

температуры определяющими становятся реакции в конденсированной фазе.

Изменение скорости горения в зависимости от начальной температуры при постоянном давлении оценивается температурным коэффициентом скорости горения $(\pi_u)_p$, выражение для которого имеет вид:

$$(\pi_u)_p = \frac{1}{u} \left(\frac{\partial u}{\partial T_o} \right)_p = \left(\frac{\partial \lg u}{\partial T_o} \right)_p. \quad (309)$$

Установлено, что $(\pi_u)_p$ уменьшается с повышением давления, как для двухосновных, так и для смешанных топлив (см. рис. 97).

Для приближенных расчетов можно считать, что температурный коэффициент скорости горения не зависит от p_k и от интервала рабочих температур. Тогда можно использовать в расчетах зависимости вида

$$u_{T_{o2}} = u_{T_{o1}} [1 + \pi_u (T_2 - T_1)], \quad (310)$$

где π_u – температурный коэффициент скорости горения.

Для современных ТРТ $\pi_u = 0,001 \dots 0,005$. Двухосновные ТРТ имеют большую зависимость скорости горения от начальной температуры, поэтому у них π_u ближе к 0,005.

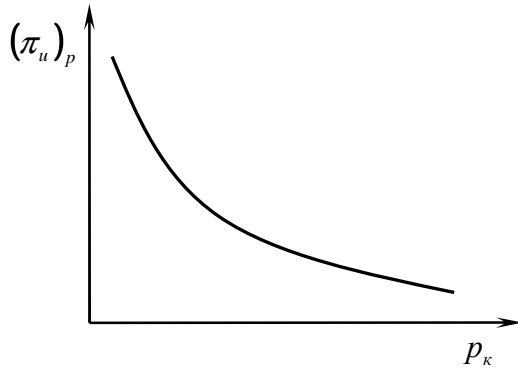


Рис. 97. Зависимость температурного коэффициента скорости горения ТРТ от давления в КС

12.7.3. Зависимость скорости горения от скорости обдува поверхности заряда ТРТ потоком рабочего тела

Скорость обдува поверхности горения твёрдого топлива продуктами сгорания по длине камеры изменяется. Покажем это на рис. 98 для цилиндрического канального заряда ТРТ.

Начиная с какой-то скорости обдува поверхности заряда ТРТ, скорость горения увеличивается. Горение в этом случае называют эрозионным.

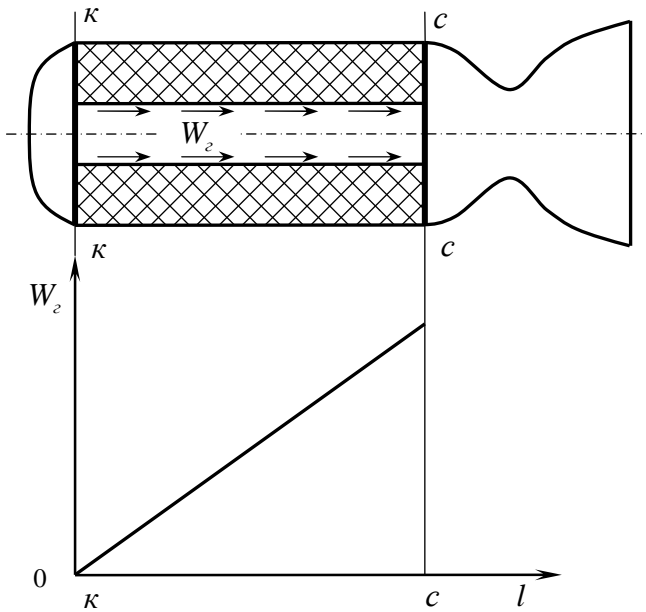


Рис. 98. Изменение скорости обдува поверхности заряда ТРТ по длине КС

Скорость горения увеличивается по причине интенсификации процессов тепломассопереноса. Происходит турбулизация потока и приближение зоны горения к поверхности топлива.

Скорость эрозионного горения запишется

$$u = u_o \varepsilon = u_o [1 + C (W_z - W_{z,n})], \quad (311)$$

где C – постоянная эрозионного горения, ε – эрозионное отношение, $W_{z,n}$ – пороговое значение скорости, ниже которого эрозионное горение отсутствует.

ЛЕКЦИЯ № 16

12.7.4. Влияние на скорость горения напряжённого состояния заряда, состава ТРТ, технологии изготовления

При работе РДГТ напряженное состояние заряда возникает от действия сил, вызванных перепадом давления, или градиентом температур (термическое напряжение). Оно может создаваться при изготовлении заряда прессованием.

Напряженное состояние влечёт за собой изменение локальных скоростей горения. В местах большего напряжения через деформацию и образование микротрещин увеличивается выделение тепла в конденсированной фазе. Это приводит к увеличению температуры, а значит и к возрастанию скорости гетерогенных и гомогенных химических превращений.

Влияет на скорость горения смесового ТРТ средний размер частиц окислителя. Покажем на рис. 99 эту зависимость графически. Здесь σ – параметр ширины функции распределения.

Уменьшение среднего диаметра частиц окислителя приводит к повышению скорости горения. Характер зависимости определяется соотноше-

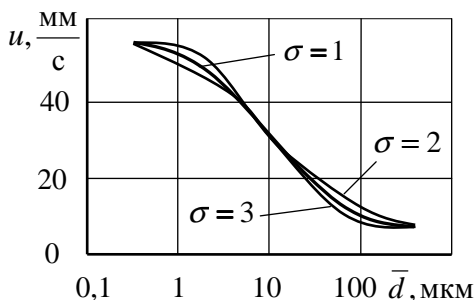


Рис. 99. Влияние среднего размера частиц окислителя на скорость горения смесового топлива

нием диффузионных и кинетических процессов при разложении и горении ТРТ.

Скорость горения ТРТ зависит от технологии изготовления заряда. Это связано с анизотропностью структуры. Так скорость горения двухосновного топлива в направлении прессования на 10...15% выше, чем в перпендикулярном направлении.

Исследования показали, что скорость горения смесевых топлив возрастает с увеличением размера (размерности) двигателя. Это объясняется изменением радиационного нагрева от высокотемпературных продуктов сгорания.

Для получения реальных характеристик РДТТ используют эмпирические коэффициенты перехода от скорости горения контрольного образца топлива к средней скорости горения этого ТРТ в камере сгорания конкретного РДТТ.

12.7.5. Зависимость скорости горения ТРТ от перегрузок

Полётные перегрузки возникают при разгоне и маневрировании ЛА, а также при вращении его вокруг продольной оси с большой угловой скоростью.

Появление инерционных сил вносит изменение в структуру поверхности горения и в физические процессы, протекающие на ней.

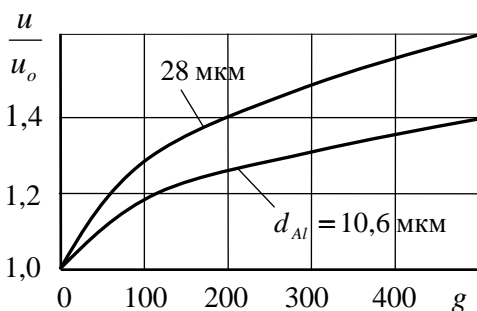


Рис. 100. Зависимость скорости горения от перегрузки для смесевых ТРТ с Al на основе NH_4ClO_4

На вращающихся стендах и центрифугах экспериментально установлено, что скорость горения возрастает, если вектор перегрузки направлен по нормали к горячей поверхности. Если он параллелен поверхности горения или направлен по нормали от неё, то скорость горения u практически не изменяется.

Скорость горения

возрастает с увеличением перегрузок. Изобразим на рис. 100 зависимость относительной скорости горения от величины перегрузок для смесового ТРТ на основе перхлората аммония с 15% содержанием алюминия.

Видно, что скорость горения при перегрузках выше у ТРТ, содержащего более крупные частицы Al. Увеличение содержания металла в топливах вызывает большее изменение скорости горения при перегрузках.

Увеличение размеров частиц окислителя повышает чувствительность скорости горения к перегрузкам.

12.8. Нормальное и аномальное горение в РДТТ

Стабильное или нормальное горение характеризуется постоянством скорости горения заряда по времени (см. рис. 101).

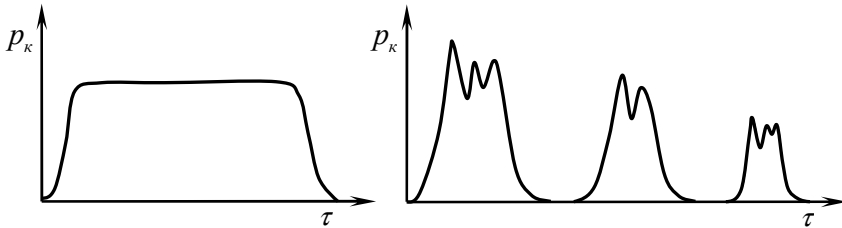
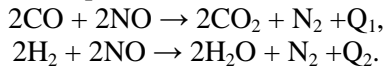


Рис. 101. Изменение давления в КС при нормальном и прерывистом горении ТРТ

Недопустимым режимом горения является аномальное или прерывистое горение. После запуска РДТТ работает прерывисто отдельными вспышками. Интервал между вспышками может составлять от долей секунды до нескольких секунд.

Аномальное горение возникает из-за уменьшения теплопровода к ТРТ. Объясняется это тем, что при низких давлениях сильно тормозятся экзотермические реакции типа



Прерывистое горение может возникнуть и при высоких давлениях, если поверхность горения ТРТ омывается продуктами сгорания (газовым потоком) с высокой скоростью. В этом случае теплоподвод к топливу снижается из-за того, что экзотермические реакции не успевают протекать полностью.

Снижение начальной температуры заряда также увеличивает вероятность возникновения аномального горения.

Прерывистое горение ограничивает нижний предел давления в камере, размеры и конфигурацию заряда.

Предельное давление, гарантирующее отсутствие аномального горения:

- ✓ для смесевых топлив – 0,1...1,5 МПа;
- ✓ двухосновных топлив – 3.5 МПа.

12.9. Основы расчета РДТТ

Рассмотрим РДТТ с цилиндрическим зарядом, горящим по боковым поверхностям, т.к. он является наиболее распространенным.

Задачами расчета являются определения формы и размеров заряда и камеры, обеспечивающих получение заданного закона изменения тягам по времени при известной начальной температуре заряда.

Для выполнения расчета необходимо знать:

- характеристики выбранного топлива (химический состав, плотность, термодинамические характеристики, физико-механические свойства, зависимости $u = f(p_{\kappa}, T_o, W_{\zeta}, \dots)$, минимальное давление в КС $p_{\kappa.\min}$, обеспечивающее нормальное устойчивое горения заряда ТРТ;
- изменение давления в камере или тяги по времени ($p_{\kappa} = f(\tau)$ или $P = f(\tau)$);
- геометрическую степень расширения сопла \bar{F}_a . или степень расширения рабочего тела \mathcal{E}_a .

Учитывая изменения газодинамических и термодинамических параметров по длине заряда и по времени, расчёт проводят, как правило, методом последовательных приближений, первое из которых

является нульмерным, когда оперируют средними значениями p_k, p_n, P и т.д.

Расчёт проводится в следующей последовательности.

1. Выполняется термодинамический расчет по изложенной выше методике применительно к ЖРД. Он дает идеальные значения температуры горения $T_{o.c}$ удельной газовой постоянной $R_{o.c}$ среднего показателя изотропы расширения n , удельных проходных сечений сопла f_c, f_m, f_a и удельных параметров двигателя $I_{y.ni0}, \beta_{i0}$.

2. Реальный удельный импульс в пустоте и на высоте H с учетом отклонения от идеальных процессов

$$I_{y.n} = \varphi_I I_{y.ni0},$$

где $\varphi_I = \varphi_\kappa \varphi_c$ — коэффициент удельного импульса тяги, назначаемый из статических данных,

$$I_y = I_{y.H} = I_{y.n} - f_a p_n.$$

Природа и методика определения потерь I_y для РДТТ та же, что и для ЖРД.

3. Массовый расход топлива

$$\dot{m} = \frac{P}{I_y}.$$

4. Масса заряда ТРТ

$$m_T = a \dot{m} \tau,$$

где a — коэффициент учитывающий неэффективность использования части ТРТ, τ — время работы двигателя ($a > 1,0$).

5. Поверхность горения заряда

$$\Omega = \frac{\dot{m}}{\rho_T u},$$

где u — скорость горения при среднем давлении КС и без учета эрозии заряда.

6. Толщина свода $e_o = u \tau$.

Если заряд каналный и горение идет одновременно по двум боковым поверхностям внутренней и наружной, то

$$e_o = 2u\tau.$$

7. Выбирают форму заряда, который должен обеспечить требуемое изменение давления в камере или тяги по времени, т.е. $p_k, P = f(\tau)$. Для него находят закон изменения поверхности горения и свободной площади по длине камеры.

8. Площади сечений сопла:

$$\text{минимальная} \quad F_M = \frac{\Omega u \rho_r \varphi_k C_{*u0}}{\sigma_f \sigma_c p_k},$$

$$\text{и в выходном сечении} \quad F_a = F_M \bar{F}_a.$$

9. Последующие приближения выполняют уже с учетом переменности геометрии заряда и параметров по времени и длине камеры. Результатом расчета являются диаграмма $p_k = f(\tau)$ при заданном значении начальной температуры заряда.

10. Переходят от уравнения $p_k(\tau)$ к зависимости $P(\tau)$ с помощью уравнения

$$P = \dot{m} I_{y.n} - F_a p_n = \sigma_f \sigma_c p_k F_M \mu_c \varphi_c K_{t.n.u0} - F_a p_n,$$

где $K_{t.n.u0}$ – идеальный коэффициент тяги сопла в пустоте, определяемый в термодинамическом расчёте.

11. Суммарный импульс в пустоте за период эффективного горения τ_e ($\tau_e = \tau - \tau_1 - \tau_3$)

$$I_{\Sigma.\text{эф}} = \int_0^{\tau_e} [P(\tau) + F_a p_n(\tau)] d\tau.$$

12. Эффективный удельный импульс в пустоте

$$I_{y.n.\text{эф}} = \frac{I_{\Sigma.\text{эф}}}{m_r - m_{T3П} - m_r(\tau_1) - m_r(\tau_3)}.$$

где $m_{T3П}$ – масса теплозащитного покрытия, выгоревшего за время τ_e , $m_r(\tau_1)$ и $m_r(\tau_3)$ – массы топлива, выгоревшие соответственно за периоды τ_1 и τ_3 малоэффективной работы РДТТ.

13. Если $\left| I_{\Sigma.эф} - I_{\Sigma.эф.зад} \right| \leq \omega$, $\left| I_{y.n.эф} - I_{y.n.эф.зад} \right| \leq \varepsilon$, $\left| P - P_{зад} \right| \leq \delta$, где ω , ε и δ – малые наперед заданные величины, определяющие точность расчета, то расчет прекращают. В противном случае его повторяют в прежней последовательности с пункта 2, а иногда с пункта 7.

12.9. Основные способы тепловой защиты элементов конструкции РДТТ и изменение величины и направления тяги двигателя

Изучить самостоятельно по учебнику [1] страницы 409...416; 329,330; 382...384.

ЛЕКЦИЯ № 17

13. ГИБРИДНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ГРД)

13.1. Общие сведения, отличительные особенности и преимущества гибридных ракетных двигателей

Гибридным ракетным двигателем (ГРД) будем называть ХРД, работающий на топливе, компоненты которого находятся в разном агрегатном состоянии. При этом один компонент должен находиться обязательно в твёрдом, а другие в жидком или в газовом состояниях.

Гибридные ракетные двигатели (ГРД) называются также двигателями на смешенном топливе (РДСТ).

Отличительными особенностями ГРД является:

- расположение заряда твёрдого компонента, необходимого для выполнения программы полёта, в камере сгорания двигателя;
- горение заряда твердого горючего или окислителя при омывании его поверхности вторым компонентом, находящимся в жидком или газовом агрегатном состоянии.

ГРД занимают промежуточное положение между ЖРД и РДТТ.

Существенными достоинствами ГРД является:

1. Возможность использования в них таких топлив, которые не могут применяться в двигателях других схем и обеспечивают максимум произведения $I_y \rho_T^C$. Эта целевая функция используется при выборе и сравнении ракетных топлив. Её максимум обеспечивает высокую эффективность летательного аппарата (ракеты), т.е. позволяет достичь максимального значения идеальной скорости в конце активного участка траектории полёта. Топлива ГРД могут иметь высокое значение идеального удельного импульса тяги, приближаясь к лучшим ЖРД, и высокую плотность, немного уступая по плотности ТРТ. Однако по условиям совместимости эти компоненты ГРТ не могут быть использованы в одном заряде РДТТ.
2. Позволяют обеспечить в камере сгорания оптимальные соотношения горючих и окислительных элементов.

3. Обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, несколько уступая в том отношении РДТТ.

Учитывая промежуточное положение ГРД между ЖРД и РДТТ, рассмотрим их преимущества:

По сравнению с ЖРД:

- простота и компактность;
- достаточно простая и надежная теплозащита камеры сгорания в связи с применением малотеплопроводного заряда, горящего изнутри и возможность использования жидкого компонента для охлаждения сопла;
- более высокая надежность и безопасность эксплуатации;
- высокая боеготовность, т.е. готовность к пуску в течение продолжительного периода;
- продолжительный период хранения, поскольку применяемые в ГРД жидкостные компоненты относятся, как правило, к категории долгохраняемых.

По сравнению с РДТТ:

- осуществлять простое регулирование тяги за счет изменения массового расхода жидкого или газообразного компонента;
- возможность производить многократное включение и выключение двигателя, поскольку компоненты топлива в ГРД подбираются таким образом, чтобы обеспечивалось их самовоспламенение;
- иметь лучшие эксплуатационные характеристики, т. к. в ГРД практически исключена чувствительность к начальной температуре топлива, а заряд, благодаря малому содержанию или отсутствию в нем окислителя, обладает хорошими механическими свойствами.

13.2. Схемы, состав и принцип работы ГРД

Схемы ГРД отличаются большим разнообразием. Это связано с возможностью использования в качестве одного из компонентов, как жидкости, так и газа, вытеснительной или насосной системы подачи одного из компонентов топлива, различного числа компонентов (двух, трех и более). Двигатели могут отличаться по месту подвода компонента в камеру.

Все ГРД подразделяются по агрегатному состоянию окислителя или горючего и расположению его заряда в КС на две схемы:

- прямую, когда в камере сгорания размещается заряд твердого горючего;
- обратную, когда в камере сгорания располагается заряд твердого окислителя;

Схема гибридной ракетной двигательной установки (ГРДУ) представлена на рис. 102.

На рисунке изображены:

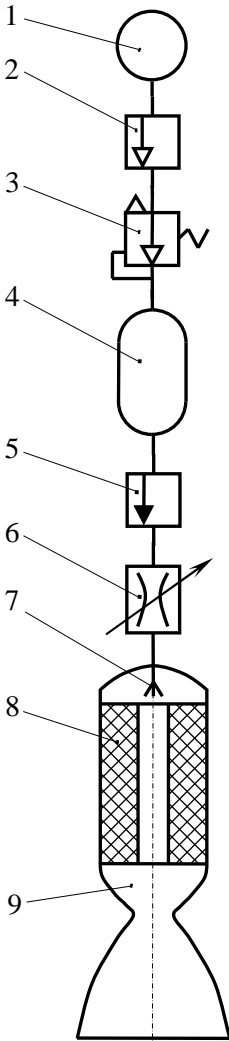


Рис.102. Схема гибридной ракетной двигательной установки (ГРДУ)

- 1 □ баллон со сжатым газом или воздушный аккумулятор давления (ВАД);
- 2 □ пуско-отсечной газовой клапан;
- 3 □ газовый редуктор давления;
- 4 □ бак с жидким компонентом, например окислителем, если двигатель выполнен по прямой схеме;
- 5 □ пуско-отсечной топливный клапан, например окислителя, если двигатель выполнен по прямой схеме;
- 6 □ дроссель для регулирования расхода жидкого компонента;
- 7 □ форсунка;
- 8 □ заряд твёрдого компонента топлива, например горючего;
- 9 □ камера;

Принцип работы ГРД.

Когда необходимо запустить двигатель подаётся управляющий сигнал на пуско-отсечной газовой клапан 2. Он открывается и газ из баллона 1 через редуктор 3 наддувает под требуемым давлением бак жидкого компонента 4. После достижения необходимой величины давления наддува бака открывается пуско-отсечной топливный

клапан 5. Через регулятор расхода 6 и форсунку 7 жидкий компонент топлива подаётся в КС.

Между жидким и твёрдым компонентами в камере сгорания происходит реакция горения. Химическая энергия топлива переходит в тепловую энергию, которая подводится к продуктам сгорания, нагревая их до высокой температуры.

Располагая большим теплоперепадом, рабочее тело (продукты сгорания) поступают в сверхзвуковое сопло или сопло Лавала. Здесь потенциальная и тепловая энергия РТ переходят в кинетическую энергию вытекающей из сопла струи продуктов сгорания. Изменение количества движения РТ в единицу времени и представляет собой тягу ГРД.

Приведенная схема имеет недостаток, заключающийся в том, что при регулировании двигателя может существенно изменяться соотношение компонентов топлива. Это нежелательно, т.к. отклонения от оптимального соотношения $K_{m.onm}$ приводит к снижению удельного импульса тяги. Существенно уменьшить этот недостаток можно за счет подачи жидкого компонента, как в смесительную головку, так и в предсопловый объём камеры (рис. 103). При этом регулируется расход рабочего тела, подаваемого в канал заряда для обеспечения оптимального соотношения компонентов в КС.

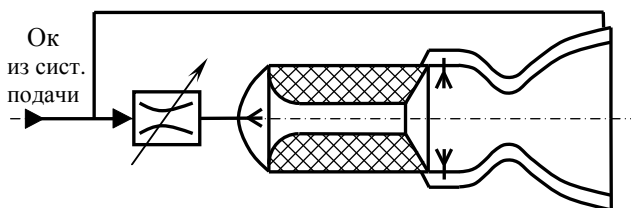


Рис. 103. Схема ГРД с камерой дожигания

Предсопловой объём, где заканчивается горение, называют иногда камерой дожигания. Здесь можно организовать горение с оптимальным для летательного аппарата соотношением компонентов.

Примером двигателя, в котором используется не жидкий, а газообразный компонент может служить ГРД, схема которого изображена на рис 104. Здесь в качестве окислителя используется перекись водорода, которая предварительно разлагается катализатором 2 в газогенераторе 1. Эксперименты подтвердили равномерность и хо-

рошую устойчивость рабочего процесса в широком диапазоне да-

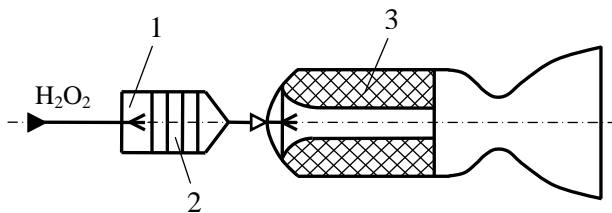


Рис. 104. Схема ГРД с газообразным компонентом:
1 □ газогенератор; 2 □ катализатор; 3 □ заряд твердого горю-

ления в камере сгорания. Линейная скорость горения твердого горючего, в качестве которого используется полиэтилен, составляет от 0,5 до 1,0 мм/с.

После выгорания твердого горючего двигатель может продолжать работать, как одно-компонентный ЖРД с каталитическим разложением H_2O_2 .

При этом развивается удельный импульс тяги $I_y = 1200 \dots 1400 \frac{M}{c}$,

что позволяет использовать двигатель вторично в качестве маршевого в космическом полёте.

По характеру рабочего процесса и ГРД примыкает двигатель с раздельными топливными зарядами (РДТТ раздельного снаряжения), представленный на рис. 105.

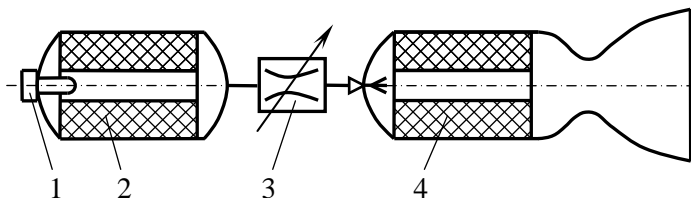


Рис. 105. Схема РДТТ раздельного снаряжения:
1 □ воспламенитель; 2 □ заряд ТРТ с избытком окислителя;
3 □ регулятор (дрозсель); 4 □ заряд ТРТ с избытком горючего

Топливный заряд 2, имеющий избыток окислителя, способен к самостоятельному горению. Он поджигается с помощью воспламенителя. Продукты сгорания поступают в тяговую камеру, нагревают и воспламеняют заряд твердого горючего. Процессы в тяговой камере

подобные процессам в камере ГРД. Камера с зарядом 4 называется тяговой, камера с зарядом 2 – газогенератором.

Подобный двигатель имеет следующие достоинства по сравнению с классической схемой РДТТ:

1. Возможен подбор компонентов топлива, размещаемых в отдельных камерах, в более широком диапазоне, их характеристики, что создает предпосылки для улучшения энергетических параметров двигателя;
2. За счет регулирования подачи газа из газогенератора в тяговую камеру можно изменять суммарный расход топлива, а следовательно, и тягу.

13.2. Гибридные ракетные топлива, требования к ним, их свойства и состав

Самостоятельно проработать и выучить по учебному пособию [7].