

А. А. ШИШКОВ, Б. В. РУМЯНЦЕВ

ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ РАКЕТНЫХ СИСТЕМ



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1981

ББК 39.62
Ш55
УДК 629.7.064.2

Рецензент д-р техн. наук А. П. Тишин

Шишков А. А., Румянцев Б. В.
Ш55 Газогенераторы ракетных систем. — М.: Машиностроение, 1981.—152 с., ил.

55 к.

В книге дано систематизированное изложение основных схем, характеристик и особенностей рабочих процессов в газогенераторах на химическом топливе (жидком, твердом и смешанном), применяемых в качестве источников мощности и газовых струй на борту летательных аппаратов и в наземных системах ракетной техники. Кратко рассмотрены методы экспериментальной отработки газогенераторов.

Книга рассчитана на инженеров и конструкторов в области ракетной техники.

Ш 31808-308 — 308-81. 3607000000
038(01)-81

ББК 39.62

6Т6

©Издательство «Машиностроение», 1981 г.

Предисловие	4
Глава 1. Общие сведения о газогенераторах	6
1.1 Области применения и основные характеристики газогенераторов	6
1.2. Топлива газогенераторов	14
1.3. Испытания газогенераторов.....	29
Глава 2. Газотермодинамика газогенераторов.....	38
2.1. Уравнения газогенератора	38
2.2. Характеристики газового тракта	43
2.3. Фильтрация продуктов сгорания.....	50
2.4. Газотермодинамические процессы в устройствах, питаемых продуктами газогенерации.....	55
Глава 3. Жидкостные газогенераторы	65
3.1. Однокомпонентный газогенератор	65
3.2. Двухкомпонентный газогенератор.....	69
3.3. Использование псевдожидкого топлива в газогенераторах	76
Глава 4. Твердотопливные газогенераторы	79
4.1. Конструктивная схема газогенератора на твердом топливе.....	79
4.2. Внутрибаллистический расчет газогенератора.....	85
4.3. Способы регулирования твердотопливных газогенераторов.....	93
4.4. Переходные процессы в твердотопливном газогенераторе	104
Глава 5. Комбинированные схемы газогенераторов	112
5.1. Газогенератор на твердом топливе с отдельными компонентами	112
5.2. Регулируемый газогенератор на квазигибридном топливе	114
5.3. Газогенератор на гибридном топливе.....	121
5.4. Парогазогенераторы	134
5.5. Газогенераторы ракетно-прямоточных и ракетно-турбинных двигателей.....	142
Список литературы	150

Предисловие

Газогенераторы широко применяются в ракетной технике. Их главные узлы во многом сходны с главными узлами основных ракетных двигателей, однако рабочие процессы в газогенераторах имеют существенные особенности, которые необходимо учитывать при их проектировании и отработке.

В связи с развитием ракетной техники и расширением областей применения газогенераторов в последние годы появились многочисленные патенты и журнальные статьи с результатами исследований газогенераторных устройств [12]. Краткие сведения о газогенераторах имеются в руководствах по основам проектирования ракетных двигателей [2, 3]. Однако в целом опубликованные материалы по газогенераторам разобщены, носят отрывочный характер и методически неоднородны.

В данной книге авторами делается попытка систематизированного изложения схем и особенностей рабочих процессов в газогенераторах на различных топливах исходя из основных принципов теории ракетных двигателей.

В книге пять глав. В гл. 1 приводятся основные характеристики газогенераторных устройств и применяемых в них топливных композиций, отдельно рассматриваются методы модельных, лабораторных и стендовых испытаний.

Гл. 2 посвящена особенностям газовых течений в газогенераторе, газоходе и выхлопных насадках и методам расчета газодинамических характеристик газогенераторов, освещаются вопросы фильтрации продуктов газогенерации и газотермодинамические процессы в потребляющих устройствах.

Обзор материалов об особенностях устройства и основах расчета одно- и двухкомпонентных жидкостных газогенераторов, а также газогенераторов на псевдожидком (порошкообразном) топливе дан в гл. 3.

В гл. 4 рассматриваются конструктивные схемы, методы внутрибаллистического расчета и различные возможные способы регулирования твердотопливных газогенераторов (особенно с зарядами торцевого горения), в том числе газогенераторов многократного включения. Решается задача о переходных процессах при изменении определяющих параметров.

В последней главе излагаются вопросы разработки различных комбинированных газогенераторов на твердых (с отдельными

компонентами), квазигибридных и гибридных топливах, парогазогенераторов и газогенераторов ракетно-прямоточных и ракетно-турбинных двигателей; приводятся инженерные методы расчета основных характеристик ряда газогенераторов.

Гл. 1, 4 и 5 написаны совместно, гл. 2—А. А. Шишковым, гл. 3—Б. В. Румянцевым.

Авторы приносят глубокую благодарность рецензенту д-ру техн. наук А. П. Тишину за ценные рекомендации, способствовавшие улучшению рукописи во всех ее компонентах, канд. техн. наук М. Е. Евгеньеву за полезные советы при решении задач к некоторым разделам и будут признательны читателям, которые сочтут возможным прислать свои замечания и пожелания в издательство «Машиностроение» по адресу: 107076, Москва, Стромынский пер. 4.

ГЛАВА 1

Общие сведения о газогенераторах

1.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Жидкостные и твердотопливные газогенераторы вырабатывают сжатый газ для привода турбин (турбонасосные агрегаты или электрогенераторы), газовых моторов и сервосистем; наддува различных полостей с подвижной границей, например, топливных баков, подракетного объема при старте ракеты из шахты, и других надувных элементов космической и морской техники; воспламенительных устройств ЖРД, РДТТ, ТРД и др. двигателей; вдува газа внутрь сопла, в пограничный слой на боковой поверхности летательного аппарата или в его донную область [12, 43, 90].

Кроме того, различные стендовые газогенераторы постоянно используются для отработки новых топлив, элементов конструкции ракет и материалов.

Большинство газогенераторов — это малорасходные источники низкотемпературного газа, но существуют газогенераторы и с относительно большим расходом, как, например, в жидкостном ракетном двигателе с дожиганием продуктов газогенерации в камере. Кроме того, в ряде газогенераторов (например, в газогенераторах вдува или стендовых) допускается повышенная температура газов, близкая к температуре горения основных ракетных топлив.

Продукты газогенерации по системе газоходов нередко распределяются по нескольким потребителям, одним из которых может быть рулевое сопло (к нему газы могут поступать и после турбины). Они могут поступать к отверстиям в стенке сверхзвуковой части сопла или боковой поверхности летательного аппарата для вдува в сверхзвуковой поток, при взаимодействии которого с вдуваемой струей возникает боковая управляющая сила, составной частью которой является полный импульс струи.

Совершенствование ракетных систем существенно связано, в частности, с развитием и применением различного рода газогенераторов. Примеры использования газогенераторов в двигательной установке на жидком топливе представлены на рис. 1.1. Гипотетическая двухступенчатая твердотопливная ракета может стартовать из шахты с помощью специального парогазогенератора, обеспечивающего создание повышенного давления в полости, ограниченной стенками шахтного ствола и донной части ракеты (рис. 1.2) [патент ФРГ № 1187957]. Открытие створок крышки шахтного ствола также может осуществляться с помощью газогенератора [43].

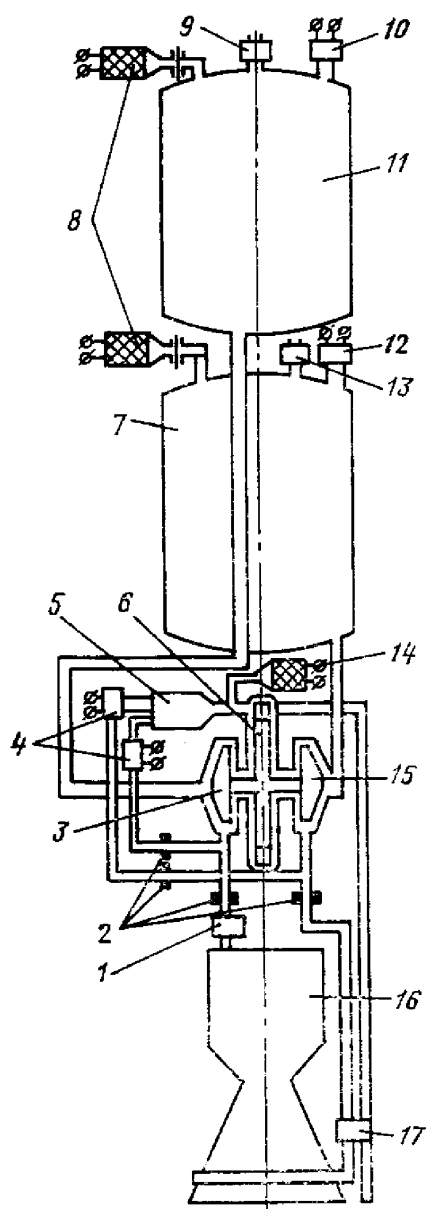


Рис. 1.1. Жидкостная ракетная двигательная установка:

1—главный клапан окислителя; 2—настроечные шайбы; 3—насос окислителя; 4—клапаны отсечные; 5—двухкомпонентный газогенератор; 6—турбина; 7—бак горючего; 8—пороховой аккумулятор давления; 9, 13—клапаны дренажно-предохранительные; 10, 12—реле давления; 11—бак окислителя; 14—пиростартер; 15—насос горючего; 16—камера сгорания; 17—главный клапан горючего.

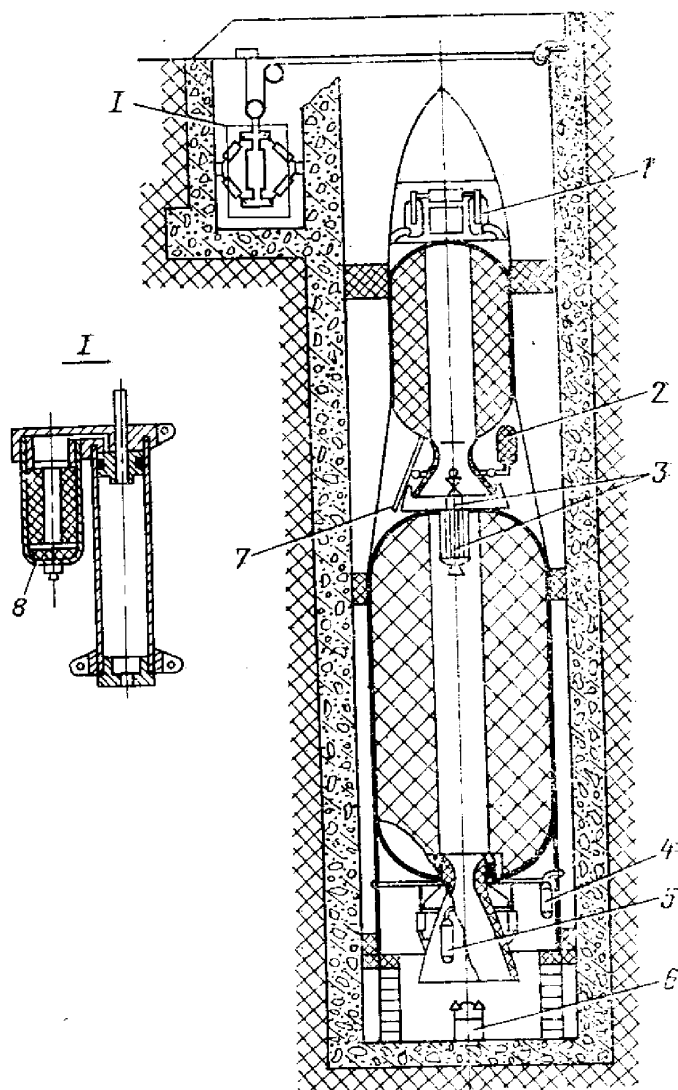


Рис. 1.2. Схема гипотетической двухступенчатой твердотопливной ракеты, расположенной в шахтном стволе:

1—газогенератор двигательной установки боевой ступени; 2—газогенератор рабочего тела для вдува в сопло двигателя; 3—газогенератор-воспламенитель; 4—газогенератор управления по крену; 5—газогенератор привода; 6—стартовый газопарогенератор; 7—газогенератор раздвижки сопла; 8—газогенератор открытия створок крышки шахтного ствола.

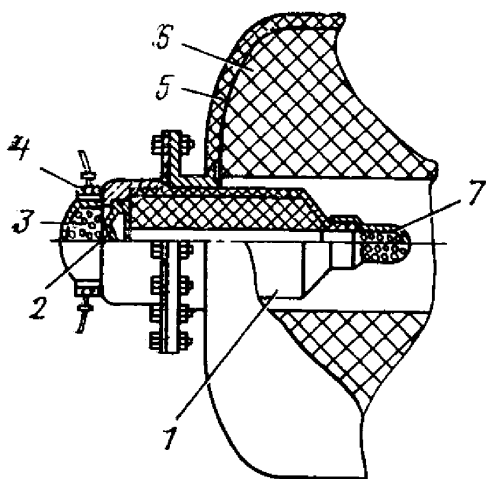


Рис. 1.3. Воспламенительное устройство крупногабаритных РДТТ:

1—корпус; 2—разрывная диафрагма; 3—пиротехнические таблетки; 4—пирозапал; 5—высокоэнергетическое твердое топливо; 6—заряд РДТТ; 7—сопловой насадок

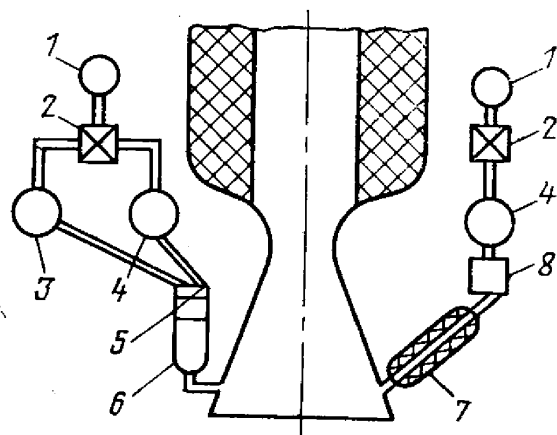
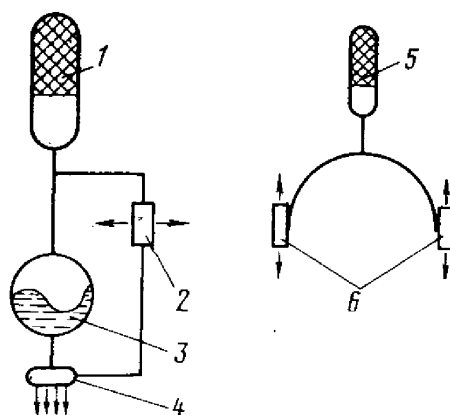


Рис. 1.4. Управление вектором тяги с помощью вдува в раструб сопла горячих газов, получаемых от вспомогательных генераторов:

1—баллон с газом высокого давления; 2—редукционный клапан; 3—горючее; 4—окислитель; 5—система регулирования расхода; 6—генератор на жидком топливе; 7—генератор на гибридном ракетном топливе; 8—клапан для регулирования подачи жидкого компонента

Рис. 1.5. Газогенераторы в системе управления вектором тяги твердотопливной ракеты:

1—газогенератор системы вытеснения фреона; 2—регулятор давления; 3—бак с фреоном; 4—коллектор подачи фреона для вырыска в сверхзвуковую часть сопла (управление по тангажу и рысканию); 5—газогенератор системы управления по крену; 6—регулятор расхода с креновыми соплами



Конструкция первой и второй ступеней ракеты может включать несколько типов газогенераторов, обеспечивающих запуск ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) (рис. 1.3) [патент США № 3041835], управление вектором тяги с помощью вдува в раструб сопла горячих газов (рис. 1.4), питание рулевых машин.

Раздвижное сопло с большой степенью расширения может приводиться в рабочее положение с помощью газогенератора [патент США № 3183664].

Так, на твердотопливной ракете «Минитмен-III» твердотопливные газогенераторы применяются для воспламенения двигателя первой ступени, вытеснения фреона из бака в закритическую часть сопла (с целью управления по тангажу и рысканию) и создания ракетных струй, парирующих креновые возмущения (рис. 1.5) [66].

Причем в системе вытеснения фреона имеется стабилизатор давления ($4,5 \pm 0,2$ МПа с пропускной способностью $0 \dots 0,45$ кг/с), а распределение расхода в каждом из двух пар креновых сопел осуществляется с помощью регулятора с постоянной суммарной площадью критических сечений (масса регулятора 1,8 кг, максимальная разность тяг 450 Н) [8,66].

В частности, расход продуктов газогенерации (см. рис. 1.4) или фреона (см. рис. 1.5) * на парирование случайных эксцентриситетных возмущений пропорционален сумме абсолютных значений проекций управляющего усилия на каждую из взаимно перпендикулярных плоскостей стабилизации $z = |x| + |y| = u + v > 0$, причем

$$f_1(u) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{u^2}{2\sigma_x^2}} \quad \text{при } u > 0;$$

$$f_2(v) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_y^2}} \quad \text{при } v > 0.$$

Плотность вероятности распределения $g(z)$ суммы двух модулей нормальных случайных величин $z = |x| + |y|$ равна

$$g(z) = \int_0^z f_1(u) f_2(z-u) du = \frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y} \int_0^z e^{-\left(\frac{u^2}{2\sigma_x^2} + \frac{z^2}{2\sigma_y^2} - \frac{zu}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{u^2}{2\sigma_y^2}\right)} du.$$

При $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ имеем

$$g(z) = \frac{4}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2}{4\sigma^2}} \Phi\left(\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}\right),$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Для вероятности получаем $\int_0^z g(z) dz = 4\Phi^2\left(\frac{z}{\sigma\sqrt{2}}\right)$ (так, вероятности 0,997 соответствует отклонение $\approx 4,2\sigma$).

Охлаждение носового обтекателя головной части, движущейся в атмосфере с гиперзвуковой скоростью, возможно с помощью газогенератора низкотемпературного газа (до 1400 К). При включении газогенератора низкотемпературный газ вытесняется из отверстия наконечника в зону формирования головной ударной волны и снижает температуру пограничного слоя, что в сочетании с использованием абляционного теплозащитного покрытия позволяет снизить температуру поверхности носового конуса до значений, не превышающих 3600 К [патент США № 4014485].

Продукты газогенерации истекают либо при сверхкритическом перепаде давления (через одно или несколько сопел с известными

* Расход фреона в данном случае определяет расход продуктов газогенерации для его вытеснения из бака.

площадями критического сечения), либо при докритическом. В частности, газогидравлические бортовые приводы, в которых энергия газа преобразуется в работу жидкостной рулевой машины, либо содержат турбину с соплом парциального подвода газа, либо поршневую систему, рабочие полости которой заполняются газами из газохода (рис. 1.6). При сверхкритическом режиме потребитель не влияет на работу газогенератора, при докритическом — возможно взаимное влияние. При питании нескольких потребителей или работе регуляторов давления возможно, что часть газа истекает при сверхкритическом перепаде давления и часть — при докритическом.

Газогенераторы различают по *используемому топливу* (см. п. 1.2); *назначению и среде, в которую происходит истечение продуктов газогенерации* [37].

Газогенераторы являются источниками газа для: а) питания или предстартовой раскрутки газовых турбин турбонасосных агрегатов подачи топлива и силовых приводов, турбогенераторов, ракетно-турбинных двигателей; б) наддува баков и эластичных емкостей, вытеснения жидкостей и поршней с нагрузкой (в том числе в приводах одностороннего действия при старте ракеты из пусковой шахты); в) струйных аппаратов и устройств (воспламенителей, эжекторов, насосов, органов управления полетом, завесной защиты, стендовых установок).

Истечение из газогенератора может происходить в вакуум, в воздух, в объем с продуктами газогенерации, в камеру сгорания.

К основным характеристикам газогенератора относятся:

расход газа и его изменение во времени $\dot{m}(t)$; время работы $t_{\text{п}}$; мощность N ; давление в камере p ; температура газа T_0 .

В тех случаях, когда продукты газогенерации поступают в рулевые сопла или сопла несимметричного вдува, в число характеристик включается полный импульс газового потока в выходном сечении этих сопел $P_{\text{п}}$.

Скорость истечения газа из сопла, расход, мощность газогенератора со сверхзвуковым соплом, а также импульс газового пото-

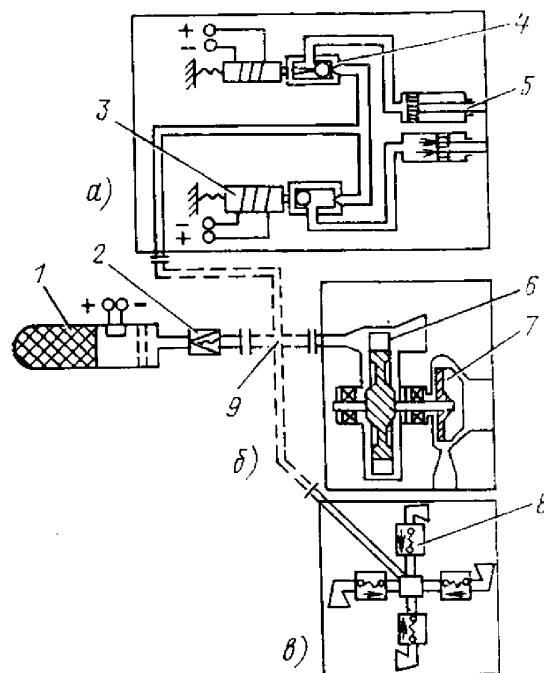


Рис. 1.6. Входные устройства потребителей мощности газогенератора:

а—схема газового привода с клапанным усилителем; б—схема турбонасосного агрегата; в—схема газового привода струйно-реактивного действия; 1—газогенератор; 2—предохранительное устройство; 3—электромеханический преобразователь; 4—клапан; 5—шток поршня привода; 6—турбина; 7—насос; 8—пневмоэлектроклапан с соплом; 9—газовая магистраль

ка на выходе из сопла вычисляются по формулам

$$v_a = \varphi a_{кр} \lambda_a = \varphi \left\{ \frac{2k}{k-1} RT_0 \left[1 - (\pi(\lambda_a))^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{1/2} =$$

$$= \varphi \left\{ \frac{2k}{k-1} RT_0 [1 - \tau(\lambda_a)] \right\}^{1/2};$$

$$\dot{m} = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{\mu p_0 F_{кр}}{\sqrt{RT_0}}} = m_{кр} \frac{\mu p_0 F_{кр}}{\sqrt{RT_0}} = \frac{\mu p_0 F_{кр}}{C_*};$$

$$N = \frac{\dot{m} v_a^2}{2} = \frac{\varphi^2 k}{k-1} RT_0 \left[1 - (\pi(\lambda_a))^{\frac{k-1}{k}} \right] \dot{m};$$

$$P_{II} = \dot{m} v_a + p_a F_a = \varphi_c \mu f_{кр} z(\lambda_a) p_0 F_{кр},$$

где

$$\pi(\lambda_a) = \frac{p_a}{p_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2 \right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\tau(\lambda_a) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2 \right); \quad f_{кр} = 2 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}};$$

$z(\lambda_a) = \frac{1}{2} \left(\lambda_a + \frac{1}{\lambda_a} \right)$; φ, μ, φ_c — коэффициенты скорости, расхода и импульса.

Давление p_0 и температура T_0 торможения соответствуют критическому сечению сопла. В связи с тем, что изменением параметров торможения на коротком участке от входного сечения сопла до критического можно пренебречь, в дальнейшем при проведении расчетов по приведенным выше формулам в качестве параметров торможения используются параметры на входе в сопло.

Питающиеся от газогенераторов автономные турбины имеют парциальный подвод газа (через одно сопло) и являются одноступенчатыми, активными: давление на входе и выходе из лопаток рабочего колеса одинаково и приблизительно равно давлению на выходе из сопла p_a [52].

Если газогенератор является источником рабочего тела для поршневого газового мотора, то его мощность вычисляется по формуле $N = \dot{m} L_{ад}$, так как $L_{ад} = \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ — теоретическая удельная работа при расширении газа от давления p_0 на входе в рабочие цилиндры до давления p_a в выхлопном патрубке.

Теоретическая удельная работа газа при вытеснении жидкости или поршня равна $pV = mRT$, а действительная — $\int_0^V p_6 dV = p_6 V = \chi RT$, где χ — коэффициент, учитывающий потери в системе газогенератор — вытесняемый объем (например, в случае вытеснения жидкого компонента из топливного бака $\chi = 0,2 \dots 0,5$ [3, 55]).

В случае, если газы истекают из газогенератора не через сопло с фиксируемой площадью критического сечения, установившийся расход газа определяется только по расходу топлива.

Технические задачи, для решения которых предназначена газогенераторная система, определяют конкретные технические требования:

1) мощность и ее изменение во времени; 2) время работы; 3) температура продуктов сгорания; 4) максимальное и минимальное давления в газогенераторе; 5) допустимое содержание в продуктах сгорания конденсированной фазы; 6) масса; 7) условия хранения и эксплуатации (температурный диапазон, перегрузки).

Если газогенератор является звеном системы управления, то как исполнительное звено он описывается передаточной функцией между командным электрическим сигналом и расходом.

Разработанные конструктивные схемы газогенераторных систем позволяют обеспечить выполнение разнообразных требований, предъявляемых к газогенераторам в соответствии с широкими областями их применения в ракетной технике. В последние годы возрастает интерес к многорежимным газогенераторам с глубоким регулированием расхода. Определенные направления для создания таких газогенераторов (как и многорежимных двигателей малой тяги) представляют комбинированные схемы с использованием топлива смешанного агрегатного состояния.

Одним из основных показателей, определяющих целесообразность применения различных источников энергии (особенно в качестве бортовых), может служить удельная энергия $E_{уд}$, равная отношению энергии к полной массе источника (табл. 1.1).

Зависимость удельной энергии от продолжительности работы можно приближенно рассчитать по формуле

$$E_{yx} = \frac{Nt}{m_0 + m_r + m_6} = \frac{t}{\frac{m_0}{N} + \frac{m}{N} \frac{t}{f_m}},$$

где E_{yx} — удельная энергия системы; t — время работы; $f_m = \frac{m_r}{m_r + m_6}$ — отношение массы топлива к сумме масс топлива и камеры (бака); m/N — отношение расхода топлива к мощности; m_0/N — отношение массы элементов устройств, не зависящих от времени работы, к мощности.

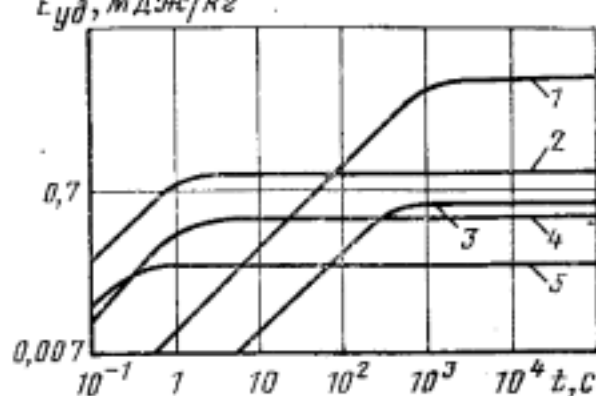


Рис. 1.7. Зависимость удельной энергии различных источников от продолжительности работы:

1—газотурбинный двигатель; 2—газогенератор; 3—газогенератор с турбогенератором; 4—баллон с сжатым газом; 5—маховик

Таблица 1.1

Характеристики различных источников энергии

Тип системы	Применение системы	Полезная мощность, кВт	m_0/N , кг/кВт	$\dot{m}/N$, кг/(с·кВт)	f_m
Газогенератор	Наддув оболочек аварийных систем		0,006	$0,7 \cdot 10^{-3}$	0,6
	Вытеснение (подача) топлива	$1 \dots 10^3$	0,0012	$0,43 \cdot 10^{-3}$	0,5
	Управление вектором тяги				
Газогенератор с турбиной	Гидравлические силовые установки		0,006	$0,98 \cdot 10^{-3}$	0,4
	Стартер двигателя	$1 \dots 10^5$	0,3	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,6
	Подача топлива		0,012	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,5
Газогенератор с турбиной и электрогенератором	Вспомогательная силовая установка на самолете и возвращаемом КЛА	$1 \dots 10^3$	0,6	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,4
Газовая турбина	Самолеты	$10^2 \dots 10^4$	0,06	$0,07 \cdot 10^{-3}$	0,9
	Вспомогательная силовая установка		0,29	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,98
Система сжатого газа	Вытеснение топлива		0,006	$0,07 \cdot 10^{-3}$	0,9
	Вспомогательные силовые установки		0,06	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,6
	Наддув оболочек аварийных систем	$10^{-1} \dots \dots 10^2$	0,006	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,5

Параметры m_0/N , $\dot{m}/N$ и f_m , характеризующие каждый тип источника энергии, приведены в табл. 1.1.

Сравнение газогенераторов с различными источниками энергии: газотурбинным двигателем, системой сжатого газа и маховиком (рис. 1.7), а также с поршневым и электрическим двигателями, электролитической и солнечной батареями [87] показывает, что газогенераторы не только явно предпочтительнее для кратковременной работы ($t \leq 10^2$ с), но и имеют высокие эксплуатационные преимущества (при соответствующих условиях, например, при потребной мощности менее 150 кВт) в случае работы в течение периода до нескольких часов. С расширением областей применения газогенераторов появляется необходимость их дополнительного совершенствования, в частности, обеспечения регулирования расхода, и выдвигаются более жесткие требования по температуре, составу и безвредности выхлопных газов и безопасности обслуживания.

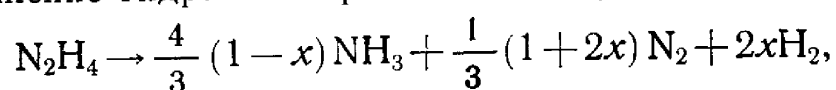
1.2. ТОПЛИВА ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Жидкие топлива. В качестве *однокомпонентных* жидких топлив используют: перекись водорода H_2O_2 различной концентрации (рис. 1.8), гидразин N_2H_4 , изопропилнитрат $\text{C}_3\text{H}_7\text{ON}_2$, окись этилена $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, несимметричный диметилгидразин $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$.

Действительное тепловыделение при разложении перекиси водорода с помощью твердого катализатора составляет, примерно, 0,92 ... 0,95 от теоретического [2, 6].

Удельная работоспособность продуктов разложения гидразина и несимметричного диметилгидразина (НДМГ) более высокая, чем при разложении перекиси водорода (рис. 1.9, 1.10). Вследствие отсутствия окислителя в продуктах разложения этих топлив они малоактивны по отношению к конструкционным материалам.

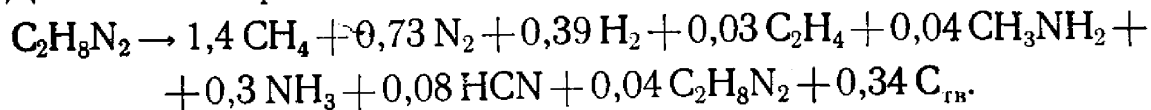
Разложение гидразина происходит по уравнению реакции



где x — степень образования N_2 и H_2 условно называется степенью разложения аммиака.

При разложении НДМГ образуются следующие вещества: метан CH_4 , аммиак NH_3 , молекулярный азот N_2 , молекулярный водород H_2 , этан C_2H_6 , этилен C_2H_4 , метиламин CH_3NH_2 , пары НДМГ, цианистый водород HCN и твердый углерод (сажа).

Приближенно суммарную реакцию термического разложения НДМГ можно представить в следующем виде:



В табл. 1.2 приведены теплофизические свойства некоторых однокомпонентных топлив, применяемых в газогенераторах [6].

Увеличение плотности однокомпонентных топлив, а также изменение температуры замерзания возможно за счет введения в топливо специальных присадок или создания новых смесей. В табл. 1.3 приведены некоторые составы смесей, применяемые за рубежом [патент США № 3658609].

Наиболее рациональным считается применение в газогенераторной установке компонентов *основного топлива* (табл. 1.4), физико-химические свойства двухкомпонентных жидких топлив подробно изложены в работах [2, 17, 23, 55].

В последние годы для увеличения удельного импульса и плотности топлива исследуют возможность применения для основных ракетных двигателей металлосодержащих жидких горючих [2, 77]. Для получения хранимой однородной суспензии металлов в компонентах топлива исследуют возможности использования различных гелирующих добавок. В качестве химически активных гелирующих добавок применяют высшие жирные кислоты и их соли (мыла), высокомолекулярные соединения (полимеры), тяжелые углеводороды. К механическим гелирующим добавкам относятся тонкоиз-

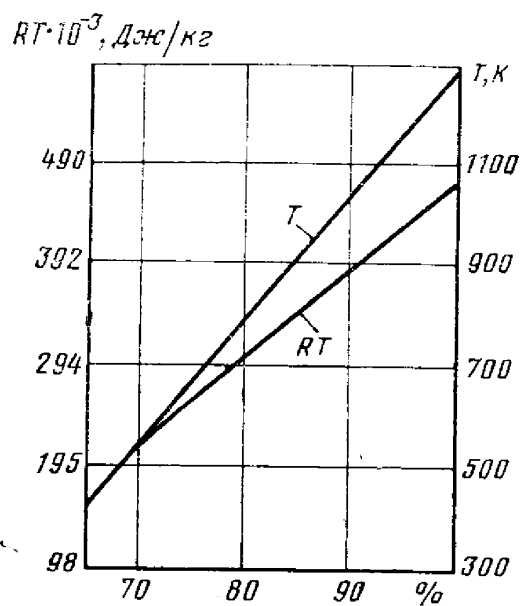


Рис. 1.8. Зависимость T и RT продуктов разложения перекиси водорода от концентрации ее при использовании твердого катализатора

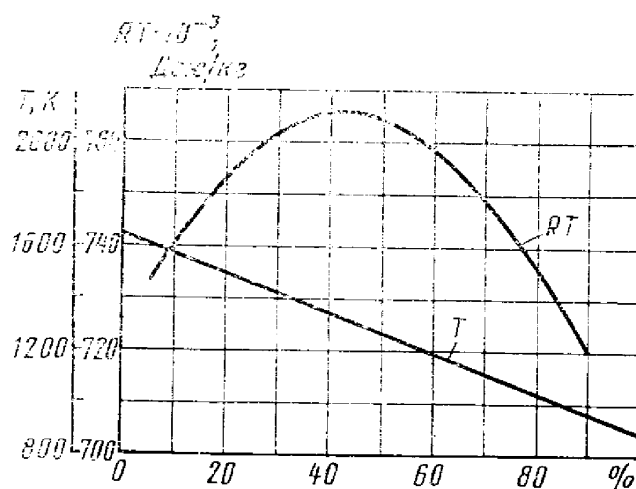


Рис. 1.9. Зависимость T и RT продуктов разложения гидразина от степени разложения аммиака

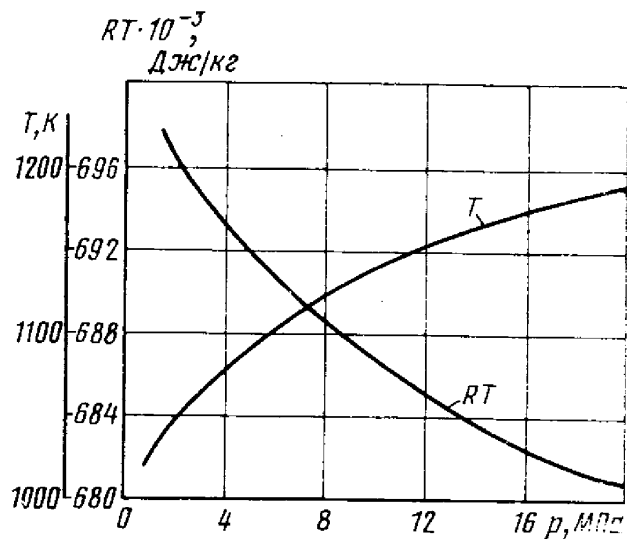


Рис. 1.10. Зависимость T и RT продуктов разложения несимметричного диметилгидразина от давления

Таблица 1.2

Характеристики топлив

Параметр	Топливо		
	98% H_2O_2	100% N_2H_4	75% N_2H_4 , 24% $\text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$, 1% H_2O
Плотность при температуре 25° С, г/см ³	1,443	0,997	1,11
Температура замерзания, °С	—0,25	1,6	—20
Температура кипения, °С	148	113	—
Удельная теплоемкость, Дж/(г·К)	1,53	3,14	—
Температура газа в камере ($p=1,0$ МПа), °С	966	1073	1340
Катализаторы, применяемые для разложения топлива	а) таблетизированный перманганат калия б) сетчатый каркас из посеребренной проволоки	а) Н-7, НА-3 на основе Fe, Ni, CO, осажденных на Al_2O_3 с подогревом б) Shell-405	

Таблица 1.3

Однокомпонентные топлива

Компонент топлива	Соотношение компонентов, в % по массе	Температура замерзания, °С
Гидразин—ММГ (НДМГ)—нитрат гидразина	24—45—31	—55
Гидразин—метоксиламиннитрат—вода	60—28—12	—55,5
Гидразин—метоксиламинсолянокислый—вода	62—28—10	—50
Гидразин—пропаргиловый спирт	62,5—37,5	—55,5
Монометилгидразин—НДМГ	39,8—60,2	—79
Гидразин—мононитрат гидразина—вода	50—45—5	—50
Гидразин— H_2S — вода	83,7—13,4—2,9	—40

мельченые (размер 0,8 ... 3 мкм) металлы и их соединения, силикагель, сажа, глина и т. д.

Гели представляют тонкую трехмерную сетку (каркас), образованную дисперсной фазой (твердым веществом), а поры этого каркаса заполнены дисперсионной средой (жидкостью). В статических условиях при небольших нагрузках и умеренных температурах гели подобны твердому телу; течение начинается после приложения сдвиговых напряжений, достаточных для разрушения структуры. При этом «обломки» структурного каркаса, отдельные частицы и

макромолекулы ориентируются большими осями вдоль потока, снижая сопротивление и уменьшая вязкость.

Таблица 1.4

Топлива жидкостных газогенераторов ЖРД

Год окончания разработки	Марка ЖРД	Назначение	Топливо ЖГТ	Истечение продуктов газогенерации	Примечание
1957	РД-107, РД-108	I и II ступени ракеты-носителя «Восток»	H_2O_2	Через патрубков	Разложение на твердом катализаторе
1957	РД-214	I ступень ракеты-носителя «Космос»	H_2O_2	Через автономное сопло	То же
1962	РД-119	II ступень ракеты-носителя «Космос»	НДМГ	Через рулевое сопло	Основное горючее
1961	РД-219	II ступень ракеты-носителя	Азотно-кислотно-диметил-гидрозиновое		Основные компоненты; запуск—подачей из пусковых бачков
1962	РД-111	I ступень ракеты	Кислород + керосин		Основные компоненты

В табл. 1.5 в качестве примера приведены свойства чистого гидразина и гелеобразного горючего алюминизина (N_2H_4 —66,5%, Al—33%, гелирующая добавка—0,5%), сохраняющего стабильность в течение нескольких лет [2]:

Таблица 1.5

Свойства топлив

Параметр	Гидразин	Алюминизин
Плотность, г/см ³	1,008	1,270
Динамическая вязкость, Па·с	$0,97 \cdot 10^{-3}$	45
Предел текучести, Н/м	0	$1,7 \cdot 10^2$
Температура плавления, К	274,66	270,86

При работе газогенератора на основных компонентах (особенно на металлосодержащих) необходимы специальные конструктивные мероприятия по очистке продуктов газогенерации от конденсированной фазы.

Для газогенерации можно использовать многокомпонентные гетерогенные системы — монотоплива, состоящие из нерастворяющихся компонентов (табл. 1.6) [63].

Таблица 1.6

Состав многокомпонентных монотоплив

Компонент топлива	Содержание по массе, %	
	Топливо А	Топливо Б
Нитрометан	50,8	—
Перхлорат аммония	46	—
C_2H_3O	1,36	—
98 ... 100%-ная азотная кислота	—	80
Сажа	—	19
Кремниевая кислота	0,46	0,5
Поверхностно-активные вещества	1,38	0,5

Эти монотоплива являются суспензиями либо твердых окислителей в жидких горючих, либо твердых горючих в жидких окислителях. В качестве стабилизатора используется высокодисперсная кремниевая кислота. Поверхностно-активные вещества облегчают диспергирование химически активных гелирующих добавок.

Твердые ракетные топлива. Наиболее компактным источником рабочего тела являются твердые ракетные топлива, которые в соответствии с их составом и физической структурой можно разделить на баллиститные (гомогенные), смесевые (гетерогенные) и сублимирующие.

Первая группа требований к твердым топливам для газогенераторов обуславливает энергетические и термодинамические характеристики: температуру и состав продуктов газогенерации, их совместимость с материалами конструкции вспомогательных систем; плотность топлива.

Вторая группа требований касается баллиститных свойств топлива, устойчивость его горения в широком диапазоне давлений.

Третья группа требований определяется условиями эксплуатации и технологии изготовления топлив.

С учетом этих требований в газогенераторах можно использовать только часть обычных баллиститных и смесевых топлив (да и то только после охлаждения и очистки от конденсированной фазы их продуктов сгорания).

В баллиститных топливах (табл. 1.7) количество кислорода недостаточно для полного окисления горючих элементов и продукты их сгорания всегда содержат горючие компоненты [20].

Смесевые топлива можно разделить на унитарные, пиротехнические с отдельными компонентами и порошкообразные [81, 84].

Таблица 1.7
Состав баллистических топлив

Компонент топлива	Содержание по массе, %						
	SC, США	HES 4016 США	M-8, США	T-6, США	R-61, ФРГ	H, СССР	HM-2 СССР
Нитроцеллюлоза	50,0	54	52,2	55,5	61,5	57	54
Растворители:							
нитроглицерин	41	43	43	27	—	28	27
динитротолуол	—	—	—	10,5	—	11	15
дичитратдиэтилен- гликоль	—	—	—	—	34	—	—
Стабилизатор: централит	9	3	0,6	4,0	3,5	3	—
Пластификатор: вазелин	—	—	—	1,0	—	1	2
Графит	—	—	—	0,5	—	—	—
Флегматизатор — окись магния	—	—	—	—	0,5	—	2
Поглотитель влаги — диэтилфталат	—	—	3	—	—	—	—
Прочие присадки	—	—	1,2	1,5	0,5	—	—

Унитарные *смесевые* твердые топлива содержат 20 ... 30% связующего каучукообразного или смолообразного вещества, 60 ... 80% окислителя и до 20% алюминия; возможно также применение в качестве горючих гидридов легких и тяжелых металлов [2, 83].

Для улучшения качества твердого топлива в смесь горючего и окислителя добавляют присадки, обеспечивающие химическую стойкость, увеличение или замедление скорости горения (катализаторы или флегматизаторы), стабильность процесса горения, технологичность изготовления зарядов.

Окислителями смесевых топлив служат неорганические соли, в молекулах содержится большой процент активного кислорода. Наиболее часто в качестве окислителей используются соли типа нитрата или перхлората аммония. В смесевые топлива иногда добавляют также октоген или гексаген.

В последние годы появились топливные составы, содержащие компоненты баллистических и смесевых топлив: нитроглицерин, нитроцеллюлозу, алюминий, перхлорат аммония и др. Примером может служить следующий литевой состав (патент США № 3956890): 50,5% связующего, 36% перхлората аммония, 13% алюминия, 0,5% окиси магния. В свою очередь, связующее состоит из 19,8% нитроцеллюлозы, 49,5% нитроглицерина, 25,7% поли

этиленгликольадипината, 4% толуилендиизоцианата, 1% нитродифениламина, 0,00004% ацетилацетоната железа.

Обычные баллиститные и смесевые топлива не удовлетворяют в полной мере требованиям, предъявляемым к газогенераторным топливам. Поэтому разрабатывают специальные составы топлив с низкой температурой продуктов сгорания [39, 68].

Твердотопливные композиции для газогенераторов можно разделить на четыре группы (по окислителю):

на основе перхлората аммония NH_4ClO_4 , нитрата аммония NH_4NO_3 , дигидроксилглиоксима $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_4\text{N}_2$ и нитрамина $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$ и $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$.

В состав этих топлив входят кроме окислителя охладитель и горючее—связка. Температура горения 1070 ... 1920 К, причем нижний предел обусловлен устойчивостью горения топлива, а верхний — ограничениями жаропрочности материалов клапанов, турбинных лопаток и др. элементов проточной части.

Низкотемпературные топлива в зависимости от состава имеют различные скорости горения: 0,2 ... 20 мм/с при $p=7$ МПа.

Окислитель в этих топливах (табл. 1.8) состоит из смеси перхлората аммония и дигидроксилглиоксима $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_4\text{N}_2$, который является унитарным топливом с низкой температурой горения [39, 68].

Таблица 1.8

Топлива с низкой температурой сгорания

Параметр	Топливо		
	ТР-Q-3038	ТР-Q-3011A	ТР-Q-3035
Состав по массе, %:			
окислитель	65,0	74,0	73,5
окись железа	—	—	0,5
оксамид	5,0	—	—
связка	30,0	26,0	26,0
Температура продуктов сгорания (при $p=7$ МПа), К	1112	1230	1195
Плотность, г/см ³	1,6	1,63	1,63

Связка состоит из трех горючих компонентов: полиэфира $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_5$, катализатора полимеризации на основе эпоксидной смолы $\text{C}_{15}\text{H}_{19}\text{O}_4$ и стабилизатора $\text{C}_9\text{H}_9\text{N}_5$. Основным горючим является полиэфир с высоким содержанием (37% по массе) кислорода, что приводит к уменьшению необходимого количества перхлората аммония. Окись железа Fe_2O_3 и оксамид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2\text{N}_2$ выполняют в топливе роль катализаторов горения.

Примером низкотемпературного ($T=1470 \dots 1870$ К) газогенераторного топлива является также состав ТР-Q-3109, в который

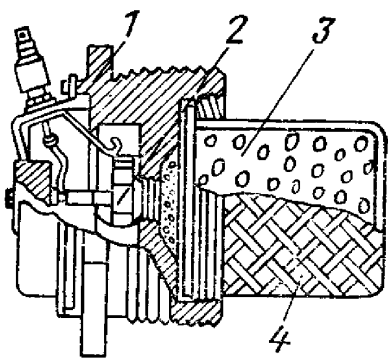


Рис. 1.11. Воспламени-
гель:

1—переходник; 2—иници-
ирующее устройство; 3—таб-
летки воспламенительного
состава; 4—корпус «корзин-
ка»

входят в качестве связующего полиэфир (без пластификатора), и окислитель — смесь октогена (85%) и гексагена (15%).

Пиротехнические составы применяются как наполнители воспламенительных устройств (рис. 1.11) и пироэнергодатчиков, возможно их применение и в газогенераторах [12, 90].

Основные компоненты, входящие в пиротехнические составы, можно разбить на следующие группы:

1) окислители — перхлорат калия KClO_4 , нитраты натрия NaNO_3 , калия KNO_3 , бария $\text{Ba(NO}_3)_2$, перекись и хромат бария BaO_2 , BaCrO_4 и др.; 2) горючие — металлы (алюминий, магний, цирконий, бор, титан) и сплавы (алюминий + магний, цирконий + никель); неметаллы (фосфор, углерод, сера); неорганические соединения (сульфиды, фосфиды, силициды и др.); органические соединения (углеводороды); 3) цементаторы (связующие) — органические полимеры, обеспечивающие механическую прочность пиротехнических составов (идитол, канифоль, эпоксидные смолы, каучуки, этилцеллюлоза); 4) другие добавки, играющие роль ускорителей или замедлителей горения или уменьшающие чувствительность составов к трению (флегматизаторы).

В пиротехнических воспламенителях используется смесь алюминиевого порошка с KClO_4 и этилцеллюлозной связкой. Эта смесь высококалорийна, интенсивно горит, температура ее воспламенения 633 К. Для воспламенения смесевых твердых топлив с высоким содержанием NH_4ClO_4 применяют пиротехнические смеси: KClO_4 — 26 ... 50%, $\text{Ba(NO}_3)_2$ — 15 ... 17%, цирконий — никелевый сплав (50/50) — 32 ... 54%, этилцеллюлоза — 3% (пат. США № 2988876).

Находят применение и воспламенительные составы, содержащие бор, например: KNO_3 — 71%, В (аморфный) — 24%, каучук — 5%.

Пиротехническими твердыми топливами называют также составы с большим количеством металлического горючего (более 50%) и солями неорганических кислот в качестве окислителя [81]. Такие твердые блоки с большим *избытком горючего* предназначены для газогенераторов ракетно-прямоточных двигателей (РПД) (табл. 1.9) [53]. Продукты газогенерации в этом случае поступают в камеру дожигания, где окисляются за счет кислорода воздуха.

Для газогенераторов ракетно-прямоточных двигателей предложены также составы на основе перхлората аммония 25 ... 50% с содержанием бора 40 ... 50% и связующего 10 ... 20%.

Для комбинированных схем газогенераторов могут найти применение твердые топлива с полностью или частично *раздельными компонентами*. Твердый блок такого топлива представляет собой

горючее (или окислитель) с относительно небольшой добавкой окислителя (или горючего). Окислителями так же, как и в смешанных твердых топливах, в основном являются соли азотной и хлорной кислот — нитраты и перхлораты [67]. Твердым топливом с отдельными компонентами является, в частности, следующий состав: твердый блок с избытком горючего, содержащий 44% нитроцеллюлозы, 44% динитрата триэтиленгликоля и 12% полиэтилена, и твердый блок с избытком окислителя, содержащий 90% перхлората аммония и 10% связки.

Таблица 1.9

Топлива для газогенераторов РПД

Массовая доля компонентов, %	Топливо			
	I	II	III	IV
Нитрат калия	25,0	21,5	25,0	10,0
Алюминий	65,0	25,0	45,0	20,0
Магний	—	30,0	—	—
Сульфат меди	10,0	8,5	10,0	—
Бор	—	10,0	20,0	5,0
Уголь	—	—	—	45,0
Нитроцеллюлоза	—	—	—	20,0
Сера	—	5,0	—	—

Некоторые топливные блоки с отдельными компонентами способны к самостоятельному горению (газификации), а некоторые газифицируются только в потоке продуктов горения второго блока. Твердый блок одной и той же композиции, способный к автономной газификации с избытком горючих элементов, может быть использован в различных комбинированных схемах (гл. 5), обеспечивающих последующее дожигание продуктов газификации (либо в смеси с продуктами разложения твердого, жидкого или пастообразного окислителя, либо в потоке воздуха в камере РПД).

Скорость горения твердых ракетных топлив в современных двигателях и газогенераторах составляет от 0,3 ... 0,5 до 40 ... 50 мм/с. Для внутрибаллистических расчетов пользуются экспериментальной зависимостью скорости горения u от давления в камере сгорания p , температуры заряда T_3 , скорости газового потока v , деформации заряда δ , ускорения n :

$$u = u_1 f_1(p) f_2(T_3) f_3(v) f_4(\delta) f_5(n),$$

где f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 — обычно независимые друг от друга функции [3.53].

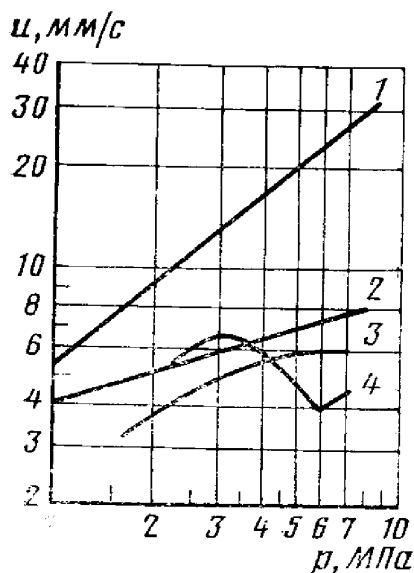


Рис. 1.12. Зависимости скорости горения от давления для различных топлив:

1—75% перхлората калия с размерами частиц, 30 мкм, полибутадиев; 2—80% перхлората аммония, 90 мкм, полибутадиев; 3—72% перхлората аммония, 90 мкм, полибутадиев; 4—72% перхлората аммония, 90 мкм, полиуретан

Экспериментальная зависимость скорости горения от давления может иметь различный вид (рис. 1.12) [63, 71]. Обычно используется степенная зависимость $u = u_1 (T_3) p^\nu$, и значения показателя степени ν составляют $0 \dots 0,8$. Для создания газогенераторов с малым временем запаздывания при регулировании предложен состав топлива с отрицательными значениями ν : $\nu = -2,5 \dots -0,99$ [19], для чего служат специальные присадки катализатора горения и заданная дисперсность наполнителя.

Ниже определенной величины давления горение может прерваться или стать неустойчивым. Величина критического давления зависит от состава топлива (табл. 1.10), а для смесевых полиуретановых и полибутадиевых топлив может быть меньше 0,1 МПа.

Зависимость скорости горения от температуры заряда T_3 определяется выражением

$$f_2(T_3) = \frac{B}{B - (T_3 - T_{3,ном})} \approx 1 + \frac{1}{B} (T_3 - T_{3,ном}),$$

где $T_{3,ном}$ — номинальная температура заряда (условная величина).

Таблица 1.10

Нижний предел горения топлив

Твердое топливо	Критическое давление, МПа
Нитроцеллюлозное	4,0
Нитроцеллюлозное с энергетическими добавками	1,5
Смесевое на перхлорате аммония	1,4
Смесевое с нитратом аммония	0,7

Величина температурного коэффициента $1/B$ равна $1 \dots 5 \cdot 10^{-3}$, при этом смесевые топлива имеют более низкую чувствительность скорости горения к температуре заряда, а баллиститные — более высокую (рис. 1.13).

Степенная зависимость скорости горения от давления обычно применима также и в случае способного к самостоятельной газификации твердого блока с избытком горючего (или окислителя).

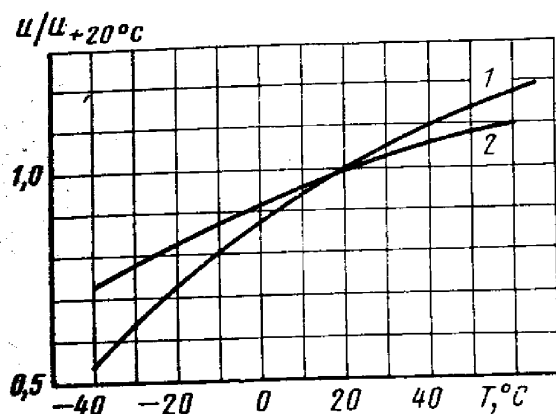


Рис. 1.13. Зависимость скорости горения от температуры заряда:
1—баллиститные топлива; 2—смесевые топлива

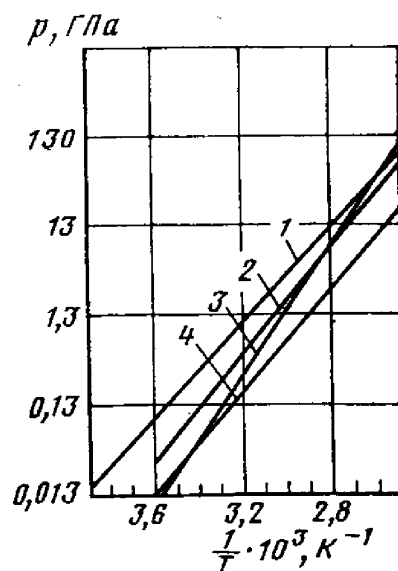


Рис. 1.14. Равновесное давление паров сублимирующих твердых топлив:
1—камфора; 2—нафталин;
3—ацетамид; 4—дифенил

К смесевым топливам относятся порошкообразные горючие и окислители. Подача и организация рабочего процесса при использовании порошкообразных компонент имеет много общего с таковыми в ЖРД и ЖГГ. Такие псевдожидкие топлива и возможности их использования в газогенераторах рассмотрены отдельно в гл. 3.

К твердым относятся также *сублимирующие* топлива. Используемые для этой цели вещества характеризуются теплотой сублимации, молекулярной массой газовой фазы, коэффициентом испарения и равновесным давлением паров при определенной температуре [61] (табл. 1.11).

Давление паров (рис. 1.14) должно быть на таком уровне, чтобы при заданном расходе топлива проходные сечения газопроводов и клапанов имели приемлемые конструктивные размеры.

Сублимирующее топливо может быть двухкомпонентным: окислитель (пятиокись азота, перхлорат нитрония) + горючее (нафталин, азид аммония или гидразина).

Сублимация может происходить под воздействием тепла, выделяющегося при работе бортовой аппаратуры либо специального нагревателя (в том числе, лучистого): в последнем случае расход топлива регулируется без применения клапанов. Так, продукты сублимации окислителя и горючего при включении специального нагревателя поступают в камеру сгорания, в которой для ускорения процесса находится каталитическая решетка (рис. 1.15) [патент США № 3898798].

Секундный приход газа при сублимации заряда рассчитывается по формуле

$$\dot{m} = \alpha S (M/2\pi RT)^{1/2} [p_v(T) - p],$$

Таблица 1.11

Физические свойства сублимирующих твердых топлив

Топливо	Химическая формула	Температура плавления, К	Равновесное давление паров при 25°C, Па	RT при температуре газа 350 К, кДж/кг
α -камфора	$C_{10}H_{16}O$	449	42,5	19
Нафталин	$C_{10}H_8$	353	18,7	23
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	342	6,7	19
Ацетамид	CH_3CONH_2	256	8,0	49
Бисульфид аммония *	NH_4HS	393	50500	114
Карбамат аммония *	$NH_4CO_2NH_2$	333	8400	112
Бикарбонат аммония *	NH_4HCO_3	309	6700	110
Муравьинокислый аммоний *	$HCOONH_4$	453	4,0	92

* Твердые топлива, диссоциирующие при сублимации.

где α — коэффициент испарения; S — сублимирующая поверхность заряда; M — средняя молекулярная масса; $p_v(T)$ — равновесное давление паров при температуре T ; p — давление в камере газогенератора.

Давление в газогенераторе определяется исходя из уравнения газового баланса

$$p = \frac{p_v(T)}{1 + \frac{Fq(\pi)}{3\alpha S} \left(\frac{2\pi RT}{M} \right)^{1/2}},$$

где F — площадь проходного сечения газохода; $q(\pi)$ — приведенный расход.

Большая плотность сублимирующих топлив (по сравнению со сжатым газом) и возможность их длительного хранения при низких температурах являются предпосылками рекомендации к их применению в реактивных системах управления космических летательных аппаратов [6].

Твердо-жидкие и пастообразные топлива. Возможны следующие группы твердо-жидкого топлива: твердое горючее + жидкий окислитель (прямая схема), вместо твердого горючего может быть твердый компонент с большим избытком горючего; твердый окислитель + жидкое горючее (обратная схема), вместо твердого окислителя может быть твердый компонент с большим избытком окислителя; трехкомпонентные топлива (некоторые компоненты твердые, остальные — жидкие).

Твердый компонент может быть либо в виде отдельного блока, либо в виде гранул.

Круг химических соединений, которые могут найти применение в качестве компонентов таких топлив, включает практически все горючие и окислители, входящие в состав применяемых и перспективных жидких и твердых ракетных топлив (табл. 1.12). Некоторые пары из перечисленных в таблице испытанных топливных композиций могут найти применение в регулируемых газогенераторах.

В табл. 1.12 приведены топливные композиции (по материалам зарубежных работ), которые прошли стендовые или летные испытания [32, 62], рассматривались в анализе ЛА.

Таблица 1.12

Состав твердо-жидких топлив

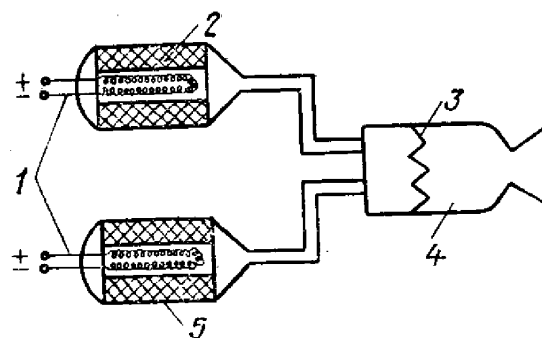


Рис. 1.15. Схема двигателя на сублимирующем топливе:

1—нагреватель; 2—газогенератор на сублимирующем окислителе; 3—каталитическая решетка; 4—камера сгорания; 5—газогенератор на сублимирующем горючем

Наименование компонента		Вид применения	Страна
горючее	окислитель		
Полибутадиен, LiH, Li	$O_2 + F_2$	Анализ применения в ракете-носителе «Атлас-Кентавр»	США
Полибутадиен, Be	$O_2 + F_2$	Анализ применения в ракете-носителе «Атлас-Кентавр»	США
Акриловая пластмасса, Mg	Смесь окислов азота	Летные испытания на ракете-мишени «Сандпайпер А»	США
Полибутадиен, Al	$O_2 + F_2$	Анализ применения в верхних ступенях ракет. Экспериментальные исследования	США
Полигликоль, полиуретан	$N_2O_4 + HNO_3$	Экспериментальные исследования	ФРГ
Полиэтилен	N_2O_4	То же	ФРГ
Полиэтилен	H_2O_2	»	ФРГ
Полиэтилен	$O_2 + F_2$	»	ФРГ
Производные этиленмина, LiH	$N_2O_4 + HNO_3$	»	ФРГ
л-аминофенол, л-толуидин	HNO_3	»	ФРГ

Наименование компонента		Вид применения	Страна
горючее	окислитель		
Паратолуидин, дифениламин, ортоксидин, мочевины	HNO_3	Экспериментальные исследования	Франция
Be, H_2	O_2	Анализ применения в космических объектах	Франция
Керосин, LiH	NO_2ClO_4	Анализ применения в армейских ракетах	Франция
LiH	ClF_3	Анализ применения в тактических ракетах	Франция
Керосин	NO_2ClO_4	То же	Франция
Каучук, Al	NH_4ClO_4	»	Франция
Тагаформ	Красная дымящая кислота HNO_3	Летные испытания ракеты	Швеция
Полиэфир, NH_4ClO_4 , Al	$\text{N}_2\text{O}_4 + \text{HNO}_3$	Экспериментальные исследования	Израиль
Керосин	Эвтектическая смесь нитрата и перхлората аммония	То же	Италия
Полиэтилен	O_2	Планер	Италия

Пастообразное топливо по своему агрегатному состоянию занимает промежуточное положение между жидкими и твердыми и в зависимости от степени загущения представляет возможность для разных способов организации рабочего процесса.

1. При большой степени загущения горение топлива происходит параллельными слоями в той же камере, где оно находится (аналогично горению твердого топлива).

2. При малой степени загущения топливо через фильерный блок вытесняется из бака в камеру, где происходит его горение по коническим поверхностям.

3. Распыливание маловязкой пасты при подаче в камеру (рис. 1.16) и последующее горение или дожигание агломератов.

По своему составу пастообразные топлива похожи на смесевые твердые топлива и включают загущенные органические окислители и горючие, порошкообразные окислители и горючие. Так, в состав пастообразного топлива RD2435, применяемого в двигателе «Вэкс-винг», входят: перхлорат аммония — 63%, пикрат аммония — 14%, алюминий — 12% и связка — 11% (состав связующего: полиизобутилен — 80%, этиломат — 15%, добавки — 5%). Заряд этого

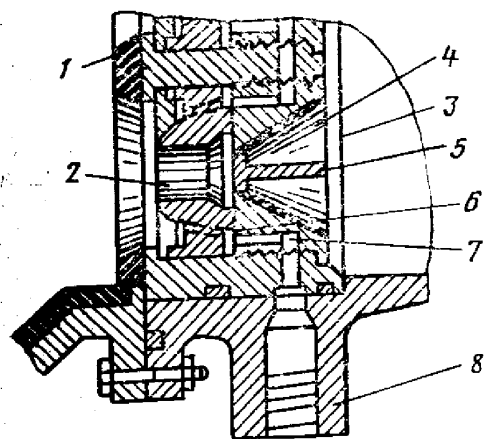


Рис. 1.16. Устройство для пневматического распыла пастообразного топлива:

1—днище камеры сгорания; 2—вихревая камера; 3—дно бака с пастообразным топливом; 4—входное отверстие; 5—завихритель; 6—тангенциальное отверстие; 7—кольцевая полость; 8—штуцер

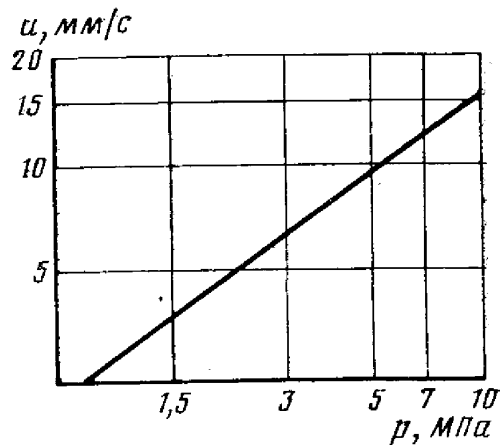


Рис. 1.17. Зависимость скорости горения пастообразного топлива от давления

пастообразного топлива горит параллельными слоями (рис. 1.17), при этом $u = f(p)$ [49].

Для прямоточных двигателей предложены пастообразные топлива с малой степенью загущения и с большим избытком горючего, включающие [62]:

- а) 10 ... 60% горючих-связующих с низкой температурой плавления 30 ... 125° С (парафина, нафталина, полиэтилена и др.);
- б) 40 ... 90% Mg, Ti, Li, Al, В или их карбидов и некоторых гидридов;

в) 0 ... 20% высокоэнергетического окислителя (тринитротолуола, нитратов аммония, нитрата гидразина и др.).

В этом случае в камере дожигания происходит либо окисление отдельных агломератов пасты, либо дожигание продуктов газогенерации.

Для подачи пастообразного топлива малой степени загущения из бака в камеру сгорания через отверстия (фильеры) можно применить поршень, эластичный мешок или винтовой насос (шнек). Вытеснение топлива можно осуществить с помощью подвижного фильерного блока, перемещающегося под действием давления в камере сгорания; в этом случае масса топлива остается неподвижной и постепенно все большая часть бака становится камерой сгорания.

Приход пасты в камеру должен быть не слишком большим (для того, чтобы топливо в камере не скапливалось) и не слишком малым (с тем, чтобы скорость движения пасты в отверстиях была больше скорости ее горения). В этих пределах возможно регулирование прихода, рассчитываемого по формуле

$$\dot{m} = \frac{n\pi r^4 Q_T (p_B - p)}{8e\eta},$$

где n , r и e — число, радиус и длина отверстий (фильер); q_t , η — плотность и вязкость топлива; p_v — давление вытеснения; p — давление в камере.

Если сгорание топлива происходит гораздо быстрее, чем релаксация газового объема, то для описания переходного процесса в газогенераторе имеем линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} = \frac{q_t n \pi r^4}{8 e \eta} p_v - \left(\frac{q_t n \pi r^4}{8 e \eta} + \frac{F_{кр}}{\beta} \right) p.$$

Давление на установившемся режиме равно

$$p = \frac{p_v}{1 + \frac{F_{кр}}{q} \frac{8 e \eta}{q_t n \pi r^4}}.$$

При прекращении подачи пастообразного топлива необходимо перекрыть фильерные отверстия или ввести хладагент либо инертную пасту в фильерный блок.

Пастообразное топливо, обладая пластичностью, позволяет расширить диапазон допустимых перегрузок до $\approx 10^4 g$. Поэтому имеются предложения по использованию их в двигателях активно-реактивных снарядов, включающихся после вылета снаряда из ствола [патент США № 4023354].

Так как разработка пастообразных топлив находится на начальной стадии, то возможность и целесообразность их применения в газогенераторах (в частности, регулируемых) изучены недостаточно; имеются сведения о применении пастообразных горючих содержащих конденсированную фазу (Al и Al_2O_3), вместе с жидкими и газообразными компонентами в стендовых газогенераторах для имитации струй РДТТ с целью изучения их теплового, эрозивного и динамического воздействия на агрегаты пускового комплекса.

Для снижения температуры продуктов газогенерации в необходимых случаях применяются жидкие (вода), твердые (оксид) и газообразные (гелий) охлаждающие вещества.

1.3. ИСПЫТАНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Сложность рабочих процессов в газогенераторах обуславливает необходимость применения при их создании комплексных экспериментальных работ. Этот комплекс включает: «холодные» и «горячие» испытания моделей. Условия, которые должны соблюдаться в опытах с моделью, а также характерные и удобные параметры, определяющие основные эффекты, устанавливаются на основе теории подобия и общезначимых соображений: запуски экспериментальных двигателей и ракет. Этот тип испытаний целесообразен, когда на первый план выступают процессы воспламенения горения и выключения топлив, регулирования характеристик газогенератора. При этом допускается замена отдельных штатных блоков экспериментальными; стендовые и летные испытания [79, 82].

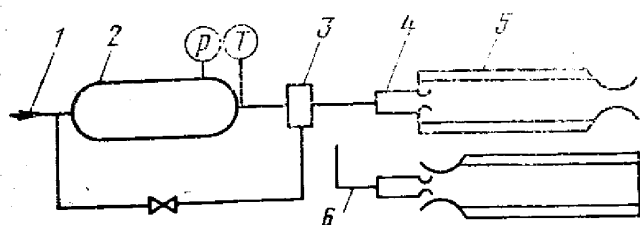


Рис. 1.18. Схема подачи горячего газа для исследования теплообмена в РДТТ при воспламенении:

1—подвод холодного газа; 2—нагреватель; 3—клапан горячего газа; 4—модель воспламеняющего газогенератора; 5—секция с соплом; 6—воспламенение со стороны сопла

Модельные испытания. Рассмотрим некоторые типичные примеры модельных исследований газогенератора, результаты которых представляют самостоятельный интерес.

Продувки модели воспламенительного газогенератора, расположенного в канале ракетного двигателя на твердом топливе, проведены холодным и подогретым воздухом с целью исследования течения в канале основного заряда и теплопередачи к поверхности в период, предшествующий его воспламенению. При этом испытаны две схемы расположения воспламенительного газогенератора: у переднего дна и со стороны основного сопла (рис. 1.18).

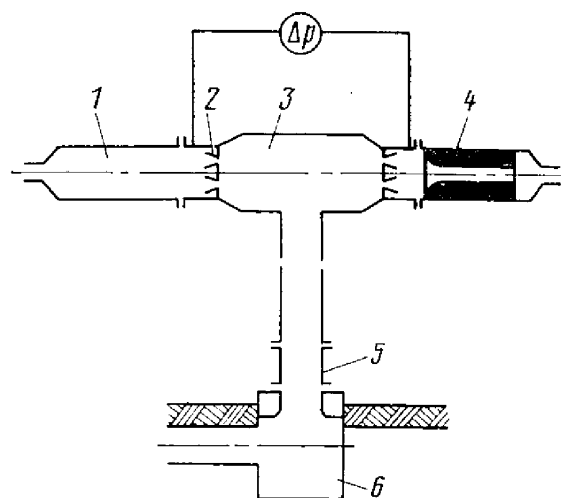


Рис. 1.19. Схема дифференциальной установки:

1—эталонный газоход; 2—разделительные сопла; 3—дифференциал; 4—испытуемый газоход; 5—тензометрический стакан; 6—подводящий ресивер

В первом случае течение газов аналогично течению в двухкамерном газогенераторе, давление в канале

$$p \approx \frac{p_v F_{кр.в}}{F_{кр}} \sqrt{\frac{T}{T_v}},$$

где p_v , T_v и $F_{кр.в}$ — давление, температура газа и площадь критического сечения воспламенительного газогенератора.

Конвективную теплопередачу в сечении, удаленном от переднего дна на $\geq 10d_{кан}$, удается скоррелировать известной зависимостью [56]:

$$Nu \approx 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4}.$$

В более близких сечениях $\approx 1 \dots 2 d_{кан}$ интенсивность теплового потока в 2—3 раза выше (а в начальный момент превышение может достигнуть значений 4 ... 5, т. е. имеет место нестационарный характер теплоотдачи). Если воспламенительный газогенератор расположен внутри сопла, то струя проникает сравнительно неглубоко, на 3 ... 4 $d_{кан}$, и течение аналогично потоку в тупике. За преде-

лами участка 3 ... 4 $d_{кан}$ теплопередача пренебрежимо мала, а на самом участке коррелируется зависимостью

$$Nu = c Re_d^{0,5} Pr, \text{ где } Re_d = \frac{4\dot{m}_в}{\pi d_{кан} \mu}.$$

Эмпирический коэффициент c равен 3 ... 4 в начале периода, затем уменьшается до 1,5 ... 2.

В плоскости критического сечения толщина зоны смешения потоков невелика и ею можно пренебречь. Тогда воспламеняющая струя проникает в двигатель со скоростью $v_{с.в} = a_{кр} \lambda_{с.в}$ через площадь $F_v = F_{кр.в} / q(\lambda_v)$, а возвратный поток истекает со звуковой скоростью через кольцевую площадь $F_{кр} - F_v$ (рассматривается случай довольно высокого давления в двигателе, когда взаимодействие потоков не зависит от давления окружающей среды). Из уравнения сохранения импульсов находим

$$K_{п.в} p_v F_{кр.в} \left[\frac{z(\lambda_{с.в})}{z(\lambda_v)} + \frac{1}{z(\lambda_v)} \right] \approx p F_{кр} K_{п},$$

где $K_{п.в}$ и $K_{п}$; p_v и p ; $F_{кр.в}$ и $F_{кр}$ — коэффициенты пустотной тяги, давления и площади критических сечений воспламенительного газогенератора и основного двигателя; $\lambda_{с.в}$ и λ_v — приведенные скорости в сечении, проходящем через плоскость критического сечения основного РДТТ, и на выходе из воспламенительного газогенератора.

Из уравнения, приведенного выше, получаем (в соответствии с результатами модельных продувок):

$$p F_{кр} / p_v F_{кр.в} = 1,9 \dots 2,1.$$

Из уравнения газового баланса для прямого и обратного потоков в плоскости критического сечения РДТТ имеем

$$\frac{p_v F_{кр.в}}{\beta_v} = \frac{p F_{кр}}{\beta} \left(1 - \frac{F_{с.в}}{F_{кр}} \right)$$

или

$$\frac{F_{с.в}}{F_{кр}} = 1 - \frac{\beta p_v F_{кр.в}}{\beta_v p F_{кр}} \approx 1 - \frac{\beta}{2\beta_v} \approx \frac{1}{2}.$$

Таким образом, струя воспламенительного газогенератора, неглубоко проникая внутрь основного двигателя, почти наполовину перекрывает его сопло. Поэтому возможны задержка воспламенения заряда и пики давления при выходе РДТТ на рабочий режим.

С помощью холодных испытаний моделей отдельных узлов газогенератора определяются коэффициенты расхода насадков, газодинамических потерь в предсопловых ресиверах и других местных сопротивлениях, усиления при вдуве вторичной струи в сопло, эффективности завесной защиты и т. д.

Например, на дифференциальной сопельной установке (предназначенной прежде всего для исследования импульсных характеристик сопел [46]) удается с большой точностью определить первые три: коэффициенты расхода, газодинамических потерь и усиления (рис. 1.19).

Методика проведения эксперимента предусматривает два запуска установки с переменной эталонного и испытываемого патрубков местами, что позволяет при последующем осреднении результатов этих продувок получить данные, соответствующие одинаковым расходам воздуха через сравниваемые сопла (даже при неодинаковом разделении воздуха между цилиндрами).

Разность коэффициентов расхода испытываемого и эталонного патрубков по результатам испытаний на дифференциальной установке определяют по формуле:

$$\Delta \mu = \mu - \mu_э = \mu_э \left(\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta F_{кр}}{F_{кр}} \right).$$

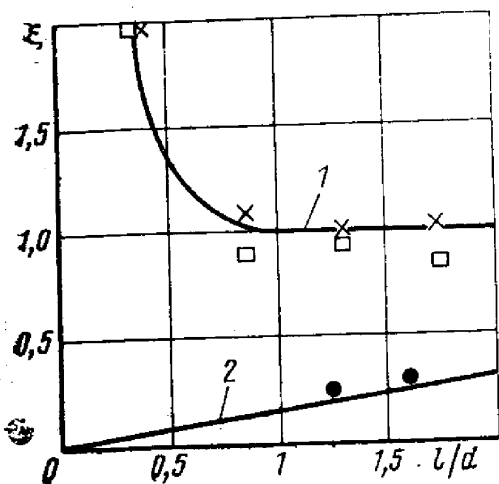


Рис. 1.20. Зависимость коэффициента газодинамических потерь от размеров предсоплового ресивера:

•—одно центральное выходное отверстие; ×—одно выходное отверстие, центр которого смещен от оси подводящего канала на величину диаметра канала; □—два выходных отверстия, центры которых смещены на диаметр канала; 1—при истечении из трубы на экран [28]; 2—в струе постоянной массы [28]

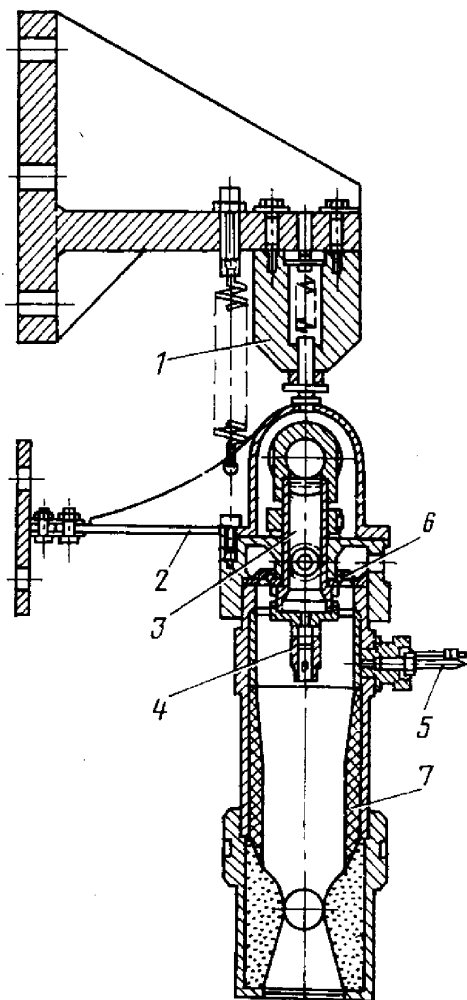


Рис. 1.21. Экспериментальный газогенератор для исследования горения зарядов твердого окислителя:

1—датчик тяги; 2—система гибкой подвески газогенератора; 3—форкамера; 4—пиротехнический воспламенитель с электросвечой; 5—датчик давления (охлаждаемый гелием); 6—форсунка подачи жидкого компонента; 7—заряд твердого окислителя

При известной характеристике эталонного сопла μ_0 получаем для испытуемого $\mu = \mu_0 + \Delta\mu$.

Аналогично определяется зависимость коэффициента газодинамических потерь в предсопловом ресивере от его размеров (рис. 1.20):

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho_L v_L^2} - \xi_{\text{кан}} = \frac{2\Delta p}{kM^2 p} - \xi_{\text{кан}}.$$

При этом предполагается, что $\Delta F_{\text{кр}} = 0$, а значение коэффициента потерь в подводящем канале $\xi_{\text{кан}}$ известно. Боковые силы при вдуве поперечной струи в сверхзвуковую часть сопла на установке измеряются с помощью тензометрического стакана (см. рис. 1.19).

Испытания газогенераторов или их основных узлов проводятся с целью изучения явлений, определяющих их параметры и характеристики.

В частности, при создании газогенератора на гибридном топливе вследствие большого количества топливных композиций, отличающихся физико-химическими свойствами, и разнообразия условий применения необходимо установить: скорость горения твердого блока в зависимости от параметров обтекающего потока (давления, плотности потока коэффициента избытка окислителя, размеров канала); длительность и характер переходных процессов; работоспособность конструкции и материалов.

На примере исследовательских испытаний газогенератора на гибридном топливе рассмотрим некоторые типовые методы постановки эксперимента и обработки результатов измерения.

Конструктивная схема экспериментальной установки со сменной камерой сгорания для исследования горения зарядов твердого компонента в условиях подачи жидкого топлива представлена на рис. 1.21. Конструкция установки позволяет испытывать гибридное топливо как с самовоспламеняющимися, так и с несамовоспламеняющимися компонентами топлива.

Выбор методов исследования скорости горения твердого компонента определяется следующими особенностями: изменением скорости горения по времени работы газогенератора; неравномерностью выгорания канала заряда по длине.

Вследствие этого при исследовании такого типа топлива важным является определение локальных и мгновенных значений скорости горения. Для этой цели может быть использован метод гашения заряда твердого компонента путем прекращения подачи жидкого (газообразного) компонента или выброса заряда из камеры сгорания в охладитель. Этот метод может быть использован в основном только при исследованиях твердых компонентов гибридных топлив с малым содержанием металла; для сильно металлизированных горючих, а также горючих с добавками окислителя этот метод может оказаться неэффективным вследствие трудностей гашения зарядов такого типа.

В процессе эксперимента измеряются следующие параметры: давление в камере сгорания; давление в баке жидкого компонента; расход жидкого компонента; масса твердого блока.

До и после эксперимента производится обмер геометрических размеров заряда твердого компонента.

Соотношение между средней по длине канала скоростью газификации заряда твердого компонента и массовой скоростью газа в канале получают, используя зависимость массы газифицированной части твердого компонента m от времени газификации t , которая для каждого режима работы газогенератора получается путем аппроксимации экспериментальных данных в виде степенной функции

$$\bar{m} = at^n,$$

где $\bar{m} = \frac{m}{m_n} = \frac{d^2 - d_n^2}{D^2 - d_n^2}$ — относительная доля газифицированного твердого компонента; m_n — начальная масса заряда твердого компонента; d_n — начальный диаметр канала заряда; D — внешний диаметр заряда; d — средний по длине диаметр канала заряда.

Зная определенную взвешиванием зависимость $\bar{m} = at^n$, получим осредненную по длине скорость газификации твердого компонента:

$$u = \frac{1}{2} \frac{dd}{dt} = \frac{D^2 - d_n^2}{4} \frac{ant^{n-1}}{\sqrt{at^n (D^2 - d_n^2) + d_n^2}}.$$

Плотность потока на выходе из канала заряда твердого компонента равна

$$qv = \frac{4(\dot{m}_{ж} + m_n ant^{n-1})}{\pi [at^n (D^2 - d_n^2) + d_n^2]},$$

где $\dot{m}_{ж}$ — секундный расход жидкого компонента.

По этим выражениям находится связь между u и qv в виде степенной функции

$$u = b(qv)^n = b_1 p^y (qv)^n.$$

Значения параметров b , b_1 и n определяют методом наименьших квадратов. Время работы газогенератора определяется от момента, при котором давление в

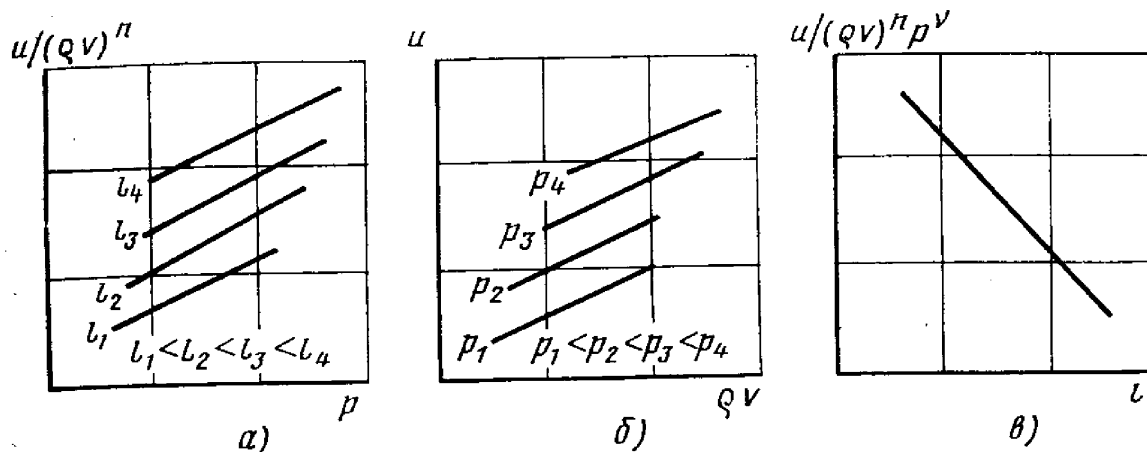


Рис. 1.22. Изменение скорости горения твердого компонента от плотности потока, давления и длины заряда в условиях подачи жидкого компонента

период выхода его на режим достигает, например, 50% от расчетного и до момента спада давления до такого же режима.

Для определения величин b_1 и n , используя зависимости, представленные на рис. 1.22, строится график $u/(qv)^n = f(p)$.

Анализ рис. 1.22 позволяет определить показатель степени и коэффициент b_1 , который представим в виде $b_1 = b_2 l^k$, тогда $u = b_2 (qv)^n p^y e^k$.

Из рассмотренного выше видно, как особенности методики исследовательских испытаний зависят от типа топлива, назначения газогенератора и конкретных целей эксперимента. Как правило, исследовательские испытания — необходимый этап создания газогенераторов.

Стендовые испытания. Стендовые испытания проводятся для определения состояния и работоспособности конструкции и материалов в условиях эксплуатации; энергетических характеристик топлива и газогенератора и зависимости давления от времени при всех режимах работы.

В программу стендовых испытаний газогенератора обычно включается измерение следующих параметров: расхода жидких компонентов; давления в камере; деформаций и перемещений элементов корпуса; перемещений штоков и усилий на них в регуляторах и клапанах; температуры элементов конструкции и продуктов сгорания; перепада давления на фильтрующих элементах. Программа испытаний предусматривает также условия проведения опытов, максимально приближенные к условиям эксплуатации газогенераторов [40, 79].

В зависимости от типа топлива разработана специальная технология проведения стендовых испытаний газогенераторов. Рассмотрим некоторые специфические методические вопросы.

Первым и основным этапом отработки газогенератора является автономная отработка газогенератора, при которой подтверждается работоспособность конструкции и соответствие характеристик расчетным.

Для газогенератора с регулирующим устройством этот этап подразделяется на два подэтапа: испытания с технологическими соплами; испытания с регулирующим устройством.

Вторым этапом является проверка работоспособности газогенератора и определение его характеристик при работе совместно с агрегатом ракеты, например, с преобразователем энергии, системой вытеснения и др.

В техническом задании на газогенератор, как правило, указываются требования для автономно работающего газогенератора и приводятся условия работы.

Критерием достаточности очистки продуктов сгорания от конденсированных частиц является нормальная работа преобразователя энергии или соплового аппарата — отсутствие накопления, налипания или наслоения твердых частиц в определяющих сечениях (ззорах).

Эффективность работы фильтрующего устройства может быть определена прямым методом при испытании газогенератора совместно с потребителем энергии. Такой способ требует слишком большого количества испытаний совместно с потребителем энергии. Конкретные требования к автономному газогенератору по чистоте продуктов сгорания позволяют существенно упростить отработку. Для определения содержания конденсированной фазы в продуктах сгорания на выходе из газогенератора устанавливаются дополнительно автономные контрольные фильтроэлементы, по количеству конденсированной фазы в которых делается вывод о ее количестве в продуктах сгорания. В качестве контрольных фильтров хорошо зарекомендовали себя фильтры-циклоны.

Особенность испытаний твердотопливных газогенераторов состоит в том, что в ходе испытаний не измеряется текущий расход продуктов сгорания. Для определения текущих значений расхода определяется средний расход продуктов сгорания

$$\dot{m}_{\text{ср}} = \frac{m_{\text{н}} - m_{\text{к}} - \Delta m}{t_3},$$

где $m_{\text{н}}$ и $m_{\text{к}}$ — масса газогенератора до и после испытания; Δm — масса продуктов сгорания, истекающих после времени t_3 .

Текущее значение расхода продуктов сгорания можно считать по соотношению:

$$\dot{m}(t) = \frac{m_{\text{ун}} - \Delta m}{t_3} \frac{p(t)}{p_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{T_{\text{ср}}}{T(t)}},$$

где $m_{\text{ун}} = m_{\text{н}} - m_{\text{к}}$; $p(t)$ — давление на выходе из газогенератора.

Средняя мощность газогенератора равна (см. п. 1.1):

$$N = \frac{m_{\text{ун}} - \Delta m}{t_3} \frac{k}{k-1} RT_{\text{ср}} \left[1 - (\pi(\lambda_a))^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

а текущее значение

$$N(t) \approx \frac{m_{\text{ун}} - \Delta m}{t_3} \frac{p(t)}{p_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{T_{\text{ср}}}{T(t)}} \frac{k}{k-1} RT(t) \left[1 - (\pi(\lambda_a))^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

При автономной отработке газогенератора с технологическими соплами давление может быть несколько отличным от давления,

поддерживаемого в газогенераторе агрегатом ракеты. В этом случае для определения расхода и мощности газогенератора при поддерживаемом давлении проводится пересчет по формулам ($S = \text{const}$):

$$\dot{m}_{\text{прив}} = \dot{m}_{\text{ср}} \left(\frac{p_{\text{прив}}}{p_{\text{ср}}} \right)^{\gamma};$$

$$N_{\text{прив}} = \dot{m}_{\text{ср}} \left(\frac{p_{\text{прив}}}{p_{\text{ср}}} \right)^{\gamma} \frac{k}{k-1} RT_{\text{ср}} \left[1 - (\pi(\lambda_a))^{\frac{k-1}{k}} \right].$$

Если на заряд твердого сопла нанесено покрытие, разложение которого происходит с поглощением тепла и приводит к охлаждению продуктов газогенерации, то для приближенного определения расхода этого покрытия используется уравнение газового баланса:

$$\dot{m}_{\text{п}} = \frac{pF_{\text{кр}}}{\beta} - u_1 q_1 S p^{\gamma},$$

где

$$\beta = \frac{F_{\text{кр}}}{m_{\text{ун}}} \int_0^t p dt.$$

Аналогичным образом определение средней по длине заряда и времени работы скорости выгорания твердого компонента в гибридном газогенераторе основывается на результатах изменений массы заряда твердого компонента до и после каждого испытания.

Используя значение уменьшения массы твердого компонента, можно записать

$$\Delta m = q_{\text{т}} \Delta V_{\text{т}} = q_{\text{т}} \pi L (r^2 - r_{\text{н}}^2)$$

и получить оценку для определения (средней по длине и времени скорости выгорания) по известным параметрам:

$$u_{\text{ср}} = \frac{r - r_{\text{н}}}{t_3} = \frac{1}{t_3} \left[\left(\frac{\Delta m}{q_{\text{т}} \pi L} + r_{\text{н}}^2 \right)^{0,5} - r_{\text{н}} \right].$$

Поскольку в процессе стендового испытания, как правило, не гасят и не взвешивают твердые блоки, то приближенную оценку текущего расхода твердого компонента получают с помощью уравнения газового баланса

$$\dot{m} = \frac{pF_{\text{кр}}}{\beta} - \dot{m}_{\text{ж}},$$

причем расходный комплекс β определяется по результатам аналогичных испытаний для текущего соотношения компонентов. Для последующей оценки средней по длине скорости выгорания твердого блока используют систему уравнений:

$$u = \frac{1}{2} \frac{dd}{dt}, \quad u = \frac{\dot{m}}{q_{\text{т}} \pi L d}.$$

На работу газогенератора могут оказывать влияние перегрузки: они могут влиять на скорость горения топлива, осаждение конденсированной фазы на фильтре и стенках газового тракта, прогрев и разложение бронирующего и теплозащитного покрытий. Поэтому часть испытаний должна вестись на стендовых установках, позволяющих создавать на газогенераторе перегрузки. Наиболее простым и широко применяемым стендовым устройством, воссоздающим на газогенераторе линейные перегрузки при его работе, является центробежный испытательный стенд (ЦИС), на вращающемся плече которого крепится газогенератор [38]. Так как длина газогенератора обычно соизмерима с длиной плеча коромысла, то при испытаниях на ЦИС как по величине, так и по направлению для разных сечений газогенератора перегрузки различны, в то время как в полете на все сечения газогенератора действуют одинаковые по величине и направлению перегрузки. Поэтому при установке газогенератора на ЦИС выбирают такое сечение, для которого необходимо выдержать принятый закон изменения и направление перегрузок, допуская в определенных пределах изменение перегрузок по длине газогенератора.

Частота вращения связана с перегрузками, действующими на точку, находящуюся от оси вращения стенда на расстоянии R , зависимостью

$$M(t) = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{gn(t)}{R}} \approx 946 \sqrt{\frac{n(t)}{R}},$$

где R — в мм.

На поток газа в газогенераторе, установленном на ЦИС, действует также кориолисово ускорение, равное

$$w_{\text{кор}} = 2 (\bar{v} \times \bar{\omega}) = 2 \sqrt{\frac{n(t)}{R}} v \cos \beta,$$

где $\bar{v}$ — вектор скорости продуктов сгорания в газогенераторе; $\bar{\omega}$ — вектор угловой скорости; β — угол между векторами $\bar{v}$ и $\bar{\omega}$.

Расчеты показывают, что силы, определяемые угловым и кориолисовым ускорениями при имитации перегрузок на ЦИС, малы по сравнению с величинами линейных перегрузок.

Необходимый крутящий момент при раскрутке ЦИС

$$M_{\text{кр}} = J' \varepsilon + M_{\text{тр}} \pm P_x r_1,$$

где J' — текущий момент инерции вращающихся частей стенда совместно с газогенератором; ε — угловое ускорение; P_x — проекция реактивной силы в плоскости вращения на перпендикуляр к направлению действия центробежной силы; r_1 — расстояние от линии P_x до оси вращения.

При знаке минус направление P_x совпадает с направлением вращения, при знаке плюс направлено в противоположную сторону.

В результате комплекса испытаний газогенераторов раскрываются особенности рабочих процессов в них, определяются и подтверждаются заданные в техническом задании их основные характеристики при всех условиях эксплуатации.

ГЛАВА 2

Газотермодинамика газогенераторов

2.1. УРАВНЕНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

В большинстве практически важных случаев уравнения газодинамики элементов газового тракта (газогенератора, газохода) упрощаются на основе модели одномерности, гипотезы квазистационарности (т. е. предположения о том, что неоднородности, обусловленные неустановившимися течениями газа, пренебрежимо малы) и предположения о том, что продукты газогенерации подчиняются уравнению состояния идеального газа: $pV = mRT$, а их внутренняя энергия пропорциональна температуре $E = c_v T_v$. Движение газа является квазистационарным, если время установления стационарного течения $\tau_2 \approx L/v$ много больше времени распространения возмущений $\tau_1 = L/a$ в объеме газогенератора, это условие выполняется при $v/a \ll 1$. Последовательное применение идей квазистационарности дает возможность рассматривать более быстрые процессы как мгновенные. По существу гипотеза квазистационарности используется в модели одномерного течения, так как последняя предполагает, что любое воздействие (например, подвод вещества от стенок) мгновенно равномерно распространяется по всей ограниченной массе газа, протекающей по каналу.

Пусть часть топлива находится в газогенераторе, а другая часть подается в него в жидком, газообразном, пасто- или порошкообразном виде. Тогда для средних по объему давления и температуры газа имеем

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} (\dot{m} - \dot{m}_{\text{вых}}) + \frac{p}{RT} \frac{dRT}{dt} - \frac{p}{V} \frac{dV}{dt};$$

$$\frac{dT}{dt} = k \frac{T}{pV} (\dot{m} R_{\text{вх}} T_{\text{вх}} - \dot{m}_{\text{вых}} R_{\text{вых}} T_{\text{вых}}) - \frac{RT^2}{pV} (\dot{m} - \dot{m}_{\text{вых}}),$$

где $\dot{m}$ — расход образующихся внутри объема и поступающих в него извне газов [в случае подачи жидкого компонента в него входит $\dot{m}_{\text{ж}}(t - \tau_3)$, причем $\tau_3 = f_3(p, T)$ — время преобразования (задержка горения) жидкого компонента]; $\dot{m}_{\text{вых}}$ — расход газа в выходном сечении.

Газовая постоянная и температура газа в выходном сечении $R_{\text{вых}}, T_{\text{вых}}$ в общем случае отличаются от таковых во входном:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}}(t - \tau_2),$$

где $\tau_2 = 2 \frac{m + m_{ж}}{\dot{m}_{вх} + \dot{m}_{ж}}$ — время пребывания топлива в реакционном объеме (установление стационарного течения).

Масса газа в рассматриваемом элементе равна $m = Vp/RT$.

Для решения приведенной системы уравнений необходимо знать действительные процессы выгорания топлива и переноса температуры, которые существенно зависят от свойств топлива и конструктивных особенностей агрегатов и могут описываться функциями различного вида [75]. Эти уравнения используются в дальнейших главах книги с целью математического описания рабочего процесса в газогенераторах с учетом основных особенностей газообразования при применении жидких, твердых и твердо-жидких топлив. Заметим, что в более детальных математических моделях процессов в проточном газовом элементе рассматриваются отдельно параметры состояния и массовые потоки основных реагирующих компонентов смеси [24, 75].

Определяющие рабочий процесс в газогенераторе термодинамические характеристики продуктов газогенерации RT , T и R как функции соотношения компонентов и давления изменяются в широких пределах в соответствии с большими фактическими диапазонами изменения давления и соотношения компонентов ($0 \dots 20$), включая экстремальные значения, при которых возможно резкое падение RT и срыв газообразования. Поэтому при разработке газогенераторов необходимы термодинамические расчеты и экспериментальное определение коэффициентов эффективности в широком диапазоне варьирования рабочих параметров с тщательным учетом особенностей химических реакций при низких температурах смеси [2, 76].

В простом частном случае выхода газогенератора на режим при $m = \dot{m}_{ном} (1 - e^{-t/\alpha})$, $\tau_3 = 0$, $RT = \text{const}$, $\tau_2 = \text{const}$ и нулевом начальном давлении решение уравнения газового баланса имеет вид

$$\frac{p}{p_{ном}} = 1 + \frac{\varepsilon}{\alpha - \varepsilon} \exp\left(-\frac{t}{\varepsilon}\right) - \frac{\alpha}{\alpha - \varepsilon} \exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right),$$

где

$$\varepsilon = \frac{V\beta}{RTF_{кр}}.$$

При $t \rightarrow \infty$ давление стремится к установившемуся (обозначенному здесь как номинальное) значению $p \rightarrow p_{ном}$. При расчете установившегося режима работы газогенератора все производные в исходной системе уравнений приравняются к нулю, отпадает необходимость в учете запаздывания, поэтому

$$p_{ном} = \frac{\dot{m}_{ном} \beta}{Fq(\pi)},$$

где $q(\pi)$ — приведенный расход.

В случае выключения газогенератора его конструкция и вид топлива определяют количество находящегося в нем и дополнительно поступающего в него топлива после начала работы отсечных устройств.

Так, введя закон выгорания топлива в виде $\dot{m} = \dot{m}_{\text{ном}} e^{-t/\alpha_k}$ и предполагая изотермический характер процесса, получим для изменения давления

$$\frac{p}{p_{\text{ном}}} = \frac{\alpha_k}{\alpha_k - \varepsilon} \left[\exp\left(-\frac{t}{\alpha_k}\right) + \exp\left(-\frac{t}{\varepsilon}\right) \right] + \exp\left(-\frac{t}{\varepsilon}\right).$$

В случае, когда можно пренебречь поступлением в объем газа, и происходит только истечение оставшихся продуктов газогенерации. Изменение давления в объеме определяется уравнением газового баланса

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{pV}{RT} \right) = -m_{\text{кр}} \frac{pF_{\text{кр}}}{\sqrt{RT}},$$

где

$$m_{\text{кр}} = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}},$$

и одним из следующих решений уравнения энергии:

истечение изотермическое $T = T_0 = \text{const}$;

истечение адиабатическое (теплообмен со стенками отсутствует)

$$T/T_0 = (p/p_0)^{(k-1)/k};$$

истечение при теплообмене в силу свободной конвекции

$$T/T_0 = R[(p/p_0)^{(k-1)((1+C)/R)} + C/R](R+C).$$

Это соотношение при $C=0$ сводится к уравнению адиабаты, а при $C \gg R$ ($C \rightarrow \infty$) равносильно уравнению изотермического процесса.

Решение уравнения газового баланса в первом случае имеет вид ($V = \text{const}$):

$$\frac{p}{p_0} = e^{-\frac{R_0 T_0 F_{\text{кр}} t}{\beta V}},$$

при этом

$$\frac{1}{p_0} \int_0^t p(t) dt = \frac{V\beta}{RT_0 F_{\text{кр}}} \left(1 - e^{-\frac{RT_0 F_{\text{кр}}}{\beta V} t} \right).$$

В случае адиабатического истечения изменение давления определяется следующим интегралом уравнения газового баланса:

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{RT_0 F_{\text{кр}}}{\beta V} \frac{k-1}{2} t \right)^{-\frac{2k}{k-1}},$$

при этом $\frac{1}{p_0} \int_0^t p(t) dt = \frac{V\beta}{RT_0 F_{\text{кр}}} \frac{2}{k+1} \left[1 - \left(1 + \frac{RT_0 F_{\text{кр}}}{V\beta} \frac{k-1}{2} t \right)^{-\frac{k+1}{k-1}} \right]$

Зависимость $p(t)$ в случае теплообмена в силу свободной конвекции такова:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{C}{C+R} \left\{ \left[\sqrt{\frac{R}{C}} \operatorname{sh} \left(Nt + \operatorname{arth} \sqrt{\frac{C}{R+C}} \right) \right]^{\frac{2R}{(R+C)(k-1)}} \times \right.$$

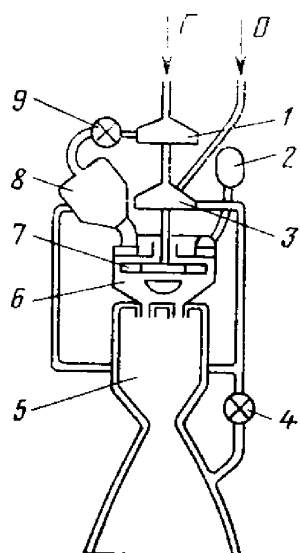


Рис. 2.1. ЖРД с дожиганием генераторного газа:

1—насос окислителя; 2—твердотопливный газогенератор; 3—насос горючего; 4—главный клапан горючего; 5—камера сгорания; 6—газопровод; 7—турбина; 8—жидкостный газогенератор; 9—главный клапан окислителя. Стрелками указан подвод окислителя и горючего

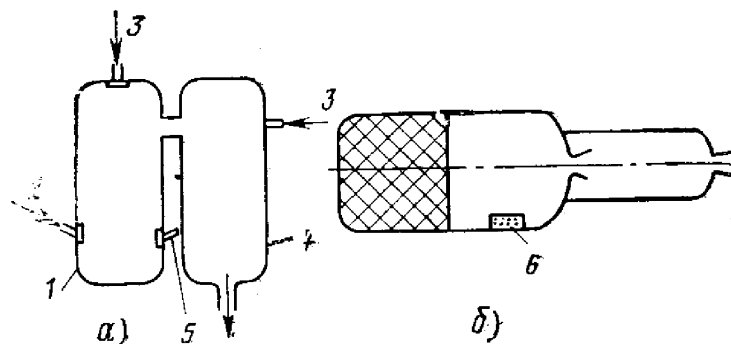


Рис. 2.2. Двухкамерные газогенераторы:

а—жидкостной газогенератор [16]; б—твердотопливный газогенератор; 1—камера сгорания; 2—подача окислителя (азотной кислоты); 3—подача воды; 4—камера смещения и испарения; 5—подача горючего (керосин); 6—воспламенитель

$$\times \text{th}^2 \left(Nt + \text{arth} \sqrt{\frac{C}{C+R}} \right)^{-1},$$

$$\text{где } N = \frac{(k-1) \sqrt{C(C+R)}}{2} \frac{RT_0 F_{\text{кв}}}{V\beta}.$$

Время отсчитывается от момента начала опорожнения газогенератора при давлении p_0 и температуре T_0 , расходный комплекс β соответствует начальным условиям. По зависимости $p(t)$ и уравнению состояния $T(p)$ могут быть вычислены изменения температуры, плотности и расхода. Возможны также другие режимы теплообмена газа со стенками.

Исходная система уравнений является основой математического моделирования сложных рабочих процессов в самых различных проточных газовых элементах. Так, с ее помощью удастся описать сложный огневой процесс запуска жидкостного газогенератора ЖРД замкнутой схемы (рис. 2.1) [75]. Построенная в работе [75] математическая модель описывает накопление жидких компонентов в газогенераторе, удаление их из зоны горения (вследствие испарения, выгорания и частичного уноса в жидком виде) и истечение газообразных продуктов вместе с частью несгоревшего топлива. В жидкостном газогенераторе ЖРД с дожиганием избыток мощности, необходимый для перехода на главный режим, создается путем повышения температуры генераторного газа (а не его расхода, как в случае ЖРД открытой схемы). При запуске и разгоне такого ЖРД могут возникнуть, как показывает моделирование [75], повышенные забросы давления, температуры и мощности газового потока, приводящие к различным аномалиям в работе: попаданию газа во внутренние полоски форсунок и микровзрывам, возгоранию элементов конструкции, разнесу турбонасосного агрегата [75].

Нередко газогенераторы выполняются по двухкамерной схеме (рис. 2.2). Если на входе в газопровод установлено местное сопротив-

ление, то при изучении переходных процессов свободный объем газа также можно рассматривать как вторую камеру. По схеме, показанной на рис. 2.2, б, работает и воспламенительный газогенератор, установленный у переднего дна РДТТ.

Если размеры второй камеры много больше диаметра внутреннего сопла ($d_2^2/d_{кр1}^2 > p_1/p_2$), то струя перемешивается с газом, наполняющим камеру. При этом давления торможения перед внутренним (разделительным) и внешним соплами (соответственно p_1 , p_2) связаны уравнениями непрерывности и энергии для сообщающихся камер. В случае установившегося течения имеем

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \frac{F_1 q(\lambda_1) \beta_2}{F_2 q(\lambda_2) \beta_1}.$$

От отношения давлений p_2/p_1 зависит режим течения в разделительном сопле; при малом p_2/p_1 имеет место сверхкритический режим перетекания: $\lambda_1 = 1$; $q(\lambda_1) = 1$. С ростом противодавления p_2/p_1 происходит отрыв струи от стенок разделительного сопла, а затем и переход на докритический режим ($\lambda_1 < 1$). Вследствие того, что при наличии расширяющейся части разделительного сопла происходит частичное восстановление давления, дозвуковое течение в его критическом сечении устанавливается при условии $\pi_{кр} < p_2/p_1 < 1$ [82].

Если струя из разделительного сопла истекает в камеру сравнительно небольших размеров, то в ней вследствие эжектирующего действия струи статическое давление возрастает по длине. Если границы сверхзвуковой струи касаются стенок второй камеры ($d_2^2/d_{кр}^2 < p_1/p_2$), то в ней образуется участок со сверхзвуковым течением длиной $\approx 12d_2$.

Таким образом, расход газа из одной камеры в другую (см. рис. 2.2) в зависимости от перепада давления $\pi = p_2/p_1$ и профиля расширяющейся части промежуточного сопла определяется соотношением

$$\dot{m}_1 = \frac{p_1 F_1 q(\pi)}{\beta_1},$$

$$\left(\left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(\pi^{\frac{2}{k}} - \pi^{\frac{k+1}{k}} \right)} \approx \sqrt{1 - \frac{(\pi - \pi_{кр})^2}{(1 - \pi_{кр})^2}} \right.$$

при $\pi \geq \pi_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ для сопла без расширяющейся части;

где $q(\pi) = \begin{cases} \sqrt{1 - \frac{(\pi - \pi^*)^2}{(1 - \pi^*)^2}} & \text{— при } \pi \geq \pi^* > \pi_{кр} \text{ для сопла с расширяющейся частью, причем } \pi^* \text{ тем больше, чем меньше угол расширения и больше ее длина;} \\ 1 & \text{— при } \pi \leq \pi_{кр} \text{ для сопла без расширяющейся части и } \pi \leq \pi^* \text{ для сопла с расширяющейся частью (критический режим течения в горловине сопла).} \end{cases}$

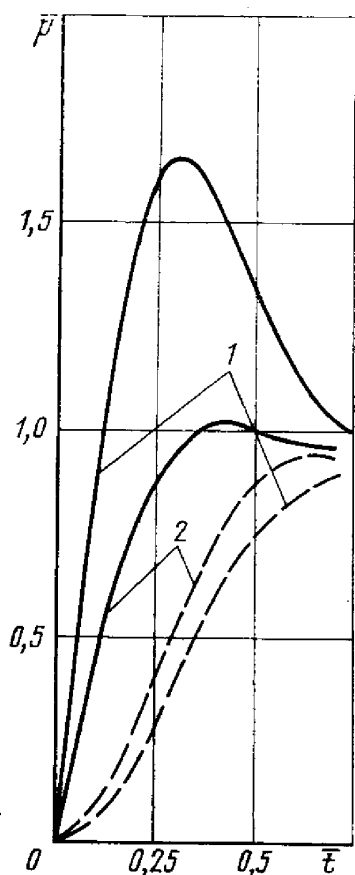


Рис. 2.3. Изменение давления в камерах при срабатывании воспламенителя:

— давление в камере, в которой находится воспламенитель; --- давление во второй камере; 1— $\chi_1=0,9$; 2— $\chi_1=0,5$

Изменение давления в двух газосвязанных камерах при воспламенении и автономном горении пиротехнического заряда в одной из них описывается следующей системой уравнений (временным изменением температуры пренебрегаем):

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\chi_1 RT}{V_1} \left(u_1 Q_r S p_1^\gamma - \frac{p_1 F_1 q (\pi)}{\beta_1} \right);$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\chi RT}{V_2} \left(\frac{p_1 F_1 q (\pi)}{\beta_1} - \frac{p_2 F_{кр}}{\beta} \right).$$

Подбор воспламенительных устройств на пиротехническом топливе осуществляется с учетом результатов решения этой системы при различных массе заряда и уровнях теплотер в камерах (рис. 2.3). В расчете принято $\frac{F_1}{F_{кр}} = 10$; $\frac{V_2}{V_1} = 0,75$; $\chi = 0,33$.

Характеристики газового потока в камере и вдоль газового тракта газогенератора неоднородны по длине и изменяются в процессе работы; нередко при этом изменяются также величины свободного объема и площади проходного сечения (например, в газогенераторах на твердом и гибридном топливах). Математическое описание этих изменений с достаточной степенью точности удастся, либо исходя из уравнений газового и энергетического баланса для осредненных по выделенным объемам параметров (время изменения параметров в несколько раз превышает время распределения звуковых волн в пределах камеры), либо на основе одномерных законов сохранения массы, импульса и энергии в стационарном потоке (так рассчитываются линейные неоднородности газодинамических параметров, время изменения которых на несколько порядков больше, чем время распространения звука в их пределах).

Для расчета волновых процессов, например, в начальной стадии воспламенения заряда твердого топлива или отсечки тяги необходимо привлечение газодинамических уравнений в частных производных [24, 82].

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО ТРАКТА

По условиям компоновки камера газогенератора может располагаться на значительном расстоянии от одного или нескольких одинаковых либо различных потребителей, продукты сгорания к которым поступают по относительно длинному и разветвленному

газопроводу ($l/d \sim 10^2$). Газопроводы при температуре газа до 1670 К обычно изготавливают из стальных нетеплоизолированных труб с неразъемными (сварными) и разъемными (штуцерными или фланцевыми) соединениями. В газовом тракте могут находиться фильтры, регуляторы давления либо расхода и другие нетеплоизолированные местные сопротивления.

Течение газов по такому газовому тракту сопровождается большими газодинамическими и тепловыми потерями. Величина тепловых потерь пропорциональна массе нетеплоизолированных элементов газового тракта, причем масса нагреваемых деталей газогенератора сравнима с запасом топлива.

При известной температуре в камере можно приближенно оценить температуру стенки T_c и температуру газов T_r по мере протекания их по газоходу с помощью следующей системы уравнений, справедливой при пренебрежении перепадом температуры по толщине стенки (аналогичная задача с учетом радиальных градиентов температуры внутри стенок решена в [60]):

$$\frac{\partial \theta_r(X, \eta)}{\partial X} = \theta_c(X, \eta) - \theta_r(X, \eta);$$

$$\theta_c(X, \eta) = \frac{\partial}{\partial \eta} \int_0^\eta \theta_r(X, \eta - \tau) u(\tau) d\tau = \theta_r(X, \eta^*) u(\eta) \approx \theta_r(X, \eta) u(\eta),$$

где $0 \leq \eta^* \leq \eta$; $\theta_r = T_r - T_n$; $\theta_c = T_c - T_n$;

$$X = 2St \frac{x}{r_1} = 0,06 Re^{-0,2} \frac{x}{r_1};$$

$$u(\eta) = u(\infty)(1 - e^{-\eta});$$

$$u(\infty) = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_2 r_2}{\alpha_1 r_1}}; \quad \eta = \frac{2(\alpha_1 r_1 + \alpha_2 r_2)(t - t_x)}{C_c \rho_c (r_2^2 - r_1^2)};$$

α_1, α_2 — коэффициенты теплопередачи с внутренней и внешней сторон стенки газохода; r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиусы.

Решение имеет вид

$$\theta_r(X, \eta) = \theta_r(0, \eta) e^{-[1-u(\eta)]X};$$

$$\theta_c(X, \eta) = \theta_r(0, \eta) u(\eta) e^{-[1-u(\eta)]X}.$$

Период нестационарного нагрева и, следовательно, оттока тепла от продуктов сгорания соизмерим со временем работы газогенератора и гораздо больше времени заполнения газами свободного объема $\frac{V\beta}{RTF_{к}}$. Поэтому течение газа в газоходу заведомо является квазистационарным почти в течение всего периода существенного изменения температуры газов и стенок газового тракта (за исключением периода распространения нескольких первых волн давления в процессе работы воспламенителя).

Установившееся течение горячего газа по холодному цилиндрическому газоходу происходит с замедлением и ростом полного и статического давлений (если пренебречь трением). В самом деле, из уравнения сохранения полного импульса газового потока в таком канале следует:

$$z(\lambda_2) = z(\lambda_1) \sqrt{\frac{T_{01}}{T_0}} > z(\lambda_1);$$

$$\lambda_2 < \lambda_1;$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_2)} > 1; \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{r(\lambda_2)}{r(\lambda_1)} > 1,$$

где индексы 1 и 2 соответствуют входу и выходу газохода.

В случае тупика (цилиндрической застойной зоны, ответвления для регулирующего элемента) установившаяся скорость у торцевой стенки равна нулю, а во входном сечении определяется соотношением $p_{02}q(\lambda_2)F/\beta = Q/H_0$, где Q — количество тепла, передаваемого стенкам; H_0 — энтальпия торможения во входном сечении.

Если стенки канала выполнены из охлаждающего покрытия, разлагающегося с поглощением тепла, то изменение приведенной скорости по длине газохода рассчитывается по уравнению сохранения полного импульса с учетом всех воздействий:

$$\frac{k_2 + 1}{k_2} \dot{m}_2 a_{кр2} z(\lambda_2) = \frac{k_1 + 1}{k_1} \dot{m}_1 a_{кр1} z(\lambda_1),$$

где изменение k и $a_{кр}$ определяется в результате термодинамического расчета.

Суммарный эффект, как правило, заключается в ускорении потока и падении полного и статического давлений, в частном случае, $k_1 = k_2 = k$; $R_1 = R_2 = R$, постоянной и одинаковой теплоемкости c имеем (r — скрытая теплота фазового перехода вещества уносимого покрытия):

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} - \frac{1}{T_{01}} \left(\frac{r}{c} - T_n \right) \frac{\dot{m}_2 - \dot{m}_1}{\dot{m}_2} \quad \text{и} \quad \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{01}}} \geq 1 \quad \text{при} \quad \frac{r}{cT_{01}} < 1 + \frac{T_n}{T_{01}};$$

Эталонным местным сопротивлением является внезапное расширение канала. Применяя законы сохранения массы и импульса в широкой части канала площадью F_2 (от сечения вблизи внутреннего торца, примыкающего к выходу из узкой части канала площадью F_1 , до сечения, находящегося на расстоянии $\approx 10d_2$), получим для определения приведенной скорости λ_2 и коэффициента восстановления давления торможения следующие соотношения:

$$\sqrt{\frac{T_{02}}{T_{01}}} z(\lambda_2) = z(\lambda_1) + \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right) \frac{1}{f_{кр} y(\lambda_1)};$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{q(\lambda_1) F_1 \sqrt{T_{02}}}{q(\lambda_2) F_2 \sqrt{T_{01}}}.$$

В случае теплоизолированного внезапного расширения ($T_{02} = T_{01}$) имеем с точностью до членов порядка λ_1^2 включительно [82]:

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{F_2}{\lambda_1 F_1} \left\{ 1 + \lambda_1^2 \left[\frac{F_1}{F_2} \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right) - \frac{k-1}{k+1} \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right) \right] \right\};$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = 1 - \frac{k}{k+1} \lambda_1^2 \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2.$$

Любое местное сопротивление с известным коэффициентом гидравлических потерь ξ можно рассматривать как внезапное расширение (или их комбинацию) от сечения $F_{сж} = F_1 = F_2 (1 - \sqrt{\xi})$ до F_2 , при этом $\frac{p_{02}}{p_{01}} = 1 - \xi \frac{k}{k+1} \lambda_1^2$.

Площадь сжатого сечения зависит от профиля входной части, а также слабо от сжимаемости.

Газовый тракт газогенератора можно представить в виде сети цилиндрических участков и местных сопротивлений (с тепловой изоляцией и без нее) и рассчитать коэффициент восстановления давления в нем $\eta = p_{окр}/p_0$, связывающий давления торможения в камере p_0 и во входных сечениях сопел $p_{окр}$ и других выхлопных насадков; при этом используются методы расчета и моделирования гидравлических сетей [28].

Выходные насадки, сопла и клапанные устройства газогенераторов отличаются большим разнообразием профилей входных (дозвуковых) и выходных частей; нередко профили с резкими переходами от дозвуковой части к горловине. Вследствие этого действительное течение газа в области минимальных проходных и выходных сечений, как правило, заметно отличается от одномерного параллельного. Эти нарушения одномерности потока приводят к отклонениям коэффициента расхода выходных устройств μ от единицы.

Рассмотрим истечение газа через удлиненную трубку Борда (рис. 2.4) ($L \approx 10d$). Во входном участке канала 1—2 струя сжимается до $F_{сж} < F$; в сжатом сеч. 2—2 (рис. 2.4, а) скорость имеет только осевую составляющую. При истечении из относительно короткой трубки (выходное отверстие вблизи сеч. 2—2) можно считать, что смещения нет, давление торможения в струе постоянно ($p_{01} = p_{02}$), газ вне струи неподвижен и давление в нем равно атмосферному.

В случае истечения через длинный канал смешением можно пренебречь только на начальном участке 1—2. Вниз по течению от сеч. 2—2 струя перемешивается с газом, находящимся у стенок, давление торможения падает из-за потерь на вихреобразование, а статическое давление у стенок изменяется немонотонно; оно минимально в области максимального сжатия струи (сеч. 2—2): $p_2 < p_3 < p_{03} < p_{02} = p_{01}$.

Из уравнения сохранения полного импульса газового потока в цилиндрическом канале ($\lambda_1 \approx 0$, $T_0 = \text{const}$, $F_{сж}$ — площадь сжатого сечения в плоскости 2—2):

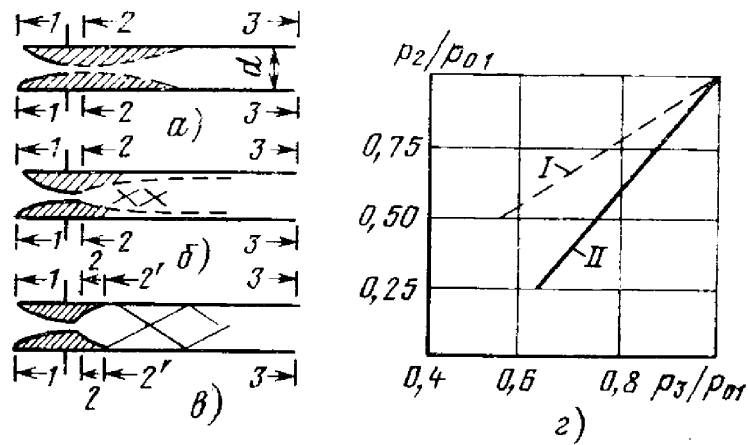


Рис. 2.4. Режимы торможения газовой струи в канале:

a —дозвуковая во всем канале струя, $\pi_{кр} < (p_2/p_{01}) < 1$, $0,76 < (p_3/p_{01}) < 1$; b —течение с ограниченным сверхзвуковым ядром $0,26 < (p_2/p_{01}) < \pi_{кр}$, $0,64 < (p_3/p_{01}) < 0,76$; $в$ —границы сверхзвукового участка струи касаются стенок; $0 \leq (p_3/p_{01}) < 0,64$; $г$ —изменение давления по каналу; I —без учета смещения; II —с учетом смещения

$$p_{01}F = p_{01}f(\lambda_2)F_{сж} + p_2(F - F_{сж}) \equiv \frac{k+1}{k} \dot{m} z(\lambda_2) a_{кр} + p_2(F - F_{сж}) =$$

$$= p_{03}f(\lambda_3)F \equiv \frac{p_3F}{r(\lambda_3)} \equiv \frac{k+1}{k} \dot{m} z(\lambda_3) a_{кр}$$

получаем соотношения для определения:

коэффициента расхода

$$\mu = \frac{F_{сж}}{F} = \frac{1 - p_2/p_{01}}{f(\lambda_2) - p_2/p_{01}};$$

взаимосвязи между приведенными скоростями в сжатом λ_2 и выходном λ_3 сечениях

$$z(\lambda_3) = z(\lambda_2) \frac{1 - \frac{p_2}{p_{01}f(\lambda_2)}}{1 - p_2/p_{01}};$$

коэффициента восстановления полного давления в выходном сечении (3—3)

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \frac{1}{f(\lambda_3)}; \quad \frac{p_3}{p_{01}} = r(\lambda_3).$$

До тех пор пока $p_2/p_{01} > \pi_{кр}$ давление одинаково по всему поперечному сечению канала в плоскости 2—2 и приведенная скорость λ_2 в сжатом сечении определяется по $\pi(\lambda_2) = p_2/p_{01}$.

При $p_2/p_{01} \leq \pi_{кр}$ (рис. 2.4, б) скорость потока в сжатом сечении равна критической ($\lambda_2 = 1$, $f(\lambda_2) = f_{кр}$), а давление неоднородно по сеч. 2—2, давление в струе больше (или равно при $p_2 = \pi_{кр}/p_{01}$), чем давление вне ее. Критический режим течения в сжатом сечении устанавливается при относительном давлении в сеч 3—3 большем,

чем $p_2/p_{01} = \pi_{кр}$; $p_3/p_{01} = 0,76$ ($k=1,4$; $p_2/p_{01} = 0,528$; $F_{сж}/F = 0,638$).
При $\lambda_2 = 1$ имеем

$$p_{01} F_{сж} = p_{03} q(\lambda_3) F$$

или

$$F_{сж}/F = q(\lambda_3)/f(\lambda_3) \equiv 1/z(\lambda_3) f_{кр}.$$

При $p_2/p_{01} < \pi_{кр}$ газовая струя расширяется после сжатого сечения ($\lambda_2 = 1$) и появляется участок со сверхзвуковыми скоростями. При некотором относительном недорасширении в сжатом сечении ($p_0 \pi_{кр} > p_2$) границы сверхзвукового участка коснутся стенок трубки (сеч. 2'—2', рис. 2.4, в), область около сеч. 2—2 изолируется от внешнего давления. В этом случае приведенная скорость $\lambda_2' > 1$ в сеч. 2'—2' определяется расширением от $F_{сж}$ до $F[q(\lambda_2') = F_{сж}/F]$, а на участке 2'—3 уменьшается до дозвуковой $\lambda_3 = 1/\lambda_2'$. Коэффициент восстановления давления торможения при смещении $p_{03}/p_{01} = 1/f(\lambda_3)$ равен при этом коэффициенту восстановления полного давления в прямом скачке (потери на участке расширения 2—2' пренебрегаем); получаем $\lambda_2' = 1,50$; $F_{сж}/F = q(\lambda_2') = 0,731$; $\lambda_3 = 1/\lambda_2' = 0,667$; $p_3/p_{01} = r(1/\lambda_2') = 0,65$. Давление в изолированной отрывной области p_2 после запуска трубки (рис. 2.4, г) существенно зависит от структуры местных возвратных течений.

Следовательно, коэффициент сжатия и режим распространения газовой струи в канале изменяется с изменением относительного давления p_2/p_{01} , связанным с изменением давления окружающей среды p_H/p_{01} ($p_H/p_{01} \approx p_3/p_{01}$):

$$\frac{p_2}{p_{01}} = \frac{z(\lambda_3) - z(\lambda_2)}{z(\lambda_3) - 1/[f_{кр} q(\lambda_2)]}.$$

На рис. 2.4, г представлено изменение давления у стенки канала в сеч. 2—2 в зависимости от давления окружающей среды $p_2/p_{01} = f(p_H/p_{01})$; кривая II соответствует длинному каналу ($p_3 = p_H$); кривая I — короткому ($p_2 = p_H$). Эта зависимость после запуска длинного канала [$p_H/p_{01} < r(1/\lambda_2') = 0,64$] не может быть рассчитана без знания возвратных потоков. Уменьшению относительного давления p_2/p_{01} от 1 до 0, обусловленному уменьшением противодавления окружающей среды p_H/p_{01} , соответствует:

увеличение коэффициента сжатия от 0,5 до 0,789;

уменьшение коэффициента восстановления полного давления от 1 до 0,789 (при $\lambda_3 = 1$);

переход от дозвукового течения по всему каналу до сверхзвукового (вниз по течению от сжатого сечения).

В результате рассмотрения газовой струи в длинной трубке

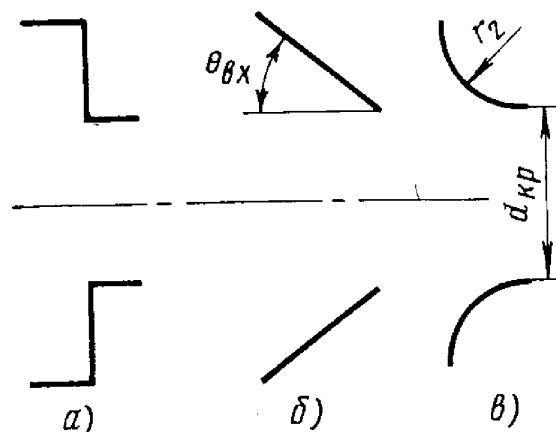


Рис. 2.5. Канал с внезапным сужением (а), конический (б) и радиусный (в) входы в сопло

Борда выявляется логическая связь различных частных случаев движения газа по каналам с местными стеснениями потока на докритических и сверхкритических режимах.

В частности, рассматривая течение газа через сужения, можно получить приближенные значения коэффициента расхода в зависимости от сжимаемости газа и геометрических характеристик дозвуковой части [82] (рис. 2.5):

$$\mu = \frac{1}{1 + 0,637 \xi_0 \xi_x},$$

где $\xi_0 = f(\lambda_2) - 1/(1 - \pi_2)$ — зависит от сжимаемости ($0 \leq \lambda \leq 1$); $\xi_x = \sqrt{1 - F_3/F_1}$ — для сопла с внезапным сужением ($0 \leq r_{кр}/r_{вх} \leq 1$); $\xi_x = (\theta_{вх}/90)^{0,924} \approx \theta_{вх}/90$ — для конического входа ($0 \leq \theta_{вх} \leq 90$; $r_{вх} \gg r_{кр}$); $\xi_x = e^{-4r_2/r_{кр}}$ — для радиусного входа ($0 \leq r_2/r_{кр} \leq \infty$, $r_{вх} \gg r_{кр}$).

При больших давлениях в газогенераторе ($\pi_2 = p_2/p_0 \approx 0$) $\xi_0 = 0,268$:

$$\mu = \frac{1}{1 + 0,17 \xi_x}.$$

Если профиль дозвуковой части имеет большой радиус скругления $r_2 \gg r_{кр}$, то поджатие струи в критическом сечении пренебрежимо мало, и отличие коэффициента расхода от единицы обусловлено лишь наличием пограничного слоя. В этом случае

$$\mu = \frac{1}{1 + (4\delta^*/d_{кр})},$$

где δ^* — толщина вытеснения пограничного слоя.

При ламинарном пограничном слое в дозвуковой части и $200 \leq Re \leq 6,8 \cdot 10^5$ справедлива следующая формула:

$$\mu = (1 + 6,5/\sqrt{Re})^{-1},$$

а при турбулентном

$$\mu = \left(1 + \frac{0,18}{Re_x^{0,2}}\right)^{-1}.$$

В малогабаритных газогенераторах толщина пограничного слоя может быть сравнима с диаметром проходного сечения [45, 57].

Коэффициенты расхода различных отверстий и регуляторов уточняются экспериментальными методами, в частности, с помощью продувок на дифференциальной сопельной установке. Питающиеся продуктами газогенерации вспомогательные и стендовые сопла рассчитываются методами теории сопел ракетных двигателей [57, 73]. Следует отметить, что течение низкотемпературного газа по малогабаритному соплу может существенно отличаться от равновесного.

При расчете расхода газогенератора необходимо учитывать изменения температуры газов и газодинамических потерь по времени работы и по длинам различных ветвей газотока на входах в разные потребители [15].

2.3. ФИЛЬТРАЦИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Масса конденсированной фазы в продуктах газогенерации обычно составляет несколько единиц процентов. Результаты термодинамического расчета продуктов сгорания газогенераторных твердых топлив в смеси с продуктами разложения различных бронирующих и теплозащитных покрытий показывают наличие частиц свинца, меди, углерода. Углерод при разложении углеводородных компонентов топлив и покрытий образуется в виде мелких частиц сажи, которые в дальнейшем могут соединяться друг с другом, образуя прочные цепочки длиной до 10 мкм. Кроме того, в потоке могут находиться коксовые остатки разложения покрытий, частицы расплавленного корпуса воспламенительного устройства и др.

В зависимости от требований к чистоте выходного потока, предъявляемых различными типами потребителей, а также от величины проходных сечений газового тракта разрабатываются следующие варианты устройств: с почти полной очисткой газов (там, где наличие частиц может привести к заклиниванию движущихся элементов регуляторов или поршней); с очисткой от грубой фракции (продукты газогенерации не должны оказывать эрозионного воздействия на элементы системы и образовывать шлаковые наросты); без очистки.

В последнем случае, а также в газовых трактах после фильтров и улавливателей особое внимание должно быть уделено такой организации потока, при которой исключается накопление и агломерация конденсированной фазы. Для этого уменьшается шероховатость канала, обеспечиваются плавные контуры газового тракта, ликвидируются загромождения и локальные отрывные зоны с возвратными течениями.

Это объясняется тем, что крупногабаритные турбулентные пульсации, проникающие в область циркуляции потока, переносят с собой частицы, длина пробега которых меньше масштаба турбулентности. Время пребывания частиц в отрывной зоне в 2—4 раза больше, чем время пребывания в прямой струе, и вследствие интенсивного турбулентного перемешивания здесь может осесть, укрупниться и наслоиться значительная часть конденсированной фазы. В свою очередь, из области обратных токов в основной поток проникают как крупномасштабные турбулентные пульсации, так и линии тока; они могут вынести слишком укрупненные частицы.

В качестве основных требований к фильтрующим устройствам можно перечислить следующие.

1. Эффективность очистки продуктов газогенерации от конденсированной фазы, обеспечивающая нормальную работу газогенератора и потребителя. Общая эффективность очистки (степень очистки) выражается через коэффициент очистки $\eta_0 = m_{\text{ул}}/m_{\text{ч}}$, равный отношению массы уловленных частиц $m_{\text{ул}}$ к массе $m_{\text{ч}}$, поступившей на фильтр с газовым потоком за определенный период времени. Коэффициент фракционной очистки η_i равен отношению массы уловленных частиц определенной фракции к массе имеющихся в продуктах

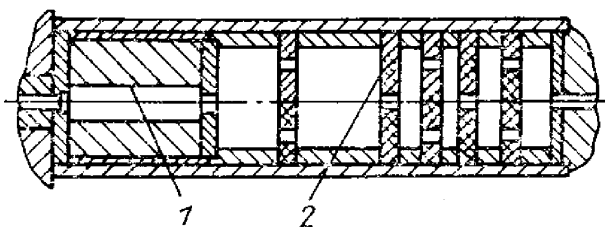
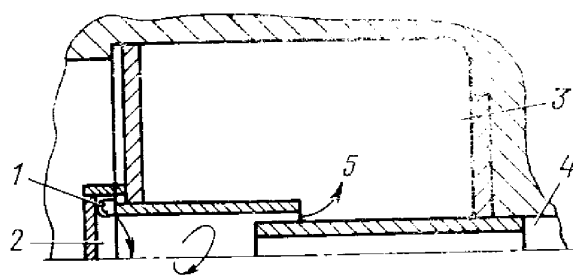


Рис. 2.6. Инерционный фильтр с охладителем:

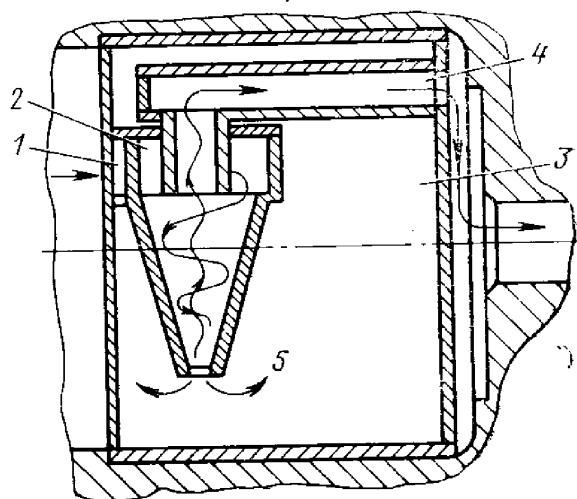
1—блок охладителя; 2—перегородки с отверстием

Рис. 2.7. Фильтры-циклоны:

а—прямоточный циклон; б—фильтр-циклон типа СКН; 1—входная часть; 2—завихритель; 3—бункер для сбора твердых частиц; 4—трубка, отводящая газ; 5—траектория частиц



а)



б)

сгорания частиц этой же фракции. Общий коэффициент очистки связан с коэффициентами фракционной очистки соотношением

$$\eta_0 = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \eta_i z_i,$$

где z_i — процентное содержание массы частиц данной фракции.

2. Минимальное газодинамическое сопротивление (перепад давления на фильтрующем устройстве), его малое изменение со временем и малый разброс.

3. Надежное функционирование в условиях воздействия полетных перегрузок ракеты.

4. Минимальные габаритные размеры, масса и теплоемкость.

В газогенераторах находят применение следующие виды фильтрующих устройств [72, 79]:

инерционные, в которых изменяется направление потока газа, конденсированные частицы отклоняются под воздействием сил инерции от линии тока газа и вследствие этого могут быть выделены из потока (рис. 2.6). Наиболее эффективны такие фильтры для улавливания крупных частиц. Основным недостатком инерционных фильтрующих устройств является невысокая степень очистки, особенно от мелкодисперсных частиц, которые увлекаются газовым потоком;

центробежные, осаждение частиц в которых основано на действии на частицы сил, возникающих при вращении потока газосмеси. Такие фильтры обладают малым газодинамическим сопротивлением, слабо зависящим от количества прошедшей через него газосмеси, и эффективность их, как правило, выше эффективности прямоточных инерционных фильтров;

фильтрующие пористые перегородки из мелкоячеистых металлических сеток, проволочных набивок, металлокерамики [4].

К *пористым* фильтрам относятся:

а) фильтры с жесткими пористыми перегородками, которые могут изготавливаться из зернистых материалов (пористая металло-керамика, спечение гранул углеграфитовых материалов и др.), спрессованных волокнистых материалов (металлической проволоки, сеток) и перфорированных металлических листов, цилиндров, сфер;

б) фильтры с полужесткими пористыми перегородками. В таких фильтрах применяются тканые и вязаные металлические сетки в один или несколько слоев.

Основным преимуществом фильтрации через пористые перегородки является возможность (при соответствующем выборе пористости) получения высокой эффективности очистки, а недостатком — быстрое забивание фильтра частицами с увеличением перепада давления на фильтре во время работы.

Кроме того, возможно применение комбинации описанных фильтров.

Движение продуктов газогенерации по фильтрующим элементам сопровождается потерями давления торможения и тепла.

Рассмотрим два часто применяемые вида фильтров: фильтр-циклон и сетчатый.

Фильтр-циклон. По конструктивному исполнению фильтры-циклоны газогенераторов могут быть различны, но все они имеют следующие элементы (рис. 2.7): входную часть, завихритель, замкнутый бункер для сбора твердых частиц, трубку, отводящую газ.

В фильтре-циклоне поток со взвешенными в нем частицами входит со скоростью 30...60 м/с через патрубок 1, расположенный по касательной к окружности цилиндрической входной части циклона и затем движется в узкой части конуса, образуя внешний вращающийся вихрь. На частицы действуют центробежные силы, под воздействием которых они отбрасываются к стенкам конуса циклона, вместе с газовым потоком выходят через выходное (малое) отверстие конуса и за счет центробежных сил отбрасываются к стенкам бункера.

При выходе из бункера завихренный поток меняет свое направление. Очищенный газ образует в конусе циклона центральный вихрь, который движется к выходной трубке, расположенной по оси конуса циклона. Центробежные силы во много раз больше, чем линейные перегрузки, действующие на ракету. Поэтому эффективность циклона практически не зависит от действия на него полетных линейных перегрузок (порядка нескольких десятков единиц).

Фильтры-циклоны могут располагаться как внутри корпуса газогенератора, так и вне его. В первом варианте компоновки предпочтительнее цилиндрическая форма фильтра-циклона, так как при этом более полно используется объем крышки газогенератора. При таком расположении корпус фильтра-циклона на установленном участке нагружен небольшим внешним давлением, а в момент выхода на режим внешнее давление на корпус фильтра может превышать внутреннее на несколько мегапаскалей. Фильтр-циклон, расположенный вне газогенератора, нагружен высоким внутренним давлением, и меньшая масса получается при сферической форме корпуса.

Для выбора основных характеристик фильтра-циклона необходимы следующие основные данные:

1. По продуктам сгорания газогенератора: расход; температура; количество конденсированной фазы; закон распределения частиц по размерам; плотность газа и конденсированной фазы; вязкость; давление.
2. Требуемый общий коэффициент очистки.
3. Допустимое гидравлическое сопротивление фильтра.
4. Допускаемые габариты.

В отдельных случаях может возникнуть необходимость определения фракционного коэффициента очистки. Коэффициент очистки продуктов сгорания зависит от диаметра улавливаемых частиц, скорости потока на входе в циклон, диаметра циклона, плотности частиц и газовой среды, вязкости газообразной составляющей продуктов сгорания.

Газодинамическое сопротивление фильтра-циклона (потеря давления в фильтре)

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{v_{\text{ц}}^2}{2} = \zeta \frac{k}{k+1} \rho_0 \lambda_{\text{ц}}^2,$$

где $v_{\text{ц}}$ — осевая скорость газа в фильтре-циклоне; $\lambda_{\text{ц}} = v_{\text{ц}}/a_{\text{кр}}$ — коэффициент скорости газа в фильтре-циклоне.

Эффективность очистки циклоном возрастает при увеличении диаметра циклона, уменьшении диаметра пылевыпускного отверстия; увеличении скорости газового потока в циклоне до 9 ... 11 м/с.

Гидравлическое сопротивление циклона увеличивается при увеличении скорости газа в циклоне $v_{\text{ц}}$, увеличении диаметра циклона, уменьшении диаметра пылевыпускного отверстия, увеличении длины конусной части.

При разработке фильтров-циклонов для газогенератора сначала разрабатывают модельный циклон натурных размеров со сменными элементами (конусом, входом, см. рис. 2.7). На таком циклоне проводят продувки запыленным воздухом с определением коэффициентов очистки и по полученным величинам определяют коэффициенты очистки продуктов сгорания.

Расчет объема бункера фильтра-циклона для сбора k -фазы производится по выражению

$$V_{\text{ц}} = \frac{z Q_{\text{max}} Q_{\text{max}} t}{Q_{\text{нас}}} \eta_0,$$

где z — концентрация конденсированной фазы в газовом потоке (доля частиц); Q_{max} — максимальная плотность газового потока, кг/м³; Q_{max} — максимальный объемный расход газового потока, м³/с; t — время работы газогенератора, с; $Q_{\text{нас}}$ — насыпная плотность конденсированной фазы.

Сетчатый фильтр. В фильтрующих устройствах газогенератора могут применяться сетчатые элементы с проходными сечениями (ячейками), как меньшими, так и большими, чем размеры большей части массы частиц.

Газодинамическое сопротивление фильтра в первом случае может быть значительным. Для второго случая в начальный момент работы частицы размером меньше, чем размеры ячейки сетки, проходят через фильтр.

При работе сетчатых фильтров на сетке откладывается слой твердых частиц, ввиду чего возникает перепад давления и поэтому к сетке предъявляются жесткие требования по прочности при высокой температуре.

Рассмотрим механизм фильтрации двухфазного газового потока сетчатым фильтром с ячейками, большими, чем размер основного количества частиц, содержащихся в двухфазном газовом потоке. Такие сетки задерживают 100% частиц размером больше величины ячейки сетки и изменяющееся по времени количество частиц, меньших, чем величина ячейки сетки.

В начальной стадии большая часть частиц проходит через ячейки фильтра, некоторая часть осаждается на волокнах сетки, причем эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление практически не изменяются на этой стадии во времени. В дальнейшем наступает стадия нестационарной фильтрации, которая характеризуется структурными изменениями в фильтрующем слое. В результате накопления частиц на сетке и других явлений эффективность улавливания и гидравлическое сопротивление повышаются в процессе фильтрации. Стадия нестационарной фильтрации имеет определяющее значение при работе фильтра из-за кратковременности первой стадии.

Осаждение частиц на волокнах проволоки возможно вследствие следующих основных механизмов:

эффекта касания (зацепления) за волокна;

инерционного столкновения — в том случае, когда масса частиц или скорость ее движения настолько значительны, что она не может двигаться по линиям тока газа, которые искривляются при огибании препятствия;

броуновского (теплового) движения высокодисперсных частиц — результата столкновения газовых молекул с поверхностью частиц.

Роль каждого механизма определяется диаметром проволоки, пористостью сетки, размером и плотностью взвешенных частиц, скоростью газового потока и свойствами газов.

На нестационарной стадии поступающие частицы начинают осаждаться преимущественно на уже осажденных. На поверхности сетки образуется сплошной слой частиц, свойства которого и играют в дальнейшей работе фильтра основную роль. Так как количество накопленных на фильтре частиц q за определенный отрезок времени является функцией скорости фильтрации u_f , то увеличение перепада давления при повышении скорости фильтрации пропорционально квадрату этой скорости [72]. Характер зависимости $\Delta p = f(q)$ может быть связан также со структурными изменениями в слое уловленных частиц, с явлением самоуплотнения слоя при движении газа.

Уловленные в фильтре частицы при дальнейшем протекании газа могут быть оторваны от проволок сетки и вынесены из фильтрующего слоя. Вероятность реализации этого явления зависит от величины адгезионных сил, характеризующих взаимодействие между частицами в слое или агрегате. Величина этих сил зависит от размера, формы, химического состава, микрогеометрии поверхности частиц и волокон сетки, времени контакта.

На основании исследований фильтрации промышленных аэрозолей можно сделать следующие качественные выводы для сетчатых фильтров газогенераторов.

1. Эффективность осадений конденсированных частиц на фильтрующей сетке возрастает при уменьшении диаметра проволоки сетки; уменьшении скорости фильтрации (уменьшении удельного объема расхода через единицу поверхности фильтра); увеличении размеров и плотности частиц; уменьшении пористости сетки.

2. Перепад давления будет возрастать при уменьшении пористости фильтрующей среды; увеличении толщины пористого слоя; увеличении скорости фильтрации.

В работах [4, 28, 72] приведен ряд эмпирических зависимостей по эффективности очистки и гидравлическому сопротивлению сетчатых и пористых фильтров. Однако обычно исследования проведены в условиях холодного запыленного воздушного потока, и при применении их для фильтров продуктов сгорания топлив в газогенераторах требуется дополнительная корректировка.

Особая проблема очистки (а также охлаждения) газов возникает при отборе газа для вспомогательных целей из основного двигателя. Проведенные расчеты показали, что в этом случае может быть получена экономия в массе летательного аппарата вследствие того, что: а) продукты сгорания основного топлива имеют более высокую удельную работоспособность, чем типичные продукты газогенерации и б) газы из основного двигателя отбираются лишь по мере потребностей вспомогательных устройств [88]. Однако при этом необходимо удалить из потока относительно большое количество конденсированной фазы (например, жидкой окиси алюминия до 40% по массе) и охладить газ. Требующийся фильтр должен: а) работать в тех же условиях высокого давления и температур, что и основной двигатель; б) иметь достаточную емкость для накопления уловленных частиц и в) иметь многоканальный блок твердого разлагающегося и снижающего в 2—

3 раза температуру вещества (например, оксамида, аминокислотной, винной или янтарной кислот).

В этом случае для более эффективной фильтрации при приемлемых газодинамических потерях целесообразно предварительно способствовать укрупнению, агломерации частиц. С этой целью в газовом тракте предусматриваются участки с расширением площади проходного сечения. На таких участках резко снижается скорость газа, а частицам создаются условия для соударения и затвердевания на поверхности фильтра. При проведении сравнительных испытаний (время работы 10 с) высокой эффективностью очистки продуктов сгорания, содержащих 40% Al_2O_3 , обладала, например, фильтрующая система, состоящая из инерционного, слоистого и пористого фильтров, между которыми два участка с резкими расширениями потока. Определенное значение имеет выбор места отбора продуктов сгорания; при большой скорости потока вдоль стенки, в которой выполняется отверстие для отбора, уменьшается количество конденсированной фазы, поступающей в систему фильтр — охладитель.

2.4. ГАЗОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСТРОЙСТВАХ, ПИТАЕМЫХ ПРОДУКТАМИ ГАЗОГЕНЕРАЦИИ

Рассмотрим основные особенности рабочих процессов в типичных устройствах — потребителях газа: газовой турбине, рулевой машине, наддуваемом баке, а также на обтекаемой поверхности с отверстием вдува.

Мощность газовой турбины. Применяемые в бортовых приводах летательных аппаратов осевые газовые турбины являются, как правило, активными. Поэтому расширение газа происходит полностью в сопле газогенератора (рис. 2.8), и лопатки колеса движутся только за счет кинетической энергии газов. В этом случае мощность, отдаваемая газом турбине, и крутящий момент турбины равны

$$N_{\tau} = u \dot{m} (v_a \cos \alpha_1 - v \cos \alpha_2);$$

$$M_{\tau} = r_{cp} \dot{m} (v_a \cos \alpha_1 - v \cos \alpha_2),$$

где u — окружная скорость лопаток колеса; v_a — скорость истечения газов из сопла; v — скорость газа на выходе из лопаток; α_1 и α_2 — углы между векторами $\vec{u}$ с одной стороны и $\vec{v}_a$ и $\vec{v}$ — с другой.

Для симметричных рабочих лопаток имеем

$$N_{\tau} = \dot{m} v_a^2 \zeta (1 + \psi) (\cos \alpha_1 - \zeta),$$

где $\zeta = u/v_a$; $\psi = \frac{|\vec{v}_a + \vec{u}|}{|\vec{v} - \vec{u}|}$ — коэффициент скорости газа на рабочих лопатках.

Из этой формулы следует, что целесообразно выбирать малые углы α_1 .

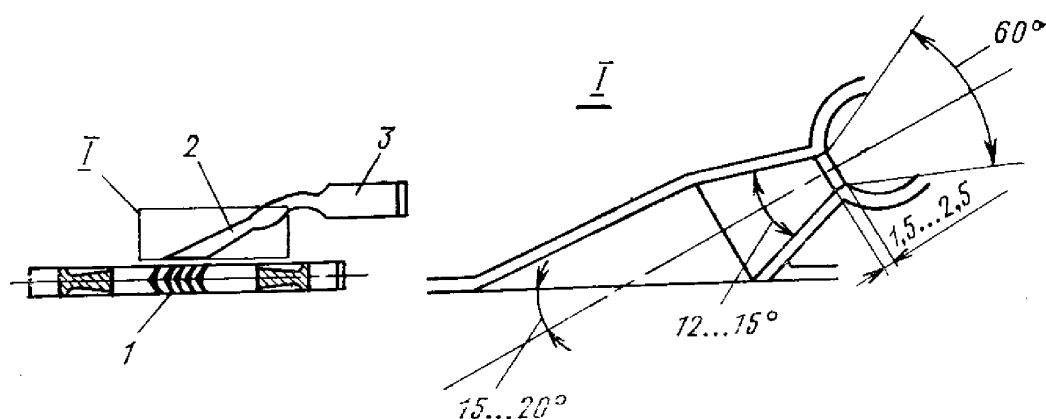


Рис. 2.8. Схема газовой турбины:

1—рабочие лопатки турбины; 2—сопло; 3—газогенератор

Газовые турбины ТНА ЖРД обычно работают на восстановительных продуктах газогенерации, их температура торможения $800 \dots 1200$ К, давление в газогенераторе $3 \dots 10$ МПа, степень расширения газа в сопле $20 \dots 50$, а $\zeta = 0,2 \dots 0,25$ [52]. Давление на выходе из сопла, в которую затем истекают продукты газогенерации, в случае автономных турбин $p_a = 0,2 \dots 0,5$ МПа.

Особенности газогенераторов турбин ЖРД с дожиганием газа изложены в работе [52].

Предкамерная турбина в системе питания ЖРД с дожиганием (см. рис. 2.1) является высокорасходной. Расход газа через нее определяется расходом того компонента, на избытке которого работает газогенератор. Например, в случае окислительного газогенератора расход равен $\dot{m} = \dot{m}_{\text{ок}} + \dot{m}_r = \dot{m}_{\text{ок}} \frac{1+K}{K}$, где $\dot{m}_{\text{ок}}$ — расход окислителя ЖРД; K — соотношение компонентов в газогенераторе.

Поэтому в предкамерных турбинах в отличие от автономных продукты газогенерации подводятся в большинстве случаев по всей окружности рабочего колеса. При этом степень понижения давления в соплах невелика $1,3 \dots 1,8$. Давление на выходе из таких турбин определяется давлением в камере сгорания ЖРД и потерями в магистрали, отводящей газ от турбины в камеру, и составляющими обычно $(10 \dots 15) \cdot 10^5$ Па [52].

Вытеснение жидкости из бака. Для газогенератора системы вытеснения применяют различные топлива; в том числе в случае жидкостной двигательной установки возможно использование одного из компонентов основного топлива, подаваемого электронасосом в газогенератор термического разложения (рис. 2.9).

Такая система реализована в жидкостной двигательной установке конечной ступени ракеты «Минитмен-III». Этот ЖРД малой тяги служит для разведения блоков и состоит из одиннадцати камер, работающих на монометилгидразине и четырехокиси азота. Тяга одной камеры, обеспечивающей приращение скорости, равна 1360 Н, каждая из шести камер управления по тан-

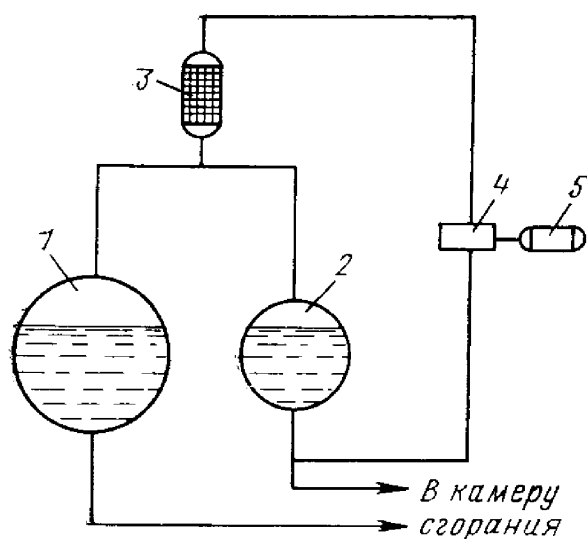


Рис. 2.9. Система подачи жидкого компонента:

1—бак с жидким окислителем; 2—бак с жидким горючим; 3—газогенератор термического разложения; 4—насос; 5—электродвигатель

гажу и рысканию равна 174 Н и каждая из четырех креновых — 82 Н.

В систему вытеснения входят цилиндрические топливные баки, снабженные сильфонными разделительными элементами из нержавеющей стали, и блок газогенерации, включающий шестеренчатый насос с электрическим приводом мощностью 150 Вт и газогенератор термического разложения горючего (монометилгидразина).

Вход насоса соединен с трубопроводом горючего из бака в камеру сгорания. Газовые полости баков имеют предстартовый наддув гелием до давления 1,4 МПа при 10°C.

Горячий газ поступает в баки через одноструйный распылитель со скоростью истечения газа 25,5 м/с в бак с горючим и 43,5 м/с в бак с окислителем (N_2O_4). Перегрев головки сильфона бака горючего устранялся путем установки на ней экрана из нержавеющей стали толщиной 0,6 мм.

Определяющей характеристикой для расчета любого типа вытеснительной системы питания является зависимость изменения давления в топливных баках по времени действия двигательной установки, называемой эпюрой вытеснения.

В вытеснительной системе питания в общем случае могут иметь эпюры вытеснения следующих типов: постоянное давление в баке в течение времени работы двигателя; многоступенчатое изменение давления в баке; снижение по времени давления в баке.

Учитывая это, применяют газогенераторы как с постоянным, так и с переменным расходом.

Расчетный запас газа следует выбирать, исходя из максимальной производительности, возможной при наихудших условиях вытеснения. Поэтому расчетный запас средств газогенерации, как правило, увеличивают на некоторый поправочный эксплуатационный коэффициент.

Избыточное количество газа на некоторых режимах вытеснения может сбрасываться через предохранительный клапан.

В качестве исходных данных для расчета газогенератора системы вытеснения должны быть заданы вещества, служащие для получения газа; давление подачи газа; температура газа на выходе из газогенератора; время работы газогенератора, а также допустимое количество твердой или жидкой фазы, коэффициент избытка окислителя и др.

При вытеснении жидкого компонента из бака происходит изменение параметров и массы газа в баке по времени. Основные методы расчета внутрибачковых процессов приведены в работе [5].

В момент времени $t=0$ начинается наддув бака продуктами газогенерации, состав которых, а также давление p и температура T известны. Пусть $\dot{m}_0$; $\dot{m}_н$; $\dot{m}_к$; $\dot{m}_д$ — соответственно массовые расходы газа, поступающего в бак; испаряющегося компонента; конденсата, выпадающего из рабочего тела наддува внутри бака; газа, удаляющегося через дренажно-предохранительный клапан из бака. Тогда уравнение изменения количества газа в свободном объеме топливного бака имеет вид $dm/dt = \dot{m}_0 + \dot{m}_н - \dot{m}_к - \dot{m}_д$. Наряду с балансом массы необходимо рассмотреть далее энергетический баланс в объеме, в том числе приток энергии из газогенератора $\dot{m}_0 i_0$, потери энергии через дренажный клапан $\dot{m}_д i_д$, тепловые потери в результате теплообмена газа со стенками бака и поверхностью жидкости dQ/dt и т. д. При условии, если потери тепла в газоподводящем канале пренебрежимо малы, состав газа внутри бака не изменяется ($dk/dt=0$); количество рабочего тела, выпадающего в конденсат, пренебрежимо мало ($\dot{m}_к=0$); количество испаряющейся жидкости по сравнению со скоростью поступающего в бак рабочего тела мало ($\dot{m}_н=0$), то уравнения для (dp/dt) ; (dm/dt) , (dQ/dt) и (dp/dQ) соответственно примут следующий вид:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \left[\frac{dQ}{dt} + i_0 \dot{m}_0 - i_д \dot{m}_д - \frac{k}{k-1} p \frac{dV}{dt} \right];$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_0 - \dot{m}_д;$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{V} \left(\dot{m}_0 - \dot{m}_д - Q \frac{dV}{dt} \right);$$

$$\frac{dp}{dQ} = (k-1) \frac{\frac{dQ}{dt} + i_0 \dot{m}_0 - i_д \dot{m}_д - \frac{k}{k-1} p \frac{dV}{dt}}{\dot{m}_0 - \dot{m}_д - Q \frac{dV}{dt}}.$$

На этапе предварительных оценок вместо уравнения энергии можно принять, что удельная работоспособность газов в баке $(RT)_6$ постоянна и равна $(RT)_6 = \chi RT$, где $\chi = 0,2 \dots 0,5$ [3,55] при отсутствии химических реакций и физико-химических превращений на границе раздела (в случае, например, наличия эластичной разделительной диафрагмы). Тогда задача упрощается и сводится к решению системы уравнений газового баланса и состояния.

Пусть, например, жидкий компонент вытесняется продуктами сгорания твердого топлива и перепад давления между газогенератором и свободным объемом V мал. Тогда для определения давления в баке имеем следующее уравнение:

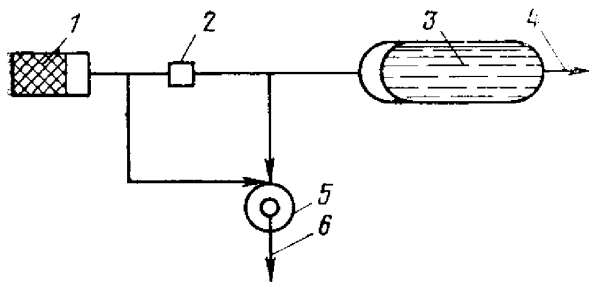


Рис. 2.10. Схема вытеснения жидкого компонента:

1—газогенератор на твердом топливе; 2—дроссель; 3—бак с жидким компонентом; 4—расход жидкого компонента; 5—вихревой клапан; 6—сброс газа

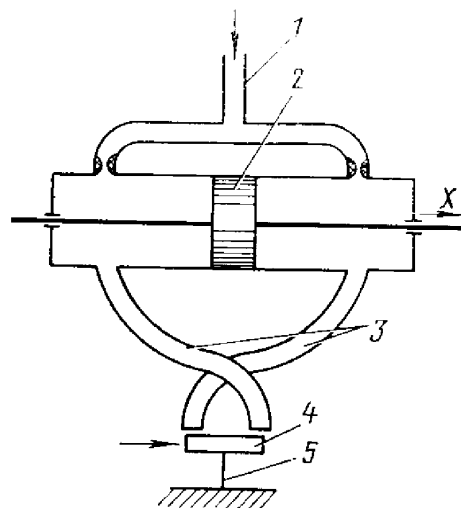


Рис. 2.11. Схема рулевой машины с регулированием на выходе:

1—трубопровод от ресивера газогенератора к рабочим полостям привода; 2—поршень; 3—трубопроводы от рабочих полостей к газовому распределительному устройству (золотнику); 4—золотник; 5—пружина золотника

$$V \frac{dp}{dt} + p \frac{dV}{dt} = \chi u_1 p^\nu Q_T SRT,$$

или
$$V \frac{dp}{dt} + \dot{m}_ж p = \chi u_1 p^\nu Q_T SRT,$$

где S — площадь горения поверхности заряда твердого топлива; $\dot{m}_ж = dV/dt$ — объемный расход вытесняемой жидкости; в общем случае он зависит от давления в баке.

На квазистационарном режиме ($dp/dt \approx 0$) в случае постоянно-го потребного расхода жидкости получим

$$p = \left(\frac{u_1 Q_T S \eta R T}{\dot{m}_ж} \right)^{1/(1-\nu)}.$$

При сложной и нестабильной потребной зависимости расхода вытесняемой жидкости от времени (а также при наличии случайных отклонений остальных определяющих параметров) в системе, работающей при постоянном давлении в баке, необходима установка предохранительного клапана сброса (см. рис. 1.5), в том числе вихревого (рис. 2.10), в который управляющий поток газа поступает из того же газогенератора (газогенератор работает при сверхкритическом режиме истечения).

Заполнение рабочих полостей рулевой машины. Газовый привод включает газогенератор, газопроводы и рулевую машину, в состав которой входят поршневой газовый двигатель и распределительное устройство (рис. 2.11).

Давление, температура и плотность газа в рабочих полостях рулевой машины определяются уравнением состояния, двумя уравнениями энергии ($i=1,2$ — номер рабочей полости);

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V_i} \left(c_p T \dot{m}_i - c_p T_i \dot{m}_i - \frac{k}{k-1} p_i \frac{dV_i}{dt} - \frac{dQ_i}{dt} \right);$$

двумя уравнениями газового баланса:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{1}{V} \left(\dot{m}_i - \dot{m}_i' - Q_i \frac{dV_i}{dt} \right)$$

и уравнением движения поршня

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} = (p_1 - p_2) S_{\Pi} - P_{\Pi},$$

где T — температура торможения газов на входе в рабочие полости; T_i — температура газов на выходе из рабочих полостей; $\dot{m}_i, \dot{m}_i'$ — приход и расход газов из рабочих полостей; dQ_i/dt — теплотери в рабочих полостях; M, S_{Π} — приведенная масса и площадь поршня; P_{Π} — нагрузка.

Для оценки тепловых потерь dQ_i/dt в рабочих полостях принимают [58]

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{\alpha_0}{R} \left(1 - \frac{T_{ci}}{T_i} \right) F_i p_i,$$

где T_{ci} и F_i — температура и площадь стенки рабочей полости, а $\alpha_0 = \text{const.}$

По приведенным уравнениям рассчитываются энергетические характеристики привода на установившихся и переходных режимах работы. На рис. 2.12 иллюстрируется влияние тепловых потерь в газоходах и рабочих полостях на мощность привода со следующими параметрами: площадь поршня 3,14 см²; средние площади поверхностей охлаждения — 15 см²; максимальная мощность при отсутствии теплообмена $N_{\max} = 0,275 \text{ кг} \cdot \text{см/с}$ [58].

При расчете газового привода необходимо учитывать коэффициент расхода, тепловые и газодинамические потери в газовом распределителе: струйной трубке, сопле заслонки, клапане или золотнике (рис. 2.13), а также негерметичность рабочих полостей [85].

Вытеснение поршня пироэнергодатчика. В качестве специального вида твердотопливных газогенераторов можно рассматривать различные пироэнергодатчики: пиротолкатели, пироклапаны, гидравлические аккумуляторы и катапульти с пироприводом, пиро-резак и т. п. Заряд пиротехнического топлива в этих устройствах сгорает в замкнутом объеме, ограниченном стенками корпуса и подвижным поршнем. Пироэнергодатчики выделяются относительно высоким давлением в объеме с относительно малыми величинами массы топлива, времени работы и скорости течения газов. При таких давлениях необходим учет собственного объема молекул газа (ковольума α); кроме того, для пироэнергодатчиков характерны высокие темпы нарастания давления в объеме dp/dt (см. табл. 2.1) [12].

Энергия продуктов сгорания пиротехнического заряда расходуется на кинетическую и потенциальную энергии поршня, на работу нагрузки и сил трения, на теплотери в стенки (и также на пренебрежимо малую кинетическую энергию рабочего тела).

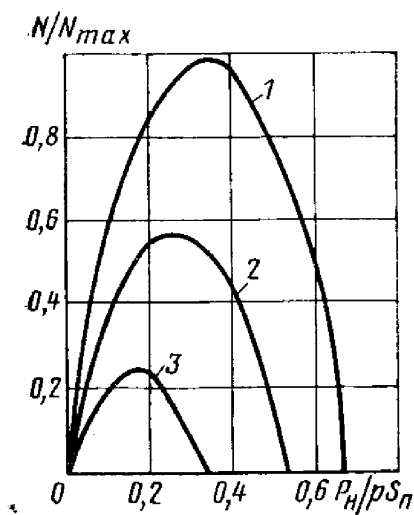


Рис. 2.12. Мощностная характеристика газового привода:

1—при отсутствии тепловых потерь; 2—тепловые потери в рабочих полостях ($\alpha_0=6$); 3—тепловые потери в полостях и газоходе ($\alpha_0=6$, коэффициент, характеризующий тепловые потери в газоходе, 0,71)

Обычно теплотери и реальная удельная работоспособность оцениваются по результатам испытаний аналогичных изделий и в расчетах температура рабочего тела предполагается постоянной. Коэффициент полезного действия пироэнергодатчиков порядка 10% [12].

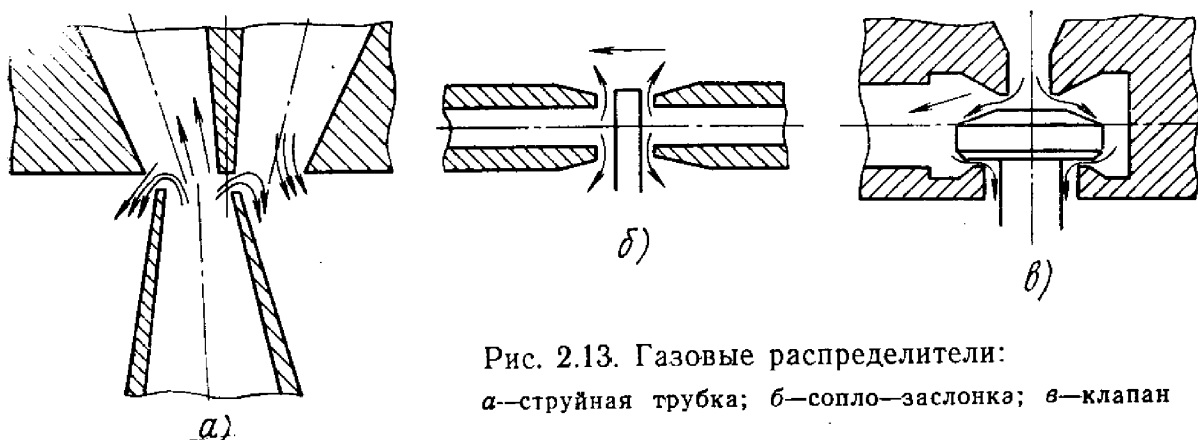


Рис. 2.13. Газовые распределители:

а—струйная трубка; б—сопло—заслонка; в—клапан

Таблица 2.1

Характеристики пироэнергодатчиков

Топливо	Удельная работоспособность, кДж/кг	α	dp/dt , ГПа/с
Бездымный порох	870...980	1,24	20
Смесь 50 : 25 : 25	720	1,18	130
Черный порох	210...280	0,99	2
Свинцовая соль	210	0,71	7

Горение заряда заканчивается либо еще до начала трогания поршня, либо в процессе его движения. В первом случае в процессе движения поршня происходит расширение продуктов сгорания и работа равна

$$mL_{ад} = \frac{k}{k-1} m\chi RT \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

причем масса газов равна массе заряда пиротехнического топлива.

Для внутрибаллистического расчета пироэнергодатчика во втором случае необходимо интегрирование системы уравнений движения поршня, состояния (с учетом коволюма и теплопотерь) и горения пиротехнического заряда:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = pS_{\Pi} - F_{\text{тр}} - P_{\text{н}} - Mg \sin \theta;$$

$$V = V_0 + xS_{\Pi}; \quad p(V - \alpha m) = m\chi RT; \quad \dot{m} = q_{\text{т}} u(p) S; \quad \frac{de}{dt} = u(p).$$

Например, по заданной зависимости $\ddot{x}(t)$ для каждого момента времени последовательно вычисляются p , V и потребные значения m , $u(p)$, $S = \dot{m}/q_{\text{т}} u(p)$ и e [12].

Коэффициент усиления при вдуве поперечной струи в сверхзвуковой поток. Если через отверстие в стенке сопла втекает в поток вторичная струя газа (или жидкости), то часть потока отклоняется от стенки, а около отверстия образуется зона повышенного давления. При этом возникает боковая сила, которая складывается из импульса вторичной струи и равнодействующей сил давления в области отрыва потока.

Вторичная струя газа воздействует на основной поток как источник массы, количества движения и энергии.

Рассмотрим поток в плоском сверхзвуковом сопле (с выходным сечением высотой H), а также воздействие на этот поток вторичной струи, бесконечно малой интенсивности $\dot{dm}$. Размеры возмущенной области ограничены линией Маха, отходящей от начала этой области под углом α и заканчивающейся на противоположной кромке выходного среза. Длина области равна

$$l = H \operatorname{ctg} \alpha = H \operatorname{ctg} \arcsin \frac{1}{M} = H \sqrt{M^2 - 1}.$$

Повышение давления в потоке вследствие ввода массы $\dot{dm}$ под углом β к оси сопла оценим по теории одномерных потоков

$$\begin{aligned} \frac{dp}{p} = \frac{kM^2}{M^2 - 1} \left\{ \frac{di}{c_p T} + 2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \frac{d\dot{m}}{\dot{m}} - \right. \\ \left. - [1 + (k-1) M^2] \frac{v_{\text{вт}} \cos \beta d\dot{m}}{v\dot{m}} - \frac{dN}{N} \right\}, \end{aligned}$$

где i и p — энтальпия и давление потока; $v = Ma$ — скорость потока; $v_{\text{вт}}$ — скорость вторичной струи; $v_{\text{вт}} \cos \beta$ — осевая составляющая скорости вторичной струи; N — молекулярная масса.

Равнодействующая сил давления по возмущенной области длиной

$l = H \sqrt{M^2 - 1}$ равна $dP_{yp} = l dp$, а боковая сила равна

$$dP_y = l dp + v_{\text{вт}} \sin \beta d\dot{m}_{\text{вт}} + (p_{\text{вт}} - p) dF_{\text{вт}},$$

где $p_{\text{вт}}$ — давление во вторичной струе; $F_{\text{вт}}$ — площадь отверстия вдува; p — давление в потоке в месте вдува.

Из результатов расчета вдува продуктов сгорания твердого топлива в основной поток ($k=1,24$, $T=3000$ К, $M=2,5$) следует, что коэффициент усиления при $\beta=90^\circ$ равен

$$K_y = \frac{dP_y}{v_{\text{вт}} d\dot{m} + (p_{\text{вт}} - p) dF_{\text{вт}}} \approx 2,4.$$

Увеличение K_y можно получить при вдуве в поток реагирующих с ним веществ.

Картина отклонения части сверхзвукового потока вторичной струей аналогична картине обтекания препятствия, установленного на стенке. Перед проходящей по всему плоскому соплу поперечной щелью, через которую вдувается вторичная газовая струя, образуется отрывная зона с возвратными течениями. Повышение давления в косом скачке, отходящем от вершины клинообразной отрывной зоны, приблизительно равно $p_2/p_1 \approx 1 + 0,5M$, где M — число M перед линией отрыва, а длина пропорциональна высоте проникновения вторичной струи: $l \approx (4,2 \dots 4,5) h_{\text{вт}}$. Высоту проникновения $h_{\text{вт}}$ можно определить из равенства количества движения струи в поперечном направлении ее сопротивлению основному потоку, т. е.

$$\dot{m}_{\text{вт}} v_{\text{вт}} = [(1 + \psi_2) p_2 - \psi_1 p_1] h_{\text{вт}},$$

где $(1 + \psi_2) p_2$ — среднее давление на переднюю грань контрольной поверхности, ограничивающей вторичную струю, причем

$$\psi_2 \approx 0,05 \frac{kM_1^2}{1 + (k-1)M_1^2/4};$$

ψ_1 , p_1 — среднее давление на заднюю грань ($\psi_1 \approx 1$).

Таким образом, для коэффициента усиления в пустоте имеем

$$K_y = \frac{R_y}{(R_{\text{вт}})_\infty} = \frac{2,2M_1 k \lambda_{\text{вт}}}{(k+1)[(1+\psi_2)(1+0,5M_1) - \psi_1] z(\lambda_{\text{вт}})} + \frac{R_{\text{вт}}}{(R_{\text{вт}})_\infty}.$$

При вдуве азота в воздушный поток коэффициент по формуле, приведенной выше, дает значения 2,9 ... 3,2 при $M_1=2 \dots 6$. Эти значения хорошо согласуются с данными специальных опытов.

В реальных соплах вдув вторичной струи осуществляется через отверстия в щели ограниченной длины. При этом возникают течения в направлении, параллельном щели, и вторичная струя обтекается не только сверху, но и с боков. Картина течения с учетом трехмерных эффектов существенно усложняется. Ведущая роль в определении газодинамических характеристик струйных органов управления вектором тяги принадлежит эксперименту.

Влияние трехмерных и нелинейных эффектов приводит к тому, что значения коэффициента усиления уменьшаются при увеличении относительного расхода вторичной струи $\dot{m}_{\text{вт}}/\dot{m}$ (табл. 2.2). Относительная боковая сила P_y/P сначала растет с увеличением $\dot{m}_{\text{вт}}/\dot{m}$, достигает максимума при некотором его значении, а затем уменьшается при дальнейшем росте $\dot{m}_{\text{вт}}/\dot{m}$. Например, для рассмотренного в табл. 2.2 ЖРД с $\dot{m}=7,25$ кг/с $(P_y/P)_{\text{max}}=0,077$ при $\dot{m}_{\text{вт}}/\dot{m}=0,07$. При слишком большой интенсивности вдува возмущенная область захватывает газовые слои вблизи противоположной поверхности сопла, и давление существенно повышается на таких участках сопла, на которых создается боковое усилие в направлении вторичной струи. Наибольшее значение боковой силы получается тогда, когда возмущенная область занимает приблизительно половину проходного сечения сопла (рис. 2.14). На

рабочем участке возмущенную пристеночную область можно разделить на две части: вверх и вниз по течению от отверстия вдува, находящегося на расстоянии $l_{\text{вт}}$ от выходного среза сопла. Коэффициент усиления для первой части области, характеризуемой отрывом потока перед струей, оказывается постоянным и равным 1,5...1,8. А коэффициент усиления для второй части области зависит от ее длины и увеличивается пропорционально $\sqrt{l_{\text{вт}}/d}$ (d — эквивалентный диаметр отверстия). Такой характер зависимости $K_y(l_{\text{вт}}/d)$ аналогичен зависимости давления от расстояния при обтекании затупленного цилиндра [36]. В результате анализа экспериментальных данных получаем

$$K_y = 1,6 [0,1 \sqrt{l_{\text{вт}}/d} + 0,9] (\sin \beta - 0,84 \cos \beta).$$

Т а б л и ц а 2.2.

Характеристики системы вдува

Параметр	Относительный расход вдуваемого газа				
	0,03	0,05	0,07	0,09	0,18
P_y/P	0,05	0,065	0,077	0,07	0,045
K_y	2	1,6	1,4	0,9	0,3

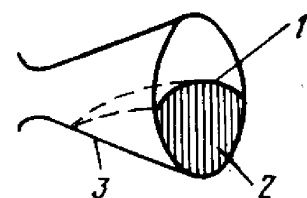


Рис. 2.14. Схема течения при наибольшей допустимой интенсивности вдува:

1—ударная волна; 2—возмущенная область; 3—место вдува

Рассмотрение газотермодинамических процессов в устройствах, потребляющих продукты газогенерации, позволяет установить ряд специфических особенностей газогенераторов и обоснованно формулировать технические требования к ним.

Жидкостные газогенераторы

3.1. ОДНОКОМПОНЕНТНЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР

Жидкостные газогенераторы широко применяются в ракетных системах и подробно описаны в литературе [2, 23, 55]. Большой опыт их создания и эксплуатации используется при разработке новых регулируемых и различных комбинированных схем. Кратко рассмотрим основные схемы одно-, двух- и трехкомпонентных газогенераторов.

Для газогенераторов на однокомпонентном жидком топливе основными условиями, определяющими возможность использования этого топлива, являются: способность к каталитическому или термическому разложению в условиях работы газогенератора; устойчивость протекания процессов разложения (постоянство давления, температуры химического состава и т. д.) в газогенераторе; достаточно высокая удельная работоспособность.

Термическое разложение компонента происходит под действием тепла, получающегося за счет энергии разложения ранее поступивших порций или подводимого от внешнего источника.

Каталитическое разложение может осуществляться как путем подачи компонента на активную поверхность твердого катализатора, размещенного во внутреннем объеме газогенератора, так и путем ввода жидкого катализатора. Газогенератор первого типа называется газогенератором с твердым катализатором, второго типа — с жидким катализатором. При создании однокомпонентного газогенератора с твердым катализатором необходимо рассматривать физико-химические и гидродинамические процессы при течении парогазовой смеси переменного состава вокруг отдельных зерен, в пакете катализатора и в объеме газогенератора.

Расчет количества катализатора выполняется из условий обеспечения разложения заданного секундного расхода компонента $m_k = \dot{m}/S$, где m_k — масса катализатора; $\dot{m}$ — секундный расход компонента; S — допустимая секундная нагрузка компонента на 1 кг катализатора.

Величина S выбирается на основании экспериментальных данных. Например, для разложения 80% перекиси водорода твердым катализатором, состоящим из перманганата кальция и хромовокислого калия, $S = 2,5 \dots 2,6$; для жидкого катализатора, состоящего из 28% водного раствора перманганата натрия (NaMnO_4), $S = 12 \dots 15$.

Если во время работы газогенератора имеет место расход катализатора (частичная реакция с образованием побочных продуктов или просто унос катализатора с генерируемым газом), количество катализатора должно быть проверено из условия обеспечения ресурса. При работе необходимо обеспечить надлежащий тепловой режим каталитического пакета и топлива с тем, чтобы избежать преждевременного разложения топлива (в головке) или разрушения катализатора из-за чрезмерных термических нагрузок.

Объем пакета катализатора V_K определяется по насыпной плотности катализатора ρ_K : $V_K = Q_K / \rho_K$. По данным работы [23], для некоторых существующих катализаторов $\rho_K = 1,3 \dots 1,4$.

Эффективный объем газогенератора определяет полноту разложения топлива и, следовательно, химический состав и температуру газа на выходе из газогенератора.

Эффективный объем определяется временем пребывания компонента в газогенераторе $\tau_{\text{гг}} = V_{\text{гг}} \rho / \dot{m}$, где $V_{\text{гг}}$ — эффективный объем газогенератора; ρ — плотность газа в газогенераторе.

Время пребывания, в свою очередь, определяется условиями протекания реакции разложения в данном типе газогенератора и находится экспериментально. Для большинства топлив, используемых в однокомпонентном газогенераторе, можно принять $\tau_{\text{гг}} = (0,8 \dots 5,0) \cdot 10^{-3}$ с.

Полный объем газогенератора V определяется как сумма эффективного объема — $V_{\text{гг}}$, объема, занимаемого катализатором, — V_K , и конструктивного объема, равного объему, заключенному между головкой и поверхностью катализатора $V_{\text{п}}$:

$$V = V_{\text{гг}} + V_K + V_{\text{п}}.$$

По данным работы [23], $V_{\text{гг}} = 0,75 V_K$; $V_{\text{п}} = 0,25 V_K$; $V \simeq 2 V_K$.

Площадь пакета катализатора определяется исходя из абсолютной расходонапряженности катализатора $F = \dot{m} / j_F$, где j_F — абсолютная расходонапряженность катализатора.

Для проектной оценки объема и размеров газогенератора можно использовать опытно-статистические параметры, приведенные в работе [23]:

$$t_{\text{гг}} = \frac{p V_{\text{гг}}}{R T \dot{m}} \simeq (5 \dots 10) \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad j_F = \frac{\dot{m}}{F} \simeq 5 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Перекись водорода и гидразин разлагаются в присутствии соответствующих катализаторов с выделением тепла и образованием высокотемпературного рабочего тела, не содержащего твердых частиц, углерода и т. д.

На рис. 3.1 приведены массовые и объемные доли продуктов разложения, а также значения средней молекулярной массы μ парогаса при разложении перекиси водорода различной концентрации.

Гидразин в присутствии катализаторов разлагается с выделением тепла и образованием газообразных продуктов, в которые вхо-

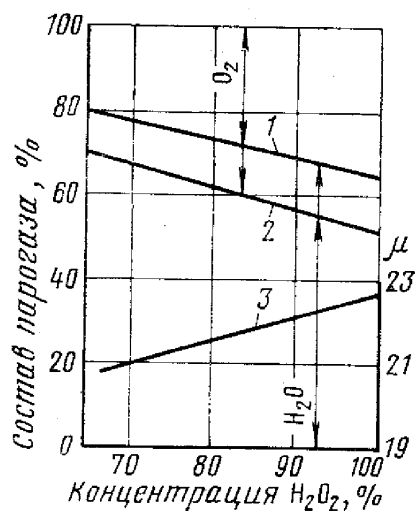


Рис. 3.1. Состав и молекулярная масса продуктов разложения перекиси водорода различной концентрации:

1—объемный состав; 2—массовый состав; 3—молекулярная масса

шения $L = 36,5 - 1,07 p + 30,5 G^{0,45}$.

Из экспериментов следует, что перепад давления на пакете катализатора определяется зависимостью

$$\Delta p = 0,00639 G^{2,2} L^{1,7} / p.$$

В работе [23] анализируются различные способы подачи гидразина к пакету катализатора. Для исключения перегрузки и повышенной эрозии некоторой части катализатора целесообразно введение гидразина в слой катализатора с помощью 2...4 шприцев на различную глубину или с помощью капиллярной трубки, обеспечивающей дробление струи при ударе о поверхность катализатора и равномерное распределение гидразина в его слое, а также применение гранул разной дисперсии (патент США № 4069664). Для времени пребывания 0,005 ... 0,01 с параметры рабочего тела характеризуются следующими средними значениями [5]:

$$T = 1360 \text{ К}; R = 559 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); k = 1,27.$$

Несимметричный диметилгидразин (НДМГ) разлагается при нагреве до 625 К [84]. Начало разложения наблюдается при температуре 400 К. С увеличением температуры увеличивается интенсивность разложения, и при температуре разложения около 775 К происходит взрыв.

На процесс разложения НДМГ влияют: время пребывания продукта в зоне разложения, величина и характер первоначального теплового импульса, конструктивная схема газогенератора. В патенте США № 3086945 предлагается разлагать НДМГ в газовой фазе на платиносодержащих катализаторах, нанесенных на

дят аммиак, азот и водород. Характер процесса каталитического разложения гидразина довольно сложен и зависит от геометрической формы и размеров камеры разложения, характеристик катализатора, времени разложения и других факторов.

Время пребывания гидразина в каталитическом пакете зависит от длины пакета, давления и расходонапряженности. Выбором длины камеры разложения и времени пребывания топлива в каталитическом пакете можно регулировать процесс разложения аммиака и изменять температуру рабочего тела до 900...1500 К.

На основании экспериментальных исследований получена зависимость для определения степени разложения аммиака $1 - x = G^{0,86} \tau_{\text{п}} / p$, где G — плотность тока гидразина $\text{кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $\tau_{\text{п}}$ — время пребывания; p — давление в камере. Для полного разложения гидразина длина пакета L выбирается с помощью эмпирического соотно-

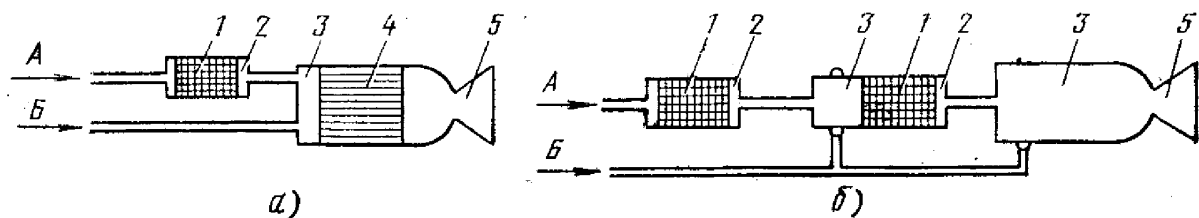


Рис. 3.2. Схема газогенераторов каталитического и термического разложения однокомпонентного жидкого топлива:

а—двухкаскадный (двухкамерный) газогенератор; б—трехкаскадный газогенератор; 1—катализатор разложения топлива; 2—камера каталитического разложения; 3—камера термического разложения; 4—тепловой аккумулятор; 5—сопло; А и Б—подвод топлива

асбест, при начальной температуре 373...423 К и при условии, что давление в системе менее 3,5 МПа. Кроме асбеста в качестве носителя для катализатора рекомендуются двуокись титана, окиси циркония, алюминия, кремния, магния, уголь и кремнеалюминиевые соединения.

Предварительный нагрев пакета катализатора может осуществляться продуктами сгорания, например, пороховой шашки. В качестве катализатора разложения гидразина и его моно- и диметилпроизводных (патент США № 3710573) предложено использовать активированный древесный уголь, силикагель и активную окись алюминия, обработанные N_2O_4 или $POCl_3$. Активированный уголь обрабатывается N_2O_4 при соотношении 7:3 и отсутствии воздуха. При контакте НДМГ с таким катализатором происходит его воспламенение, в результате чего катализатор разогревается до температуры, обеспечивающей разложение; после выгорания N_2O_4 температура катализатора поддерживается за счет положительного тепловыделения реакции разложения.

При большом расходе рабочего тела рационально применять газогенератор термо-каталитического разложения однокомпонентного топлива (двухкамерный, рис. 3.2, а). В камеру с катализатором поступает приблизительно 5...15% основного расхода распыленного топлива, а остальная часть топлива подается в основную камеру, в которой оно разлагается термически [патент США № 3772885]. Разложение топлива может осуществляться также в трехкаскадном реакторе (см. рис. 3.2, б), в котором в первом каскаде применяют каталитическое разложение, например, 11% расхода топлива; во втором каскаде — термическое разложение 22% топлива с пропуском полученных продуктов разложения 33% топлива через катализатор, для обеспечения полного разложения в третьем каскаде — термическое разложение 67% расхода топлива в продуктах разложения [патент США № 3772885].

Выход газогенератора на режим в значительной степени зависит от его конструкции, начальной температуры каталитического пакета, объема между седлом клапана и каталитической камерой, а также от промежутка времени между запусками. Основными требованиями к режиму запуска являются плавность изменения давления в камере, снижение количества топлива, расходуемого при запуске, уменьшение времени запуска.

В работе [6] приведена примерная длительность отдельных процессов, происходящих при запуске и остановке газогенератора на однокомпонентном жидком топливе.

1. При подаче командного электрического сигнала и включении газогенератора:

открытие клапана ... примерно, 0,005 с;

заполнение клапанной полости, контактирование топлива с катализатором ... примерно, 0,030 с;

физико-химические процессы, связанные с разложением топлива и возрастанием давления в камере до 10% от номинального значения ... примерно, 0,005 с;

повышение давления в камере от 10 до 90% от номинального значения ... примерно, 0,010 с.

2. При снятии командного электрического сигнала:

закрытие клапана и прекращение подачи топлива ... приблизительно 0,005 ... 0,001 с;

спад давления в камере до 10% от номинального значения из-за постепенного испарения топлива, оставшегося в заклапанной полости газогенератора после закрытия клапана ... 0,050 ... 0,100 с.

После окончания первого импульса тепло из каталитического пакета теряется за счет проводимости и радиации, и только часть его удерживается к моменту начала второго импульса. Через 10 ... 20 импульсов устанавливается стационарный импульсный режим.

3.2. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР

Рабочие характеристики газогенератора на двухкомпонентном жидком топливе зависят от физико-химических свойств топлива, параметров системы подачи (скорость течения компонентов, их температура на входе в газогенератор, геометрические размеры магистрали, гидравлическое сопротивление и состояние поверхности трактов), параметров смесительной головки (тип и геометрические размеры форсунок, число форсунок окислителя и горючего, перепад давления, угол распыла, соотношение компонентов топлива), параметров камеры (давление в ней, время пребывания, форма и геометрические размеры, конструкция стенки и материалы, демпфирующие устройства, распределение расхода между ядром и пристеночным слоем). Эти параметры определяют экономичность, устойчивость и работоспособность газогенератора [84, 86].

Процессы в камере сгорания двухкомпонентного газогенератора отличаются от применяемой в расчетах идеализированной схемы. Эти отличия обусловлены неоднородным распределением компонентов топлива по поперечному сечению камеры из-за малого числа смесительных элементов и неполнотой горения.

Процесс горения в двухкомпонентном газогенераторе может проходить при избытке горючего или окислителя.

При этом нужно иметь в виду следующие обстоятельства.

1. Удельная работоспособность (RT) восстановительного газа при работе на углеводородных топливах при равных температурах выше удельной работоспособности окислительного газа.

2. При использовании окислительного газа предъявляются дополнительные требования повышенной стойкости к конструктивным элементам, соприкасающимся с горючим газом.

3. При генерации восстановительного газа в ряде случаев на выходе из газогенератора могут появляться твердые продукты газогенерации, откладывающиеся в проходных сечениях газового

тракта и вызывающие повышенный эрозионный износ конструктивных элементов, соприкасающихся с газом.

Термодинамические расчеты показывают, что при одной и той же температуре и постоянном допуске на соотношение компонентов скорость изменения температуры различна в областях малых и больших коэффициентов избытка окислителя α . Сжигание двухкомпонентного топлива в газогенераторах выгодно при малых α , т. е. при избытке горючего.

Для двухкомпонентных газогенераторов лучше применять самовоспламеняющиеся топлива или активизировать один из компонентов несамовоспламеняющегося топлива. Однако даже в этом случае, организация надежного воспламенения и затем устойчивого горения при больших избытках одного из компонентов топлива представляет большие трудности. Особенно остро эта проблема встала при создании регулируемых газогенераторов. При этом приходится решать вопрос обеспечения устойчивости подачи топлива и его сгорания.

Низкочастотная (частоты менее 100 Гц) и высокочастотная (частоты 1000 Гц и более) неустойчивость горения в камере газогенератора характеризуется неуправляемыми изменениями давления, изменениями температуры и колебаниями расхода топлива в зависимости от времени работы газогенератора. Амплитуда низкочастотных колебаний может достигнуть 30...50%, а высокочастотных — 100% от давления в камере.

Если наиболее вероятные тона колебаний известны, то определенными химическими, газодинамическими или конструктивными мероприятиями можно: а) уменьшить подвод энергии к колебательному процессу путем изменения времени запаздывания горения или скорости горения; б) увеличить способность системы поглощать или рассеивать энергию или в) изменить резонансные частоты камеры.

К конструктивным усовершенствованиям можно отнести, например, следующие: а) подвод в камеру тангенциальных потоков; б) изменение профиля расхода напряженности по форсуночной головке; в) изменение ее конструкции или смесительного элемента; г) изменение размеров и расположения форсунок; д) изменение форм камеры; ж) введение в конструкцию дефлекторов вблизи форсуночной головки и акустических демпферов.

Наиболее простым типом двухкомпонентного газогенератора является однокаскадный газогенератор, у которого весь расход компонентов топлива вводится в одном поперечном сечении через одну головку.

Недостатком такого газогенератора является сложность обеспечения устойчивого горения при работе на смесях, резко отличающихся от стехиометрической.

Более удобным в доводке является второй тип газогенератора, изображенный на рис. 3.3. Здесь в зону головки подается горючее и окислитель в соотношении, надежно обеспечивающем воспламенение и устойчивое горение, т. е. близком к стехиометрическому.

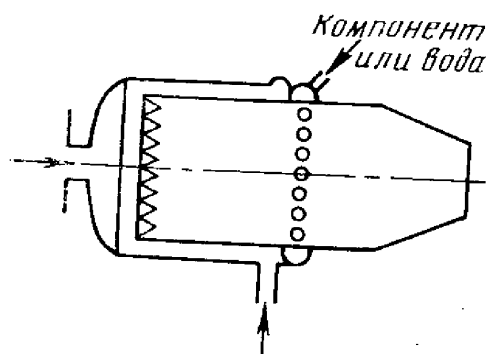


Рис. 3.3. Схема двухступенчатой подачи топлива в газогенератор

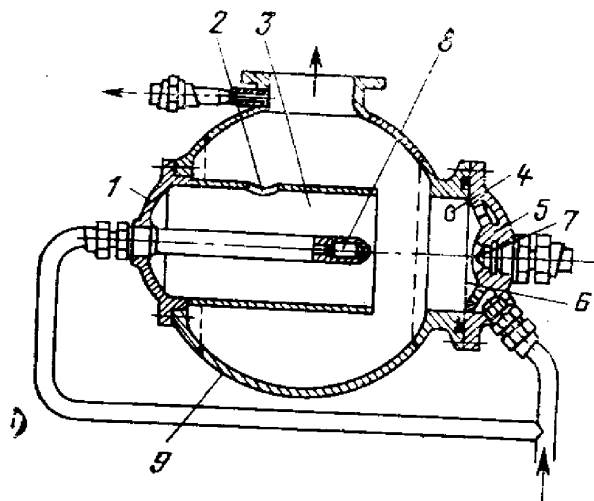


Рис. 3.4. Жидкостной газогенератор со сферической камерой:

1—головка цилиндрической камеры; 2—окно; 3—цилиндрическая камера; 4—воспламенитель; 5—форсуночная головка камеры; 6—форсунки горючего; 7—распылитель окислителя; 8—вихревая форсунка горючего; 9—шаровой корпус

Через дополнительный пояс подается необходимый для соответствующего понижения температуры избыток одного из компонентов.

Термодинамические показатели генерируемого этим способом газа на выходе из камеры будут отличаться от термодинамических показателей для газа, полученного при том же общем значении α в одноступенчатой схеме. Для расчета схемы с двухступенчатым подводом топлива необходимы экспериментальные данные о сложном процессе испарения и частичного сгорания избыточного компонента, а также о степени равновесности итогового состава газовой смеси. Жидкостной газогенератор двухступенчатой схемы со сферической камерой показан на рис. 3.4. [47].

На сферической неохлаждаемой форсуночной головке 5 по периферии расположены концентричными рядами форсунки горючего 6, а в центре — распылитель 7 с форсунками, впрыскивающими окислитель в радиальном направлении. Если топливо не самовоспламеняющееся, то применяется воспламенитель 4. Газы от головки попадают во внутреннюю цилиндрическую одностенную камеру 3. В центре этой камеры на некотором удалении от головки установлена вихревая форсунка горючего 8. Через нее подается в камеру около 8...10% горючего. Отбор газов из цилиндрической камеры производится через окно 2, а к потребителю, например, турбине, газ поступает через патрубок на сферическом неохлаждаемом корпусе газогенератора 9. Такая конструкция обеспечивает хорошее перемешивание продуктов сгорания и некоторое уменьшение сажи в продуктах сгорания, истекающих к потребителю. Для газогенератора, вырабатывающего восстановительный газ, время пребывания, с одной стороны, должно быть достаточ-

ным для того, чтобы был завершен процесс испарения и разложения избыточного горючего, с другой стороны, при слишком большом времени пребывания и установления химически равновесного процесса из паров горючего могут образоваться побочные продукты с большой молекулярной массой (кокс, тяжелые смолы), что помимо снижения газовой постоянной может привести к зашлаковке газового тракта. Для того чтобы этого избежать, в газогенераторах, генерирующих восстановительный газ, заведомо стремятся к созданию химически неравновесного рабочего процесса путем задания меньшего времени пребывания. Для каждого топлива при заданной температуре газа и конструктивном типе газогенератора время пребывания подбирается экспериментально из условия получения наибольшего значения удельной работоспособности.

Обычно при температуре газа порядка 1000...1200 К время пребывания топлива в однокаскадном газогенераторе можно принять равным $\tau_{\text{п}} = 0,004 \dots 0,008$ с.

Соответственно объем газогенератора определяется из зависимости $V = \tau_{\text{п}} \dot{m} / \rho$, где V — объем газогенератора; $\dot{m}$ — секундный массовый расход компонентов газогенерации; ρ — средняя плотность газа в газогенераторе.

Объем газогенератора с дополнительным поясом складывается из объема зоны горения $V_{\text{г}}$ и объема зоны испарения $V_{\text{и}}$:

$$V = V_{\text{г}} + V_{\text{и}}.$$

Величины $V_{\text{г}}$ и $V_{\text{и}}$ связаны с необходимым временем пребывания в соответствующих зонах $\tau_{\text{п.г}}$ и $\tau_{\text{п.и}}$ и расходами через них $\dot{m}_{\text{г}}$ и $\dot{m}_{\text{и}}$ уравнениями, аналогичными уравнению для V :

$$V_{\text{г}} = \frac{\tau_{\text{п.г}} \dot{m}_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}}; \quad V_{\text{и}} = \frac{\tau_{\text{п.и}} \dot{m}_{\text{и}}}{\rho_{\text{и}}}.$$

Здесь $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{и}}$ — плотность газа в зонах горения и испарения.

Расход через зоны горения $\dot{m}_{\text{г}}$ и испарения $\dot{m}_{\text{и}}$ определяется по формулам $\dot{m}_{\text{г}} = \frac{K_0 + 1}{K + 1} \dot{m}$; $\dot{m}_{\text{и}} = \frac{K - K_0}{K + 1} \dot{m}$ — для газогенератора, вырабатывающего окисленный газ ($\alpha > 1$).

По формулам $\dot{m}_{\text{г}} = \frac{K(K_0 + 1)}{K_0(K + 1)} \dot{m}$; $\dot{m}_{\text{и}} = \frac{K_0 - K}{K_0(K + 1)} \dot{m}$ — для газогенератора, вырабатывающего восстановительный газ ($\alpha < 1$).

Здесь K_0 — соотношение компонентов топлива в зоне горения; K — соотношение компонентов топлива, расходуемого газогенератором.

Время пребывания топлива в зоне горения можно принять $\tau_{\text{п.г}} = 0,002 \dots 0,004$ с. Время пребывания в зоне испарения определяется временем испарения избыточного компонента. В первом приближении при диаметре капель ≤ 60 мкм и температуре газа на выходе из газогенератора не меньше 1100 К можно принять $\tau_{\text{п.и}} = 0,001 \dots 0,003$ с.

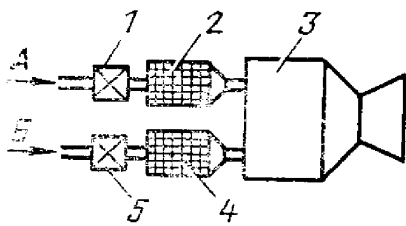


Рис. 3.5. Схема трехрежимного двухкомпонентного ЖРД малой тяги:

1, 5—электрические клапаны подачи компонентов топлива; 2—газогенератор окислительного газа; 3—камера сгорания; 4—газогенератор восстановительного газа; А—подача перекиси водорода; Б—подача гидразина

Величина K_0 выбирается таким образом, чтобы обеспечить устойчивое горение и равномерную по сечению температуру в зоне горения.

При применении в качестве горючего гидразина возможна конструкция двухрежимного газогенератора, у которого минимальный режим обеспечивается за счет разложения гидразина, а режим увеличенного расхода при подаче в камеру сгорания второго компонента, например, четырехоксида азота.

На рис. 3.5 представлена схема трехрежимного двухкомпонентного ЖРД малой тяги; на одном режиме работает газогенератор на гидразине; на другом — газогенератор на перекиси водорода; на третьем — продукты газогенерации поступают в камеру двигателя, где они сгорают.

Для получения рабочего тела, необходимого для стендовой отработки элементов конструкций ракетных двигателей с определенными свойствами — температурой, составом продуктов сгорания, отношением теплостойкостей и т. д., к основному топливу могут добавляться другие вещества и, следовательно, газогенератор становится трехкомпонентным. Например, для значительного снижения температуры добавляется балластный компонент — вода. Добавка воды непосредственно к тем компонентам топлива, которые образуют с ней истинные растворы (спирт, азотная кислота, перекись водорода), понижая температуру продуктов сгорания, имеет то преимущество, что сохраняется топливо двухкомпонентным и не усложняет конструкцию. Однако для достижения относительно низких температур газа может потребоваться весьма значительное количество воды, и такой способ реализовать не удастся (либо из-за ограничений по взаимной растворимости компонентов топлива и воды, либо из-за трудности организации надежного воспламенения и горения сильно забалластированного топлива). Самостоятельный ввод воды в камеру сгорания через специальные форсунки (см. рис. 2.2) позволяет в более широких пределах изменять температуру продуктов.

Запуск газогенератора на самовоспламеняющихся компонентах (табл. 3.1) осуществляется аналогично ЖРД на таких же компонентах, воспламенение не-самовоспламеняющихся в обычных условиях топливных пар можно обеспечить каталитическим воздействием или введением в один из компонентов активизирующих присадок. Эти присадки, кроме того, могут повышать устойчивость процесса. К таким присадкам могут относиться как жидкие, так и твердые активные вещества. Например, суспензии боргидридов калия и лития или гидрида лития в керосине обеспечивают самовоспламенение при небольшом (до 2%) содержании активных веществ [3,84].

Важнейшей количественной характеристикой самовоспламенения является задержка самовоспламенения — время от момента соприкосновения жидких самовоспламеняющихся компонентов до момента появления пламени τ_3 . Величина за-

держки воспламенения зависит как от физико-химических характеристик топлива, так и условий, в которых протекает процесс сгорания (режимы работы и конструкция газогенератора). От величины τ_z существенно зависит надежность переходных режимов работы газогенератора: запуск и ступенчатое изменение режима. Уменьшить задержку воспламенения самовоспламеняющихся топлив можно путем добавки в них небольшого количества специальных присадок, например, кислотсодержащих металлических соединений (пятиокись ванадия, сернистое серебро, пятиокись тантала и некоторые др.).

Таблица 3.1 [2]

Характеристика воспламенения топливных композиций

Горючее	Окислитель				
	Трехфтористый хлор (ClF_3) _ж	Кислород (O_2) _ж	Азотная кислота HNO_3	Четырехокись азота N_2O_4	Перекись водорода (98%) H_2O_2
Этиловый спирт — $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	С	Н	Н	Н	Н
Гидразин — N_2H_4	С	Н	С	С	Н
Керосин — $\text{C}_{7,21}\text{H}_{13,29}$	С	Н	Н	Н	Н
Монометилгидразин — $\text{H}_2\text{N}-\text{N}(\text{CH}_3)_2$	С	Н	С	С	Н
Диметилгидразин несимметричный — $\text{H}_2\text{N}-\text{N}(\text{CH}_3)_2$	С	Н	С	С	Н

Обозначения: С—самовоспламеняющаяся; Н—несамовоспламеняющаяся.

Для запуска газогенераторов на несамовоспламеняющихся топливных компонентах используют пиротехнические составы, пусковые жидкие (самовоспламеняющиеся) топлива и электрические системы.

Типичное пиротехническое зажигательное устройство имеет вид прессованного столбика из тонкого порошка металла (обычно бора, алюминия, магния, а также смеси этих или подобных им металлов), окислителя (типа перхлората калия) и связующего. Пиротехнический состав обычно воспламеняется электрозапалом. При горении пиротехнической смеси образуются нагретые раскаленные частицы и высокотемпературные газы, которые воспламеняют жидкое топливо. Желательно, чтобы пламя от зажигательного устройства покрывало почти всю плоскость форсуночной головки газогенератора.

При запуске газогенератора с помощью пускового компонента необходимо правильно разработать способ подачи его в камеру для обеспечения плавного воспламенения с основными компонентами. Широко используется способ подачи пускового компонента из отдельного бачка, откуда он под давлением поступает в камеру сгорания и смешивается с основными топливными компонентами у форсуночной головки. После образования в камере газогенератора мощного горящего факела пусковая система отключается. Эта система обеспечивает возможность повторных запусков. Можно заливать пусковой компонент в магистраль основного компонента топлива, в смеси с которым эта жидкость не воспламеняется. Основной компонент вытесняет пусковую жидкость в камеру сгорания, где при ее контакте с другим компонентом происходит воспламенение.

Для электрического зажигания применяются свечи-форсунки и зажигательное устройство. В свече-форсунке через разряд между кольцевыми электродами продувается хорошо воспламеняющееся горючее или смесь горючего с окислителем. Зажигательное устройство включает в себя корпус, образующий небольшую камеру сгорания, в которой размещаются форсунки компонентов и свечи. На линиях подачи горючего и окислителя устанавливаются пусковые и отсечные клапаны.

ны. Для выработки сигнала на отсечку зажигательного устройства может устанавливаться датчик.

Основные трудности создания электрических пусковых устройств вызываются сравнительно малой тепловой мощностью электрического разряда. Для создания искры большой мощности используются полупроводниковые свечи, состоящие из двух concentрических электродов, изолятор между которыми покрыт слоем полупроводника. При подаче напряжения на электроды в полупроводнике возникает ток и происходит прогрев полупроводника. При его достаточно высокой температуре создаются условия для ионизации топливной смеси около электродов и между ними возникает сильный искровой разряд. Периодичность разряда порядка 1 мкс. Защита зажигательного устройства от горячих газов, когда пусковое устройство отключено, осуществляется путем создания топливной завесы.

Для организации устойчивого очага пламени в течение всего времени работы газогенератора можно применять невыключаемые зажигательные устройства.

Для регулирования режима работы жидкостного газогенератора могут применяться следующие способы (и их комбинации) [23, 75]:

- 1) изменение расхода топлива регулированием давления перед форсунками (в случае вытеснительной системы подачи это достигается изменением давления в баках, дросселированием линии питания);
- 2) изменение расхода топлива регулированием площади проходного сечения форсунок (плавное или отдельными секциями);
- 3) изменение площади критического сечения сопла (это наиболее сложный для конструктивного исполнения способ);
- 4) изменение расхода топлива путем запуска и отключения отдельных камер многокамерного газогенератора (ступенчатое изменение площадей форсунок и критического сечения одновременно).

Диапазон регулирования первым и вторым способом меньше, чем многокамерным газогенератором, вследствие того, что расход жидких компонентов пропорционален корню квадратному из перепада давления на форсунках (кроме того, от величины перепада давления существенно зависит качество распыла):

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^n \mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2 \rho_{\text{ж}} (p_{\phi} - p)} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} (p_{\phi} - p)}{A_{\phi}}},$$

где n — число форсунок; $A_{\phi} = (\rho_{\text{ж}} \Delta p_{\phi}) / \dot{m}^2 = 1 / (2 \mu_{\phi}^2 F_{\phi}^2)$ — проливочная характеристика головки.

Для установившегося режима работы давление в камере и перед форсунками (p , p_{ϕ}), площадь критического сечения сопла и проливочная характеристика связаны соотношением, вытекающим из уравнения материального баланса:

$$\begin{aligned} \frac{p}{p_{\phi}} &= \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\rho_{\text{ж}} \beta^2}{p_{\phi} A_{\phi} F_{\text{кр}}^2} \right)^2 + \frac{\rho_{\text{ж}} \beta^2}{A_{\phi} F_{\text{кр}}^2 p_{\phi}} \right]^{1/2} - \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{ж}} \beta^2}{p_{\phi} A_{\phi} F_{\text{кр}}^2} = \\ &= \frac{F_{\phi}}{F_{\text{кр}}} \rho_{\text{ж}} \beta^2 \mu_{\phi}^2 \left\{ \left[\left(\frac{F_{\phi}}{F_{\text{кр}}} \right)^2 + \frac{2}{\rho_{\text{ж}} \beta^2 \mu_{\phi}^2} p_{\phi} \right]^{1/2} - \frac{F_{\phi}}{F_{\text{кр}}} \right\}, \end{aligned}$$

где β — расходный комплекс.

При всех способах регулирования расхода изменяется удельная работоспособность продуктов газогенерации. На рис. 3.6 показан характер изменений и удельной работоспособности при изменении площади проходного сечения форсунок (при постоянном давлении подачи топлива).

Проблемы глубокого регулирования расхода и теоретически, и конструктивно проработаны в меньшей степени, чем регулирование в узких пределах.

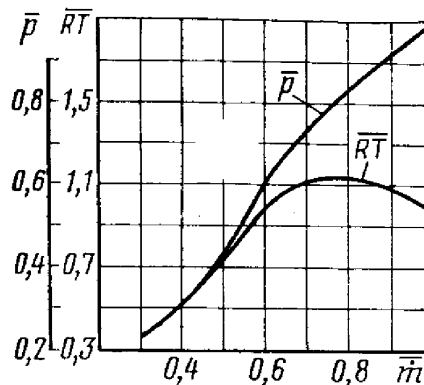


Рис. 3.6. Изменение давления и удельной работоспособности от расхода топлива

3.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ

При некоторой скорости протекания газа или жидкости v через слой частиц наступает равновесие между гравитационными силами и динамическим воздействием потока

$$v = 1,58 \cdot 10^{-4} \frac{d^{1,82}}{\nu^{0,88}} \left(\frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \right)^{0,94},$$

где d , ρ_{τ} — диаметр и плотность частиц; ν и ρ — вязкость и плотность газа или жидкости.

В результате этого частицы взвешиваются и порошкообразный компонент превращается в псевдожидкость, которая может двигаться по трубопроводам как обычная жидкость.

Плотность укладки сыпучих материалов зависит от размеров, формы, состояния поверхности и структуры частиц. Известно, что сферические частицы одинакового размера можно уложить с плотностью 74%. Если составить набор из сферических частиц двух-, трех- и четырехфракционного состава, то теоретическая плотность укладки таких частиц составит 86, 90...92 и 95...97% соответственно. Практически указанную плотность получить не удастся. Увеличить плотность укладки частиц можно встряхиванием и вибрацией при некотором давлении наддува. Размер частиц окислителя и горючего выбирается из условий обеспечения их сгорания, улучшения укладки порошка, уменьшения потребной мощности насоса и расхода флюидизирующего газа.

В качестве экспериментальных псевдожидких горючих в США использовали алюминий, двойной декаборид алюминия, диборид бора и циркония, диборид титана, гидрида циркония, полиэтилен и др., а в качестве окислителя применяли перхлорат аммония, натрат аммония и др. Частицы имели размер от 2 до 2000 мкм. В ка-

честве флюидизирующих газов применялись инертные (азот), окислительные (воздух, кислород) и горючие (водород, метан).

Были проведены лабораторные испытания регулируемого газогенератора на двухкомпонентном порошкообразном топливе. Состав топлива: перхлорат аммония (размер частиц 55 мкм) и полиэтилен (177 мкм) при соотношении компонентов $\approx 3:1$. В этом случае температура продуктов газогенерации ≈ 1500 К [83]. Флюидизирующие газы: воздух (1%) для перхлората аммония и водород (0,12%) — для полиэтилена. Смешение компонентов происходило в форкамере со свечой. В ходе экспериментов была показана импульсная работа газогенератора и отмечено, что воспламенение и горение порошкообразного топлива ставит специфические вопросы. С одной стороны, эти процессы протекают на поверхности (аналогично процессам для обычных твердых топлив), а с другой — они усложнены движением газа и перемешиванием. В опытах применены средства, способствующие воспламенению: а) экран, дробящий и рассеивающий струю и б) реагирующие транспортирующие газы [83]. Можно также отметить, что в некоторых пусках наблюдалось пробкообразование в форсунках.

Порошкообразные топлива имеют следующие преимущества по сравнению с другими жидкими и твердыми топливами [83, 84].

1. Высокая теплотворная способность.
2. Текучесть, как у жидкости, поэтому расход можно регулировать.
3. Сохранение свойств при длительном хранении.
4. Возможность повторного запуска.
5. Высокая плотность и минимальный объем (самые малые габаритные размеры баков).

Считается, что псевдожидкие топлива перспективны как для ракетных двигателей, так и для газогенераторов ракетно-прямоточных двигателей (п. 5.5), а также для стендовых и других газогенераторов.

При установившемся режиме работы давление в газогенераторе рассчитывается так:

$$p = \frac{3(\dot{m}_0 + \dot{m}_{ф.о} + \dot{m}_Г + \dot{m}_{ф.г})}{F_{кр}},$$

где $\dot{m}_0$ и $\dot{m}_Г$ — расход частиц окислителя и горючего; $\dot{m}_{ф.о}$ и $\dot{m}_{ф.г}$ — расход газа, флюидизирующего частицы окислителя и горючего.

Возможны следующие способы подачи псевдожидкости из бака в камеру сгорания или газогенератор: с помощью сжатого газа [патент США № 3256688]; с помощью поршня; с помощью винтового насоса; с помощью струйного насоса [патент США № 3777490].

Экспериментальные исследования показали, что для впрыска псевдожидкости вполне пригодны струйные и шнековые форсунки. На расходные характеристики форсунок влияет отношение расходов твердых частиц и газа. Форсунки должны распылять порошок до исходных размеров твердых частиц и препятствовать их агломерации. Для лучшего распыливания центральная струя порошка, истекающая из форсунки, может взаимодействовать с отдельно подаваемыми по периферии газовыми струями.

В случае подачи порошка в камеру сгорания с помощью эжекционной системы псевдожидкость из емкости под давлением наддува поступает в камеру смешения эжектора через сужающийся насадок. В результате смешения этого потока и высоконапорного потока газов, поступающих, например, из дополнительного жидкостного или твердотопливного газогенератора, образуется двухфазная топливная смесь.

Для организации рабочего процесса необходима тщательная разработка комплекса газодинамических, физических и химических мероприятий по распыливанию, смешению, воспламенению и устойчивому горению смеси частиц горючего и окислителя с газом. Трудности в решении этой задачи, а также некоторые специфические проблемы хранения и подачи обуславливают то, что двигатели и газогенераторы на псевдожидком топливе пока не вышли из стадии лабораторных и стендовых исследований.

Пример возможного применения порошкообразного компонента в комбинированном стендовом газогенераторе, позволяющем в широких пределах варьировать давление, температуру и состав продуктов в сверхзвуковой двухфазной струе с целью изучения ее воздействия на теплозащитные материалы, приведен на рис. 3.7. Устойчивость рабочего процесса в этой комбинированной схеме обеспечивается горением жидких компонентов. На установившемся режиме работы давление в газогенераторе равно $p = \beta \dot{m}_2 / F_{кр}$, где $\dot{m}_2$ — суммарный расход всех компонентов. При моделировании струи горячих газов можно применять не только трехкомпонентное топливо, но и смешанное многокомпонентное топливо, состоящее из жидкого, газообразного, суспензионного и порошкообразного компонентов.

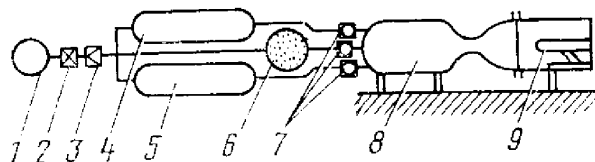


Рис. 3.7. Схема стендовой установки с газогенератором:

1—баллон с газом; 2—клапан; 3—редуктор; 4—бак с жидким окислителем; 5—бак с жидким горючим; 6—бак с металлическим порошком; 7—регуляторы расхода; 8—камера сгорания; 9—испытуемый объект

Твердотопливные газогенераторы

4.1. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ГАЗОГЕНЕРАТОРА НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Габаритно-весовые, эксплуатационные (отсутствие утечек, высокая надежность, длительные сроки хранения), технологические характеристики, широкие возможности варьирования и модернизации конструкции позволяют использовать твердотопливные газогенераторы в самых разнообразных системах [3, 12, 87, 90]. Несмотря на большое разнообразие конструкций твердотопливных газогенераторов, основную принципиальную схему его можно представить в следующем виде (рис. 4.1); фильтр и охладитель устанавливаются при необходимости, относительные размеры применяемых газохода и ресивера колеблются в широких пределах, различные виды выхлопных устройств рассмотрены в гл. 2 (п. 2.4).

Конструктивная схема рассмотренного выше газогенератора в значительной мере определяется формой твердотопливного заряда.

В газогенераторах используются различные формы зарядов твердого топлива (рис. 4.2 и табл. 4.1): горящие с торца; горящие главным образом по внутренним поверхностям (поверхности, горение которых надо предотвратить, покрыты бронирующим составом); горящие почти по всем боковым поверхностям (например, небронированные трубчатые шашки).

Наиболее часто в газогенераторах применяются цилиндрические или спиральные заряды торцевого горения, которые имеют большое отношение длины к диаметру, технологичны в изготовлении, не требуют сложных устройств для крепления в камере, обеспечивают большой коэффициент заполнения объема камеры твердым топливом. В газогенераторах с увеличивающимся расходом (в частности, для катапульты с поршнем, движущимся с постоянным ускорением) используются многоканальные заряды твердого топлива.

Газопроводы, фильтрующие устройства, регуляторы и другие элементы конструкции, изготавливаемые из металла, поглощают значительную часть тепловой энергии газового потока: $\Delta Q \approx$

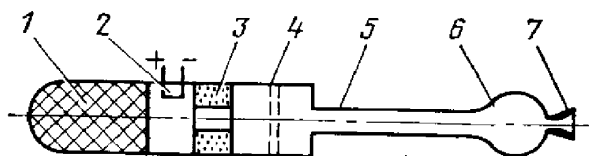


Рис. 4.1. Принципиальная схема твердотопливного газогенератора:

1—корпус с зарядом твердого топлива; 2—воспламенитель; 3—охлаждающее устройство; 4—фильтр; 5—газоход; 6—ресивер; 7—выхлопной насадок

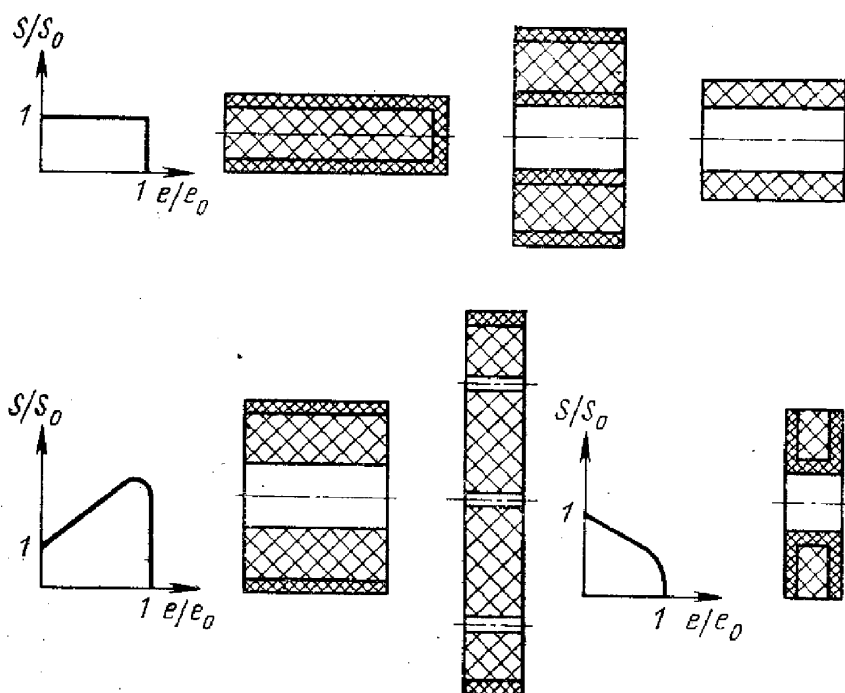


Рис. 4.2. Формы зарядов твердого топлива:

S —текущая поверхность горения заряда; S_0 —начальная поверхность горения заряда; e —текущий свод заряда; e_0 —начальный свод заряда

$\approx c_c m_c (T - T_n)$, а период нестационарного теплообмена продуктов сгорания с элементами конструкции растягивается на большую часть времени работы.

Таблица 4.1

Геометрические характеристики зарядов

Тип заряда	L/d	e/d	$S/\frac{\pi d^2}{4}$	Число и форма поперечного сечения канала
Торцевого горения	$\gg 1$	$\gg 1$	1	—
Внутриканального горения	1...10	0,33	$\sim 4L/d$	1, круг
То же	1...10	0,1	$\sim 4L/d$	1, звезда
Всестороннего горения	> 1	$\ll 1$	$\gg 1$	Круг

Для компенсации тепловых потерь в газогенераторе и поддержания заданной мощности приходится применять специальные форсажные устройства, дающие дополнительный приход продуктов сгорания с несколько большей температурой, или увеличивать приход продуктов сгорания путем увеличения начальной поверхности заряда газогенератора. С этой целью торцевая часть заряда выполняется без наружной бронировки с отверстием, пропилами или проточками. Например, в случае отсутствия бронировки на длине l_1 и наличия осевого отверстия диаметром d_2 и глубиной l_2

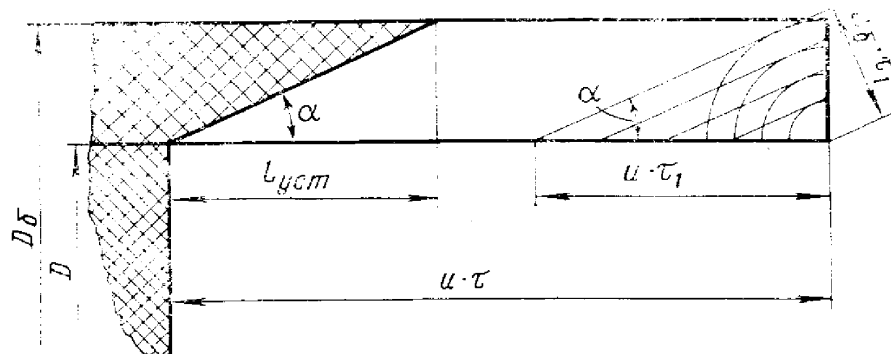
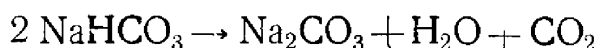


Рис. 4.3. Изменение поверхности сублимирующего бронирующего покрытия цилиндрического заряда, горящего с торца

площадь начальной горячей поверхности в $1 + 4 \left(\frac{l_1}{D} + \frac{d_2 l_2}{D^2} \right)$ раз превышает площадь торца.

Постановка охладителя зависит от совместимости продуктов сгорания с материалами газоприемника или требований к температуре газа (обычно менее 1500 К), от теплотерь в газоходе и других элементах газового тракта.

В случае необходимости возможно применение блока охлаждающего вещества (бикарбоната натрия, карбоната кальция или хлорида алюминия с 10...16% тефлона или поливинилацетата в качестве связующего [39]). Например, при разложении бикарбоната натрия



поглощается тепло 787 Дж/г. Охладитель может быть также нанесен на наружную поверхность заряда твердого топлива.

Приход продуктов сгорания заряда с сублимирующимся покрытием, нанесенным на наружную поверхность, является суммой прихода продуктов сгорания при горении твердого топлива и прихода газа при газификации бронепокровтия $\dot{m} = \dot{m}_\tau + \dot{m}_6$.

Скорость сублимации покрытия меньше скорости горения топлива, и установившаяся поверхность сублимации будет иметь форму усеченного конуса (при $\tau > \tau_1$) (рис. 4.3) с полууглом раскрытия $\alpha = \arcsin \frac{u_6}{u}$, площадью боковой поверхности

$$S_6 = \frac{\pi (D_6^2 - D^2)}{4 \sin \alpha}.$$

Расход продуктов сублимации покрытия на установившемся режиме не зависит от u_6 и пропорционален u :

$$\dot{m}_6 = \frac{\pi}{4} (D_6^2 - D^2) \rho_6 u \cong \pi D \delta_6 \rho_6 u.$$

Тогда

$$\dot{m} = \dot{m}_\tau \left[1 + \left(\frac{D_6^2}{D^2} - 1 \right) \right] = K_6 \dot{m}_\tau,$$

где K_6 — коэффициент, учитывающий газоприход от бронирования. Время выхода на установившийся режим порядка $\tau_1 = \delta_6 / u_6$.

На внутреннюю часть камеры дна и крышки, как правило, наносится теплозащитное покрытие для исключения прогрева силовой оболочки корпуса, а крышка имеет разъемное соединение с камерой для упрощения монтажа воспламенительного и фильтрующего устройств. При вкладном цилиндрическом заряде, горящем с торца, может быть зазор между наружной цилиндрической поверхностью заряда и камерой газогенератора. Кроме этого, может быть свободная полость в месте крепления заряда.

При воспламенении зазоры между зарядом и камерой заполняются продуктами сгорания, а при определенных условиях в полости (зазоре) между зарядом и камерой может быть перетекание газа и на стационарном участке работы газогенератора.

В связи с этим возникает задача оценки силовых и тепловых нагрузок на вкладной заряд (в том числе и на наружное бронировующее покрытие), действующих при заполнении застойной зоны.

Движение газа в кольцевой зоне между зарядом и камерой сопровождается газодинамическими потерями и теплообменом со стенками корпуса и зарядом. Если изменение давления в камере газогенератора аппроксимировать экспоненциальной функцией $f(t) = 1 - e^{-t/t_n}$, где t_n — время нарастания давления у горящего торца заряда, то решение уравнений движения газа в застойной зоне имеет вид [82]:

$$\frac{p(l, t) - p(0, t)}{p_{\max} - p_0} = \left[\frac{1}{\cos \sqrt{Pd}} - 1 \right] e^{-PdFo} + \frac{4Pd}{\pi \left(Pd - \frac{\pi^2}{4} \right)} e^{-\frac{\pi^2 Fo}{4}},$$

где $Fo = \frac{b^* t}{l^2}$ — число Фурье; $Pd = \frac{l^2}{b^* t_n}$ — критерий подобия; p_0 — начальное давление; $p_{\max}$ — максимальное давление у горящего торца.

Из табл. 4.2 могут быть найдены числа Pd и Fo , соответствующие максимальному перепаду давления в застойной зоне.

Таблица 4.2

Безразмерные параметры заполнения застойной зоны

Pd	0,1	0,16	0,49	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	9,0
Fo	1,37	1,2	0,83	0,63	0,45	0,37	0,3	0,25	0,22
$\frac{p(l) - p(0)}{p_{\max} - p_0}$	0,044	0,066	0,165	0,271	0,407	0,513	0,619	0,692	0,741

Число $Pd = \frac{l^2}{b^* t_n}$ характеризует конструкцию газогенератора:

длину кольцевой зоны между зарядом и камерой l ;

время нарастания давления у горящего торца заряда t_n ;

коэффициент газодинамических потерь в кольцевом зазоре δ :

$$b^* = \frac{3a^2 \delta}{\xi V_1}.$$

При расчете теплопередачи от газа в зазоре к пороховому заряду необходимо учитывать перегрузки, так как последние в существенной мере могут влиять на теплопередачу от продуктов сгорания, находящихся в кольцевом зазоре между вкладным зарядом и камерой газогенератора, к бронепокрытию и заряду. По мере прогрева газа в зазоре между зарядом и камерой после выхода на режим уменьшаются силы трения и увеличивается влияние массовых сил, определяемых действием перегрузок, увеличивается свободная конвекция.

Эмпирическое критериальное уравнение для свободной конвекции в щели [11]:

$$\varepsilon_k = 0,24 \left(1 + \frac{\delta}{l_s}\right)^{4,15} (\text{GrPr} \varphi_n)^{0,25},$$

где $\text{Gr} = n \frac{g \delta^3 (\Delta T)}{T \eta^2} \left(\frac{p}{RT}\right)^2$ — критерий Грасгофа; ε — коэффициент для свободной конвекции; $l_s = \sqrt{D_2 l}$ — эквивалентный размер кольцевой щели; $\varphi_n = 0$, $\varphi_n = 1$, $\varphi_n = 3$ — если направление перегрузки и перепада температур (от большей к меньшей) соответственно противоположны, взаимно перпендикулярны, совпадают; n — величина перегрузки; δ — ширина щели; ΔT — перепад температур.

Отсюда следует, что теплообмен в щели зависит от направления действия перегрузок, перепада температур между газом и стенками в зазоре, перепада температур между газом в зазоре и объемом камеры газогенератора, величины зазора δ .

При направлении перегрузки от застойной зоны к горящему торцу заряда свободная конвекция в зазоре между зарядом и камерой увеличивается. При направлении перегрузки от горящего торца заряда к застойной зоне (в сторону зазора) движение газа в зазоре уменьшается. При горизонтальном положении заряда в верхней части кольцевого канала газ имеет большую температуру и по мере остывания перетекает вниз, а наверх поступает высоко-температурный газ из области горения.

В газогенераторе на твердом топливе находят применение различные фильтры: инерционные, центробежные, пористые. Для выполнения требований, предъявляемых к фильтрующим устройствам, в условиях воздействия полидисперсной среды может оказаться целесообразным применение комбинации фильтров.

Из анализа следует, что твердотопливные газогенераторы при небольших временах работы имеют высокую величину располагаемой энергии на единицу массы (см. табл. 1.1). При постоянной готовности и быстром запуске они не требуют проведения каких-либо регламентных работ в течение всего срока эксплуатации, хранятся в широком температурном диапазоне ($\pm 50^\circ\text{C}$), удобны в обращении, не выделяют токсичных продуктов, обладают высокой надежностью работы.

Основным недостатком твердотопливных газогенераторов являются значительные разбросы выходных параметров, обуславливаемые разбросом скорости горения твердого топлива и ее зависимостью от температуры эксплуатации. Это ведет к излишним запасам твердого топлива. Например, действительный запас топлива для вытеснительной системы подачи в случае порохового аккумулятора давления в 2...3,5 раза больше расчетного, в то время как в случае жидкостного аккумулятора давления — в 1,3...2 [55]. Несмотря на отмеченный недостаток, твердотопливные газогенераторы находят широкое применение (см. п. 1.1) в качестве бортовых источников энергии и других вспомогательных устройств ракетных систем. По данным фирмы Джeneral Электрик, 40% бортовых источников питания различных ракет имеют мощность меньше 7,5 кВт, 30% — 7,5...15 кВт и 20% — 15...30 кВт, остальные — больше 30 кВт.

К самым маломощным газогенераторам на твердом топливе относятся источники «холодного» газа (температура менее 500 К) для заполнения надувных емкостей: индивидуальных аварийно-предохранительных систем, тормозящих средств (парашютов) и других устройств ракетно-космической техники. Твердое топливо для генерирования холодного газа подбирается в зависимости от требований к составу газа. Так, газ с относительно большой долей водорода может быть получен при горении гидрогенита [81], либо хлорида аммония и литийалюмогидрида (патент США № 3898048); с большой долей азота — при горении составов, состоящих из хлорида аммония и NaNO_3 ; созданы также топлива для получения кислорода и углекислого газа [39, 81].

Принципиальная схема генератора «холодного» газа предусматривает охладители (в случае необходимости, см. рис. 4.1), фильтры и устройства, способствующие более равномерному распределению газовых струй в надувной емкости. Время заполнения надувных подушек из пропитанного неопреном нейлона объемом $(2...7) \cdot 10^4 \text{ см}^3$ порядка 20 мс [39].

Большую мощность имеют твердотопливные газогенераторы (массой 3,5 т и мощностью $\approx 10^4$ кВт) телескопических приводов для вскрытия крышки траншеи (два одинаковых привода) и подъема контейнера. В этих газогенераторах низкотемпературное топливо ($T=1220 \text{ К}$) горит при давлении 40...50 МПа, масса заряда составляет $(3...4) \cdot 10^2 \text{ кг}$, время работы 20...30 с. Развиваемое каждым приводом усилие порядка нескольких меганьютонов.

Пример необычного применения твердотопливного газогенератора показан на рис. 4.4, где газогенератор является одновременно и воспламенительным устройством и источником рабочего тела для вытеснения пастообразного топлива в ранцевом двигателе (патент США № 3098625).

Таким образом, твердотопливные газогенераторы являются компактными, простыми и удобными по конструкции, быстро при-

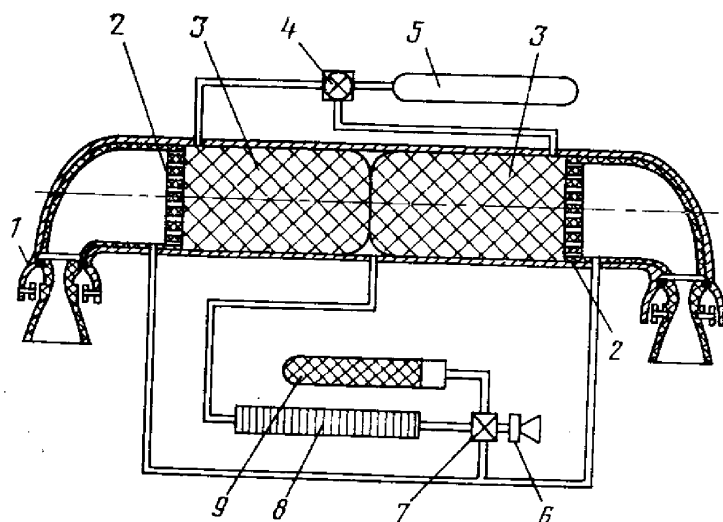


Рис. 4.4. Ранцевый ракетный двигатель на пастообразном топливе:

1—сопло в карданном подвесе; 2—фильтровая решетка; 3—пастообразное топливо; 4—клапан; 5—бак с охладителем; 6—сопло сброса газа; 7—регулятор расхода горячего газа; 8—охладитель; 9—твердотопливный газогенератор

водимыми в действие источниками энергии с постоянно расширяющимися областями применения (реферативный журнал «Авиационная и ракетная техника» 1979, 11.34.112, 11.34.114).

4.2. ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

На установившихся участках работы твердотопливного газогенератора с известной площадью критических сечений $F_{кр}$ зависимость давления в камере от характеристик заряда определяется системой уравнений

$$p = \left(\frac{K_u K_b u_1 Q_r S \beta \varphi_L}{\eta \mu F_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}; \quad \frac{de}{dt} = K_u u_1 p^\nu,$$

где K_u — коэффициент, учитывающий систематическое расхождение между скоростью горения образца твердого топлива и порохового заряда; K_b — коэффициент, учитывающий газоприток от охлаждающего покрытия; η — коэффициент восстановления давления в газовом тракте газогенератора.

Скорости газового потока в большинстве газогенераторов невелики и можно пренебречь отличием коэффициента средней скорости горения φ_L от единицы.

В газогенераторах коэффициент, учитывающий тепловые потери χ , температура газов T (и следовательно, комплекс β) и коэффициент восстановления давления торможения η заметно изменяются в процессе горения заряда. Требуемая зависимость давления от времени обеспечивается программированием площади горячей поверхности $S(e)$ и регулированием площади критического сечения сопла $F_{кр}(t)$.

Отклонения скорости горения, комплекса β и других параметров от номинальных значений вследствие случайных, технологических и эксплуатационных изменений приводят к изменениям

давления, скорости истечения, расхода, мощности газогенератора на твердом топливе (а также полного импульса газового потока в выходном сечении сопла). Эти вариации рассчитываются по соотношениям

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\delta u_1}{u_1} + a_p \delta T_3 + \frac{\delta Q_r}{Q_r} + \frac{\delta S}{S} + \frac{\delta \beta}{\beta} - \frac{\delta \mu}{\mu} - \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} - \frac{\delta \eta}{\eta} \right);$$

$$\frac{\delta v_a}{v_a} = \frac{\delta \varphi}{\varphi} + \frac{\delta \lambda_a}{\lambda_a} + \frac{\delta a_{кр}}{a_{кр}} \cong \frac{\delta \varphi}{\varphi} + \frac{\delta \beta}{\beta} + \frac{\tau(\lambda_a)}{1-\lambda_a^2} \frac{\delta q(\lambda_a)}{q(\lambda_a)};$$

$$\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{\delta p}{p} + \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} + \frac{\delta \eta}{\eta} + \frac{\delta \mu}{\mu} - \frac{\delta \beta}{\beta} = \frac{1}{1-\nu} \left(\frac{\delta u_1}{u} + a_m \delta T_3 + \frac{\delta Q_r}{Q_r} + \frac{\delta S}{S} + \nu \frac{\delta \beta}{\beta} - \nu \frac{\delta \mu}{\mu} - \nu \frac{\delta \eta}{\eta} - \nu \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} \right);$$

$$\frac{\delta N}{N} = \frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}} + 2 \frac{\delta v_a}{v_a};$$

$$\frac{\delta P_{II}}{P_{II}} = \frac{\delta \varphi_c}{\varphi_c} + \frac{\delta \mu}{\mu} + \frac{\delta \eta}{\eta} + \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} + \frac{\delta p}{p} - r(\lambda_a) \frac{\delta q(\lambda_a)}{q(\lambda_a)},$$

где

$$a_p = \frac{1}{u_1} \frac{\partial u_1}{\partial T_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \chi}{\chi \partial T_3} + \frac{\partial RT}{RT \partial T_3} \right) - \alpha;$$

$$a_m = \frac{1}{u_1} \frac{\partial u_1}{\partial T_3} + \frac{\nu}{2} \left(\frac{\partial \chi}{\chi \partial T_3} + \frac{\partial RT}{RT \partial T_3} \right) - \alpha$$

(α — коэффициент линейного расширения); $\frac{\delta q(\lambda_a)}{q(\lambda_a)} = \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} - \frac{\delta F_a}{F_a}$.

Рассматривая сумму отклонений независимых определяющих параметров как суперпозицию неслучайных (известных) и случайных величин с нулевыми значениями математического ожидания и известными дисперсиями, можно получить оценки отклонений и предельных значений выходных характеристик газогенератора во всех условиях эксплуатации [71]. Эти отклонения могут быть переменными во время работы газогенератора. Основное влияние на разброс расхода и других выходных параметров газогенератора оказывают отклонения скорости горения $\left(\frac{\delta u_1}{u_1}; \frac{1}{u_1} \frac{\partial u_1}{\partial T_3} \Delta T_3 \right)$ и величина показателя степени в зависимости скорости горения от давления ν , а также нестабильность тепловых и газодинамических потерь.

Работа газогенератора продолжается до полного выгорания заряда, либо (реже) до выключения сбросом давления. Время горения заряда равно

$$t_3 = \frac{1}{K_u} \int_0^e \frac{de}{u} = \frac{1}{K_u u_1(T_3)} \int_0^e \frac{de}{p^\nu} = \frac{e}{K_u u_1(T_3) p^\nu(e^*)} (0 \leq e^* \leq e).$$

Эта величина также нестабильна:

$$\frac{\delta t_3}{t_3} = \frac{\delta e}{e} - \gamma \frac{\delta p(e^*)}{p(e^*)} + \left(\alpha - \frac{1}{u_1} \frac{\partial u_1}{\partial T_3} \right) \delta T_3 - \frac{\delta u_1}{u_1}.$$

Если одновременно работает n газогенераторов, то время работы пакета совпадает с минимальным временем горения одного из зарядов $t_{\min} = t_1$ и возникают нерабочие остатки топлива:

$$\Delta m = \sum_{i=1}^n \frac{m}{t_i} (t_i - t_1) = \dot{m} \left(\sum_{i=1}^n \delta t_i - n \delta t_1 \right)$$

($\delta t_1 < 0$; $\dot{m}$ — номинальный расход топлива).

Математическое ожидание величины остатков топлива в пакете равно $M\Delta m = -\dot{m}nM\delta t_1$, а дисперсия остатка включает коэффициенты ковариации порядковых статистик $\sigma_{(1, i)}$:

$$\sigma_{\Delta m}^2 = \sigma_t^2 \dot{m}^2 \left[n(1 + \sigma_1^2) - 2 \sum_{i=2}^n \sigma_{(1, i)} \right].$$

Например, для $n=2$ имеем статистические характеристики для размаха, а при $n=4$ — $\sigma_1^2 = 0,492$ и $2 \sum_{i=2}^4 \sigma_{(1, i)} = 1,016$.

При расчете газогенератора обычно исходят из условия, чтобы потребное значение выходного параметра (например, расхода газа) обеспечивалось на минимальном режиме работы газогенератора (при минимальной скорости горения топлива и т. д.). Тогда при других условиях работы образуется избыток расхода, что приводит к усложнению и утяжелению газогенератора. С целью снижения разбросов выходных параметров в ряде случаев осуществляется регулировка площади критического сечения (всех или части выходных патрубков).

В наиболее распространенном случае работы газогенератора с постоянной площадью критического сечения сопла обычно задается потребный диапазон расхода $\dot{m}_{\min} \dots \dot{m}_{\max}$ или мощности $N_{\min} \dots N_{\max}$, минимальное давление на выходе из газогенератора $p_{\min}$, время работы t_3^* и диапазон температур заряда $T_{3\min} \dots T_{3\max}$, максимальная температура продуктов сгорания T и ограничения габаритных размеров. Предварительная оценка номинальных характеристик p_n и S_n ведется по формулам табл. 4.3, затем рассчитываются предельные режимы и проверяется выполнение требований задания.

Входящие в таблицу скорость истечения $v_a = \varphi \lambda_a \sqrt{\frac{2k}{k+1} \chi RT}$ и коэффициент восстановления давления торможения η зависят от времени (т. е. толщины сгоревшего свода e). Поэтому зависимость $S_n(e)$ даже при постоянном заданном $\dot{m}$ (или N) нестационарна.

Таблица 4.3
Расчет номинальных характеристик

Параметр	Техническое задание	
	$\dot{m}_{\min} \dots \dot{m}_{\max}$	$N_{\min} \dots N_{\max}$
p_n	$\frac{p_{\min}}{2\eta_n} \left(1 + \frac{\dot{m}_{\max}}{\dot{m}_{\min}} \right)$	$\frac{p_{\min}}{2\eta_n} \left(1 + \frac{N_{\max}}{N_{\min}} \right)$
S_n	$\frac{\dot{m}_{\max} + \dot{m}_{\min}}{2K_u K_{6Q} u_1 (T_{з.н}) p_n^\nu}$	$\frac{N_{\max} + N_{\min}}{K_u K_{6Q} u_1 (T_{з.н}) p_n^\nu v_a^2}$
$F_{кр.н}$	$\frac{K_u K_{6Q} u_1 (T_{з.н}) S_n^{\beta_n}}{\mu \eta_n p_n^{1-\nu}}$	

Если в газовом тракте имеется клапан, поддерживающий постоянный уровень давления $p_{кл} = \text{const}$, то S_n также рассчитывается по формулам табл. 4.3 с подстановкой $p_{кл}$ вместо p_n , а при расчете предельных отклонений мощности в этом случае необходимо считать отклонения давления заданными и равными погрешности настройки клапана $\Delta p_{кл}$.

Основной задачей проектирования газогенератора является определение размеров заряда и состава твердого топлива, средних и предельных характеристик по мощности, давлению, расходу продуктов сгорания и времени работы.

В качестве примера рассмотрим последовательность расчета газогенератора с цилиндрическим зарядом торцевого горения и постоянной площадью критического сечения сопла при заданных $N_{\min} \dots N_{\max}$; $p_{\min}$; t_3^* ; $T_{з.н} \dots T_{з.макс}$.

При $F_{кр} = \text{const}$ максимальное давление приблизительно равно

$$p_{\max} \cong \frac{N_{\max}}{\eta N_{\min}} p_{\min},$$

при этом максимальное значение скорости горения

$$u_{\max} = (1 + \Delta \bar{u}_z) u_{1н} \frac{B p_{\max}^\nu K_u}{B - (T_{з.макс} - T_{з.н})},$$

где $\Delta \bar{u}_z = \frac{\Delta u_z}{u_{1н}}$ — суммарное относительное отклонение скорости горения от номинального значения за счет разброса скорости горения между партиями и внутри партии зарядов.

Для ряда твердых топлив, применяемых в газогенераторах, проводится оценка расчетной максимальной скорости горения и расчетного времени работы газогенератора

$$t_{\min} = \frac{e}{u_{\max}},$$

где e — допустимая длина горящего свода заряда.

Из условия $t_{\min} \geq t_3^*$ предварительно выбираем состав твердого топлива.

Номинальные (средние) значения требуемой мощности, давления в газогенераторе и площади горячей поверхности равны:

$$N_n = \frac{N_{\max} + N_{\min}}{2}; \quad p_n = \frac{p_{\max} + \frac{1}{\eta} p_{\min}}{2} = \frac{p_{\min}}{\eta} \left(1 + \frac{N_{\max}}{N_{\min}} \right);$$

$$S_n = \frac{\pi d_n^2}{4} = \frac{2N_n}{K_u K_6 q_1 u_n (T_{3,n}) p_n^{\gamma} v_a^2}.$$

Предельное отклонение мощности от номинального значения равно

$$\frac{\Delta N}{N_n} = \frac{1}{1-\nu} \left\{ a_N \Delta T_3 + \left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)_n \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta q_\tau}{q_\tau} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left[\left(-\nu + \frac{2\tau(\lambda_a)(1-\nu)}{1-\lambda_a^2} \right) \frac{\Delta F_{кр}}{F_{кр}} \right]^2 + \left(\frac{2-\nu}{2} \frac{\Delta \chi RT}{\chi RT} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_6}{K_6} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2 + \left(\frac{2\tau(\lambda_a)}{1-\lambda_a^2} \frac{\Delta F_a}{F_a} \right)^2},$$

где $\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)_n$ — отклонения скорости горения между партиями зарядов; $\Delta T_3 = (T_{3\max} - T_{3\min})/2$; $a_N = \frac{1}{u_1} \frac{\partial u_1}{\partial T_3} + \frac{2-\nu}{2} \left(\frac{\partial \chi}{\chi \partial T_3} + \frac{\partial RT}{RT \partial T_3} \right) - \alpha$.

Далее находим максимальное и минимальное значения мощности

$$N_{\max} = N_n \left(1 + \frac{\Delta N}{N_n} \right); \quad N_{\min} = N_n \left(1 - \frac{\Delta N}{N_n} \right)$$

и проверяем выполнение условий задания по диапазону мощностей.

При выполнении условий определим уточненные значения $p_{\max}$ и $p_{\min}$ по предельному отклонению давления

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{1-\nu} \left[\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)_n + a_p \Delta T_3 \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta q_\tau}{q_\tau} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left(\frac{\Delta F_{кр}}{F_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \chi RT}{2\chi RT} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_6}{K_6} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2} \right];$$

$$p_{\max} = p_n \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right);$$

$$p_{\min} = p_n \left(1 - \frac{\Delta p}{p} \right).$$

Это расчетное значение минимального давления на выходе из газогенератора должно быть не менее заданного.

По уточненным значениям $p_{\max}$ и $p_{\min}$ определяем

$$u_{\max}, u_{\min}, t_{\min} = \frac{e}{u_{\max}}, \quad t_{\max} = \frac{e + \Delta e}{u_{\min}},$$

где Δe — допуск на длину горящего свода. Должно быть $t_{\min} \geq t_3^*$.

Наконец, рассчитываем номинальное значение прихода продуктов сгорания, его предельные отклонения и площадь критического сечения сопла

$$\dot{m}_n = Q_{г.н} S_n u_{1н} p_n^* K_u K_6;$$

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = \frac{1}{1 - \nu} \left[\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)_n + a_m \Delta T_3 \pm \right. \\ \left. \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_{г.н}}{Q_{г.н}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left(\nu \frac{\Delta F_{кр}}{F_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{\nu \Delta \chi RT}{2 \chi RT} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_6}{K_6} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2} \right];$$

$$F_{кр.н} = \frac{\dot{m}_n \beta}{\mu \eta_n p_n}.$$

Методы расчета распределений скоростей, полного и статического давлений в каналах твердотопливных зарядов других *различных форм* (внутриканального горения, секционных, многошашечных и др.) изложены в [82]. На цилиндрических участках газового тракта основой расчета является уравнение сохранения полного импульса газового потока, а в местах сопряжения цилиндрических участков — уравнение непрерывности с учетом гидравлических потерь.

Пример расчета номинального режима работы газогенератора с цилиндрическим внутриканального горения зарядом из баллистического топлива ($\nu = 0,7$) приведен в табл. 4.4.

В предсопловом объеме такого газогенератора рассеивается почти весь скоростной напор, при этом приведенная скорость на выходе из канала λ_L определяется с помощью газодинамической функции $y(\lambda_L) = F_{кр}/F$ (F — площадь проходного сечения канала), а $\eta = r(\lambda_L)$. Расчетная зависимость давления от времени с учетом потерь полного давления ($\eta < 1$) и эрозионного горения ($\phi_L > 1$) согласуется с экспериментальной (и существенно отличается от рассчитанной без учета течения газа в камере; см. последние две колонки табл. 4.4 при $\phi_L = 1$; $\eta = 1$).

В случае нейтральной площади горячей поверхности ($S \approx \text{const}$, $p = \text{const}$) приблизительно имеем

$$S_{ср} = \frac{m}{e Q_{г.н}} = \frac{V_{г.н}}{e}; \quad t_3 = \frac{e}{u_{ср}}; \quad \dot{m} = \frac{m}{t_3},$$

где $V_{г.н}$ — объем твердотопливного заряда.

Площадь под функцией $p(t)$ не зависит от скорости горения твердого топлива (если пренебречь изменением тепловых потерь

Т а б л и ц а 4.4

Изменение параметров заряда и газогенератора

e/e_0	$F_{кр}/F$	λ_L	φ_L	η	p , МПа	t , с	$\varphi_L=1; \eta=1$	
							p' , МПа	t' , с
0,0	0,70	0,42	1,07	0,84	11,9	0,00	5,4	0,00
0,1	0,60	0,37	1,06	0,87	11,7	0,05	6,1	0,06
0,2	0,52	0,32	1,04	0,90	11,0	0,11	6,9	0,12
0,4	0,42	0,26	1,01	0,93	10,7	0,20	8,2	0,22
0,6	0,35	0,22	1,00	0,95	10,7	0,30	9,1	0,32
0,8	0,30	0,18	1,00	0,97	11,1	0,39	10,1	0,41
1,0	0,26	0,16	1,00	0,97	11,8	0,47	10,7	0,51

при изменении режима работы газогенератора):

$$\int_0^{t_n} p(t) dt = \frac{\beta}{\eta F_{кр}} \int_0^{t_n} \dot{m}(t) dt = \frac{m\beta}{\eta F_{кр}},$$

где t_n — полное время работы газогенератора.

Серии экспериментальных зависимостей $p(t)$ и их характерных точек (времен задержки воспламенения и выхода на режим, максимальных и средних давлений и др.) обрабатываются методами математической статистики и теории случайных функций. В частности, каноническое разложение случайного процесса $p(t)$ по собственной системе координатных функций $\varphi_i(t)$:

$$p(t) = p_{ср}(t) + \sum_{i=1}^n \xi_i \varphi_i(t),$$

где коэффициентами разложения являются независимые случайные числа ξ с убывающими (наиболее быстро) дисперсиями, позволяет выделить основные типы случайных возмущений: отклонения средней скорости горения; неоднородность скорости горения по массе топливного заряда; нестабильность площади горячей поверхности при смыкании фронтов горения и выходе их на нейтральные поверхности. Отсюда вытекает возможность решения задачи об оценке статистических характеристик зависимости давления от времени на этапе проектирования газогенератора.

Выше рассмотрен внутрибаллистический расчет газогенератора на основном, квазиустановившемся участке работы. Воспламенение заряда твердого топлива зависит от совместного воздействия многих факторов и является в значительной мере экспериментально отрабатываемым процессом. При выборе воспламенителя для маломощных газогенераторов необходимо, однако, учитывать относительно большие тепловые потери и ограничение по максимальному давлению в камере. Вследствие этого сужаются пределы для возможной массы воспламенителя из быстрогорящих по-

роховых зерен и возникает необходимость введения дополнительных крупных форсажных топливных таблеток.

Догорание остатков заряда определяется всей предысторией и также почти не поддается расчету. В малых газогенераторах (особенно тех, в которых применены охладители) оно занимает относительно продолжительный участок, и эти остатки, как правило, не входят в эффективную массу топлива (исключение составляют лишь некоторые системы наддува оболочек).

Отдельные аспекты переходных процессов в твердотопливных газогенераторах рассмотрены в п. 4.4.

Рассмотрим основные способы *снижения разбросов* газогенератора.

1. Изменение критического сечения сопла или изменение диаметра пороховой шашки в зависимости от скорости горения между партиями (учитываемому отклонению скорости горения). В этом случае в приведенных формулах для разбросов мощности давления и расхода следует положить $(\Delta u_1/u_1)_п$ равным нулю. Такая настройка не позволяет исключить влияние на разброс расхода изменения скорости горения от начальной температуры заряда и случайных отклонений параметров. Применение такой настройки может быть целесообразно при узких температурных диапазонах эксплуатации.

2. Поддержание постоянного расхода продуктов сгорания на потребитель энергии с помощью:

а) стабилизатора расхода, находящегося между камерой газогенератора и выходным соплом и поддерживающего заданное давление $p_{кл}$ перед ним. При использовании такого стабилизатора исключается выброс продуктов сгорания в атмосферу, минуя потребитель энергии; газоприход в этом случае стабилизируется воздействием на скорость горения твердого топлива переменным давлением

$$\frac{p}{p_n} = \left(\frac{u_1(T_3)}{u_{1n}(T_3)} \right)^{1/\gamma},$$

которое изменяется вследствие регулирования площади проходного сечения на входе в камеру стабилизатора расхода согласно соотношению

$$F_{кл} = \frac{\dot{m}\beta}{pq(\pi_{кл})\eta}, \text{ где } \pi_{кл} = p_{кл}/\eta p.$$

При постоянной площади критического сечения выходного сопла ($F_{кр} = \text{const}$) это будет означать постоянство расхода (режим $\dot{m} = \text{const}$). Разброс мощности газогенератора в этом случае равен

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N}{N} = & \left(\frac{\Delta p_{кл}}{p_{кл}} \right)_п + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \chi}{\chi \partial T_3} + \frac{\partial RT}{RT \partial T_3} \right) \pm \\ & \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta p_{кл}}{p_{кл}} \right)^2 + \left[\left(1 + \frac{2\tau(\lambda_a)}{1 - \lambda_a^2} \frac{\Delta F_{кр}}{F_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \chi RT}{2\chi RT} \right)^2 + \left(\frac{2\tau(\lambda_a)}{1 - \lambda_a^2} \frac{\Delta F_a}{F_a} \right)^2}, \end{aligned}$$

где $(\Delta p_{кл}/p_{кл})_п$ — неслучайная погрешность стабилизатора;

б) стабилизатора давления, поддерживающего заданное давление в газовом тракте газогенератора (режим $p = \text{const}$) и сбрасывающего излишки продуктов сгорания в окружающую среду.

Разброс мощности, поступающей на потребитель, в этом случае также определяется выше приведенной формулой, а разброс расхода топлива равен

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}} = & \frac{\partial u_1}{u_1 \partial T_3} \Delta T_3 + \left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)_п + v \left(\frac{\Delta p_{кл}}{p_{кл}} \right)_п \pm \\ & \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_r}{Q_r} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left(\frac{\Delta u_1}{u_1} \right)^2 + \left(v \frac{\Delta p_{кл}}{p_{кл}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_6}{K_6} \right)^2}, \end{aligned}$$

где $(\Delta p_{кл}/p_{кл})_п$ — неслучайная погрешность стабилизатора давления.

Твердотопливный газогенератор может сообщаться с основной камерой, которая выступает в этом случае и как ресивер-стабилизатор давления в газогенераторе (с точностью до характерных для нее отклонений давления). После запуска двигателя по соединительному газоходу («газовой связи») сначала продукты сгорания основного топлива проникают в газогенератор, воспламеняя его твердотопливный заряд, а затем излишки продуктов газогенерации $\Delta \dot{m}$ перетекают в камеру [8]:

$$\Delta \dot{m} = \frac{pq(\pi)\mu F}{\beta},$$

где $\pi = p_k/p$; p_k и p — давление в основной камере и газогенераторе; μ , F — коэффициент расхода и площадь проходного сечения соединительного газохода; $q(\pi)$ — функция Сен-Венана — Ванцелля; приближенно $q(\pi) = \sqrt{1 - \frac{(\pi - \pi_{кр})^2}{(1 - \pi_{кр})^2}}$; β — расходный комплекс (для продуктов газогенерации).

Если расход газа на вспомогательные цели максимальный, то $\Delta \dot{m}$ мало и перепад давления между газогенератором и камерой $p = p_k = p(1 - \pi)$ наименьший, и его величина должна гарантировать отсутствие попадания продуктов сгорания основного топлива в полость газогенератора. При прекращении питания вспомогательных устройств увеличиваются $\Delta \dot{m}$ и $p - p_k$, а перетекание газов в основную камеру приводит к увеличению давления и снижению температуры газов в ней. Детальная система уравнений газосвязанных камер с твердотопливными зарядами приведена в работе [71].

4.3. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Расход продуктов газогенерации твердотопливного газогенератора (рис. 4.5) можно регулировать путем изменения площади критического сечения сопла, скорости горения топлива, площади горячей поверхности, а также с помощью комбинированных схем [65, 78, 80].

Перемещение регулятора. Известным методом регулирования расхода является изменение площади минимального сечения с помощью различных механических задвижек и клапанов, к профилям которых в области сужения обычно не предъявляются большие требования по обеспечению параллельного и равномерного течения газа (в отличие, например, от жестких требований к профилям подвижного центрального тела и сопла РДТТ с регулируемой тягой, рис. 4.6). Для оценки динамических характеристик рассматривают изменения во времени командного электрического напряжения и тока в обмотке электропривода, хода клапана и давления (рис. 4.7) [6, 10].

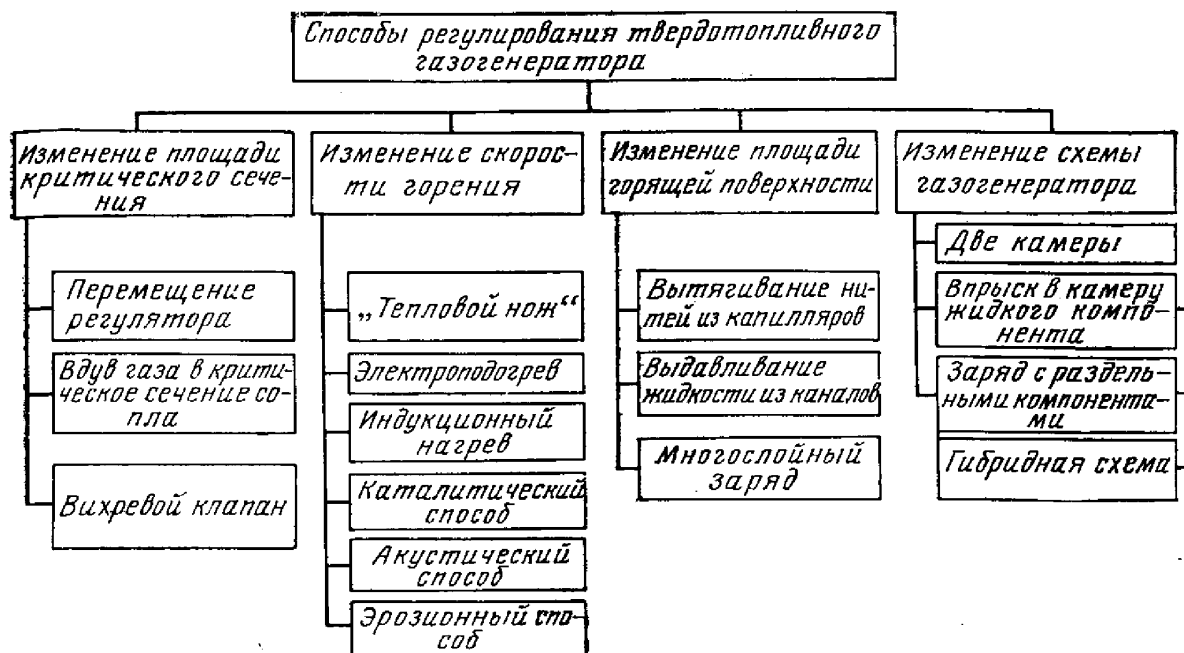


Рис. 4.5. Способы регулирования твердотопливных газогенераторов

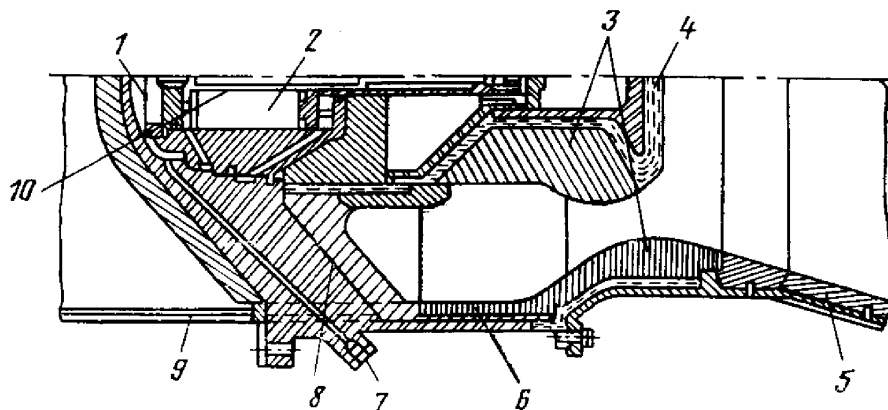


Рис. 4.6. Сопло РДТТ с подвижным центральным телом:

1—центральное тело; 2—гидроцилиндр; 3—вкладыш центрального тела и горловины сопла; 4—термоизоляция донной части центрального тела; 5—раструб сопла; 6—входная часть сопла; 7—штуцер подачи рабочей жидкости; 8—пилонь крепления центрального тела; 9—корпус; 10—потенциометр обратной связи

Для степенной зависимости скорости горения от давления справедливо соотношение вида

$$p/p_{\text{ном}} \approx (F_{\text{кр}}/F_{\text{кр.ном}})^{-\frac{1}{1-\nu}},$$

при этом
$$\dot{m}/\dot{m}_{\text{ном}} \approx \frac{F_{\text{кр}} p}{F_{\text{кр.ном}} p_{\text{ном}}} \approx (F_{\text{кр}}/F_{\text{кр.ном}})^{-\frac{\nu}{1-\nu}}.$$

Регулирование расхода в ограниченных пределах возможно также с помощью дросселя, работающего при докритическом перепаде давления и расположенного в газоходе. Газогенератор может иметь несколько газоходов и во всех или только некото-

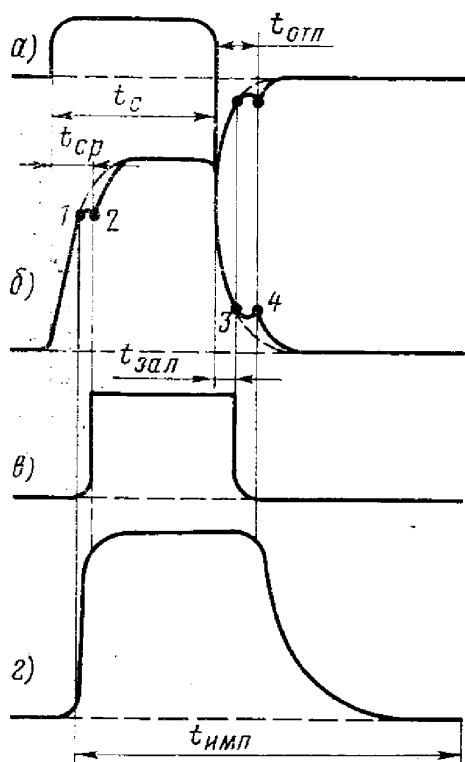


Рис. 4.7. Динамические характеристики регулируемого газогенератора:

а—командное напряжение; б—сила тока; в—ход клапана; г—давление в газогенераторе; 1, 3—начало движения якоря; 2, 4—посадка якоря на стоп-седло; t_c —время командного сигнала; $t_{ср}$ —время срабатывания; $t_{отп}$ —время отпущения; $t_{зал}$ —время залипания якоря; $t_{имп}$ —время импульса давления

рых из них могут быть устройства для регулирования площади проходного сечения.

При достаточно большом увеличении площади критического сечения возможно гашение твердотопливного заряда и выключение газогенератора.

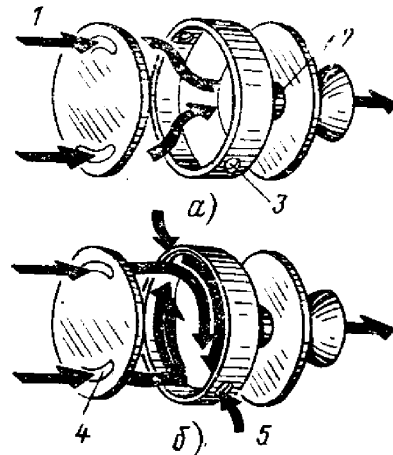


Рис. 4.8. Вихревой клапан:

а—без управляющего газа; б—с управляющим газом; 1—поток газа из газогенератора; 2—выходное сопло; 3—тангенциальное окно для входа управляющего газа; 4—периферийный канал для входа газа из газогенератора; 5—поток управляющего газа

Вдув газа в критическое сечение сопла. Если вдувать вспомогательный газ по кольцу в критическое сечение сопла (или вблизи от него), то этот поток оттеснит внутрь основной поток и тем самым уменьшит площадь критического сечения на $\Delta F = \Delta F / F_{кр}$.

Проведя преобразование уравнения сохранения массы, получим

$$\frac{p(t)}{p_0} = \left(\frac{1}{1 - \Delta F} \right)^{1/(1-\nu)} \left[\frac{\mu_0}{\mu(t)} \right]^{1/(1-\nu)};$$

$$\frac{\dot{m}(t)}{\dot{m}} = \left(\frac{1}{1 - \Delta F} \right)^{\nu/(1-\nu)} \left[\frac{\mu}{\mu(t)} \right]^{\nu/(1-\nu)}.$$

Газ для вдува в область критического сечения сопла с целью регулирования расхода может поступать либо из автономного источника, либо непосредственно из регулируемого газогенератора; этот способ малоэффективен.

Вихревой клапан. Регулирование газогенератора возможно с помощью вихревого клапана (рис. 4.8), включенного в газоход.

Такой клапан имеет периферийные каналы для входа газа из газохода (оси каналов параллельны оси клапана), вихревую камеру с тангенциальными отверстиями для входа управляющего газа и центральное выходное сопло.

При отсутствии управляющего потока газы проходят вихревую камеру без закрутки и истекают через выходное сопло. Давление при этом в газогенераторе равно

$$p_{\text{ном}} = \left(\frac{u_1 Q S \beta}{\eta_{\text{ном}} F_{\text{кр}}} \right)^{1/(1-\nu)},$$

где $\eta_{\text{ном}}$ — коэффициент газодинамических потерь в дросселе на номинальном режиме.

Если регулирующий газ тангенциально поступает в вихревую камеру, то общий газовый поток закручивается, а образующаяся центробежная сила создает радиальный градиент давления в камере. При этом увеличивается давление на выходе из периферийных каналов и уменьшается приток газа из газохода.

Экспериментальные расходные характеристики одного из испытанных при постоянном давлении на входе в периферийные каналы ($p_{\text{п}} = \text{const}$) клапанов представлены в зависимости от относительного давления газа в канале управления $\bar{p}_y = p_y/p_{\text{п}}$ [74]:

$\bar{p}_y$	...	1	...	1,1	...	1,2	...	1,3
$\bar{m}_y$	...	0	...	0,15	...	0,2	...	0,25
$\bar{m}$	...	1	...	0,88	...	0,28	...	0,25
$\bar{p}$	...	1	...	0,2	...	0,07	...	0,05

$\bar{m}_y = \frac{\dot{m}_y \beta}{p_{\text{п}} F_{\text{кр}}}$ — относительный расход на управление;

$\bar{m} = \dot{m} \beta / p_{\text{п}} F_{\text{кр}}$ — относительный расход через сопло; газы одинакового состава;
 $\bar{p}$ — относительный импульс газового потока при истечении из клапана со сверхзвуковым соплом.

Газ для регулирования может поступать либо из автономного источника (в том числе автономного твердотопливного газогенератора), либо из этой же газогенераторной системы. В последнем случае в тракте, подводящем газ к периферийным каналам клапана, необходимо предусмотреть дроссель (местное сопротивление), с помощью которого обеспечивается избыток давления в управляющем потоке по сравнению с регулируемым $\bar{p}_y > 1$ (рис. 4.9)

При известном $\bar{p}_y$ имеем

$$u_1 Q S p^{\nu} = \frac{\bar{m} \eta_x p F_{\text{кр}}}{\beta}$$

или
$$p = \left(\frac{u_1 Q S \beta}{\bar{m} \eta_x F_{\text{кр}}} \right)^{1/(1-\nu)} = p/p_{\text{ном}} \left(\frac{\eta_{\text{ном}}}{\eta_x \bar{m}} \right)^{1/(1-\nu)},$$

где $\eta_x = \eta_{\text{п}}/\bar{p}_y$ — газодинамические потери на дросселе; $\eta_{\text{п}}$ — газодинамические потери в электропневмопреобразователе.

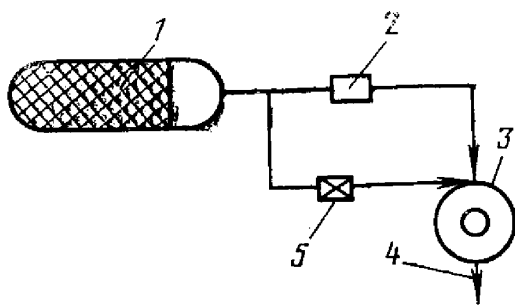


Рис. 4.9. Твердотопливный газогенератор с вихревым клапаном на выходе:

1—газогенератор; 2—дроссель; 3—вихревой клапан; 4—истечение газа; 5—электропневмопреобразователь

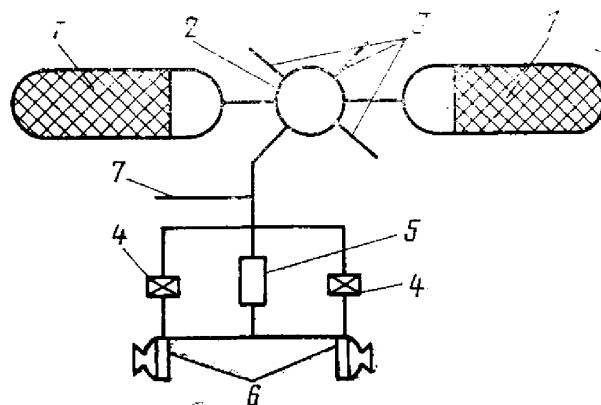


Рис. 4.10. Реактивная система управления полетом:

1—твердотопливный газогенератор; 2—ресивер; 3—газоходы к четырем парам струйных блоков; 4—электропневмопреобразователь; 5—дроссель; 6—вихревые клапаны со сверхзвуковыми соплами; 7—газоход к креновым соплам

При достаточно большом полном давлении управляющего газа (например, $\bar{p}_y = 1,3$) статическое давление на периферии вихревой камеры сравняется с давлением в регулируемом газе и его течение прекратится; в этом случае через сопло клапана протекает только управляющий газ ($\bar{m} = \bar{m}_y = 0,25$).

Сопло вихревого клапана может быть выполнено со сверхзвуковой частью, и такой клапан может быть использован в качестве регулируемого выходного устройства реактивной системы.

Четыре пары таких устройств (в каждой паре сопла направлены во взаимно противоположные стороны и работают по схеме тяга — противотяга) входят, например, в реактивную систему управления полетом [51] (рис. 4.10).

Вихревой клапан не имеет подвижных деталей и может применяться для регулирования двухфазных потоков, например, в каналах управления вектором тяги маршевого двигателя с помощью продуктов сгорания основного металлосодержащего топлива.

«Тепловой нож» для регулирования скорости горения твердого топлива представляет собой пластинчатую или игольчатую конструкцию, выполненную из жаропрочных материалов с высокой теплопроводностью (молибден, вольфрам). Он прижимается к горячей торцевой поверхности с помощью сервопривода, омывается продуктами сгорания, нагревается ими и прогревает топливо в местах соприкосновения, увеличивая местную скорость горения. Изменением усилия прижатия ножа к поверхности горения заряда можно изменять в довольно широких пределах расход продуктов газогенерации. Расчеты показывают, что возможный диапазон регулирования составляет 1...3,5 [патент США № 3630028]. Прогреть слои топлива можно также с помощью проложенных в нем тонких трубок, по которым проходит течение горячего газа [патент США № 3097481].

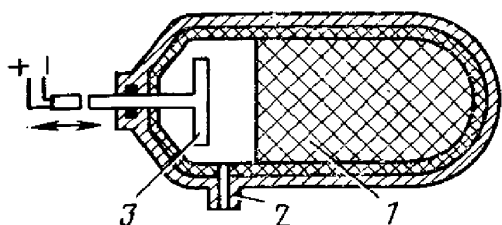


Рис. 4.11. Газогенератор многократного включения с каталитической решеткой:

1—заряд торцевого горения; 2—выходной патрубок; 3—каталитическая решетка с нагревателем

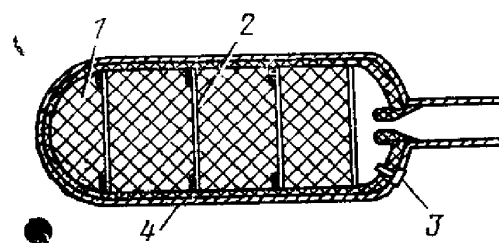


Рис. 4.12. Импульсный газогенератор на твердом топливе:

1—твердое топливо; 2—термоизоляционные прокладки; 3—воспламенитель первой секции; 4—система повторного воспламенения заряда

Электроподогрев. Если в заряд твердого топлива предварительно поместить проводник, то при пропускании через него электрического тока будут нагреваться примыкающие к нему слои топлива, что приведет к повышению скорости горения вблизи проводника. Регулируя интенсивность тепловыделения в проводнике, можно добиться нужной скорости горения заряда. Диапазон регулирования может быть достаточно большим: наименьшая массовая скорость горения достигается при отсутствии тока, а наибольшая — ограничивается температурой начала разложения топлива, прилегающего к проводнику; с учетом этого диапазон регулирования расхода составляет 1...5.

Предложены также другие способы регулирования скорости горения с помощью электрических полей [патент США № 3529425]: с помощью электрической дуги между изолированными электродами, заделанными в заряд; с помощью пропускания тока через электропроводные продукты сгорания между вспомогательным электродом, расположенным в канале, и электропроводным зарядом твердого топлива; путем индукционного нагрева заряда.

В случае специального твердого топлива, газифицируемого с помощью каталитической решетки при одновременном нагревании также возможно создание газогенератора многократного включения (патент США № 3797238) (рис. 4.11).

Твердое топливо в этом случае может быть изготовлено, например, из нитрата аммония с введением небольших присадок (серы, углеводородов и т. п.), а в решетке размещается катализатор, например, бихромат калия, и нихромовый нагревательный элемент. Для включения такого газогенератора решетка перемещается специальным приводом к поверхности заряда с одновременным нагреванием. Регулирование скорости газификации твердого окислителя и расхода производится путем изменения скорости перемещения каталитической решетки. Горение прекращается при удалении решетки.

Изменять площадь горячей поверхности предлагается либо с помощью вытягивания предварительно проложенных в толще заряда нитей, либо путем программного выдавливания жидкости,

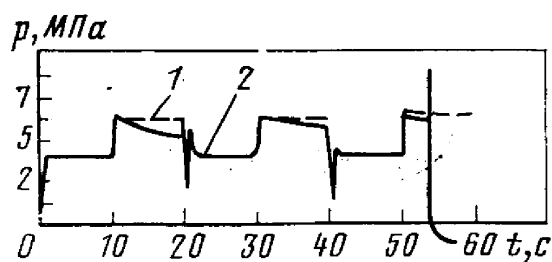


Рис. 4.13. Экспериментальная и расчетная диаграммы давления в газогенераторе:

1—расчет; 2—испытание

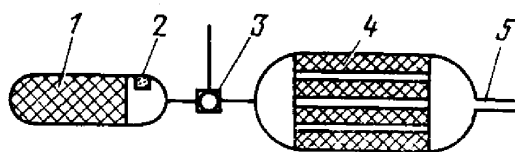


Рис. 4.14. Твердотопливный ракетный двигатель многократного включения:

1—управляющий газогенератор; 2—воспламенитель; 3—клапан-газораспределитель; 4—многоканальный заряд; 5—выхлопной патрубок

залитой в тонкие цилиндрические каналы [патент Франции № 1418758], либо с помощью многослойного (таблеточного) заряда.

Многослойный заряд состоит из отдельных секций, каждая имеет воспламенитель, брикет твердого топлива и теплоизолирующую прокладку (рис. 4.12). Каждый брикет после воспламенения горит с торца до полного выгорания. Заданный уровень давления, а следовательно, и расхода газа в газогенераторе может поддерживаться с помощью замкнутого контура регулирования. После того, как очередная потребность в газе удовлетворена, регулятор закрывается, а горение секции заряда продолжается, вызывая рост давления в газогенераторе. Уровень, до которого может произойти это повышение давления, зависит от количества твердого топлива, оставшегося в секции, величины свободного объема газогенератора и давления, на которое рассчитан предохранительный клапан газогенератора. Сжатый газ находится в газогенераторе, пока не возникнет потребность в следующем импульсе. В этот момент регулятор открывается и начинается истечение газа из газогенератора; давление при этом снижается до заданного минимального уровня, после чего датчик давления посылает сигнал на включение находящегося вблизи оси воспламенителя следующей секции заряда. На рис. 4.13 представлена зависимость давления от времени для первых трех секций заряда; расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Для многослойных зарядов предложена также система воспламенения с биметаллическим элементом, например, из палладия с алюминиевым сердечником; при сплавлении этих металлов выделяется тепло ≈ 3 кДж/г.

Гашение заряда твердого топлива может быть осуществлено:

а) открыванием дополнительных сопел; б) впрыском охладителя; в) впрыском охладителя после вскрытия дополнительных сопел [64, 82].

Открывание дополнительных сопел приводит к падению давления в газогенераторе, и заряд может погаснуть вследствие либо

слишком малого уровня давления (на новом режиме), недостаточного для устойчивого горения твердого топлива, либо слишком резкого падения давления, за которым не успевает перестроиться прогретый слой топлива.

На первом способе гашения основана схема РДТТ с управляющим газогенератором (рис. 4.14), в котором находится заряд торцевого горения. В камере двигателя размещен многоканальный заряд с большой площадью горячей поверхности, причем топливо этого заряда горит только при обтекании его продуктами газогенерации и давлении больше критического (см. гл. 1 и п. 1.2). Примерный состав топлива заряда газогенератора: перхлорат аммония — 40...70%, горючее-связка 10...35%, оксид (охладитель) — 5...35%, добавки 0...10% [патент США № 3908358]. При переключении клапана в соединительном газоходе продукты газогенерации истекают в боковую ветвь газохода, не попадают в камеру с многоканальным зарядом, и он гаснет. Для повторного включения с помощью клапана осуществляется подача газов из газогенератора в основную камеру. Таким образом, возможно создание РДТТ многократного включения и подобного газогенератора.

Опыты показывают, что существует критическая величина скорости сброса давления $(dp/dt)_{кр} < 0$, обеспечивающая прекращение горения. Для смесового топлива на основе перхлората аммония и сополимера бутадиена (связка) горение прекращается при $dp/dt < (dp/dt)_{кр}$, где $(dp/dt)_{кр}$ — линейно зависит от начального давления ($p = 2,5 \dots 8,5$ МПа):

$$(dp/dt)_{кр} = 150 - 180p < 0.$$

На величину $(dp/dt)_{кр}$ влияет дисперсность компонентов и состав топлива. В табл. 4.5 приводятся результаты влияния состава смесового топлива на $(dp/dt)_{кр}$ [50].

Увеличение стационарного значения скорости горения твердого топлива, уровня давления в камере двигателя, а также уменьшение показателя γ приводят к росту абсолютной величины $(dp/dt)_{кр}$. В зависимости от типа связующего она увеличивается в следующем направлении: полиизобутилен → полиуретан → сополимер полибутадиена, акриловой кислоты и акрилонитрила → полибутадиен с концевыми карбоксильными группами [50]. Для полиуретанового топлива уменьшение дисперсности перхлората аммония облегчает гашение заряда, а для полибутадиеновых топлив — затрудняет; введение в состав топлива катализаторов скорости горения обычно приводит к росту модуля $(dp/dt)_{кр}$.

Практически площадь окон, требуемая для гашения, примерно равна площади поперечного сечения газогенератора.

Гашение заряда твердого топлива вскрытием больших дополнительных площадей истечения газа используется в некоторых схемах отключения тяги РДТТ, в том числе в экспериментальной схеме обнуления тяги перемещением сопла по коническим болтам, выступающим за сопловой фланец и имеющим более широкую часть на заднем конце (рис. 4.15). На маршевом режиме сопло удерживается частично за счет плотной посадки на конических болтах, частично пироболтами. После срабатывания пироболтов по команде на обнуление тяги сопло отодви-

Таблица 4.5

Влияние состава смесового твердого топлива на $(dp/dt)_{кр}$
(по модулю)

Перхлорат аммония		Тип связующе-го	Содержание свя-зующего, %	Содержание Al, %	Катализатор	Содержание ката-лизатора, %	Содержание сажи, %	u мм/с при $p=9$ МПа	$(dp/dt)_{кр}$ ГПа/с
содержа-ние, %	размер частиц, мкм								
76,0	5	ПБККГ ¹	24,0	—	—	—	—	26,4	0,8...2
76,0	100		24,0	—	—	—	—	8,5	0,5...1
76,0	200		24,0	—	—	—	—	8,6	0,5...0,8
75,5	100	ПБККГ	24,0	—	Ферроцен	0,5	—	10,2	1,1...1,6
75,3	100	ПБККГ	23,7	—	Хромит меди	1,0	—	10,5	1,2...2,0
74,9	100	ПБККГ	23,6	—	Хромит меди	1,0	0,5	11,1	1,2...1,7
76,0	100	ПБККГ	23,5	—	Окись железа	0,5	—	10,4	0,4...1,2
76,0	100	ПБККГ	23,5	—	—	0,5	—	9,6	0,5...1,6
76,0	5/200	ПБККГ	24,0	—	—	—	—	10,1	0,6...1,4
69,2	5/200	ПБККГ	21,8	9	—	—	—	7,7	0,8...1,3
62,0	5/200	ПБККГ	19,5	18	Ферроцен	0,5	—	9,1	2,6...3,5
75,0	200	ПБАН ²	23,5	—	Хромит меди	1,0	0,5	8,9	0,2...0,4
79,0	150	ПУ ³	21,0	—	—	—	—	0,4	0,8

Примечание. ПБККГ¹—связующее на основе полибутадиена с концевыми карбоксильными группами; ПБАН²—связующее на основе сополимера бутадиена и акрилонитрила; ПУ³—полиуретановое связующее; u —начальная скорость горения при постоянном давлении.

гается по коническим болтам на некоторое расстояние. Происходит их протяжка через отверстия во фланце, сопло останавливается, и в сопловой части корпуса образуется большое окно, площадь которого превышает площадь критического сечения сопла в несколько раз (≈ 5). Время перемещения сопла порядка $(1 \dots 2) \cdot 10^{-2}$ с, расстояние ≈ 20 см. Часть газов, вытекающих через это большое окно, тормозится на скошенном сопловом фланце и тем самым создает некоторое усилие, направленное назад. После опорожнения двигателя заряд гаснет [89]. Такой способ отодвигания сопла с постоянным торможением его на конических болтах почти не приводит к увеличению осевых перегрузок в период отсечки в отличие от схемы с полным отделением соплового блока, в которой возникает сила порядка pF , где p —давление в двигателе; F —площадь прорубаемого окна [89].

На РДТТ в процессе его опорожнения при перемещении сопловой части действует тяга, состоящая из ($p_n=0$):

полного импульса газового потока на выходе из основного сопла:

$$P_n = \dot{m}v_a + p_a F_a;$$

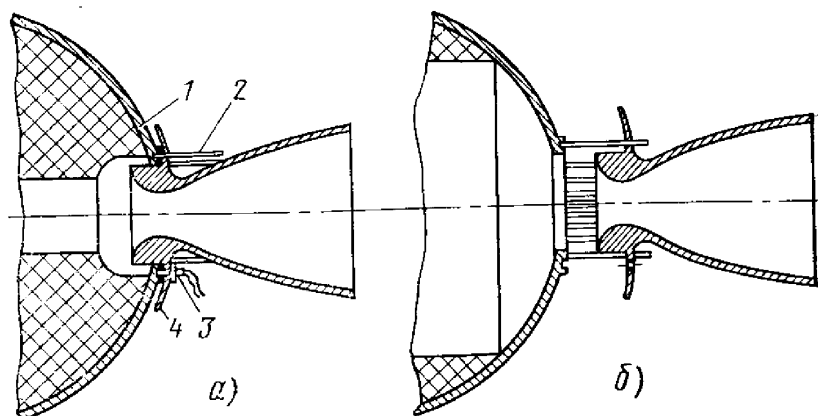


Рис. 4.15. Выключение тяги РДТТ перемещением сопла по коническим болтам:

a—до отключения тяги; *б*—после отключения тяги; 1—сопловая часть корпуса; 2—конический болт; 3—разрывной болт (условно показан один); 4—фланец сопла

полного импульса газового потока на выходе из тарельчатого сопла, образованного кромкой вскрываемого отверстия (радиуса r_0), частью отодвигающегося основного сопла и экраном (радиуса r_3):

$$P_{п.т} = \dot{m}_t v_t \cos \gamma_t - p_t \pi (r_3^2 - r_0^2),$$

где p_t и γ_t — средние давление и угол между направлениями скоростей v_a и v_t на конической поверхности, соединяющей кромки отверстия и экрана;

сил давления на наружную поверхность сопловой крышки

$$2\pi \int_{r_0}^{r_m} p r dr,$$

где r_m — радиус мицеля двигателя;

сил давления на наружную поверхность экрана основного сопла (при взаимодействии потоков, истекающих из основного и тарельчатого сопел, давление в этой области отличается от окружающего):

$$2\pi \int_{r_a}^{r_3} p r dr.$$

Твердотопливные газогенераторы с устройствами гашения путем отделения (откидывания) сопловой части успешно используются в лабораторных исследованиях горения заряда в различных условиях, например, при разных скоростях газового потока вдоль горящей поверхности или наличии колебаний давления.

Гашение заряда впрыском охладителя. Горение заряда твердого топлива можно прервать, впрыскивая быстро (за время, много меньшее времени релаксации свободного объема) достаточное количество охладителя, например воды.

При этом охлаждается газовая фаза; охладитель непосредственно воздействует на горящую поверхность топлива; падает давление в газогенераторе (вследствие охлаждения и истечения парогазовой смеси).

После гашения заряда должно быть предотвращено самовоспламенение. Это может быть достигнуто дальнейшим охлаждением или химическим подавлением реакций в камере газогенератора.

ра. Так, аммиак, инжектированный в камеру газогенератора, препятствует разложению окислителя и тем самым предотвращает самовоспламенение. Щелочной металл и радикалы галогенов приостанавливают многие цепные реакции горения. Эти радикалы соединяются с промежуточными веществами реакции, что предотвращает или подавляет горение.

Таким образом, при выборе жидкости для сброса давления требуется охладитель с высокой теплоемкостью, высокой теплотой парообразования, с большой молекулярной массой и достаточно низкой температурой кипения.

Эмпирическая зависимость, определяющая массу воды, необходимую для полного гашения, имеет вид

$$m_v = 2m + 3,52S,$$

где m_v — масса воды, необходимая для полного гашения (кг); m — масса газа в камере (кг); S — площадь горения к моменту гашения, m^2 .

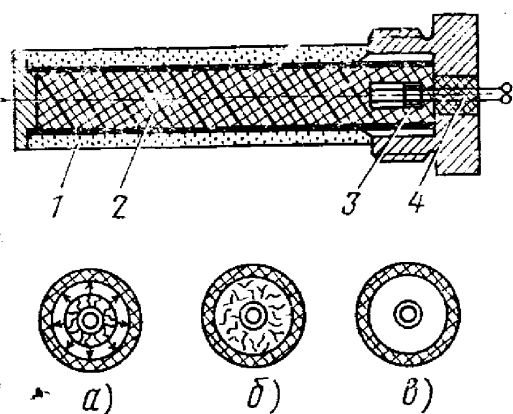
Время испарения капли пропорционально квадрату ее диаметра: $t_{\text{исп}} \approx 1,2 d^2$ ($t_{\text{исп}}$ — в мс; d — в мм).

В качестве охладителя рассматривались также твердые вещества, выбрасываемые взрывом из пирефорсунки внутрь газогенератора [22].

Полное количество охладителя, выраженное в «водяных» эквивалентах, m_2 равно

$$m_2 = m_r + m_{\text{гор}} + \Delta m,$$

где m_r — расход охладителя, необходимый для требуемого понижения температуры газов в камере сгорания (примерно, 2,5 кг воды на 1 кг нагретых газов); $m_{\text{гор}}$ — расход охладителя, необходимый для непосредственного гашения зоны горения твердого топлива и вычисляемой по эмпирической формуле



$$m_{\text{гор}} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{Sp^{1,17}}{\Delta p_{\text{ф}} \sqrt{\sin \alpha}},$$

где S — площадь горения заряда, cm^2 ; p — давление в камере сгорания, 10^5 Па; $\Delta p_{\text{ф}}$ — перепад давления на форсунке, 10^5 Па; $\sin \alpha$ — средний угол между направлением охладителя и поверхностью горения заряда; Δm — дополнительный небольшой расход охладителя после гашения заряда для предотвращения повторного воспламенения.

Для охлаждения продуктов сгорания в камере газогенератора до температуры 500 К требуется около 3,5 кг кристаллогидрата суль-

Рис. 4.16. Пирефорсунка для радиальной подачи твердого охладителя:

а — детонация спирального заряда; б — гашение топлива; в — погашенный заряд; 1 — прессованный твердый охладитель; 2 — спиральный заряд; 3 — детонатор; 4 — узел воспламенения

тата аммония $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ на 1 кг продуктов сгорания.

Желательно спроектировать систему гашения так, чтобы частицы твердого охладителя разлетались радиально и встречали поверхность горения заряда под углом $45 \dots 90^\circ$. Вариант пирофорески представлен на рис. 4.16. В этой конструкции порошок охладителя напрессован непосредственно на шнур детонирующего заряда с обеспечением контакта между ними. Это улучшает распространение ударной волны и уменьшает величину диспергированных частиц до микронного размера. Возможно также применение листовых и таблеточных детонирующих зарядов (для обеспечения заданных временных характеристик и направления разлета частиц охладителя).

Для предотвращения самопроизвольного воспламенения необходимо уменьшить лучистый теплообмен между элементами конструкции газогенератора и зарядом охлаждением этих элементов, подбором теплозащитных материалов с малым коэффициентом излучения и т. д.

Несмотря на то, что в лабораторных условиях изучены различные способы регулирования двигателей и газогенераторов на твердом топливе, в ракетной технике удалось реализовать только единичные схемы (см., например, рис. 4.10).

4.4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТВЕРДОТОПЛИВНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

В квазистационарной постановке, с большой степенью точности описывающей переходный процесс после распространения волн, предполагается, что давление и температура газов будут лишь функциями времени.

При этом изменения p и T во времени определяются системой уравнений газового и энергетического баланса в камере твердотопливного газогенератора [82]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{pV}{\tau} \right) = m f (\dot{\psi} - \dot{\eta});$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{mf\tau}{pV} \{ [\eta_3(p) - \tau] \dot{\psi} - (k-1) \tau \dot{\eta} \},$$

где $\dot{\psi}$ и $\dot{\eta}$ — относительный приход и расход газов:

$$\dot{\psi} = \frac{q_\tau S u_1 p^\nu}{m} f(t); \quad \dot{\eta} = \frac{p F_{кр}}{m \sqrt{f\tau}} m_{кр};$$

$\tau = T/T_v$ — относительная температура; T_v — температура сгорания при постоянном объеме; $f = RT_v$; m — масса заряда; $\eta_3(p)$ — полнота тепловыделения в камере; $V = V_0 - m/[q_\tau(1-\psi)]$ — свободный объем к моменту неуставившегося истечения; $u_1 p^\nu$ — скорость горения топлива (степенная зависимость); q_τ — плотность топлива; $f(t)$ — функция, определяющая распространение во времени пламени по поверхности (а также газоприход от воспламенительного устройства).

Полнота тепловыделения $\eta_3(p)$ при достаточно больших давлениях ($p \geq p^*$) равна единице.

Уравнение газового баланса определяет изменение количества газа $d(pV/f\tau)/dt$ за счет горения топлива $m\dot{\psi}$ и истечения газа через сопло $m\dot{\eta}$. Вместе с изменением количества газа происходит изменение энергии в объеме $\frac{d}{dt} \left(c_v T \frac{pV}{f\tau} \right) = \frac{d}{dt} \left[\frac{RTm}{k-1} (\dot{\psi} - \dot{\eta}) \right]$ вследствие секундного притока с продуктами сгорания $c_v T_v m\dot{\psi} = \frac{RT_v}{k-1} m\dot{\psi}$ и конвективного уноса через сопло:

$$\left(\frac{a_{кр}^2}{2} + \frac{k}{k-1} RT_{кр} \right) m\dot{\eta} = c_p T m\dot{\eta} = \frac{k}{k-1} RT m\dot{\eta}.$$

В результате получаем уравнение баланса энергии $d[\tau(\psi - \eta)]/dt = \dot{\psi} - k\tau\dot{\eta}$, которое после преобразований принимает исходный вид.

При малых изменениях $\delta F_{кр}/F_{кр}$ и малых отклонениях $\delta p/p_0$ и $\delta \tau$ от равновесных значений p_0 и τ , определяемых условием $\dot{p} = \dot{\tau} = 0$, нелинейную систему можно линеаризовать. В результате линеаризации системы, полагая $u_{кр} S_{кр}$ и f постоянными в течение переходного процесса, получим

$$\begin{aligned} \frac{d\delta p}{p_0 dt} &= -\frac{k}{T_p} \left[(1 - \nu + \varepsilon_0) \frac{\delta p}{p_0} + \frac{1}{2} \delta \tau_1 + \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} \right]; \\ \frac{d\delta \tau_1}{dt} &= -\frac{1}{T_p} \left[(k-1)(1 - \nu + \nu \varepsilon_0) \frac{\delta p}{p_0} + \frac{k+1}{2} \delta \tau_1 + (k-1) \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}} \right], \end{aligned}$$

где $T_p = V\beta/f_0 F_{кр}$; $\varepsilon_0 = p_0/qf$; $f_0 = f\tau_0 = f/k$ — приведенная сила топлива; $\tau_1 = \tau/\tau_0 = k\tau$.

Характеристическое уравнение системы ($T_p = \text{const}$):

$$T_p^2 s^2 + T_p s \left[k(1 - \nu + \varepsilon_0) + \frac{k+1}{2} + \varepsilon_0 \right] + k(1 + \varepsilon_0)(1 - \nu + \varepsilon_0) = 0.$$

Система устойчива, если коэффициенты характеристического уравнения положительны. Отсюда следует, что давление в газогенераторе устойчиво только при $\nu < 1 + \varepsilon_0$.

При $p \leq 5$ МПа величина ε_0 мала: $\varepsilon_0 \leq 3 \cdot 10^{-3}$ и этой величиной можно пренебречь для топлив со значениями $\nu \leq 0,8$.

Передаточная функция $\delta p/\delta F_{кр}$ при $\varepsilon_0 = 0$ имеет вид

$$\frac{\delta p}{\delta F_{кр}} = -\frac{p_0}{F_{кр}(1-\nu)} \frac{T_p s + 1}{T^2 s^2 + T_k s + 1} = -\frac{p_0}{F_{кр}(1-\nu)} \left(\frac{k_1}{T_1 s + 1} + \frac{k_2}{T_2 s + 1} \right),$$

где $T^2 = T_p^2/k(1-\nu)$; $T_k = T_p \left[1 + \frac{k+1}{2k(1-\nu)} \right]$;

$$T_{1,2} = T_p \left[\frac{1 + \frac{k+1}{2k(1-\nu)}}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[1 + \frac{k+1}{2k(1-\nu)} \right]^2 - \frac{1}{k(1-\nu)}} \right];$$

$$K_1 = \frac{T_1 - T_p}{T_1 - T_2}; K_2 = 1 - K_1.$$

Значения корней T_1 и T_2 и коэффициентов K_1 и K_2 приведены в табл. 4.6 для $K=1,25$ и различных значений v .

Таблица 4.6

Значения корней характеристического уравнения

Параметр	v			
	0,7	0,5	0	-0,5
T_1/T_p	3,15	2,0	1,27	1,13
T_2/T_p	0,84	0,8	0,63	0,48
K_1	0,93	0,83	0,42	0,20
K_2	0,07	0,17	0,58	0,80

Если площадь критического сечения $F_{кр}$ получает приращение $\delta F_{кр}$ мгновенно, то процесс изменения давлений определяется соотношением

$$\frac{\delta p}{p_0} = - \frac{\delta F_{кр}}{(1-v)F_{кр}} (1 - K_1 e^{-t/T_1} - K_2 e^{-t/T_2}).$$

При $k=1$ (процесс изотермический) $T_1 = T_p$; $T_2 = T_p/(1-v)$; $K_1 = 0$; $K_2 = 1$:

$$\left(\frac{\delta p}{p_0} \right)_{k=1} = - \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}(1-v)} \left(1 - e^{-\frac{(1-v)t}{T_p}} \right).$$

Время переходного процесса

$$t^* = \frac{2,3(k+1)}{2k(1-v)} T_p.$$

Отношение времени переходного процесса t^* к времени работы генератора $t_{п} = m\beta/p_0 F_{кр}$ мало: $t^*/t_{п} \approx \frac{2}{1-v} \frac{q}{q_r}$.

Асимптотическое значение изменения давления равно (при $t \rightarrow \infty$):

$$\frac{\delta p}{p_0} = - \frac{1}{1-v} \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}}.$$

Передающая функция для расхода $\delta \dot{m}/\delta F_{кр}$ имеет вид ($\delta \mu/\delta F_{кр} = 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\delta \dot{m}}{\delta F_{кр}} &= \frac{\dot{m}_0}{F_{кр}} \left[1 + \frac{F_{кр}}{p_0} \frac{\delta p_0}{F_{кр}} \right] = \\ &= - \frac{\dot{m}_0}{(1-v)F_{кр}} \left[\frac{K_1}{T_1 s + 1} + \frac{K_2}{T_2 s + 1} - (1-v) \right]. \end{aligned}$$

В случае мгновенного изменения площади критического сечения $F_{кр}$ на $\delta F_{кр}$ процесс изменения расхода определится соотношением

$$\delta \dot{m} = - \frac{\dot{m}_0 \delta F_{кр}}{(1 - \nu) F_{кр}} (\nu - K_1 e^{-t/T_1} - K_2 e^{-t/T_2});$$

при $t=0$: $\delta \dot{m} = \dot{m}_0 \frac{\delta F_{кр}}{F_{кр}};$

при $t \rightarrow \infty$: $\delta \dot{m} \rightarrow - \frac{\dot{m}_0 \delta F_{кр}}{F_{кр}} \frac{\nu}{1 - \nu}.$

Из анализа этой зависимости следует, что для регулируемых газогенераторов определенные преимущества имеют такие топлива, у которых $\nu < 0$. В этом случае уменьшается запаздывание в отработке сигнала; например, с увеличением площади критического сечения расход увеличивается сразу, и приращение $\delta \dot{m}$ остается положительным (а при $\nu > 0$ расход сначала также растет, но затем уменьшается). Давление в газогенераторе при $\nu < 0$ менее чувствительно к случайным отклонениям внутрибаллистических параметров и изменениям температуры заряда. Поэтому рассматривались возможности создания топлив с отрицательными значениями ν (вплоть до $\nu = -2,5$) и их применения в газогенераторах [19]. При $\nu = 0$ невозможно регулирование расхода газогенератора с помощью изменения площади критического сечения выходного патрубка.

При глубоком регулировании необходимо учитывать нелинейность в зависимости скорости горения от давления. Кроме того, большое падение давления может сопровождаться снижением полноты тепловыделения при сгорании топлива; при малых $p \leq p^*$ $\eta_3(p) = a_1 p^{\nu_1} \leq 1$ ($\eta_3 = 1$ при $p \geq p^*$).

Раскрыв производную $d/dt(p/\tau)$ и используя уравнение энергии, получим

$$\frac{dp}{dt} = \frac{f}{V} [\eta_3(p) \dot{\psi} - k\tau \dot{\eta}];$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{f\tau}{pV} [(\eta_3(p) - \tau) \dot{\psi} - (k - 1)\tau \dot{\eta}].$$

Устойчивое решение этой системы уравнений должно удовлетворять начальным условиям:

$$\text{при } t=0$$

$$p = p_0; \quad \tau = \tau_0 = \frac{\eta_3(p_0)}{k}$$

и асимптотическим условиям:

$$\text{при } t \rightarrow \infty$$

$$p = p_\infty, \quad \tau = \tau_\infty = \frac{\eta(p_\infty)}{k},$$

причем начальные и асимптотические значения параметров газа взаимосвязаны уравнениями установившейся работы твердотопливного газогенератора

$$\dot{\psi}_0 = \dot{\eta}_0; \quad \dot{\psi}_\infty = \dot{\eta}_\infty.$$

Отсюда следует

$$\left(\frac{p_0}{p_\infty}\right)^v = \frac{p_0 F_{\kappa 0}}{p_\infty F_{\kappa \infty}} \sqrt{\frac{\eta_3(p_\infty)}{\eta_3(p_0)}}.$$

Введем новые переменные

$$X = (p/p_\infty)^{1-v-v_1}; \quad Y = (\tau/\tau_\infty)^{1/2} X;$$

$$Z = \frac{\eta_3(p_\infty) f_0 F_{\kappa \infty} t}{V \beta_\infty}$$

так, чтобы уравнение газового баланса было линейным относительно этих переменных:

$$\frac{dX}{dZ} = k(1-v-v_1)(1-Y);$$

$$\frac{X}{Y} \frac{dY}{dZ} = \frac{1}{2} \left[k - Y^2 X^{-\frac{v}{1-v-v_1}-2} - (k-1)Y \right] + k(1-v-v_1)(1-Y).$$

Начальные и асимптотические условия

$$Z=0: X=X_0 = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-v-v_1};$$

$$Y=Y_0 = X_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau_\infty}\right)^{1/2} > 1;$$

$$Z \rightarrow \infty: X=1; Y=1.$$

Теперь линеаризуем уравнение энергии относительно введенных переменных

$$\frac{d\Delta X}{dZ} = -k(1-v-v_1)\Delta Y;$$

$$\frac{d\Delta Y}{dZ} = -\left[k(1-v-v_1) + \frac{k+1}{2}\right]\Delta Y + \frac{1}{2}\left(\frac{v_1}{1-v-v_1} + 2\right)\Delta X.$$

Начальные и асимптотические условия

$$Z=0: \Delta X = X_0 - 1 = \Delta X_0; \quad \Delta Y = Y_0 - 1 = \Delta Y_0;$$

$$Z \rightarrow \infty: \Delta X = 0, \quad \Delta Y = 0.$$

Решение линейной системы

$$\begin{aligned} \Delta X(t) = & \frac{\beta_2 \Delta X_0 + k(1-v-v_1)\Delta Y_0}{\beta_2 - \beta_1} e^{\beta_1 Z} - \\ & - \frac{\beta_1 \Delta X_0 + k(1-v-v_1)\Delta Y_0}{\beta_2 - \beta_1} e^{\beta_2 Z}; \end{aligned}$$

$$\Delta Y(t) = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \left(\frac{1 - \nu - \frac{\nu_1}{2}}{1 - \nu - \nu_1} \Delta X_0 + \beta_1 \Delta Y_0 \right) e^{\beta_1 Z} +$$

$$+ \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \left(\frac{1 - \nu - \frac{\nu_1}{2}}{1 - \nu - \nu_1} \Delta X_0 + \beta_2 \Delta Y_0 \right) e^{\beta_2 Z},$$

где $\beta_{1,2} = -\frac{k(1 - \nu - \nu_1) + \frac{k+1}{2}}{2} \pm$

$$\pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[k(1 - \nu - \nu_1) + \frac{k+1}{2} \right]^2 - k \left(1 - \nu - \frac{\nu_1}{2} \right)}.$$

Это решение устойчиво при $\nu + \frac{\nu_1}{2} < 1$.

Решение исходной системы можно представить в виде

$$p/p_\infty = [1 + \Delta X(t)]^{\frac{1}{1-\nu-\nu_1}}; \quad \tau/\tau_\infty = \left[\frac{1 + \Delta Y(t)}{1 + \Delta X(t)} \right]^2.$$

Эти формулы дают начальные и асимптотические значения и с высокой точностью описывают процесс изменения давления и температуры при скачкообразном изменении площади критического сечения от $F_{кр}$ до $F_{кр\infty}$ с учетом переменной полноты тепловыделения топлива. В случае, если тепловыделение постоянно и теплотеря нет ($\eta_z = 1$), то для решения $p/p_\infty(t)$ можно записать миноранту $[p/p_\infty]_{\min}$ и мажоранту $[p/p_\infty]_{\max}$ в виде [82]

$$[p/p_\infty]_{\min, \max} = \left[F_{кр}/F_{кр\infty} + (1 - F_{кр}/F_{кр\infty}) e^{-\frac{k(1-\nu)f_0 F_{кр\infty} t}{\beta V}} \right]^{1/(1-\nu)},$$

где $k = c_p/c_v$ — для миноранты и $k=1$ для мажоранты ($F_{кр} < F_{кр\infty}$).

Если $T(t)$, $F_{кр}(t)$ и $S(t)$ (так же как и другие входящие в уравнение газового баланса параметры) суть известные функции времени, то уравнение газового баланса приводится к типу уравнения Бернулли:

$$\frac{dp}{dt} + Q_1(t)p = Q_2(t)p^\nu \quad (\nu < 1).$$

При решении этого уравнения

$$(p/p_\infty)^{1-\nu} = \exp \left[-(1-\nu) \int Q_1(t) dt \right] \times \left\{ (1-\nu) \int Q_2(t) \exp \left[(1-\nu) \int Q_1(t) dt \right] dt + C \right\}$$

постоянная интегрирования C определяется из начальных условий.

Например, в случае линейного увеличения горячей поверхности $\dot{\psi} = (q_r S u_1 p^\nu / m) f(t)$ уравнение газового баланса имеет вид ($T = \text{const}$, $F_{\text{кр}} = \text{const}$):

$$\frac{dx}{dz} = (1 - \nu)[f(z) - x],$$

где $f(z) = \begin{cases} z/z_1 & \text{при } 0 \leq z \leq z_1; \\ 1 & \text{при } z \geq z_1; \end{cases} \quad x = (p/p_\infty)^{1-\nu}; \quad z = f_0 F_{\text{кр}} t / \beta V.$

Для переходного процесса получим соотношения

$$z < z_1: \quad x = \frac{z}{z_1} - \frac{1}{(1-\nu)z_1} + \left(x_0 + \frac{1}{z_1(1-\nu)} \right) e^{-(1-\nu)z};$$

$$z > z_1: \quad x = 1 - \left[\frac{1}{(1-\nu)z_1} (e^{(1-\nu)z_1} - 1) - x_0 \right] e^{-(1-\nu)z}.$$

Изменения давления $p/p_\infty = x^{1/(1-\nu)}$ в зависимости от безразмерного времени z представлены на рис. 4.17 при различной скорости распространения пламени по поверхности заряда (при $\nu = 0,5$, $x_0 = 0,09$):

$1 - z = 0$, т. е. мгновенное включение поверхности:

$$\frac{p}{p_\infty} = \{ 1 - [1 - (p_0/p_\infty)^{0,5}] e^{-0,5z} \}^2;$$

$$2 - z_1 = 1: \quad p/p_\infty = (z - 2 + 2,3e^{-0,5z})^2 \quad \text{при } z < 1; \quad p/p_\infty = (1 - e^{-0,5z})^2 \quad \text{при } z > 1;$$

$$3 - z_1 = 2: \quad p/p_\infty = (0,5z - 1 + 1,3e^{-0,5z})^2 \quad \text{при } z < 2; \quad p/p_\infty = (1 - 1,42e^{-0,5z})^2 \quad \text{при } z > 2.$$

Приведенные данные показывают возможности математического моделирования переходных процессов в газогенераторах на твердом топливе.

Таким образом, при рассмотрении рабочего процесса в твердотопливном газогенераторе выделяют, как правило, три периода.

Начальный период. В этом периоде рассматриваются уравнения нестационарного (волнового на начальной стадии) течения продуктов сгорания воспламенителя и твердого топлива с учетом догорания в кислороде воздуха, прогрева и вспышки топлива, начального прогрева элементов конструкции.

Основной период. Для расчета этого периода используются уравнения квазистационарного течения газа и горения заряда твердого топ-

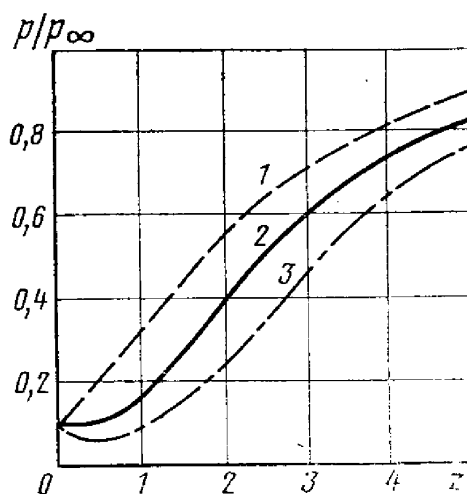


Рис. 4.17. Изменение давления в газогенераторе при различной скорости распределения пламени по поверхности заряда

лива; особое внимание уделяется переменным потерям тепла на нагрев элементов конструкции и теплозащитных материалов, а также неравновесному течению двухфазных продуктов сгорания в камере, фильтре и сопле.

Участок спада давления. Расчет ведется по уравнениям для осредненных по объему камеры параметров с учетом стохастических закономерностей перемещения горячей поверхности.

В регулируемых газогенераторах переходные процессы протекают не только в начале и конце работы, но и в ходе изменения режима; при расчете этих процессов необходимо учитывать динамику регулирующих устройств.

Построение теории опирается на экспериментальное изучение нестационарного теплообмена в сложных каналах, неравномерности скорости горения твердого топлива по объему заряда, газодинамических неоднородностей в камере, особенностей двухфазных течений.

Комбинированные схемы газогенераторов

5.1. ГАЗОГЕНЕРАТОР НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ С РАЗДЕЛЬНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

На основе использования твердотопливных зарядов с полностью или частично раздельными компонентами возможны следующие схемы регулируемых газогенераторов: с двумя твердыми блоками, газифицируемыми при их приближении друг к другу [патент США № 3797238]. Регулирование осуществляется изменением усилия при приближении (рис. 5.1); с твердым блоком, способным к самостоятельному горению. Регулирование осуществляется путем изменения площади проходного сечения клапана в газоходе [9, 54].

Лабораторные испытания газогенераторов, выполненные по первой из этих схем, проведены при скорости подачи зарядов окислителя и горючего друг к другу от 0,5 до 9,5 м/с. Скорость горения топлива такой конструктивной схемы зависит не только от физико-химических свойств компонентов топлива, но и от усилия прижатия компонентов друг к другу. Заряд окислителя был изготовлен из 64% перхлората нитрония, 9% тефлона и 27% гексафторбромата цезия методом прессования. Заряд горючего также был изготовлен методом прессования и состоял из 80% $\text{B}_{10}\text{H}_{12} \cdot 2(\text{NH}_3)$ и 20% полиэтилена. В газогенераторе успешно осуществлялось гашение зарядов при их разведении друг от друга и многократный запуск.

Во второй схеме (рис. 5.2) продукты газификации заряда торцевого горения должны иметь относительно низкую температуру (1000...1300 К) для обеспечения работоспособности клапанов. Если продукты газификации заряда вводить не только в канал, но и в ресивер, то можно осуществлять регулирование по двум параметрам — по расходу и составу продуктов. Если с помощью регулятора отключить подачу продуктов газификации заряда 1 в канал заряда 3, то последний гаснет. Топливная композиция заряда твердого блока с цилиндрическим каналом выбирается из условия устойчивого горения как при максимальных, так и минимальных величинах давления.

Наиболее важными факторами, влияющими на характер изменения основных параметров газогенератора на твердом топливе раздельного снаряжения (см. рис. 5.2) при регулировании, можно считать: законы газообразования при горении топлив $u_1 = u_{01} p_1^{\gamma_1}$,

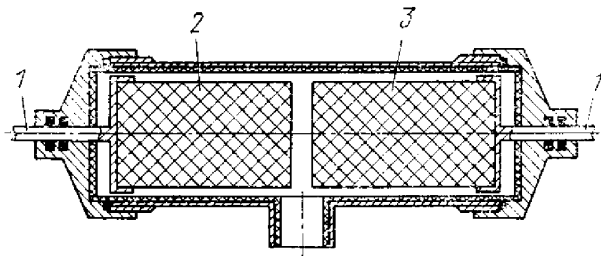


Рис. 5.1. Газогенератор с подвижными твердыми блоками:

1—шток привода; 2—блок окислителя; 3—блок горючего

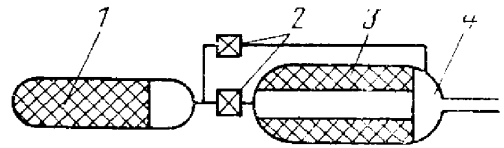


Рис. 5.2. Схема газогенератора на твердом топливе с отдельными компонентами:

1—твердый блок торцевого горения; 2—регуляторы; 3—твердый блок с цилиндрическим каналом; 4—ресивер

$u_2 = u_{02} p_2^{v_2} (Qv)^n$; режимы течения газового потока через клапаны и выходной патрубков: до- или сверхкритический.

В рассматриваемом случае можно с большим основанием предположить, что время запаздывания поступления топлива во вторую камеру газогенератора равно нулю.

При установившемся режиме давление на выходе из газогенератора равно $p_2 = \frac{\dot{m} \beta_2}{F_{кр}}$, где $\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$.

Приход газа на участке заряда dl составит

$$d\dot{m}_2 = \pi d_2 Q_2 u_2 dl.$$

После подстановки зависимости для скорости газификации заряда u_2 и использования соотношений газового баланса получим систему уравнений:

$$\dot{m} = [4^n \pi^{(1-n)} (1-n) u_{02} Q_2 L_2 d_2^{1-2n} p_2^{v_2} + \dot{m}_1^{1-n}]^{1/(1-n)};$$

$$\dot{m}_1 = \frac{p_1 F_{кл} q (p_2/p_1)}{\beta_1} = u_{01} p_1^{v_1} S Q_1,$$

где $F_{кл}$ — площадь проходного сечения клапана.

В некоторых случаях скорость газификации заряда не зависит от потока газа, т. е. $u_2 = u_{02} p_2^{v_2}$. Тогда суммарный массовый расход газов может быть представлен так:

$$\dot{m} = (p_1^{2v_1} F_{кл} / \beta_1) (p_1^{v_1} + K p_2^{v_2}),$$

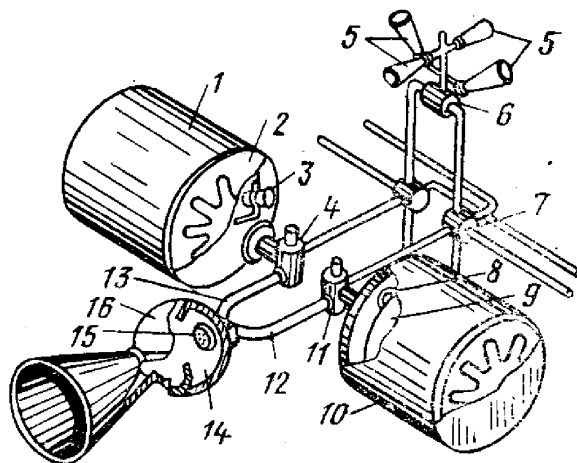
где $K = (u_{02} S_2 Q_2) / (u_{01} S_1 Q_1)$.

Для обеспечения большей глубины регулирования в таком газогенераторе желательно иметь большее значение K .

Продукты газогенерации двух автономных газогенераторов с твердыми блоками, способными к самостоятельному горению, причем один из них с избытком горючего, а другой — с избытком окислителя, можно дожигать в специальной камере (патент США № 3826087, рис. 5.3). Регулируя расход каждого газогенератора с помощью клапана в газохвате, можно регулировать расход, тем-

Рис. 5.3. Двигательная установка с газогенераторами на твердом топливе с раздельными компонентами:

1, 10—газогенераторы; 2, 9—твердые блоки; 3, 8, 16—воспламенители; 4, 7, 11—клапаны; 5—сопло; 6, 14—камеры сгорания; 12, 13—газоходы; 15—форсунки



температуру и состав продуктов сгорания. Вместе с тем газы из одного (или двух) газогенераторов можно использовать для работы агрегатов управления.

5.2. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР НА КВАЗИГИБРИДНОМ ТОПЛИВЕ

Регулировочные характеристики. В газогенераторе на квазигибридном топливе (рис. 5.4) жидкое однокомпонентное топливо горит в потоке продуктов сгорания твердого топлива. В этом случае возможно глубокое регулирование расхода газогенератора путем изменения расхода жидкого топлива, например, с помощью дросселирования линии питания или изменения площади проходного сечения форсунок, и характер горения твердого и жидкого топлив при этом, как можно предполагать, почти не будет изменяться.

В качестве веществ, с помощью переменного расхода которых возможно регулирование газогенератора на квазигибридном топливе, могут быть использованы также различные жидкие компоненты (рис. 5.5), псевдожидкое и пастообразное топлива.

В работе [32] приведены результаты экспериментальных исследований регулируемого газогенератора с зарядами смесового ($\nu=0,276$) и двухосновного ($\nu=0,69$) твердых топлив и регулируемой подачей жидких компонентов N_2O_4 или H_2O_2 . Испытывались заряды диаметром 50...200 мм и длиной 100...500 мм при равновесном давлении 0,8...4 МПа. При отношении расходов жидкого компонента и твердого топлива 0,142...0,770 зависимость скорости горения от давления практически не изменяется. При этом давление в газогенераторе возрастало в 1,4...3,5 раза. Наибольшее увеличение давления происходило в случае использования двухосновного топлива, имевшего высокое значение показателя ν .

Для расчета параметров газа, осредненных по объему газогенератора, работающего на двух унитарных (твердом и жидком) топливах, используется система уравнений состояния, газового баланса и энергии, аналогичная системе квазистационарных урав-

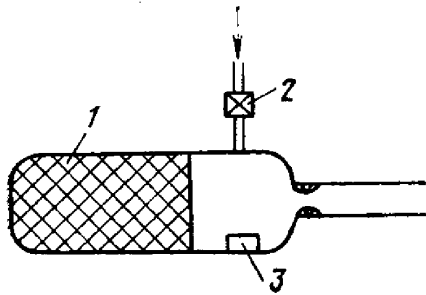
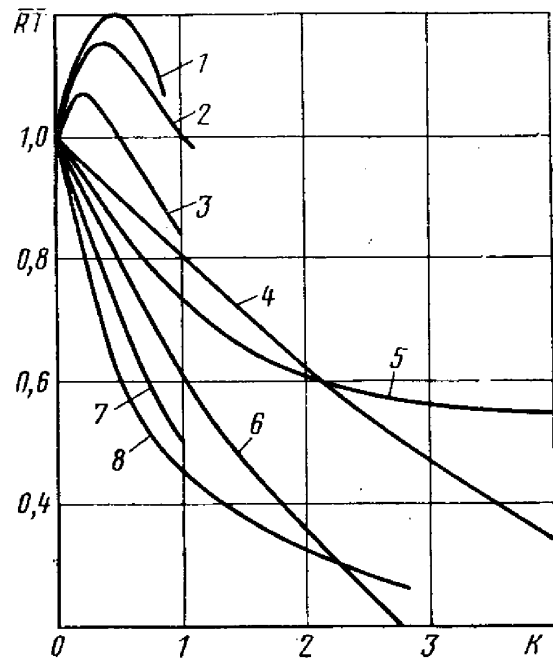


Рис. 5.4. Газогенератор на квазигибридном топливе:

1—заряд твердого топлива; 2—регулятор расхода жидкого компонента; 3—воспламенитель

Рис. 5.5. Зависимость относительной удельной работоспособности от соотношения компонентов:

1—трехфтористый хлор; 2—высококонцентрированная перекись водорода; 3—азотный тетраксид; 4—50%-ый водный раствор перекиси водорода; 5—гидразин; 6—фреон-113; 7—вода; 8—этиленгликоль



нений внутренней баллистики РДТТ. Отличие состоит в том, что в рассматриваемом случае дополнительно имеет место приток жидкого компонента через форсунку площадью F_{ϕ} :

$$\dot{m}_{\text{ж}} = f(t) \mu F_{\phi} V \sqrt{2 \rho_{\text{ж}} (p_{\phi} - p)^{0,5}},$$

где p_{ϕ} — давление перед форсункой; p — давление; μ — коэффициент расхода; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкого компонента.

В этом соотношении введена функция $f(t)$, моделирующая отклонение расхода жидкого компонента через форсунку от квазистационарного (определенного соотношением $\dot{m}_{\text{ж}} = \mu F_{\phi} V \sqrt{2 \rho_{\text{ж}}} \times (p_{\phi} - p)^{0,5}$). Уравнение газового баланса в этом случае имеет вид

$$\frac{dp}{dt} \frac{V}{RT_0} = u_1 \rho_{\text{т}} S p^{\nu} + \dot{m}_{\text{ж}} (t - \tau_s) - \frac{p F_{\text{кр}}}{\beta},$$

где V — объем; R — газовая постоянная; T_0 — температура продуктов сгорания; S — площадь поверхности горения заряда твердого топлива; $\dot{m}_{\text{ж}}$ — секундный расход жидкого компонента; $F_{\text{кр}}$ — площадь критического сечения сопла газогенератора; β — расходный комплекс; u_1, ν — коэффициенты в зависимости для скорости горения; $\rho_{\text{т}}$ — плотность топлива.

После выхода генератора на установившийся режим давление в нем определяется следующей системой уравнений:

$$\dot{m}_{\text{ж}} + \dot{m}_{\text{т}} = \dot{m}_{\text{кр}} \text{ или } \dot{m}_{\text{ж}} + u_1 \rho_{\text{т}} S p^{\nu} = (p F_{\text{кр}}) / \beta.$$

Зависимости для отношений давлений для случая впрыска жидкого компонента в камеру газогенератора и без него

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\beta}{\beta_0} \frac{u}{u_0} \left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{ж}}}{\dot{m}_{\text{т}}} \right) = \left[\left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{ж}}}{\dot{m}_{\text{т}}} \right) \frac{\beta}{\beta_0} \right]^{1/(1-\nu)},$$

где β — расходный комплекс при расходе жидкости, равном нулю; β_0 — расходный комплекс при наличии впрыска жидкости; β_0 является функцией расхода жидкости.

Введем режим автономного горения твердого топлива. Тогда $\dot{m}_ж = 0$ и для давления в газогенераторе получим известное соотношение $p_0 = \left[\frac{u_1 (T_3) q_r S \beta}{F_{кр}} \right]^{1/(1-\nu)}$, при этом расход твердого топлива равен $\dot{m}_{т0} = u_1 q_r S p_0^\nu = (p_0 F_{кр}) / \beta$. Используя обозначения $\varphi = \dot{m}_ж / \dot{m}_{т0}$; $x = p/p_0$; $y = \beta_0/\beta$, запишем уравнение в безразмерном виде: $\varphi = yx - x^\nu$.

По этому уравнению можно определить изменение безразмерного давления в двигателе $x = p/p_0 \geq 1$ при увеличении безразмерного расхода жидкого компонента $\varphi = \dot{m}_ж / \dot{m}_{т0} \geq 0$.

При $\nu = 0,5$ и $y = 1$ можно записать решение в виде

$$x = f(\varphi): x = \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \varphi} \right)^2, \text{ или } p/p_0 = \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \dot{m}_ж / \dot{m}_{т0}} \right)^2.$$

Отсюда следует, что, например, для десятикратного увеличения давления и расхода газогенератора необходимо, чтобы расход жидкого компонента приблизительно в 7 раз превышал расход твердого компонента топлива в автономном режиме, а расход твердого топлива увеличился приблизительно в 3 раза.

Безразмерный запас твердого топлива и жидкого компонента соответственно равен

$$\bar{\omega}_т = \omega_т / \omega_{т0} = \frac{1}{t_\Pi} \int_0^{t_\Pi} x^\nu dt \quad \text{и} \quad \bar{\omega}_ж = \omega_ж / \omega_{т0} = \frac{1}{t_\Pi} \int_0^{t_\Pi} \varphi dt,$$

где $\omega_{т0} = \dot{m}_{т0} t_\Pi$ — масса твердого топлива, расходуемого за время t_Π на режиме автономной работы твердотопливного заряда при постоянной площади горячей поверхности ($S = \text{const}$); t_Π — полное время работы газогенератора.

Общий безразмерный запас топлива равен $\bar{\omega} = \bar{\omega}_т + \bar{\omega}_ж = \frac{1}{t_\Pi} \int_0^{t_\Pi} yx dt$. Коэффициенты усиления при регулировании рассматриваемого газогенератора по давлению и по тяге одинаковые и равны ($y = \text{const}$):

$$\frac{dx}{d\varphi} = 1 / \left(y - \frac{\nu}{x^{1-\nu}} \right).$$

Переходный процесс (выход на режим, спад давления) в рассматриваемом газогенераторе при изменении расхода жидкого компонента определяется системой уравнений состояния и газового баланса при следующих допустимых упрощениях: $u_1, T, \beta, \nu,$

$$V, R, q, S = \text{const}.$$

Уравнение для переходного процесса при $y \simeq \text{const}$, $\tau_3 = 0$:

$$\tau = \frac{dx}{dt} = x^\gamma + \frac{\beta_0}{F_{\text{кр}} p_0} A f(t) \sqrt{x_\phi - x} - yx,$$

где $\tau = \frac{\beta_0 V}{RT_0 F_{\text{кр}}}$ — время релаксации газового объема при среднем значении RT_0 ; $A = \mu F_\phi \sqrt{2g_{\text{ж}}}$.

В первом приближении в качестве моделирующей функции могут быть использованы экспоненты:

$f(t) = 1 - e^{-t/\alpha_1}$ — для режима повышения давления (увеличения расхода);

$f(t) = e^{-t/\alpha_2}$ — для режима уменьшения давления (уменьшения расхода).

При этом параметр α_i ($i=1, 2$) подбирается экспериментально в частности, по результатам проливок форсунок и устройств, регулирующих расход жидкости.

Введем отклонение параметра x от равновесного: $\Delta x = x - x_0$ где x_0 — характеризует равновесный режим, $x_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$.

С целью аналитического исследования можно линеаризовать расход жидкого топлива

$$\begin{aligned} \sqrt{x_\phi - x} &= \sqrt{x_\phi - x_0 - \Delta x} = \sqrt{(x_\phi - x_0) \left(1 - \frac{\Delta x}{x_\phi - x_0}\right)} = \\ &= \sqrt{(x_\phi - x_0)} \left[1 - \frac{\Delta x}{2(x_\phi - x_0)}\right]. \end{aligned}$$

Можно считать, что во время переходного процесса изменение скорости горения в зависимости от давления происходит приблизительно линейно. Формально линеаризуем степенную зависимость скорости горения от давления $x^\gamma = x_0^\gamma + \gamma x_0^{\gamma-1} \Delta x$.

Получим линейное уравнение для Δx :

$$\tau \frac{d(\Delta x)}{dt} = B(t) \Delta x + D(t),$$

где $B(t) = \gamma x_0^{\gamma-1} - \frac{A \beta_0 f(t)}{2 F_{\text{кр}} V \sqrt{p_\phi - p}} - y$;

$$D(t) = \frac{A \beta_0}{2 F_{\text{кр}} p_0} \sqrt{p_\phi - p} [f(t) - f_0];$$

$$f_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t).$$

Следует отметить, что введение жидкого компонента для регулирования расхода и давления в газогенераторе способствует обеспечению устойчивости рабочего процесса во всем диапазоне давлений, в том числе на нижней границе.

Увеличение эффективности регулирования квазигибридного газогенератора возможно с помощью специально организованного впрыска такого жидкого компонента, который оказывает химическое воздействие на горение твердого топлива [80]. Для реализации

этого воздействия жидкий компонент с определенными физико-химическими свойствами должен поступать в зону газификации твердого топлива, например, вдоль поверхности канала заряда. Давление увеличивается при этом:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\beta}{\beta_0} \frac{u}{u_0} \left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{ж}}}{\dot{m}_{\text{т}}} \right) = \left[\frac{\beta}{\beta_0} B \left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{ж}}}{\dot{m}_{\text{т}}} \right) \right]^{1/(1-\nu)},$$

или в безразмерном виде $\varphi = ux - Bx^\nu$, где B — увеличение скорости горения твердого топлива при фиксированном давлении вследствие химического воздействия жидкого компонента на зону газификации.

Возможный диапазон регулирования давления и расхода существенно зависит от увеличения скорости горения из-за химического воздействия подводимой массы (табл. 5.1) и показателя степени ν .

Таблица 5.1

Пределы регулирования давления при $\nu=0,7$

$x = p/p_0$		3	5	7	10
$\varphi = \dot{m}_{\text{ж}}/\dot{m}_{\text{т0}}$	$B=1$	0,84	1,91	3,1	5,0
	$B=1,2$	0,41	1,29	2,3	4,0

Таким образом, квазигибридная схема представляет возможности для разработки регулируемого газогенератора.

Массовые характеристики. Элементы газогенераторов — корпуса, форсунки и фильеры, диафрагмы, фильтры, газоходы, сопловые вкладыши, регуляторы и другие изготавливаются в зависимости от условий работы из различных материалов [51] (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Конструкционные и эрозионностойкие материалы

Материал	Плотность, кг/м ³ ·10 ³	Временное сопротивление, н/м ² ·10 ⁸
Сталь	7,8	11...12
Высокопрочная сталь	7,8	18...22
Титановый сплав	4,5	11...13
Стеклопластик	2	10...11
Алюминиево-магниевый сплав	2,7	3...3,5
Вольфрам	19,3	0,9 при 2300 К
Молибден	10,2	0,5 при 2000 К
Эрозионностойкий стеклопластик	1,5...1,6	0,6
Эрозионностойкий углепластик	1,2...1,4	1

При необходимости используются также теплозащитные покрытия на основе каучука (скорость обтекания до 50 м/с), эпоксидной (до 100 м/с) и фенолформальдегидной (до 200 м/с) смол.

При баллистическом проектировании ракетных систем различные газогенераторы сравниваются между собой на основе анализа массовых характеристик [51] (так же, как и при сравнении их с другими источниками энергии [87]).

Рассмотрим массовые характеристики газогенератора на квазигибридном топливе вместе с системами жидкого топлива и его подачи, включающими баллоны со сжатым газом, трубопровод, пусковой электропневмоклапан, регулятор давления, обратный клапан, бак с жидким топливом, трубопровод и магистральный клапан.

Наиболее массивные детали имеют цилиндрическую и сферическую формы. К первым относятся обечайка корпуса газогенератора, газоходы, трубопроводы; ко вторым — бак для жидкого топлива (давление 2...6 МПа), баллон для сжатого газа (давление ~10 МПа). Толщина цилиндрической и сферической оболочек с внутренним диаметром d равна соответственно

$$\delta_{ц} = \frac{f p d}{2\sigma} \quad \text{и} \quad \delta_{сф} = \frac{f p d}{4\sigma K_{с.ш}},$$

где f — запас прочности; p — внутреннее давление; σ — временное сопротивление; $K_{с.ш}$ — коэффициент ослабления прочности из-за сварных швов.

Габаритные размеры корпуса, бака и баллона определяются запасом твердого и жидкого топлив; диаметр и длина газоходов, трубопроводов и других элементов — расходом топлива и условиями компоновки газогенератора на летательном аппарате.

Объем бака жидкого компонента топлива V_6 складывается из объема компонента топлива при фиксированной температуре, объема газовой подушки, компенсирующей изменение объема жидкого компонента топлива, при изменении температуры, и объема, занимаемого внутренними конструктивными элементами бака (заборник и т. п.): $V_6 = K(m_{ж}/\rho_{ж})$, где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости при максимальной температуре эксплуатации; K — коэффициент, учитывающий наличие в баке незаполненного объема [2, 3].

Масса бака для хранения жидкого компонента топлива включает массу, определяемую по расчетной величине объема, приращение массы бака за счет технологических припусков на толщину стенки бака, массу элементов крепления (штуцеров, кронштейнов) и массу внутренних конструктивных элементов бака (мембрана, заборное устройство и т. п.). В случае сферической формы бака имеем: $m_6 = \frac{3}{2} \frac{f \rho p_6 V_6}{\sigma K_{с.ш}} Z$.

Давление сжатого газа в баллоне вытеснительной системы в течение всего времени работы газогенератора должно быть достаточно велико по сравнению с давлением подачи; в частности, для момента окончания работы это превышение приблизительно рав-

но 1 МПа. Тогда, используя законы сохранения массы и энергии сжатого газа для начального и конечного состояний, получаем следующее соотношение для массы всей системы подачи [3]:

$$m_{\text{н}} = \left(\frac{3f_0}{2\sigma K_{\text{с.ш}}} + \frac{1}{RT_{\text{н}}} + b \right) p_{\text{н}} V_{\text{бал}} \approx \left(\frac{3f_0}{2\sigma K_{\text{с.ш}}} + \frac{1}{RT_{\text{н}}} + b \right) k p_6 V_6,$$

где $V_{\text{бал}}$ — объем баллона; b — коэффициент, учитывающий массу газохода, соединяющего баллон с баком, регулятора давления, клапанов.

Перепад давления в магистрали жидкого топлива можно представить в виде трех частей: перепада давления на входе в трубопровод $p_6 - p_{\text{вх}}$, падения давления по его длине (включая потери давления торможения) и перепада давления на форсунках. При этом расход жидкого топлива $m_{\text{ж}}$ связан с перепадом $p_6 - p_{\text{вх}}$ соотношением

$$\dot{m}_{\text{ж}} = \frac{\pi}{4} v_{\text{ж}} \delta d_{\text{м}}^2 = \mu \frac{\pi d_{\text{м}}^2}{4} \sqrt{p_6 - p_{\text{вх}}} \sqrt{2\rho_{\text{ж}}},$$

где $\mu = 0,61$ — коэффициент расхода входного патрубка. Уменьшение диаметра трубопровода $d_{\text{м}}$ с одной стороны, приводит к уменьшению его массы, с другой стороны, к увеличению потерь полного давления, а значит, к увеличению массы бака с жидким компонентом, так как для компенсации потерь давления в трубопроводе необходимо увеличить давление в баке. Поэтому скорость движения жидкого топлива ограничивается величиной 6...10 м/с [5]. При заданных расходе и скорости определяются внутренний диаметр $d_{\text{м}}$ и масса магистрали длиной $m_{\text{м}} = (f \pi d_{\text{м}}^2 l_{\text{гм}} p_{\text{вх}}) / 2\sigma$.

Магистральный клапан представляет собой эквивалентный трубопровод, и его масса рассчитывается по приведенному соотношению. Масса газоходов также определяется исходя из расхода газа и ограничений на скорость его движения. При этом учитывается, что увеличение скорости приводит не только к росту гидродинамических потерь, но и увеличению теплового потока в стенки. Газоход может иметь тепловую защиту. Кроме того, необходимо учитывать увеличение массы в местах соединения газохода с корпусом газогенератора и потребителем рабочего тела.

Масса корпуса газогенератора включает массы переднего и заднего днищ и элементов стыковки отдельных частей (при разъемном корпусе). Для разъемного корпуса масса переднего и заднего днищ определяется выражением

$$m_{\text{д}} = \frac{f p d_{\text{г}}}{8\sigma \lambda_{\text{д}}} S_{\text{л}} + m_{\text{т.д}},$$

где $S_{\text{л}} = \frac{\pi d^2}{2} \sqrt{\frac{4\lambda_{\text{д}}^2 + 1}{2}}$ — поверхность днища; $\lambda_{\text{д}} = l_{\text{д}}/d$ — относительная длина днища; $m_{\text{т.д}}$ — масса тепловой защиты днища.

Масса цилиндрической обечайки корпуса газогенератора также определяется с учетом массы тепловой защиты.

Потребная толщина теплозащитного материала переменна по длине корпуса газогенератора, она зависит от времени воздействия продуктов сгорания, состава, технологии изготовления и конструкции твердотопливного заряда и тепловой защиты. Приближенно требуемую толщину слоя $\delta_{тзп}$ можно оценить по формуле [51]; $\delta_{тзп} = a \sqrt{t} + (0,1 \dots 0,15)$, где $a \approx 0,05$ — для цилиндрической обечайки корпуса газогенератора; $a = 0,12$ — для соплового днища.

При расчете массы корпуса газогенератора необходимо также учитывать массы элементов стыковки, расположенных на днищах и цилиндрической обечайке, узла стыковки газохода, воспламенительного и регулируемого форсуночного устройств и элементов их соединения с корпусом.

5.3. ГАЗОГЕНЕРАТОР НА ГИБРИДНОМ ТОПЛИВЕ

Основные элементы газогенератора на гибридном топливе. На основании результатов исследования гибридных ракетных двигателей [9, 18] рассмотрим возможные схемы регулируемого газогенератора на гибридном топливе.

Наиболее простая камера сгорания ракетного двигателя на гибридном топливе (рис. 5.6) отличается от камеры РДТТ только наличием форсуночного устройства. Регулируя расход жидкого компонента, можно в широких пределах изменять общий расход продуктов сгорания, вплоть до прекращения горения. Однако для обеспечения наиболее полного сгорания компонентов гибридного топлива необходим комплекс специальных мер по организации рабочего процесса: увеличение свободного объема камеры или введение дополнительной камеры дожигания; постановка турбулизующих диафрагм (рис. 5.7, *а, б, в*); армирование твердого блока; подогрев и улучшенный расплав жидкого компонента; применение химических активаторов горения и т. п. Особая проблема, недостаточно разработанная, — обеспечение равномерности выгорания, малых остатков твердого компонента (например, размещение турбулизаторов внутри канала заметно нарушает однородность скорости разложения твердого блока, рис. 5.8).

Основные узлы газогенератора на гибридном топливе — твердый блок и форсуночное устройство — аналогичны таковым в камере сгорания гибридного ракетного двигателя.

Исходя из этого, газогенератор может быть выполнен по различным схемам (рис. 5.9). На рис. 5.9, *а* твердый компонент может либо разлагаться только при впрыске жидкого, либо гореть самостоятельно, на рис. 5.9, *б, в, г* — необходимо самостоятельное горение. Скорость горения твердого компонента зависит от расхода жидкого компонента (рис. 5.9, *а, г*), а в схеме рис. 5.9, *в* — не зависит.

Твердый блок может быть многоканальным (рис. 5.10), впрыск жидкого окислителя осуществляется в два основных канала. Возможен вариант подвижного твердого блока торцевого горения, позволяющий сохранить неизменным расстояние между форсуночным устройством и поверхностью газификации.

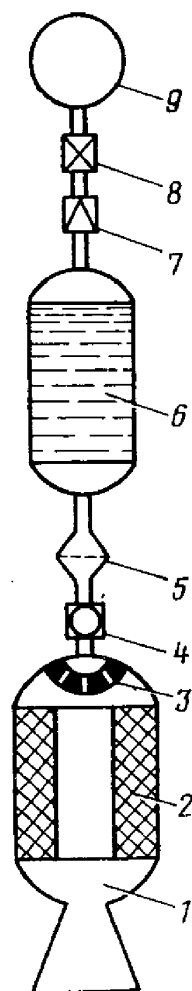


Рис. 5.6. Принципиальная схема двигателя на гибридном топливе:

1—камера; 2—заряд твердого компонента; 3—форсуночное устройство; 4—регулятор расхода; 5—фильтр; 6—бак с жидким компонентом; 7—редуктор; 8—клапан; 9—баллон с газом

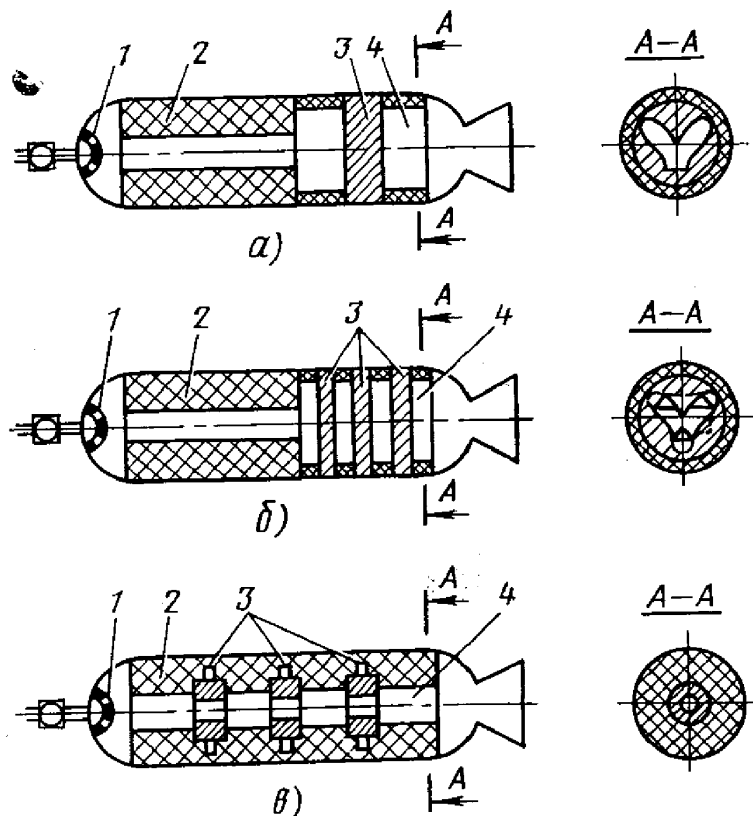
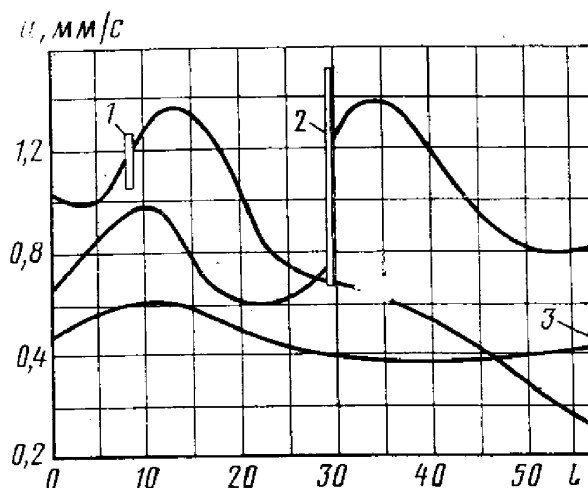


Рис. 5.7. Камера сгорания с турбулизаторами:

1—корпус; 2—заряд твердого компонента; 3—турбулизатор; 4—предсоловой объем

Рис. 5.8. Распределение локальных скоростей горения вдоль заряда твердого горючего при различных положениях турбулизаторов:

1—турбулизатор на расстоянии $1/7$ полной длины от переднего торца заряда [$\rho v = 2,79 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$]; 2—турбулизатор в середине заряда [$\rho v = 4,63 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$]; 3—турбулизатор в конце заряда [$\rho v = 2,63 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$]



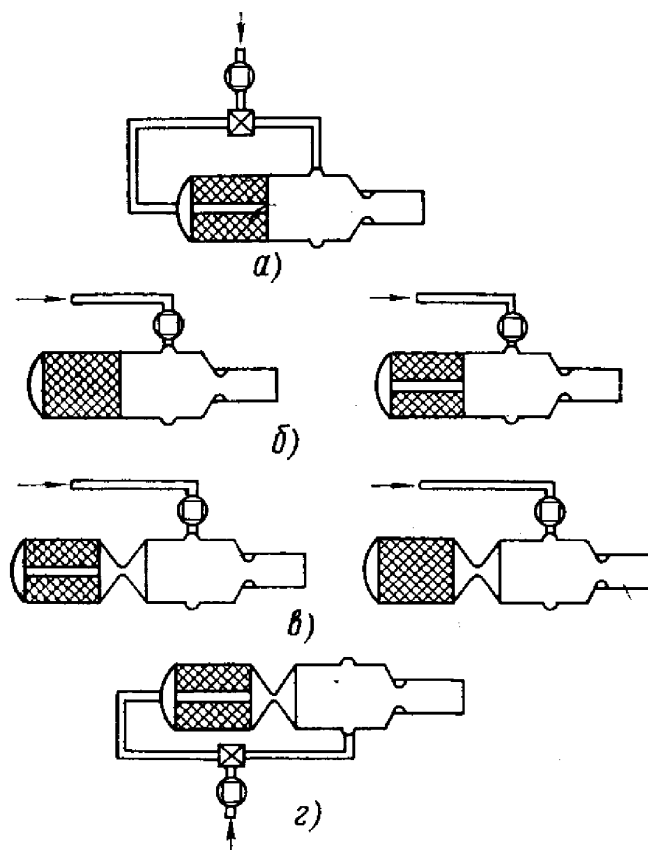


Рис. 5.9. Газогенераторы на гибридном топливе:

→ —от системы подачи жидкого компонента; —регулятор расхода жидкого компонента;
 —регулятор перепуска

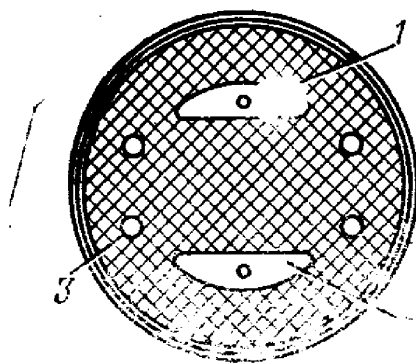
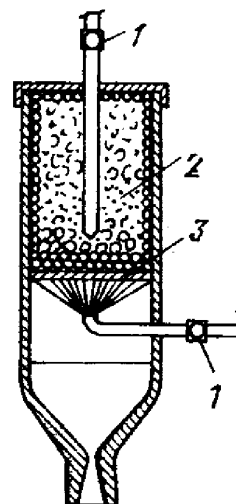


Рис. 5.10. Поперечное сечение многоканального твердого блока горючего:

1—форсунка; 2—основной канал; 3—дополнительный канал

Рис. 5.11. Газогенератор с гранулированным твердым компонентом:

1—регулятор подачи жидкого компонента; 2—гранулированный твердый компонент; 3—решетка



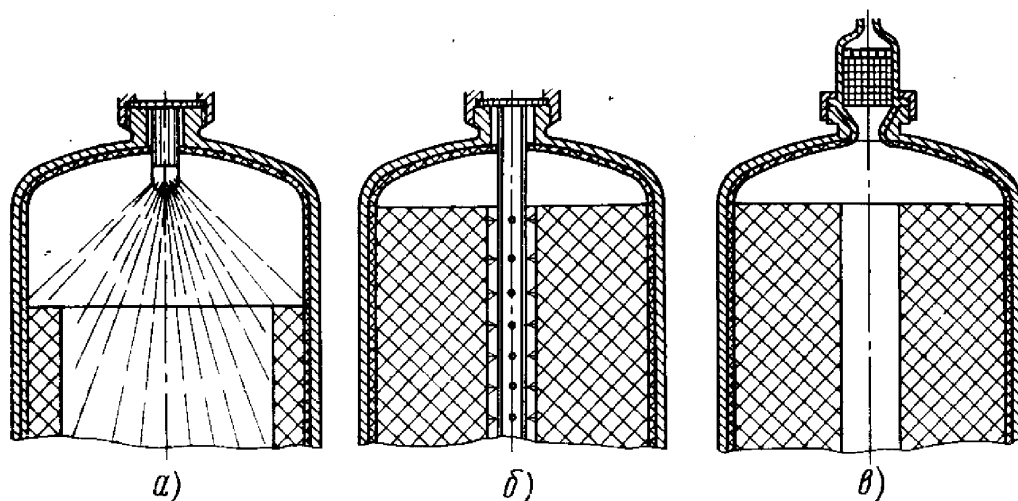


Рис. 5.12. Подача жидкого компонента:

а—на переднюю часть твердого блока; *б*—на всю горящую поверхность; *в*—в камеру предварительного каталитического разложения

Твердый компонент может находиться в газогенераторе в виде гранул (рис. 5.11), удерживаемых в переднем объеме специальной решеткой. Жидкий компонент подается в первый и второй объемы. В первый объем подается незначительное количество (приблизительно 10...15% всего расхода жидкого компонента) для обеспечения образования газожидкостной смеси. С гранулированным твердым окислителем, например, разработана принципиальная схема гибридной реактивной системы, обеспечивающей как приращение скорости летательному аппарату, так и его ориентацию (патент США № 3732693).

Работа форсуночного устройства определяет условия тепломассообмена в канале твердого блока, оказывает существенное влияние на среднюю скорость и равномерность газификации твердого блока.

Подача жидкого компонента может осуществляться на различные участки твердого блока (рис. 5.12); при этом может быть применена форсунка с регулируемым направлением струй (рис. 5.13) или форсуночное устройство (например, труба), вращающееся под действием реактивного момента из-за тангенциального истечения жидкого компонента. В случае длинных секционных зарядов жидкий компонент вводится через форсуночные пояса, расположенные между секциями. При применении длинного бесканального твердого блока жидкий компонент может подаваться непосредственно на его торец по спиральным трубопроводам, расположенным на боковой поверхности и подгорающим по мере выгорания заряда.

С целью быстрого испарения жидкого компонента перед поступлением к форсункам, его можно подогреть в трубках, установленных внутри канала заряда, или же в рубашке охлаждения. (В случае схемы, показанной на рис. 5, 12, в, в газогенератор поступает компонент в газовой фазе.).

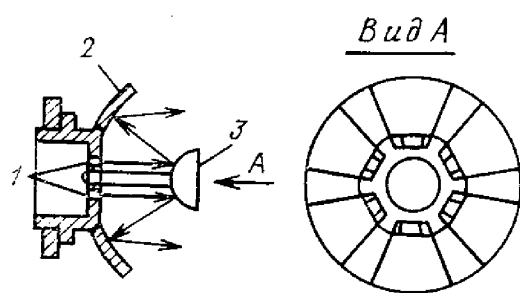


Рис. 5.13. Форсунка с регулируемым направлением струй:

1—отверстие; 2—регулирующая поверхность; 3—центральное тело

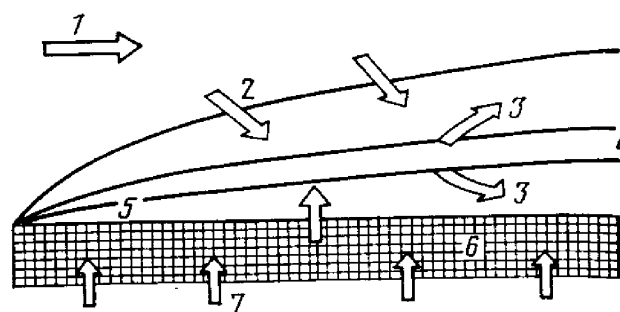


Рис. 5.14. Модель процесса горения гибридного топлива в случае подачи вторичного потока кислорода через пористый заряд твердого компонента:

1—основной поток кислорода; 2—кислород; 3—продукты сгорания; 4—зона пламени; 5—газообразное горючее+кислород; 6—пористый заряд; 7—вторичный поток кислорода

При глубоком регулировании расхода газогенератора за счет изменения расхода жидкого компонента топлива наиболее рационально применение форсунок с регулируемой площадью проходного сечения.

Возможно управление горением гибридного топлива путем создания пористого твердого блока и подачи через него добавочного количества жидкого или газообразного компонента (рис. 5.14). При этом вторичный поток окислителя при прохождении через заряд горючего инертен и влияет лишь на распределение массы, энтальпии и скоростей в пограничном слое. Вследствие дополнительной подачи массы через граничную поверхность увеличивается толщина пограничного слоя. Это приводит к тому, что пограничные слои в канале горения соединяются раньше, и холодная зона основного потока окислителя уменьшается.

При подаче вторичного потока окислителя на пористый заряд происходит значительное повышение скорости выгорания независимо от размеров зерен и материала пористого блока

$$\frac{qv}{(qv)_H} = 1 + 0,15 \cdot 10^{-3} (qv)_o,$$

где qv — массовая плотность потока горючего при наличии вторичного потока окислителя; $(qv)_H$ — массовая плотность потока горючего при отсутствии вторичного потока окислителя; $(qv)_o$ — массовая плотность вторичного потока окислителя в $г/(см^2 \cdot с)$.

Трехкомпонентное твердо-жидкое топливо расширяет возможности регулирования расхода, температуры и состава газогенерации вплоть до осуществления режима работы многократного включения путем возобновления и прекращения подачи жидкого компонента. Топливо состоит из твердого горючего и твердого окислителя, размещенных в газогенераторе, и третьего жидкого компонента, добавляемого в различных количествах, обеспечивая воспламенение и регулирование расхода.

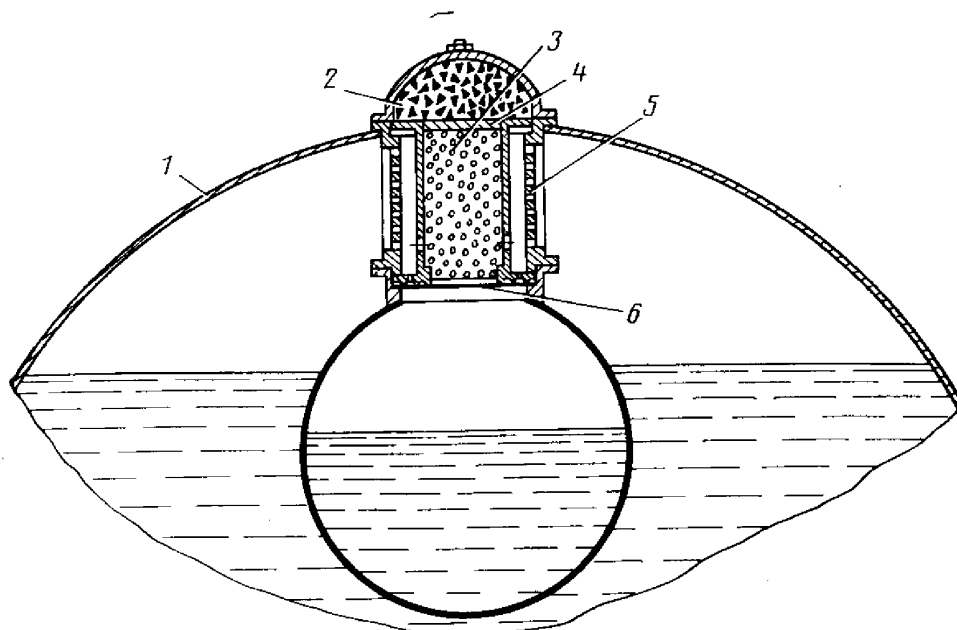


Рис. 5.15. Газогенератор наддува топливного бака:

1—бак с жидким компонентом; 2—пиротехнический заряд; 3—гранулы твердого компонента; 4—поршень; 5—стакан с отверстиями в верхней части; 6—мембрана

Расположение твердых блоков в газогенераторе определяется физико-химическими свойствами жидкого компонента: если жидкий компонент является окислителем, то в форсуночной области располагается блок горючего, а блок окислителя располагается ближе к выходу из газогенератора.

В отличие от рассмотренных гибридных схем, в которых жидкий компонент подавался в канал твердого компонента, возможна схема газогенератора, в котором гранулы твердого компонента вбрасываются в емкость с жидким. Такой газогенератор может быть применен для предварительного наддува топливного бака [5] (рис. 5.15).

В табл. 5.3 приведены твердые и жидкие компоненты, которые могут быть применены в газогенераторах наддува баков [5].

Процесс горения сублимирующего твердого окислителя в жидком горючем имеет три стадии [5]. В первой стадии горение протекает на дне стакана. Вторая стадия горения протекает во взвешенном состоянии: гранулы хаотично перемещаются внутри жидкости. Третья стадия горения топлива протекает на поверхности жидкости. Длительность каждой стадии горения определяется геометрическими размерами гранул. Для сферических гранул зависимость изменения текущего диаметра d во времени t имеет вид

$$d = \sqrt{d_0^2 - kt},$$

где d_0 — начальный диаметр гранулы.

При этом константа k зависит от стадии горения топлива: $k_1 \approx k_2 > k_3$.

Т а б л и ц а 5.3

Химическая активность топливных пар

Наименование компонента		Химическая активность
горючее	окислитель	
Тиосемикарбозид	70% $\text{HNO}_3 + 30\% \text{N}_2\text{O}_4$	Воспламеняется, значительный твердый осадок
0-алюминофенол		Воспламеняется, на стенках смолистые продукты
Ортофенилендиамин		Воспламеняется, без осадка
<i>n</i> -нитрофенилгидразин $\text{C}_6\text{H}_7\text{OH}$		То же
Перхлорат нитрония NO_2ClO_4	Тонка-250	Воспламеняется
	Керосин	Воспламеняется
	НДМГ	Воспламеняется, взрывается
Гексанитроэтан $\text{C}_2(\text{NO}_2)_6$	НДМГ	Воспламеняется
	Тонка-250	Воспламеняется

Массовое соотношение компонентов K меньше единицы и, например, для топливной пары гексанитроэтан+НДМГ составляет 0,147... 0,324.

При горении одинаковых сферических гранул суммарный газоприход из газогенератора в бак определяется по формуле

$$\dot{m} = \frac{n\pi q_T (1+K)}{4K} \sqrt{d_0^2 - k_{1,2}t},$$

где n — число гранул; q_T — плотность гранул.

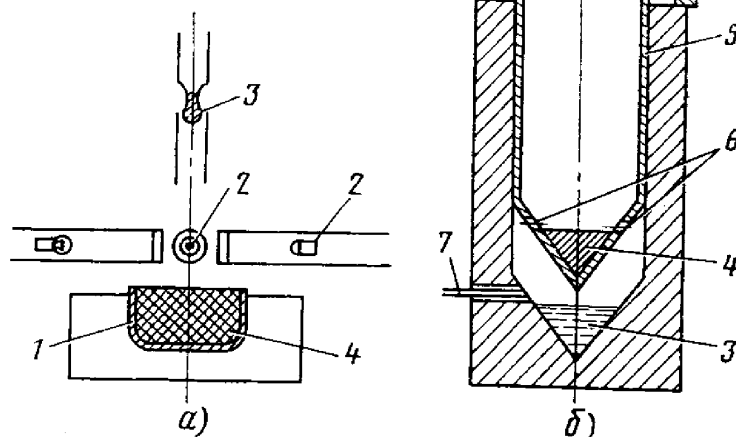
Если не учитывать теплообмен между продуктами газогенерации со стенками и поверхностью жидкости, то давление в баке определяется следующим выражением:

$$p = p_0 + \frac{2}{3} B \frac{n}{V} [d_0^3 - (d_0^2 - k_{1,2}t)^{3/2}],$$

где $B = (K-1)i\pi q_T(1+K)/4K$; i — энтальпия продуктов сгорания твердо-жидкого топлива; p_0 — начальное давление в баке; V — свободный объем бака.

Рис. 5.16. Устройство для определения задержки воспламенения гибридных топлив:

а—метод падающей на твердый блок капли жидкого компонента; б—метод погружения в жидкий компонент капсулы с твердым блоком; 1—тигель; 2—германиевый фотоэлемент; 3—окислитель; 4—твердое горючее; 5—шоршень; 6—отверстия; 7—электрод



В момент полного сгорания твердого компонента давление в баке достигает максимального значения $p_{\max} = p_0 + \frac{2}{3} B \frac{n}{V} d_0^3$.

Для расчета давления наддува бака необходимо знать константы горения на различных стадиях, определяемые опытным путем.

Из анализа возможных схемных решений гибридных газогенераторов видно, что они существенно отличны и от твердотопливных, и от жидкостных, обладают преимуществами, по сравнению с ними, и выдвигают ряд специфических проблем, от решения которых зависит эффективность их разработки и применения.

Горение гибридного топлива. Воспламенение в газогенераторе, работающем на гибридном топливе, осуществимо в большинстве случаев с помощью самовоспламеняющихся компонентов топлива. Если применен твердый компонент, способный к самостоятельному горению, то можно применить пиротехнический воспламенитель такого же типа, как и используемый в РДТТ.

Результаты исследований показали, что на процесс воспламенения самовоспламеняющихся компонентов гибридного топлива влияет большое число факторов [18, 42]:

1) переходные режимы подачи жидкого компонента; 2) характеристики форсунки; 3) скорость начальной химической реакции (определяемая кинетикой, процессами тепловыделения и теплопереноса); 4) скорость распространения пламени вдоль заряда, связанная со скоростью выгорания (также зависит от характеристик форсунки и подачи жидкого компонента); 5) время нарастания давления, зависящее от скорости выгорания и объема.

При повторном запуске газогенератора на гибридном топливе иногда наблюдается большой разброс и увеличение времени задержки воспламенения по сравнению с начальным запуском.

Оценка времени задержки воспламенения осуществляется экспериментально на лабораторных установках одним из следующих способов: методом падающей на твердый блок капли жидкого компонента (рис. 5.16, а) или методом погружаемой в жидкий компонент капсулы с твердым блоком (рис. 5.16, б).

В первом случае капли жидкого компонента, прежде чем достичь поверхности твердого компонента, пересекают пучок света, образуя первый импульс на осциллограмме. Германиевый фотоэлемент реагирует на изменение световой энергии. Изменение этой энергии регистрируется в течение определенного времени. Германиевый фотоэлемент чувствителен к инфракрасным лучам и позволяет следить за ходом химических реакций до появления пламени. Для правильного определения времени задержки предварительно тарируют установку и определяют время полета капли от светового пучка до поверхности твердого компонента, размещенного в обогреваемом тигле.

Во втором случае устройство состоит из двух основных частей: цилиндра, оканчивающегося конической частью, где помещается жидкий компонент, например, окислитель;

поршня, помещенного в этот цилиндр и оканчивающегося конусом такого же угла. Во внутренний конус с отверстиями помещается коническая капсула, содержащая твердый компонент. Над поршнем находится груз, а подпорка определенной высоты помещается между цилиндром и грузом. Если убрать подпорку, то поршень падает, а жидкий компонент, помещенный в нижнем цилиндре, поднимается вверх и через отверстия попадает на твердый компонент топлива.

Жидкий компонент, прежде чем попасть в отверстия, замыкает электрическую цепь с платиновым электродом, расположенным около этих отверстий. Период времени от пропускания жидкого компонента до его попадания на поверхность твердого компонента топлива бывает порядка миллисекунды, он определяет константу прибора.

Определение задержки воспламенения возможно также путем скоростной киносъемки процесса в стендовых камерах с прозрачными стенками.

Скорость газификации твердого компонента, т. е. линейная скорость перемещения границы раздела фаз, определяется гидродинамическими и термодинамическими параметрами газового потока, кинетикой химических реакций, природой твердого и подаваемого жидкого компонента. Одним из наиболее важных параметров, влияющих на скорость горения, является массовая скорость газового потока в канале заряда [9, 18, 32, 42].

Наиболее полно изучен процесс горения полиметилметакрилата в газообразном кислороде [9, 18]. Результаты экспериментов показывают, что скорость горения зависит от удельного массового расхода в степени 0,8.

Исследования зависимости скорости горения бутылкаучука, сополимера полибутадиена и акриловой кислоты, полиуретана и

бутилкаучука с гидридом лития при подаче смеси фтора с кислородом показали, что в области малых значений $\dot{m}$ зависимость для скорости газификации имела вид $u = a\dot{m}^{0,8}$, при высоких значениях $\dot{m}$ скорость газификации перестает зависеть от $\dot{m}$: $u = b\rho^v$, а в промежуточной области она такова: $u = a\dot{m}^3\rho^v$.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что скорость горения твердого компонента зависит от очень многих факторов, учет которых находит отражение в эмпирических зависимостях для скорости горения твердого компонента, например, в следующей зависимости:

$$u = u_1 (qv)^n p^v A^a d^k = u_1 (\dot{m}/F)^n p^v A^a d^k,$$

где u_1 — эмпирический коэффициент, учитывающий свойства компонентов топлива, в том числе и их температуру; p , q , v — соответственно давление, плотность и скорость движения газов; A — коэффициент, учитывающий другие свойства продуктов сгорания; d — диаметр цилиндрического канала заряда; n , v , a , k — эмпирические коэффициенты. Здесь постоянные величины u_1 , n , v , a , k осреднены по длине заряда.

Секундный расход газов через сечение канала растет по его длине в результате поступления добавочной массы вследствие газификации твердого компонента и при $F = \text{const}$ скорость газификации будет меняться по длине канала. По мере удаления от переднего торца заряда толщина пограничного слоя увеличивается и, следовательно, фронт пламени удаляется от поверхности канала заряда. После смыкания пограничных слоев концентрация окислителя на оси потока падает, что приводит к дальнейшему увеличению расстояния от поверхности канала заряда до фронта пламени. Наконец, в некотором сечении канала заряда происходит смыкание фронтов пламени. После смыкания фронтов пламени горение в канале заряда прекращается, так как израсходован весь окислитель. На больших расстояниях от начала канала наблюдается лишь сублимация твердого горючего в потоке инертных продуктов сгорания.

Зависимость скорости выгорания различных горючих от длины заряда приведена на рис. 5.17.

В случае впрыска жидкости в начале канала заряда твердого блока характер выгорания начального участка отличается от того, который устанавливается на более удаленных участках.

Изменение выходных параметров. Для определения давления необходимо решить уравнение газогенератора (гл. 2 п. 2.1). Для решения этого уравнения необходимо знать приход продуктов сгорания в заданный момент времени t , который определяется выражением

$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{ж}}(t - \tau_3) + \pi d L q_{\tau} u_0 \left[\frac{\dot{m}_{\text{ж}}(t - \tau_3)}{d^2} \right]^n p^v.$$

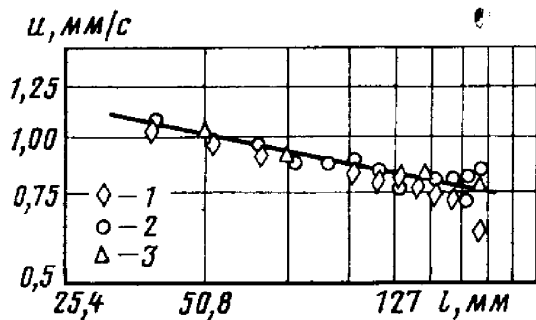


Рис. 5.17. Зависимость скорости выгорания различных горючих от длины заряда:

1—плексиглас; 2—каучук; 3—параплекс

Без учета запаздывания уравнение газогенератора упрощается:

$$\varepsilon \frac{dp}{dt} + p - \frac{\beta}{F_{кр}} \left[\dot{m}_ж + \pi d L Q_r u_0 \left(\frac{\dot{m}_ж}{d^2} \right)^n p^\nu \right] = 0.$$

При расчете установившегося режима уравнение газогенератора имеет вид

$$p - \frac{\beta}{F_{кр}} (\dot{m}_ж + \dot{m}_г) = 0.$$

Давление в газогенераторе прямой схемы определяется по соотношению

$$p = \frac{\dot{m}_ж \left(1 + \frac{1}{K} \right) \beta}{F_{кр}},$$

а для обратной схемы

$$p = \frac{\dot{m}_ж (1 + K) \beta}{F_{кр}}; K = \dot{m}_о / \dot{m}_г,$$

где $\dot{m}_о$ — расход окислителя; $\dot{m}_г$ — расход горючего.

Давление торможения у переднего дна газогенератора больше давления у входа в сопло из-за потерь на смещение потока в канале и вихреобразование в предсопловом объеме.

Коэффициент восстановления давления торможения определяется так же, как и для твердотопливного ракетного двигателя с зарядом внутриканального горения.

При выборе топлива для газогенератора необходимо учитывать не только его энергетические характеристики, но и сделать оценку величины изменения параметров газогенератора в процессе разгара канала. Во время работы газогенератора поверхность горения заряда и площадь поперечного сечения канала изменяются. Вследствие этого скорость горения оказывается непостоянной. Лишь когда изменения поверхности горения и скорость горения компенсируются таким образом, что расход остается постоянным, режим газогенератора не изменяется по времени [9, 18]. Оценку изменения отношения компонентов гибридного топлива и давления в газогенераторе при разгаре канала, а также регулировоч-

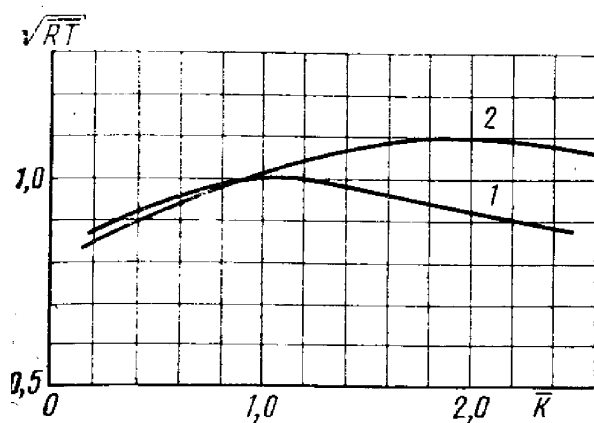


Рис. 5.18. Зависимость энергетических характеристик от соотношения компонентов $\sqrt{RT} = f(\bar{K})$:

1 — оптимальное значение коэффициента избытка окислителя на номинальном режиме;
2 — коэффициент избытка окислителя на номинальном режиме равен 0,3

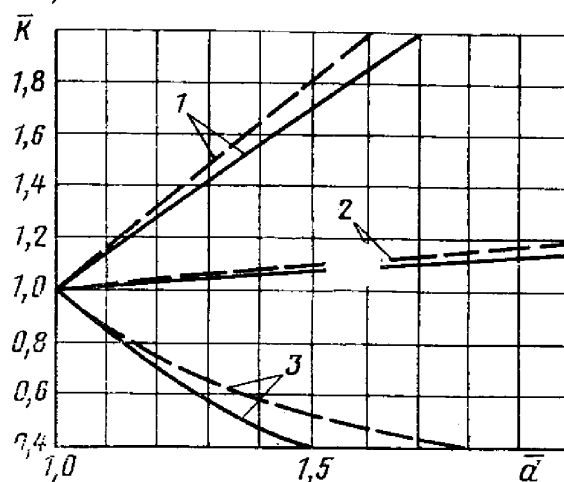


Рис. 5.19. Изменение соотношения компонентов от диаметра канала:

— оптимальное значение коэффициента избытка окислителя; --- коэффициент избытка окислителя равен 0,3; 1 — $v=0$, $n=0,4$; 2 — $v=0,4$, $n=0,45$; 3 — $v=1,0$, $n=0,7$

ных характеристик можно проводить по уравнениям («обратная» схема):

суммарного расхода компонентов гибридного топлива

$$\bar{m} = \bar{m}_ж \frac{1}{1 + K} + \bar{m}_т \frac{K}{1 + K};$$

соотношения компонентов гибридного топлива

$$\bar{K} = \bar{m}_т / \bar{m}_ж;$$

расхода твердого компонента

$$\bar{m}_т = \bar{d} \left(\frac{\bar{m}_ж}{\bar{d}^2} \right)^n \bar{p}^v, \text{ где } n, v — \text{коэффициенты};$$

давление в камере сгорания

$$\bar{p} = \bar{m} \sqrt{\bar{RT}}.$$

Кроме того, данную систему уравнений следует дополнить еще уравнением $\sqrt{RT} = f(\bar{K})$, которое можно представить в графической форме (рис. 5.18) ($p_n=0$).

Параметры $\bar{m}$, $\bar{K}$, $\bar{p}$, $\bar{RT}$, $\bar{d}$ определяются отношением указанной величины, принятой на нормальном режиме, к текущему режиму.

В результате при $\bar{m}_ж = \text{const}$ получено, что на соотношение компонентов и давление в газогенераторе при разгаре канала заряда существенно влияют коэффициенты в законе скорости горе-

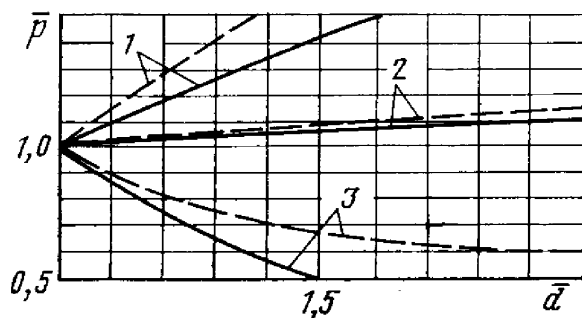


Рис. 5.20. Изменение давления от диаметра канала:

— оптимальное значение коэффициента избытка окислителя; — — коэффициент избытка окислителя равен 0,3; 1— $v=0$, $n=0,4$; 2— $v=0,4$, $n=0,45$; 3— $v=1,0$, $n=0,7$

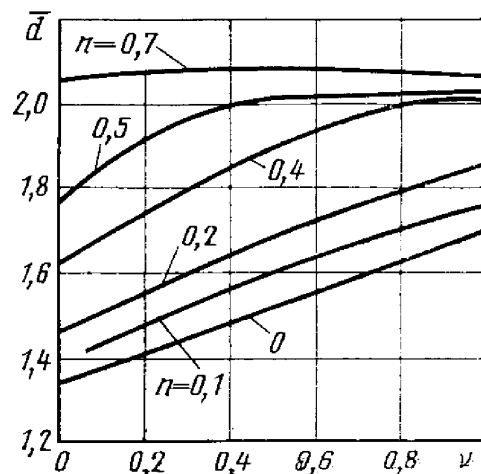


Рис. 5.21. Изменение диаметра канала заряда в зависимости от коэффициентов при скорости горения

ния и выбор исходного коэффициента избытка окислителя $\alpha_{исх}$ (рис. 5.19, 5.20). Так, например, при $v=0,4$ $n=0,45$ увеличение диаметра канала на 50% вызывает изменение соотношения компонентов на 10%, что при этом изменит давление на 6%. В этом случае от $\alpha_{исх}$ характеристики зависят слабо. При том же разгаре канала и коэффициентах при скорости горения $v=0$ и $n=0,4$ соотношение компонентов изменится на 70...80% в зависимости от $\alpha_{исх}$, а давление на 40...60%. С возрастанием толщины свода $\bar{d}$ при $\bar{m}_ж = \text{const}$ отклонения параметров газогенератора от исходного значения увеличиваются. Уход режима от исходного в общем случае будет определяться степенью изменения диаметра канала заряда, исходным коэффициентом избытка окислителя и при прочих равных условиях коэффициентами при скорости горения.

При работе газогенератора при постоянном расходе жидкого компонента за одинаковое время канал заряда разгорается на разную величину (рис. 5.21).

Рассмотрим относительные изменения выходных параметров при скачкообразном изменении расхода жидкого компонента ($\bar{d} = \text{const}$), т. е. регулировочные характеристики. Регулировочные характеристики представлены в виде зависимости относительного давления от относительного расхода (рис. 5.22).

Из результатов расчета следует, что для топлив с показателями при скорости горения $v=0$, $n=0,4$, т. е. $v+n < 1$, увеличение расхода горючего вызывает снижение соотношения компонентов, а для случая $v+n > 1$, наоборот, соотношение компонентов растет. Естественно, что изменение соотношения компонентов приводит к соответствующему отклонению работоспособности от исходной.

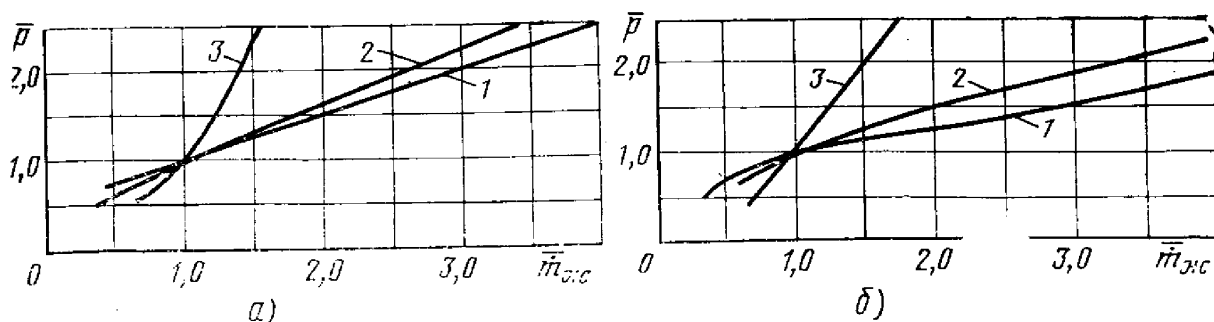


Рис. 5.22. Изменение давления от расхода жидкого компонента:

а—коэффициент избытка окислителя равен 0,3; *б*—коэффициент избытка окислителя—оптимальный; 1— $\nu=0$, $n=0,4$; 2— $\nu=0,4$, $n=1,0$; 3— $\nu=1,0$, $n=0,7$

Как для прямых, так и для обратных схем получается, что для глубоко регулируемых газогенераторов следует применять топлива, у которых заметна чувствительность к давлению. Результаты расчета показывают, что на возможный диапазон изменения влияет величина соотношения компонентов на исходном режиме. Например, чем меньше $\bar{K}_{исх}$ для топлив с $\nu+n < 1$, тем меньшим изменением расхода жидкого компонента обеспечивается потребный диапазон регулирования. Причем более чувствительная система получается при малом исходном коэффициенте избытка окислителя.

Таким образом, исследования гибридных ракетных двигателей показывают возможные пути разработки газогенератора на гибридном топливе с глубоким регулированием расхода. Однако при реализации возможностей, предоставляемых этой схемой, необходимо учитывать то, что некоторые специфические для нее вопросы пока еще не получили конструктивного решения.

5.4. ПАРОГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

Стендовые парогазогенераторы. Сложность ракетных систем и большое количество трудноучитываемых факторов, возникающих при полете на больших высотах и в космосе, заставляют проводить стендовые испытания верхних ступеней ракет в высотных условиях, без чего не удастся ни достичь основных целей стендовых испытаний, ни исследовать специфические проблемы, связанные с высотными полетами [13, 30].

Стенды для высотных испытаний маршевых ступеней ракет состоят из барокамеры (в которой располагается испытуемый двигатель либо целиком, либо только сопловой частью) и выхлопного диффузора, установленного соосно с соплом двигателя. Разрежение в барокамере в этом случае создается эжектирующим действием струи двигателя. Для запуска диффузора необходимо определенное отношение давления в двигателе к давлению на выходе из диффузора $p_{оп}/p_n$ (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Давление запуска цилиндрических диффузоров

$F_{\text{вх}}/F_{\text{кр}}$		9	16	25	36	49	64	81	100
$p_{\text{оп}}/p_{\text{н}}$	$k=1,4$	7	11,8	18,3	26	35	45	57	70
	$k=1,25$	6,4	10,8	16,4	23	31	40	50	61
	$k=1,25$	6,1	10,1	15,2	21	28	36	46	56

В табл. 5.4 приведены расчетные значения давления запуска цилиндрического (длиной $L \approx 8d_{\text{вх}}$) диффузора $p_{\text{оп}}/p_{\text{н}} = y(1/\lambda_{\text{вх}}) \times \times F_{\text{вх}}/F_{\text{кр}}$, где $q(\lambda_{\text{вх}}) = F_{\text{кр}}/F_{\text{вх}}$; $F_{\text{вх}}$ — площадь входа в диффузор; $F_{\text{вх}} = \pi d_{\text{вх}}^2/4$.

Если для обеспечения пускового отношения давления $p_{\text{оп}}/p_{\text{н}}$ необходимо снизить давление на выходе из диффузора $p_{\text{н}}$, то выхлопные газы из диффузора направляют в различные откачивающие системы, в качестве которых часто используются одно- или двухступенчатые эжекторы. Сопла эжекторов могут размещаться по кольцу (между стенками диффузора и камеры смешения), или в центре газовода, применяется также система эжекторных сопел, распределенных по поперечному сечению газового тракта. В качестве рабочего тела эжекторов возможно использование различных веществ (табл. 5.5) [13, 40].

Таблица 5.5

Рабочие тела эжекторов

Рабочее тело	Источник энергии	Относительная стоимость основного оборудования
Пар	Аккумулятор перегретой воды	2
Пар	Котел с мгновенным парообразованием	3
Парогаз	Камера сгорания ЖРД	1
Горячая вода	Аккумулятор горячей воды	1
Воздух	Воздушный компрессор и баллоны	10

В соответствии с проведенными оценками (табл. 5.5) в эжекторных системах ряда высотных зарубежных стендов используется парогаз — смесь продуктов сгорания жидкого топлива и паров воды в отношении 1:2. Причем парогазогенератор выполняется по одной из следующих схем (рис. 5.23):

а) сопловая часть жидкостного газогенератора погружается непосредственно в резервуар с проточной водой (рис. 5.23, а);

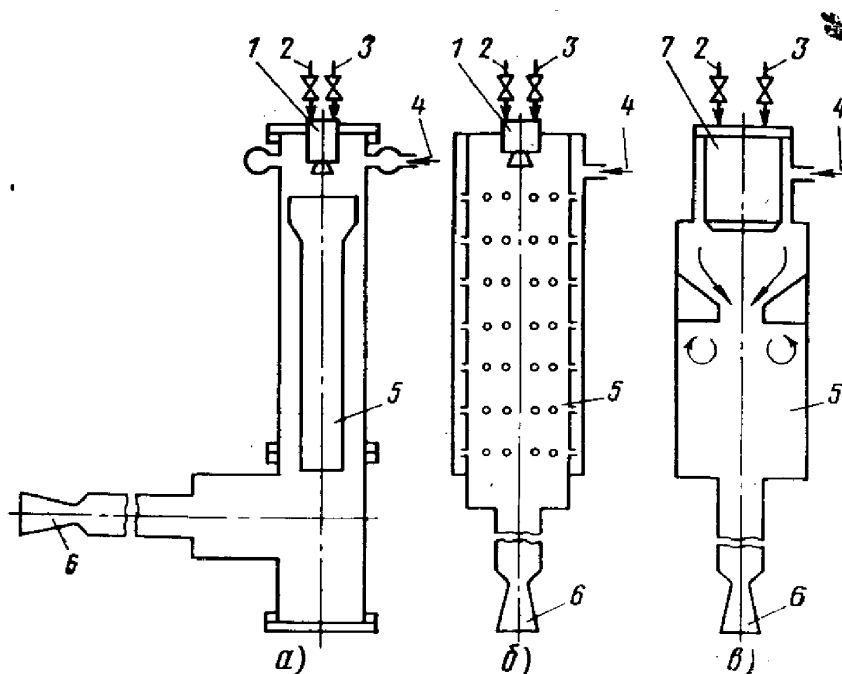


Рис. 5.23. Схемы парогазогенераторов:

1—газогенератор; 2—окислитель; 3—горючее; 4—вода; 5—испарительная камера; 6—сопло эжектора; 7—камера сгорания

б) продукты сгорания топлива жидкостного газогенератора и вода одновременно впрыскиваются в камеру смешения, пристыкованную к соплу (рис. 5.23, б);

в) вода вместе с компонентами жидкого топлива подается в камеру сгорания (трехкомпонентный жидкостной газогенератор) (рис. 5.23, в).

Характеристики некоторых парогазогенераторов для эжекторов высотных стендов приведены в табл. 5.6. Давление перед соплом эжектора 1,5...2,1 МПа, температура парогаса 470...570 К. На стендах используются 2...3 парогазогенератора, причем регулированием расхода впрыска воды обеспечивается тонкая настройка параметров эжектора.

Для расчета, необходимого для откачки стенда расхода парогаса, используется модель кусочно-одномерного течения газа в камере смешения эжектора [69]. Согласно этой модели на участке между начальным сечением и сечением запирания камеры смешения газы движутся без перемешивания. Поток продуктов сгорания испытуемого двигателя (расход m_1) ускоряется и приобретает звуковую скорость в сечении запирания, за которым происходит перемешивание и торможение потоков до дозвуковой скорости (рис. 5.24).

Для эжекторов с цилиндрической камерой смешения имеем: приведенный коэффициент эжекции, выраженный через параметры в начальном сечении, проходящем через срез сопел эжектора:

$$nC = \frac{Cm_1}{m'} = \frac{q(\lambda_1)}{\Omega \alpha q(\lambda')} ;$$

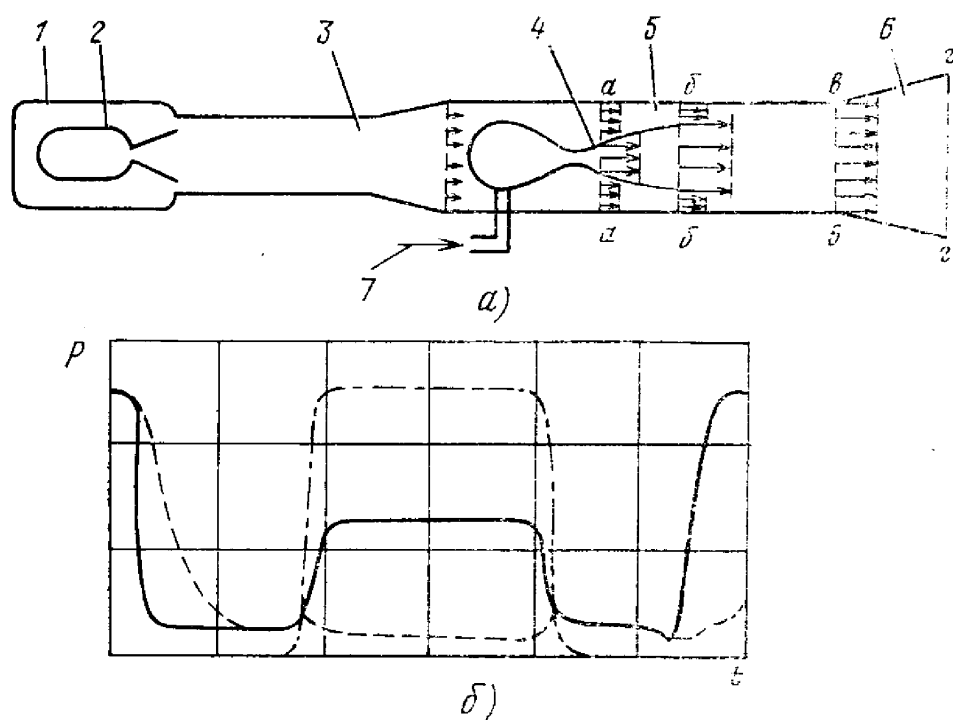


Рис. 5.24. Расчетная схема газового тракта (а) и циклограмма изменения давления (б) в высотном стенде:

1—барокамера; 2—ракетный двигатель; 3—диффузор; 4—сопло эжектора; 5—камера смешения эжектора; 6—дозвуковой диффузор; 7—парогаз; а—а—начальное сечение; б—б—сечение запираания; в—в—сечение на выходе из камеры смешения; г—г—выходное сечение; ———— давление в начальном сечении эжектора; — — — давление в барокамере; — · — · — давление в двигателе

Т а б л и ц а 5.6

Характеристики парогазогенераторов

Схема парогазогенератора	Компонент топлива	Производительность парогаза, кг/с
Сопловая часть погружена в резервуар (рис. 5.23, а)	Спирт и жидкий кислород	80
Общая камера смешения (рис. 5.23, б)	—	50
Трехкомпонентный жидкостной газогенератор (рис. 5.23, в)	Смесь газойля и скипидара, азотная кислота, вода	30

уравнения сохранения массы и импульса на начальном участке (до сечения запираания):

$$nC\Omega = \frac{1/q(\lambda'_3) - 1/q(\lambda'_1)}{1/q(\lambda_1) - 1};$$

$$nC = \frac{z(\lambda'_3) - z(\lambda'_1)}{z(\lambda_1) - 1};$$

уравнение сохранения импульса от сечения записания до выходного:

$$(1 + nC)z(\lambda'') \frac{A}{A^*} = z(\lambda'_s) + nC;$$

уравнение сохранения массы от начального сечения до выходного:

$$\frac{p'_0}{p''_0} = \frac{(1 + \alpha)q(\lambda'')}{(1 + nC)\alpha q(\lambda')} \frac{A^*}{A} = \frac{q(\lambda'')}{\beta(1 + nC)} \frac{A^*}{A},$$

где $\Omega = p'_0/p_{01}$ — отношение давлений торможения; $n = m_1/m'$ — коэффициент эжекции; $\alpha = F'/F_1$ — отношение выходной площади сопел эжектора к площади проходного сечения эжектируемого потока;

$$C = \frac{a_{кр1}(k_1 + 1)k'}{a'_{кр}(k' + 1)k_1}; \quad A = \frac{a''_{кр}(k'' + 1)k'}{a'_{кр}(k' + 1)k''};$$

$$A^* = \frac{1 + nC}{1 + n}; \quad k_1 = c_{p1}/c_{v1}; \quad k' = c'_p/c'_v; \quad k'' = c''_p/c''_v.$$

Для определения газовой постоянной R'' , температуры и теплоемкостей c_p'' и c_v'' смеси в выходном сечении необходимо использовать уравнение энергии и методы термодинамического расчета.

По этой системе уравнений определяют пять из восьми газодинамических параметров эжектора при заданных трех из них и известных температурах и теплоемкостях газов. Условие запуска системы имеет вид

$$p_0 \sigma_d \pi(\lambda''') \geq p_n,$$

где σ_d — коэффициент восстановления давления в дозвуковом (расширяющемся) диффузоре, установленном на выходе из камеры смешения; λ''' — приведенная скорость на выходе из дозвукового диффузора.

Наибольшее давление p_0'' обеспечивает эжектор с наименьшей площадью эжектирующей струи в сечении записания:

$$Q'_3 = \frac{1}{q(\lambda'_3)} = \min. \text{ Такой эжектор является оптимальным.}$$

Заметим, что рассматриваемый режим течения характеризуется одним сечением записания, в котором только эжектируемый поток имеет скорость звука. В число условий существования такого режима входит отсутствие теплового кризиса в смеси вблизи выхода из цилиндрической камеры смешения, т. е. $\lambda'' < 1$. Возникновение течения смеси со скоростью звука ($\lambda'' = 1$) возможно при перемешивании двух потоков с различными химическими свойствами (c_p, R) или температурами торможения, а также при выделении тепла в процессе перемешивания.

Получим условие оптимальности эжектора, в сечении записания которого лишь эжектируемый газ движется со скоростью звука.

Рассмотрим $F(Q_3', Q') = z(\lambda_3') - z(\lambda') - nC[z(\lambda_1) - 1] = 0$. После дифференцирования получим

$$dF = \frac{\partial F}{\partial Q_3'} dQ_3' + \frac{\partial F}{\partial Q'} dQ' = 0,$$

откуда $\frac{dQ_3'}{dQ'} = -\frac{\partial F}{\partial Q'} / \frac{\partial F}{\partial Q_3'}$, и условие оптимальности эжектора принимает вид $(dz/dQ = \pi(\lambda)/f_{кр})$:

$$\frac{\partial F}{\partial Q'} = -\frac{\pi(\lambda')}{f_{кр}} + nC \frac{\pi(\lambda_1)}{f_{кр}} \frac{1}{\pi C \Omega} = 0.$$

Таким образом, в случае оптимального эжектора имеем $\pi(\lambda') = \pi(\lambda_1)$, т. е. статическое давление одинаково по всему начальному сечению. Приближенно

$$z(\lambda_3') - z(\lambda') \approx \frac{\pi(\lambda_3') + \pi(\lambda')}{2f_{кр}} \left[\frac{1}{q(\lambda_3')} - \frac{1}{q(\lambda')} \right];$$

при этом из уравнений получаем

$$\pi(\lambda_3') \approx \frac{2f_{кр}}{\Omega} \frac{z(\lambda_1) - 1}{\frac{1}{q(\lambda_1)} - 1} - \pi(\lambda') = \frac{2\varphi(\lambda_1)}{\Omega} - \pi(\lambda'),$$

где $1 \geq \varphi(\lambda_1) \approx 1 - (1 - \pi_{кр})\lambda_1 \geq \pi_{кр}$.

Для оптимального эжектора имеем

$$\frac{\pi(\lambda_3')}{\pi(\lambda')} = \frac{2\varphi(\lambda_1)}{\pi(\lambda_1)} - 1 \leq 1,$$

причем $\min \left[\frac{2\varphi(\lambda)}{\pi(\lambda)} - 1 \right] \approx 0,79$ при $\lambda_1 = 0,5 \dots 0,6$, а $\max \left[\frac{2\varphi(\lambda)}{\pi(\lambda)} - 1 \right] = 1$ при $\lambda_1 = 0$ и $\lambda_1 = 1$.

Приближенное решение системы уравнений при заданных n, C, Ω имеет вид (метод Ньютона, начальное приближение в точке

$$\lambda_{30}' = \lambda_p, \quad \frac{1}{q(\lambda_{10})} - 1 = \frac{\frac{1}{q(\lambda_{30}')} - \frac{1}{q(\lambda')}}{nC\Omega}, \quad \text{где } \pi(\lambda_p) = \frac{\pi_{кр}}{\Omega};$$

$$\frac{1}{q(\lambda_3')} = \frac{1}{q(\lambda_{30}')} + \frac{f_{кр}\Omega \{z(\lambda_p) - z(\lambda') - nC[z(\lambda_{10}) - 1]\}}{\pi(\lambda_{10}) - \pi_{кр}};$$

$$\frac{1}{q(\lambda_1)} = \frac{1}{q(\lambda_{10})} + \frac{f_{кр}\Omega \{z(\lambda_p) - z(\lambda') - nC[z(\lambda_{10}) - 1]\}}{nC[\pi(\lambda_{10}) - \pi_{кр}]}.$$

При необходимости могут быть построены дальнейшие уточнения, например, тем же методом Ньютона.

Расчеты показывают, что при значениях $nC \geq 0,2$ оптимальный эжектор близок к расчетному (т. е. $\lambda' = \lambda_p$; $\lambda_1 = 1$), а при $nC \geq 0,6$, типичных для эжекторов высотных стендов, преимущества оптимального эжектора по сравнению с неоптимальным ($\lambda' < \lambda_p$) невелики и уменьшаются с ростом nC [69].

Для расчета степени сжатия в цилиндрическом эжекторе при известных λ' ; $\alpha = \frac{F'}{F - F'}$ удобно использовать уравнение сохранения импульса от начального сечения до конечного

$$p'_0 f(\lambda'_0) F' + p_{01} f(\lambda_1) (F - F') = p''_0 f(\lambda'') F$$

или

$$\frac{p''_0}{p_{01}} = \frac{2\alpha}{1 + \alpha} \frac{f(\lambda')}{f(\lambda'')} + \frac{1}{1 + \alpha} \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda'')}.$$

Величина приведенных скоростей эжектируемого λ_1 и выходного λ' потоков меньше единицы; $\lambda_1 \leq 1$; $\lambda'' < 1$. Поэтому возможные значения функций $f(\lambda)$ находятся в узких пределах $1 \leq f(\lambda_1) \leq f_{кр} = 1,25$, $1 < f(\lambda'') < f_{кр}$, и приближенные оценки $f(\lambda)$ из этого интервала можно использовать для непосредственного расчета p''_0/p_{01} . Кроме того, точное значение λ_1 [и следовательно, $f(\lambda_1)$] известно из предыдущего расчета.

Восстановление давления от p''_0 (на выходе из цилиндрической камеры смешения) до давления окружающей струи происходит в дозвуковом расходящемся ($2\alpha = 8 \dots 15^\circ$) диффузоре с потерями, существенно зависящими от профиля скорости перед расходящейся частью. Из результатов испытаний эжекторов с камерой смешения оптимальной длины следует, что коэффициент восстановления давления торможения в дозвуковом (выходном) диффузоре равен $0,80 \dots 0,87$ при периферийном подводе высоконапорной струи и $0,87 \dots 0,95$ — при центральном.

Стартовый парогазогенератор. Для образования парогаса применяются продукты сгорания не только жидкого, но и твердого топлива. Парогазовая система с использованием твердотопливного газогенератора разработана для обеспечения старта ракеты из пусковой шахты подводной лодки [48].

Стартовая система крепится на наружной поверхности шахты в нижней ее части (рис. 5.25). Газогенератор с зарядом прогрессивного горения пристыкован к блоку выработки парогаса, основными элементами которого являются цилиндрический резервуар с пресной водой, расположенный вдоль его оси, смеситель и газоход. Газогенератор запускается после наддува пусковой трубы инертным

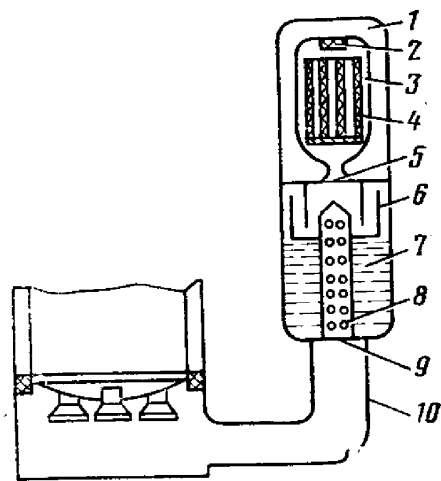


Рис. 5.25. Стартовая система:

1—кожух; 2—воспламенитель; 3—корпус твердотопливного газогенератора; 4—заряд твердого топлива; 5—заглушка сопла; 6—кольцевой дроссель; 7—резервуар с водой; 8—смеситель; 9—разрывная диафрагма; 10—газоход

газом до давления, нескорько превышающего давление забортной воды. Продукты сгорания пробивают сопловую заглушку и поступают в блок выработки парогаса. Образующаяся парогазовая смесь разрывает диафрагму и по газоходу истекает в подракетный объем, в котором нарастает давление. При сходе ракеты со стопорного кольца сбрасывается заглушка пусковой трубы в результате срабатывания профилированного заряда взрывчатого вещества, и ракета выходит из шахты.

Подача парогаса в подракетную полость происходит в соответствии с заданным ускорением движения ракеты в пусковой трубе.

Тепломеханическую систему: парогазогенератор + шахта + ракета можно рассматривать как газовый привод одностороннего действия, нормализованные уравнения функционирования которого имеют вид [44]:

$$\begin{aligned}\frac{d\varrho}{d\tau} &= \frac{k}{1+\varphi} [1 + \varrho\psi]; \\ \frac{d\theta}{d\tau} &= \frac{1}{1+\varphi} \frac{\theta}{\varrho} [(k-\theta) - (k-1)\varrho\psi]; \\ \frac{d\psi}{d\tau} &= \varrho; \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \psi,\end{aligned}$$

где τ , ϱ , θ , ψ и φ — безразмерное время, поршневое давление, температура, скорость и перемещение.

В простейшем случае движения с постоянным ускорением

$$\left(\frac{d\varrho}{d\tau} = 0\right):$$

$$\ddot{x} = \frac{(p_{\Pi} - p) F_{\Pi} - F_{\text{тр}}}{m} - 1$$

скорость изменяется пропорционально времени $\dot{x} = \ddot{x}t$, и имеем для скорости выхода ракеты из шахты $x_{\text{вых}} = \sqrt{2\ddot{x}H}$, где p_{Π} — поршневое давление; F_{Π} — площадь поперечного сечения шахты; $F_{\text{тр}}$ — сила трения; H — высота шахты.

Масса парогаса в пусковой шахте для любого момента времени может быть определена из уравнения состояния $m \cong \frac{p_{\Pi} F_{\Pi} x}{\chi RT}$, где χ — коэффициент, учитывающий тепловые потери в подракетной полости.

Отсюда для требуемого расхода парогаса получаем ($p_{\Pi} = \text{const}$) линейную зависимость

$$\dot{m} = \frac{p_{\Pi} F_{\Pi} \dot{x}}{\chi RT} = \frac{p_{\Pi} F_{\Pi} \ddot{x}}{\chi RT} t = \frac{\dot{m}_{\text{max}} \ddot{x}}{\sqrt{2\ddot{x}H}} t,$$

где $\dot{m}_{\text{max}} = \frac{p_{\Pi} F_{\Pi}}{\chi RT} \sqrt{2\ddot{x}H}$ — максимальный расход парогаса в момент выхода ракеты из шахты.

В соответствии с этим соотношением расход продуктов сгорания заряда твердого топлива в данном случае должен прогрессивно увеличиваться с ростом толщины горящего свода, горение заряда должно происходить преимущественно по внутренним поверхностям каналов, и следовательно, давление в пороховом газогенераторе существенно возрастает в процессе работы. В уточненном расчете парогазогенератора для старта ракеты из шахты необходимо также учесть процессы, протекающие при заполнении начального свободного объема и при догорании заряда после выхода ракеты из нее.

В последние годы продолжают развиваться способы пуска ракеты из шахты. В частности, исследовалась возможность использования части продуктов сгорания заряда твердого топлива первой ступени для создания поршневого давления в подракетном объеме, т. е. первоначально этот двигатель работает в качестве газогенератора. При этом, как показывают расчеты, в период движения ракеты в шахте расход из двигателя должен быть меньше величины, необходимой для обеспечения начальной тяговооруженности после выхода ракеты из шахты, и истечение газов из первой ступени в шахту происходит при докритическом перепаде давления. Кроме того, в самом начале процесса истечения продуктов сгорания твердого топлива в подракетную полость происходит их перемешивание с находящимся там воздухом и последующее их дожигание (доокисление) [7]. Удельный объем продуктов дожигания возрастает в 2...3 раза даже при малом 20% относительном объеме воздуха, вступившего в реакцию. Поэтому возможно резкое и нестабильное повышение поршневого давления. Следовательно, при использовании двигателя первой ступени в качестве газогенератора на участке старта ракеты из шахты возникают особые требования к программированию начального участка его работы.

Таким образом, парогазогенераторы с использованием жидкого и твердого ракетного топлива успешно применяются в пусковых и стендовых установках ракетной техники.

5.5. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ РАКЕТНО-ПРЯМОТОЧНЫХ И РАКЕТНО-ТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Горение топлива в ракетно-прямоточном двигателе происходит в два этапа: сначала топливо газифицируется в камере газогенератора при большом избытке горючего, а затем струи, истекающие из сопел газогенератора, перемешиваются в камере дожигания РПД с воздухом, за счет кислорода которого окисляется (дожигается) горючее (рис. 5.26). Из-за использования воздуха в качестве окислителя существенно возрастает удельный импульс РПД [27, 54]:

$$J_1 = \frac{R}{\dot{m}_T} = \frac{C_R v_n n}{2\varphi_n f_{вх}},$$

где $C_R = \frac{2R}{\rho_n v_n^2 F_{лв}}$ — коэффициент тяги; $n = \dot{m}_n / \dot{m}_T$ — отношение

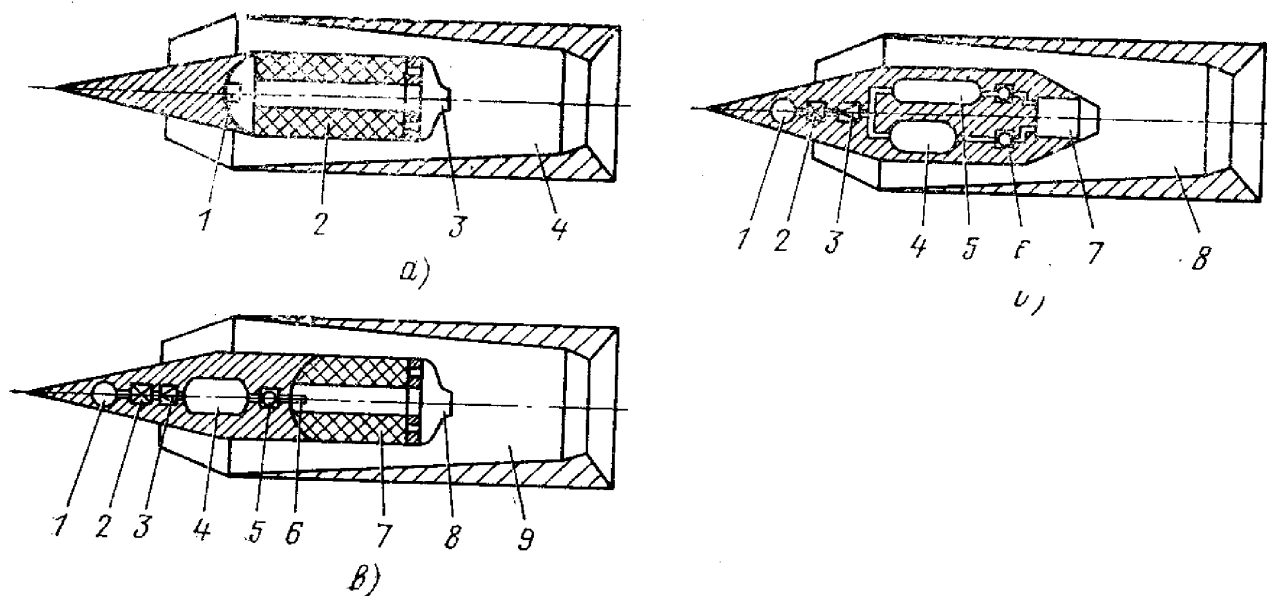


Рис. 5.26. Схемы ракетно-прямоточных двигателей:

а—ракетно-прямоточный двигатель с газогенератором на твердом топливе; 1—воспламенитель; 2—заряд твердого топлива; 3—сопло газогенератора; 4—камера дожигания; б—ракетно-прямоточный двигатель с газогенератором на жидком топливе; 1—баллон с газом; 2—клапан; 3—редуктор; 4—бак с жидким окислителем; 5—бак с жидким горючим; 6—регулятор расхода; 7—камера сгорания газогенератора; 8—камера дожигания; в—ракетно-прямоточный двигатель с газогенератором на гибридном топливе; 1—баллон с газом; 2—клапан; 3—редуктор; 4—бак с жидким окислителем; 5—регулятор расхода; 6—воспламенитель; 7—заряд твердого топлива; 8—сопло газогенератора; 9—камера дожигания

расхода воздуха к расходу топлива; $\varphi_n = F_n / F_{вх}$ — коэффициент расхода диффузора; $f_{вх} = F_{вх} / F_{дв}$ — отношение площади входа в диффузор к площади двигателя.

Для обеспечения оптимальных значений удельного импульса ракетно-прямоточных двигателей вдоль всего активного участка траектории с переменными плотностью воздуха и скоростью полета необходимо регулирование расхода истекающих из газогенератора продуктов неполного сгорания. Кроме того, перемешивание высоконапорных струй, истекающих из газогенератора, с воздухом в камере дожигания РПД приводит к повышению давления торможения. Поэтому скорость истечения из сопла и тяга РПД при прочих равных условиях выше, чем скорость на выходе из сопла и тяга прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД). В случае работы диффузора и сопла ВРД на расчетном режиме имеем

$$\left(\varphi_n = 1, p_a = p_n, \beta = \frac{\dot{m}_n + \dot{m}_r}{\dot{m}_n} \right);$$

$$R = (\dot{m}_n + \dot{m}_r) v_a - \dot{m}_n v_n = \dot{m}_n v_n \left(\beta \frac{v_a}{v_n} - 1 \right),$$

а избыток тяги РПД по сравнению с ПВРД равен

$$\Delta R = \dot{m}_n \beta \Delta v_a = \dot{m}_n \beta a_{кр} \Delta \lambda_a = \frac{\dot{m}_n \beta a_{кр}}{k \pi_{кр} \gamma (\lambda_a)} \frac{\Delta p_0}{p_0}.$$

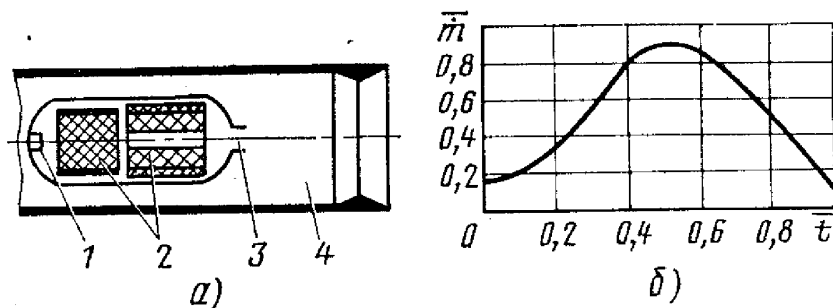


Рис. 5.27. Схема газогенератора РПД с прогрессивно-дегрессивной зависимостью прихода продуктов сгорания по времени:

а: 1—воспламенитель; 2—заряды твердого топлива с избытком горючего; 3—сопло газогенератора; 4—камера дожигания РПД; б—относительный приход продуктов сгорания твердого топлива в зависимости от относительного времени работы

Соответствующее увеличение коэффициента тяги составляет

$$\Delta C_R = \frac{2f_{\text{вх}} \beta a_{\text{кр}}}{k \pi_{\text{кр}} \gamma (\lambda_a) a_{\text{кр.н}} \lambda_{\text{н}}} \frac{\Delta p_0}{p}$$

Избыток полного давления в камере РПД, по сравнению с давлением в камере ПВРД, невелик: $\Delta p_0/p_0 < 0,5$ вследствие больших величин коэффициента эжекции в камере РПД: $n = \dot{m}_{\text{н}}/\dot{m}_{\text{т}} > 2$.

Потребная длина камеры дожигания РПД сравнима с протяженностью диффузионного факела, образующегося в истекающей из газогенератора турбулентной струе. В случае гомогенной струи продуктов неполного сгорания эта длина уменьшается приблизительно пропорционально корню квадратному из числа сопел газогенератора (при прочих равных условиях). Однако в топливах РПД предполагается большое количество металлического горючего [53, 70] (см. п. 1.2). В этом случае два следующих фактора существенно ограничивают возможности сокращения длины камеры сгорания РПД путем увеличения числа сопел:

горение частиц металла — существенно более продолжительный процесс, чем перемешивание струй, и это превышение зависит от условий в газогенераторе;

течение газов с большим количеством конденсированной фазы может сопровождаться нерасчетным зашлаковыванием проходных сечений (и их нельзя делать слишком малыми).

Наиболее простую конструктивную схему имеет РПД с твердотопливным газогенератором (рис. 5.26, а).

Особенности рабочего процесса в твердотопливном газогенераторе РПД (по сравнению с РДТТ) следующие:

как правило, сложная (например, прогрессивно-дегрессивная, рис. 5.27) зависимость прихода продуктов сгорания от времени; наличие в продуктах неполного сгорания большого количества (40 и более процентов) конденсированной фазы; низкая температура в газогенераторе.

Для решения задачи о влиянии конденсированной фазы продуктов неполного сгорания на работу газогенератора и камеры дожигания РПД необходимо:

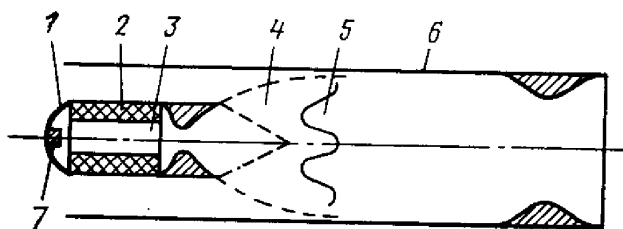


Рис. 5.28. Основные зоны РПД:

1—корпус газогенератора; 2—твердотопливный заряд; 3—зона предварительного разложения и подогрева металлического горючего в газогенераторе; 4—зона перемешивания с потоком воздуха; 5—зона воспламенения и горения; 6—камера дожигания РПД; 7—воспламенитель

определить степень дисперсности частиц при движении по всему газовому тракту;

установить законы трения и теплообмена частиц и запыленного потока в соплах;

исследовать процессы перемешивания и догорания частиц при взаимодействии истекающих струй с воздушным потоком (рис. 5.28).

Существенными требованиями к работе газогенератора являются:

а) необходимость обеспечения полного истечения конденсированной фазы;

б) стабильность площади критического сечения сопла (исключение нерасчетной зашлаковки);

в) подогрев частиц до необходимой температуры;

г) уменьшение и предотвращение агломерации частиц в струе.

При этом решающее влияние оказывают температура продуктов первичного горения и конструкция соплового блока (число, расположение и наклон сопел, рис. 5.29).

Применительно к боросодержащим твердым топливам РПД проведены экспериментальные исследования горения бора на лабораторной установке с присоединенным воздухопроводом (рис. 5.30) [31].

Порошок бора (размер частиц 1 мкм) подавался в газогенератор вместе с 50% суммарного расхода газообразного водорода через центральную форсунку, а газообразный кислород — через четыре соударяющихся с ней струи; остальная часть водорода поступала через два отверстия в центре. Изменения соотношения расходов кислорода и водорода приводили к регулированию температуры продуктов газогенерации (табл. 5.7) [31].

При температуре в газогенераторе ниже 1300 К и выше 2000 К отложения в сопле после испытания не наблюдались. Полное смешение достигается на расстоянии десяти диаметров сопла (диаметр камеры дожигания в 7,4 раза больше диаметра сопла газогенератора). Полнота сгорания бора и водорода увеличивается с ростом температуры (с 0,85 до 0,94 при увеличении температуры от 750 до 2000 К).

Особенность автономных испытаний твердотопливного газогенератора РПД состоит в том, что необходимо определять как текущий общий расход продуктов разложения, так и отдельно расходы газовой и конденсированной фаз.

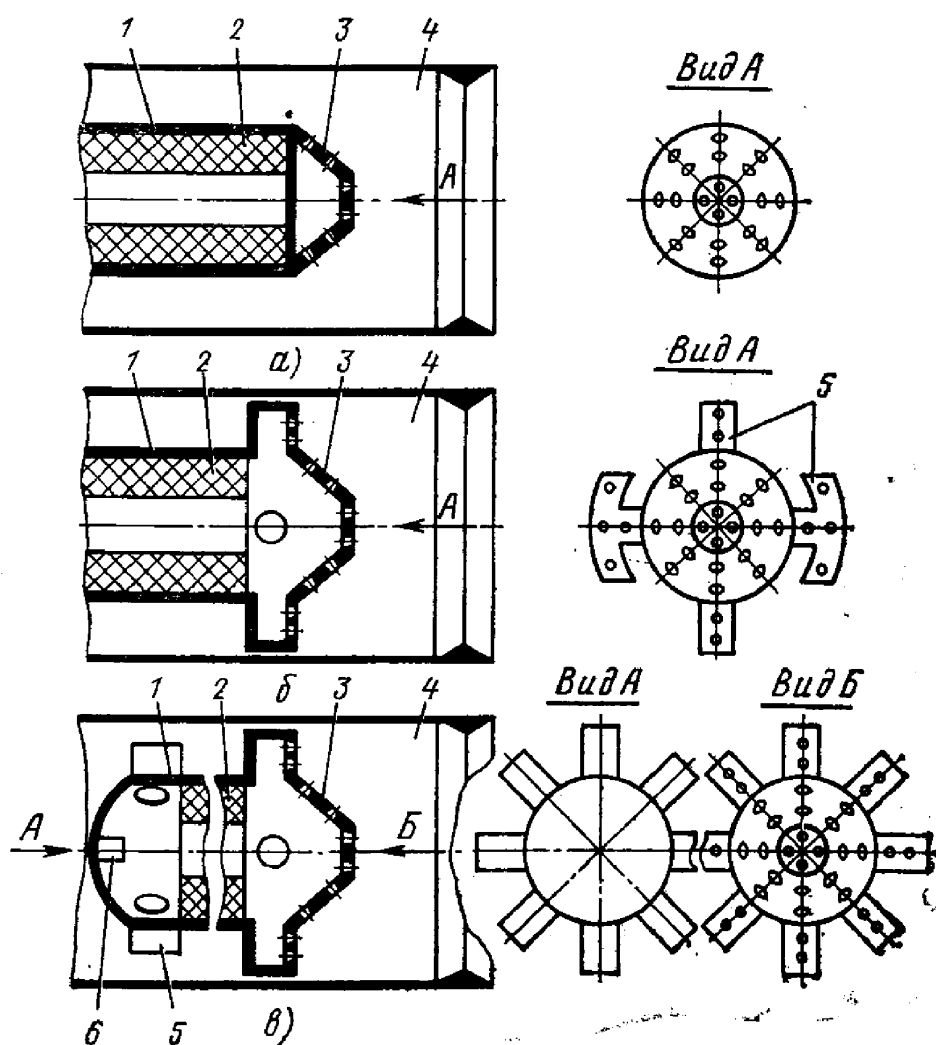


Рис. 5.29. Сопловые блоки газогенераторов РПД:

1—корпус газогенератора; 2—заряд твердого топлива; 3—сопловой блок; 4—камера дожигания РПД; 5—пилоны; 6—воспламенитель

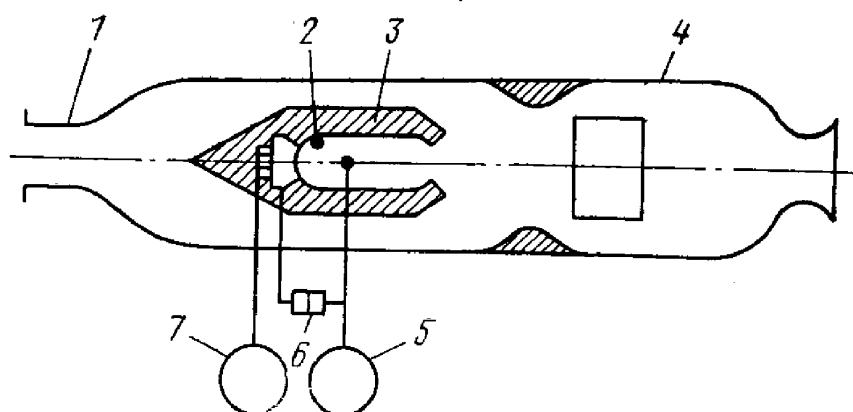


Рис. 5.30. Схема экспериментальной установки:

1—присоединенный воздуховод; 2—пиротехнический воспламенитель; 3—цилиндрический газогенератор; 4—квадратная камера дожигания с кварцевыми окнами; 5—бак с водородом; 6—резервуар с порошком бора; 7—бак с кислородом

Таблица 5.7

Изменения температур в зависимости от соотношения компонентов

Массовое отношение O_2/H_2	Температура, К	
	в газогенераторе	на срезе сопла
1	1000	500
2	1700	900
4	2500	1300

В первом приближении общий расход можно определить с помощью среднего значения, рассчитываемого по замеренным величинам начальной и конечной массы, и текущим значениям давления.

Рассмотрим вопрос сгорания частиц металла в газогенераторе на твердом топливе. Опыты показали, что в зависимости от физико-химических и кинетических свойств горючего-связующего, окислителя и их соотношения воспламенение и горение частиц алюминия возможно на поверхности горящего твердого топлива или в объеме камеры сгорания.

В первом случае при достижении определенной температуры происходит процесс укрупнения или спекания частиц, которые покидают поверхность горящего топлива в виде агломератов различного размера. Во втором случае воспламенение частиц не происходит до тех пор, пока они не оторвутся от поверхности топлива. Горящая частица имеет одну (или более) «шапку» расплавленного окисла, которая может увеличиваться в размерах по мере выгорания алюминия. Прилегающая зона реакции содержит частицы окиси алюминия размером до 2 мкм. Однако в объеме могут находиться и частицы окислов размером 5 ... 20 мкм.

На степень агломерации частиц влияют очень много параметров: концентрация и дисперсность частиц металла, дисперсность компонентов, состав горючего и окислителя, условия горения топлива.

Для примера в табл. 5.8 приведен среднеобъемный размер частиц D агломератов Al и Mg, образующихся при горении модельных составов перхлорат аммония — полиформальдегид с разным содержанием металла (%) и отобранных на расстоянии h (мм) от горячей поверхности заряда [16]. Среднеобъемный размер рассчитывался по формуле

$$D = \left[\int_0^{\infty} d^3 f(d) dd \right]^{1/3} = \left[\sum d_i^3 \frac{N_i}{N} \right]^{1/3},$$

где N_i — число частиц в i -м интервале; N — общее число частиц; d_i — средний размер частиц в i -м интервале.

Анализ экспериментального материала по влиянию различных параметров, характеризующих как топливную систему, так и условия ее сжигания, в зависимости от протекания процессов агломерации и диспергирования позволяет разделить все металло-содержащие конденсированные системы на три основные категории [16].

1. Конденсированные системы, содержащие до 10...18% мелкодисперсного металла. Агломерация в этих составах носит уме-

Таблица 5.8

Среднеобъемный размер частиц агломератов Al и Mg при горении модельных составов

Металл	$d_{\text{исх.}}$ частиц метал- ла, мкм	p , МПа	D , мкм								
			$h=0,5$			$h=5$			$h=10$		
			7	13	20	7	13	20	7	13	20
Алюминий	1	0,1 3	26 17	28 19	30 22	— 6	— 7	— 8	20 2	22 2,5	24 3
	5...10	0,1 3	38 32	42 36	44 39	— 9	— 11	— 12	28 2,5	32 3	35 4
Магний	Сферический	0,1 3	48 37	51 40	54 44	— 12	— 15	— 17	34 2,5	37 3,5	40 4,5
	1,5	0,1 3	18 11	— —	23 16	3 1	— —	6 2	— —	— —	— —

ренный характер; размер агломератов не превышает 200...300 мкм. В состав наиболее крупных агломератов помимо металлических частиц входит определенный процент (до 50...70%) продуктов неполного разложения горючего и окислителя. Газофазные продукты при горении этих составов доминируют.

2. Системы, содержащие от 20 до 60% металлического компонента. Явление агломерации в них выражено более сильно, чем в первых системах, размер агломератов колеблется от нескольких микрон до миллиметров. При горении возможно образование конденсированного остатка в виде спекшегося шлака.

3. Системы, в состав которых входит свыше 60% порошкообразного металла (за исключением магния) и окислов металла. После сгорания заряда образуется толстый слой шлака или скелет, напоминающий по форме исходный заряд. Количество диспергируемых конденсированных и газофазных продуктов, образующихся при горении таких систем, минимально.

Для систем первого типа (при прочих равных условиях) определяющим агломерацию параметром является, главным образом, скорость горения. Для систем второго и третьего типов скорость горения не может быть взята в качестве критериального параметра для оценки степени агломерации металлических частиц.

В случае заряда, горящего с торца, размер частиц значительно выше, чем для зарядов, горящих по поверхности внутреннего канала.

В газогенераторах на гибридном топливе, когда в центральный канал заряда подается жидкий окислитель, проблема горения металлических частиц осложняется тем, что они, освобождаясь из твердой фазы, оказываются в газообразной среде с большим избытком горючего и вступают в контакт с окислителем с большим

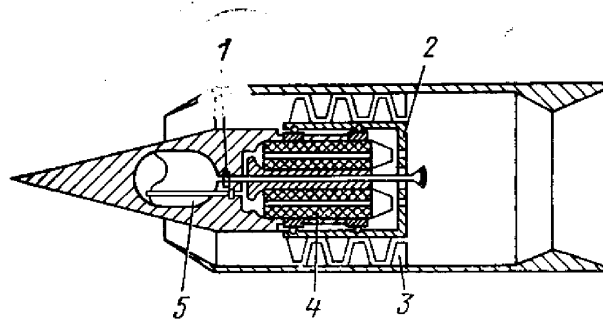


Рис. 5.31. Схема ракетно-турбинного двигателя:

1—регулятор расхода жидкого горючего; 2—рабочее колесо турбины; 3—компрессор; 4—твердотопливный газогенератор; 5—бак с жидким горючим

опозданием. Однако применение в качестве первого контура РПД газогенератора на гибридном топливе (рис. 5.26, в) расширяет возможности регулирования расхода продуктов первичного разложения с помощью изменения расхода жидкого компонента. Более того, регулированием расхода жидкого компонента в данном случае можно обеспечить оптимальное соотношение компонентов топлива как в

газогенераторе, так и в камере дожигания даже на участке старта и разгона РПД до маршевой скорости полета. Таким образом, в этой схеме газогенератор на гибридном топливе сначала используется в качестве стартового двигателя.

Вследствие подвода тепла в камере дожигания РПД скорость потока возрастает и, как показывают расчеты, обычно становится равной скорости звука, т. е. для эжектора РПД характерна работа в режиме «теплового кризиса» [27] (см. п. 5.4).

Степень повышения давления в эжекторе РПД невелика, приблизительно такая же, как и в одной ступени осевого компрессора. Существенное увеличение степени сжатия возможно в схеме ракетно-турбинного двигателя, имеющего многоступенчатый осевой воздушный компрессор, соединенный с турбиной, для привода которой используются продукты первичного разложения топлива в газогенераторе (рис. 5.31). В камере дожигания (вне рабочего колеса турбины) продукты первичного разложения смешиваются с воздухом и догорают; здесь же возможно сжигание дополнительного горючего.

Газогенератор ракетно-турбинного двигателя может работать на топливах различного агрегатного состояния (твердом, жидком, смешанном). Температура и состав продуктов газогенерации должны быть таковы, чтобы обеспечить требуемую работоспособность лопаток турбины, а мощность газогенератора достаточна для наиболее эффективной работы компрессора на всех режимах полета. В ракетно-турбинном двигателе наибольшее значение удельного импульса достигается тогда, когда реализуется высокое совершенство рабочих процессов одновременно в газогенераторе, турбине, компрессоре, камере дожигания и сопле.

Таким образом, использование общих принципов теории ракетных двигателей позволяет систематизировать схемы газогенераторов на различных топливах, выявить особенности рабочих процессов в них и рационализировать методы их проектирования и отработки.

Список литературы

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
2. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.
3. Баррер М., Жомотт А., Вебек Б. Ф. Ракетные двигатели. М.: Оборонгиз, 1962. 800 с.
4. Белов С. В. Пористые материалы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.
5. Беляев Н. М. Системы наддува топливных баков ракет. М.: Машиностроение, 1976. 335 с.
6. Беляев Н. М., Уваров Е. И. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1974. 199 с.
7. Бродвелл, Цу. Запуск и отсечка тяги ракеты в шахте. — ВРТ, 1968, № 4, с. 1—15.
8. Виницкий А. М. и др. Конструкция и отработка РДТТ. М.: Машиностроение, 1980. 230 с.
9. Волков Е. Б., Мазинг Г. Ю., Шишкин Ю. Н. Ракетные двигатели на комбинированном топливе. М.: Машиностроение, 1973. 184 с.
10. Волков Е. Б., Сырицин Т. А., Мазинг Г. Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. В 2-х кн. М.: Машиностроение, 1978. 223 с. 318 с.
11. Володин Ю. Г., Дульнев Г. Н. Исследование конвективного теплообмена в замкнутом пространстве. — ИФЖ, т. 9, 1965, № 5, с. 603—608.
12. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М.: Мир, 1973. 400 с.
13. Гётерт. Моделирование высотных и космических условий при испытаниях. — Ракетная техника, 1962, № 6, с. 17—30.
14. Гильберг Л. А. Ракеты и ракетные двигатели. М.: Знание, 1972. 63 с.
15. Гинзбург И. П. Прикладная гидрогазодинамика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. 338 с.
16. Гладун В. Д., Фролов Ю. В., Шахиджанов Е. С. — В кн.: Физика аэродисперсных систем. Киев: Изд-во КГУ, 1975, № 14. 54 с.
17. Глушко В. П. Ракетные двигатели ГДЛ—ОКБ. М.: Изд-во АПН, 1975. 36 с.
18. Головков Л. Г. Гибридные ракетные двигатели. М.: Воениздат, 1976. 168 с.
19. Годай, Симидзе. Исследование топлив для регулируемых РДТТ в Японии. — ВРТ, 1973, № 6, с. 36—41.
20. Григорьев А. И. Твердые ракетные топлива. М.: Химия, 1969. 116 с.
21. Двигательные установки ракет на жидком топливе. М.: Мир, 1966. 404 с.
22. Деи, Бейли. Разработка РДТТ с системой регулирования импульса тяги. — ВРТ, 1972, № 5, с. 36—49.
23. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 395 с.
24. Ерохин Б. Т., Липанов А. М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.
25. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука, 1975. 131 с.
26. Зрелов В. П., Серегин Е. П. Жидкие ракетные топлива. М.: Химия, 1975. 320 с.
27. Зуев В. С., Макаров В. С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 367 с.
28. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.
29. Исследование ракетных двигателей на твердом топливе/Под ред. Саммерфильда. М.: ИЛ, 1963. 440 с.
30. Исследование ракетных двигателей на жидком топливе. М.: Мир, 1964. 454 с.
31. Исследование внутрикамерных процессов в РПД ТТ. — ВРТ, 1969, № 5, с. 37—57.

32. Исследование и разработка гибридных ракетных двигателей (обзор). — ВРТ, 1973, № 6, с. 23—50.
33. Кац Б. М., Жаров Э. С., Винокуров В. К. Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 220 с.
34. Коутс, Коэн, Робертс. Регулирование процесса горения твердого топлива путем впрыска самовоспламеняющегося компонента. — ВРТ, 1968, № 11, с. 28—36.
35. Коэн. Горение топлив с избытком горючего. — Ракетная техника и космонавтика, 1969, № 7, с. 11—17.
36. Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н. Управление и стабилизация в аэродинамике. М.: Высшая школа, 1978. 480 с.
37. Курзинер Р. И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. (Основы теории). М.: Машиностроение, 1977. 212 с.
38. Ландау, Цеджельский. Баллистические характеристики РДТТ при больших перегрузках. — ВРТ, 1966, № 2, с. 66—67.
39. Лейн, Дергазариан, Стодечер. Малогабаритные твердотопливные газогенераторы. — ВРТ, 1973, № 5, с. 36—47.
40. Луарсабов К. А., Пронь Л. В., Сердюк А. В. Летные испытания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1977. 190 с.
41. Макдональд. РДТТ с многократным запуском и регулированием величины тяги. — ВРТ, 1973, № 2, с. 32—51.
42. Максмен Г., Вулдридж К., Маззи Ф. Основы теории горения в пограничном слое твердого горючего гибридного топлива. — В кн.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967. с. 313—345.
43. Маликов В. Г. Шахтные пусковые установки. М.: Воениздат, 1975. 119 с.
44. Мамонтов М. А. Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудам. М.: Оборонгиз, 1951. 491 с.
45. Марн, Бродвелл, Сильвер. Характеристики сопел для двигателей малой тяги. — ВРТ, 1978, № 11, с. 36—52.
46. Мельников Д. А., Пирумов У. Г., Сергиенко А. А. Сопла реактивных двигателей. — В кн.: Аэродинамика и газовая динамика. М.: Наука, 1976. с. 57—75.
47. Мелькумов Т. М., Мелик-Пашаев Н. И., Чистяков П. Г. Ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1976. 399 с.
48. Михайлов В. П., Назаров Г. А. Развитие техники пуска ракет/Под общей ред. акад. В. П. Бармина. М.: Воениздат, 1976. 196 с.
49. Моррис. Разработка апогейного РДТТ английской ракеты-носителя «Блэк эрроу». — ВРТ, 1973, № 7, с. 77—89.
50. Нестационарные процессы горения в ракетных двигателях. Итоги науки и техники. Авиационные и ракетные двигатели/Под ред. А. З. Чулкова. Т. 2. М.: ВИНТИ АН СССР, 1977. 199 с.
51. Николаев Ю. М., Соломонов Ю. С. Инженерное проектирование управляемых баллистических ракет с РДТТ. М.: Воениздат, 1979. 240 с.
52. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. М.: Машиностроение, 1979. 344 с.
53. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования РДТТ. М.: Машиностроение, 1979. 392 с.
54. Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов/Под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1967. 424 с.
55. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей/Под ред. В. М. Кудрявцева. М.: Высшая школа, 1975. 656 с.
56. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике/Под ред. В. К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
57. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Течение газа в соплах М.: Изд-во МГУ, 1978. 288 с.
58. Подчуфаров Б. М. Некоторые вопросы теории пневматических сервомеханизмов при учете теплообмена в рабочих полостях привода и трубопроводах. — Изв. вузов. Сер. Машиностроение, 1964, № 6, с. 134—146.
59. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.

60. Проектирование ракетных и ствольных систем/Под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.
61. Разработка бортовых микроракетных двигателей в США. — ВРТ, 1966, № 5, с. 52—68.
62. Разработка топлива для ГРД в Швеции. — ВРТ, 1966, № 10, с. 32—41.
63. Ракетные топлива (по материалам зарубежной печати). М.: Мир, 1975. 188 с.
64. Райзберг Б. А., Ерохин Б. Т., Самсонов К. П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972. 384 с.
65. РДТТ с регулируемой тягой (обзор). — ВРТ, 1973, № 2, с. 32—51.
66. Ройстон. Высокотемпературные пневматические регуляторы. — ВРТ, 1967, № 3, с. 79—82.
67. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
68. Саттон, Пакановский, Сарнер. Твердые топлива для газогенераторов. — ВРТ, 1968, № 4, с. 48—56.
69. Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. ЦАГИ, БНИИ, 1961. 328 с.
70. Симс, Крамп, Ли. Исследование твердых топлив для ракетно-прямоточных двигателей. — ВРТ, 1967, № 3, с. 42—46.
71. Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Наука, 1967. 388 с.
72. Справочник по пыли- и золоулавливанию/Под общей ред. А. А. Русанова. М.: Энергия, 1975. 296 с.
73. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
74. Струйная автоматика в системах управления/Под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.
75. Теория автоматического управления ракетными двигателями/Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
76. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания/Под ред. акад. В. П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 266 с.
77. Уэллс. Жидкие топлива с металлическими добавками. — ВРТ, 1967, № 1, с. 26—36.
78. Физические методы регулирования скорости горения твердого топлива. — ВРТ, 1974, № 10, с. 51—64.
79. Чернышев А. В. Технология монтажа и испытаний бортовых систем летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1977. 333 с.
80. Шапиро Я. М., Мазинг Г. Ю., Прудников Н. Е. Основы проектирования ракет на твердом топливе. М.: Воениздат, 1968. 352 с.
81. Шидловский А. А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
82. Шишков А. А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 151 с.
83. Шорр, Рейнхардт. Газогенератор на псевдоожигенном порошкообразном топливе. — ВРТ, 1979, № 9, с. 55—63.
84. Штегер М. С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.
85. Шумилов И. М. Негерметичные пневматические рулевые машины с золотниковым распределением. — В кн. Некоторые вопросы механики. М.: Оборонгиз, 1958. с. 162—178.
86. Экономичность, устойчивость и работоспособность ЖРД. — ВРТ, 1973, № 1, с. 29—60.
87. Gutler W. H. Gas generators — a perspective. AIAA Paper, 1973, N 1168, p. 111.
88. Murray J. A. Chamber bleed auxiliary powder unit. Journal of Spacecraft and Rockets. 1974, vol 11, N 12, pp. 808—812.
89. Thrust termination system for ICBM-s developed. Aviation Week and Space Technology, 1978, vol 108, N 10, pp. 50—51.
90. Zimmermann M. D. Power in pill form. Machine design. 1978, 50, N 5, pp. 86—89.

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения о газогенераторах	5
1.1 Области применения и основные характеристики газогенераторов	5
1.2. Топлива газогенераторов	13
1.3. Испытания газогенераторов	28
Глава 2. Газотермодинамика газогенераторов	37
2.1. Уравнения газогенератора	37
2.2. Характеристики газового тракта	42
2.3. Фильтрация продуктов сгорания	49
2.4. Газотермодинамические процессы в устройствах, питаемых продуктами газогенерации	54
Глава 3. Жидкостные газогенераторы	64
3.1. Однокомпонентный газогенератор	64
3.2. Двухкомпонентный газогенератор	68
3.3. Использование псевдожидкого топлива в газогенераторах	75
Глава 4. Твердотопливные газогенераторы	78
4.1. Конструктивная схема газогенератора на твердом топливе	78
4.2. Внутрибаллистический расчет газогенератора	84
4.3. Способы регулирования твердотопливных газогенераторов	92
4.4. Переходные процессы в твердотопливном газогенераторе	103
Глава 5. Комбинированные схемы газогенераторов	111
5.1. Газогенератор на твердом топливе с отдельными компонентами	111
5.2. Регулируемый газогенератор на квазигибридном топливе	113
5.3. Газогенератор на гибридном топливе	120
5.4. Парогазогенераторы	133
5.5. Газогенераторы ракетно-прямоточных и ракетно-турбинных двигателей	141
Список литературы	149

ИБ № 2591

**Альберт Алексеевич Шишков,
Борис Васильевич Румянцев**

ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ РАКЕТНЫХ СИСТЕМ

Редактор Л. И. Коваленко
Художественный редактор В. В. Лебедев
Технический редактор Т. С. Старых
Корректоры А. П. Озерова и Л. Е. Хохлова
Обложка художника В. И. Копнина

Сдано в набор 24.11.80.	Подписано в печать 14.04.81.	Т-08706
Формат 60×90 ¹ / ₁₆ .	Бумага типографская № 2.	Гарнитура литературная
Печать высокая	Усл. печ. л. 9,5	Уч.-изд. л. 10,5.
Тираж 1183 экз.	Заказ 1256	Цена 55 к.

Издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Б-76, Стромынский пер., 4

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Хохловский пер., 7.