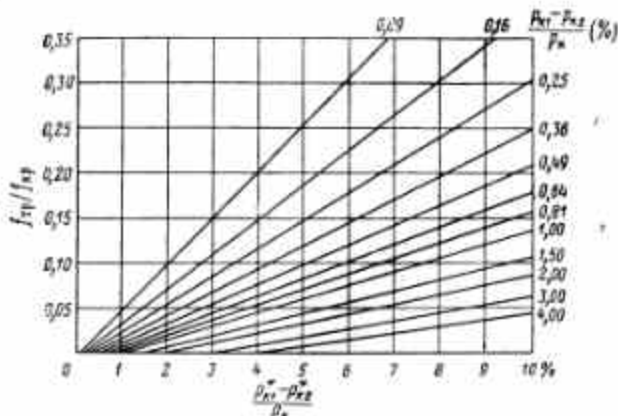




Фиг. 6.34. Графики изменения отношения площади поперечного сечения трубопровода огневой связи к площади критического сечения сопла в зависимости от величины отношения $(p_{x1}^* - p_{x2}^*) / p_k$ при различных значениях величины $(p_{x1} - p_{x2}) / p_k$; $\Gamma = 0,66$; $n = 0,68$; $C_d = 0,48$.

трубопровода огневой связи не превышает 5% ($\Gamma = 0,66$; $n = 0,68$; $C_d = 0,48$). Тогда

$$\frac{p_{x1} - p_{x2}}{p_k} = 0,01; \quad \frac{p_{x1}^* - p_{x2}^*}{p_k} = 0,05$$

и

$$\frac{f_{tr}}{f_{sp}} = \frac{0,66(1 - 0,68)}{2\sqrt{2} \cdot 0,48} \cdot \frac{(0,05 - 0,01)}{\sqrt{0,01}} = 0,0024.$$

Эту величину сразу можно найти по графикам, приведенным на фиг. 6.34.

6.10. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

6.10.1. Основные характеристики [40, 41]

Твердые топлива отличаются простотой формы зарядов, их малым весом, небольшими размерами и высокой надежностью. Поэтому их широко используют для создания давления в баках ракет с ЖРД, имеющих вытеснительную систему подачи, и в газогенераторах для вспомогательных силовых установок. Используемые в этих случаях твердые топлива должны удовлетворять ряду специальных требований.

А. Температура горения должна быть низкой. В вытеснительных системах подачи это необходимо для того, чтобы избежать тепловых потерь и свести к минимуму реакции взаимодействия между продуктами сгорания и вытесняемой жидкостью; кроме того, высокая температура продуктов сгорания приводит к уменьшению прочности тонкостенных топливных баков. Тепловые потери в газогенераторах также могут быть весьма существенными, особенно в самом начале работы; кроме того, лопатки турбины не должны чрезмерно перегреваться. Хотя иногда используют топливо с температурой сгорания, превышающей 2000°K , но целесообразнее все же иметь температуру сгорания не выше 1500°K (кроме тех случаев, когда предусмотрено охлаждение продуктов сгорания).

Б. Продукты сгорания должны быть или инертными, или содержать небольшой избыток горючего; это нужно для уменьшения взаимодействия продуктов сгорания с металлическими частями конструкции и с жидкими компонентами. Однако некоторый избыток окислителя в продуктах сгорания бывает даже желателен в тех случаях, когда твердое топливо используется для создания давления в баке горючего. Последнее условие накладывает особые требования на состав твердого топлива, поскольку обычно низкие температуры сгорания достигаются уменьшением относительного количества окислителя в топливе.

В. Количество твердых частичек в составе продуктов сгорания должно быть незначительным для уменьшения эрозии сопла, турбинных лопаток и форсунок.

Г. Температурная чувствительность твердого топлива должна быть низкой; однако в вытеснительных системах подачи наличие определенной температурной чувствительности твердого топлива даже желательно, поскольку свойства вытесняемой жидкости также зависят от температуры.

В работе [40] приведен в качестве примера один частный случай, когда общее изменение тяги было снижено до величины, меньшей 2%, в результате использования твердого топлива с коэффициентом температурной чувствительности $(\lambda_a)_n$, примерно равным $0,0025 \left[\frac{1}{^\circ\text{K}} \right]$.

Д. Наконец, при выработке требований к физическим свойствам топлива должны учитываться конкретные условия его эксплуатации.

Для удовлетворения перечисленных требований необходима разработка специальных химических составов топлива. Эти составы включают в себя mesa- или plateau-горящие (см. разд. 4.2.1) двухосновные топлива с низкими энергетическими характеристиками и различные богатые горючим смеси топлива, содержащие нитрат аммония. В числе прочих (несмотря на их плохие механические характеристики и трудность их воспламенения) используют

прессованные заряды, составленные из нитратов аммония и калия с добавкой в качестве катализатора гуанидин-нитрата и бихромата аммония, поскольку эти составы дают почти нейтральные или даже богатые окислителем продукты сгорания (например, 32% NH_4NO_3 , 3% KNO_3 , 60% гуанидин-нитрата и 4% бихромата аммония).

6.10.2. Создание давления в вытеснительной системе подачи ЖРД [40]

На фиг. 6.35 показана схема вытеснительной системы подачи ЖРД, в которой для создания давления использован заряд твердого топлива. Такая система подачи требует специальных мер предосторожности.

А. Должен быть исключен удар струи газов о поверхность жидкости.

Б. Некоторое взаимодействие продуктов сгорания с жидкостью можно допустить только в том случае, если оно точно рассчитано и воспроизводимо; такое взаимодействие может даже оказаться полезным, поскольку оно дает дополнительный объем газа.

В. Продукты сгорания не должны растворяться в жидкости.

Для выполнения этих условий в некоторых случаях приходится прибегать к дополнительным устройствам (применять специальные вытеснительные мешки, создавать плавающий на поверхности горючего и окислителя слой изолирующей жидкости или ставить предохранительные клапаны сброса давления).

Согласно условию неразрывности приравняем количество продуктов сгорания, образовавшихся в секунду, и увеличение количества газа в свободном объеме бака в секунду:

$$\frac{dp_6 V_{6.св}}{dt} = \eta p_1 a f_{\text{ж}}$$

где $V_{6.св}$ — свободный объем бака;

η — коэффициент, учитывающий тепловые потери в взаимодействие между продуктами сгорания и жидкостью; он может изменяться от 0,25 до величины, несколько большей единицы;

ρ_6 — массовая плотность газа в свободном объеме бака.

Температуру продуктов сгорания в баке считаем равной температуре изобарического сгорания (от давления она зависит незначительно); тогда можно записать

$$\frac{dp_6 V_{6.св}}{dt} = \frac{1}{RT_6} \frac{dp_6 V_{6.св}}{dt}$$



Фиг. 6.35. Схема вытеснительной системы подачи ЖРД, в которой для создания давления использован заряд твердого топлива.

откуда

$$V_{0, \text{св}} \frac{dp_0}{dt} + p_0 \frac{dV_{0, \text{св}}}{dt} = \pi r_0^2 f_p RT_0.$$

При установившемся процессе давление в баке должно оставаться постоянным. Кроме того, производная от величины свободного объема бака по времени равна объемному секунднему расходу жидкого компонента Q_m ; тогда окончательно получим

$$Q_m = \frac{\pi r_0^2 RT_0 a f_p}{p_0} \quad (45)$$

Объемный секундный расход жидкости можно также выразить через площадь входного сечения трубопровода подачи жидкости $\dot{V}_m$ и соответствующий перепад давления $p_0 - p_m$ (обычная формула расхода жидкости через отверстие):

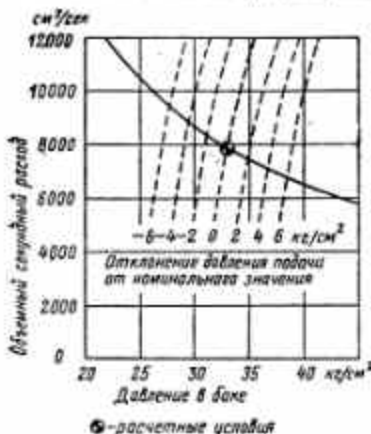
$$Q_m = C_d f_m \sqrt{2 \frac{p_0 - p_m}{\rho_m}} \quad (46)$$

где C_d — эмпирический коэффициент расхода, примерно равный 0,61; ρ_m — массовая плотность жидкости.

На фиг. 6.36 дана зависимость Q_m от величины давления p_0 для рассмотренного ниже примера. Сплошной линией показано изменение объемного секундного расхода, определенное уравнением (45), а пунктирными линиями показано изменение секундного расхода, описываемое уравнением (46), для нескольких значений давления подачи p_m (в действительности, эти кривые были построены для нескольких значений величины отклонения Δp_m от номинального значения p_m). Приведенные на фиг. 6.36 графики дают возможность судить о стабильности системы подачи.

А. Устойчивость процесса в баке. Величину давления подачи считаем постоянной. Пусть давление в баке несколько превысит равновесное значение; процесс вытеснения будет устойчивым, если при этом увеличение скорости истечения жидкости будет превышать увеличение скорости образования газа. Можно показать, что это условие выражается следующим неравенством:

$$\pi < 1 + \frac{1}{2} \frac{p_{0, \text{св}}}{p_{0, \text{св}} - p_m}.$$



Фиг. 6.36. Графики, характеризующие работу вытеснительной системы подачи ЖРД, в которой для создания давления использован заряд твердого топлива.

Указанное неравенство всегда удовлетворяется, поскольку показатель горения твердого топлива n меньше единицы.

Б. Устойчивость всей системы. Если в результате повышения давления в камере сгорания ЖРД повышается давление подачи $p_{\text{ж}}$ (т. е. $\Delta p_{\text{ж}} > 0$), то необходимо, чтобы при этом уменьшался расход компонентов. Как видно из фиг. 6.36, это условие действительно выполняется. Во избежание сильных колебаний давления в камере уменьшение расхода компонентов не должно быть слишком значительным; поэтому может оказаться желательным применять твердое топливо, обладающее большой величиной показателя горения n (легко показать, что при $n=1$ расход жидкости $Q_{\text{ж}}$ будет постоянным). Однако по ряду практических соображений часто оказывается предпочтительней топливо с низкими значениями n и в некоторых случаях нужное изменение расхода жидкости может быть достигнуто с помощью небольшого дополнительного сопла, через которое истекает часть продуктов сгорания твердого топлива.

6. 10. 3. Пример

А. Требуется рассчитать размеры заряда, горящего по торцу, потребного для создания в течение 30 сек. давления в баках ЖРД, равного $33,1 \text{ кг/см}^2$. Тяга ЖРД равна 2000 кг ; жидкие компоненты: красная дымящая азотная кислота ($\rho_{\text{агс}} = 0,00152 \text{ кг/см}^3$) и углеводородное горючее ($\rho_{\text{гсг}} = 0,00105 \text{ кг/см}^3$). Соотношение компонентов $\Phi = 0,3$ и суммарный секундный расход $g_{\text{сг}} = 10,7 \text{ кг/сек}$. Заряд делается из двухосновного твердого топлива с малой зависимостью скорости горения от давления; характеристики твердого топлива следующие:

скорость горения	$u = 0,406 \text{ см/сек}$
температура изобарического горения	$T_{\text{г}} = 2000^\circ \text{ К}$
молекулярный вес	$\mu = 21,2$
отношение удельных теплоемкостей	$k = 1,28$
весовая плотность	$\rho_{\text{тсг}} = 0,00156 \text{ кг/см}^3$
коэффициент температурной чувствительности (κ_n) _К =	$0,00435 \left[\frac{1}{^\circ \text{К}} \right]$

Коэффициент η берем равным 0,75.

Б. Кроме того, требуется определить площадь входных сечений трубопроводов по следующим данным:

давление в камере сгорания	20	кг/см ²
перепад давления на форсунках (одинаковый для горючего и для окислителя)	6	"
падение давления в магистрали горючего	2,17	"
падение давления в магистрали окислителя (с учетом падения давления в охлаждающем тракте, равного $4,24 \text{ кг/см}^2$)	5,89	"

Решение

А. Расчет горящего по торцу заряда. Секундный объемный расход окислителя будет равен

$$Q_0 = \frac{\dot{m}_0}{\rho_0} = \frac{\dot{m}}{\rho_0} \frac{1}{1 + \Phi} = \frac{10,7}{0,00152 \cdot 1,3} = 5420 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Секундный объемный расход горючего

$$Q_T = \frac{\dot{m}_T}{\rho_T} = \frac{\dot{m}}{\rho_T} \frac{\Phi}{1 + \Phi} = \frac{10,7 \cdot 0,3}{0,00105 \cdot 1,3} = 2350 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Следовательно, общий секундный объемный расход жидкого топлива будет равен

$$Q_{\Sigma} = 5420 + 2350 = 7770 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Находим площадь поверхности горения заряда

$$f_b = \frac{\rho_0 c_b Q_{\Sigma}}{\eta_T R T_{\Sigma} a} = \frac{33,1 \cdot 7770 \cdot 981}{0,75 \cdot \frac{8316,6}{21,2} \cdot 10^4 \cdot 2000 \cdot 0,406} = 67,5 \text{ см}^2$$

и длину заряда

$$L = 1,01 m f_b = 1,01 \cdot 30 \cdot 0,406 = 12,3 \text{ см.}$$

Вес заряда будет равен

$$G_T = f_b L \rho_T g_0 = 67,5 \cdot 12,3 \cdot 0,00156 = 1,3 \text{ кг.}$$

Б. Определение входных сечений трубопроводов. Для магистрали окислителя согласно исходным данным имеем

$$p_{b,cs} - p_0 = 33,1 - (20 + 6 + 5,89) = 1,21 \text{ кг/см}^2$$

и, следовательно,

$$f_0 = \frac{Q_0}{C_d \sqrt{2 \frac{p_{b,cs} - p_0}{\rho_0}}} = \frac{5420}{0,61 \sqrt{2 \cdot \frac{981 \cdot 1,21}{0,00152}}} = 7,1 \text{ см}^2.$$

Аналогично, для магистрали горючего находим

$$p_{b,cs} - p_T = 4,93 \text{ кг/см}^2$$

и

$$f_T = 1,27 \text{ см}^2.$$

Примечание. Температура горения рассмотренного топлива, вероятно, слишком высока для того, чтобы это топливо можно было использовать в системе подачи. Поэтому может оказаться предпочтительнее использовать заряд, состоящий из 70% нитрата аммония и 30% (включая присадки) синтетического каучука или полиакрилата; характеристики этого топлива могут быть следующие:

скорость горения (при $p_k = 70 \text{ кг/см}^2$) $a = 0,175 \text{ см/сек}$

температура изобарического горения $T_k = 1366^\circ \text{ K}$

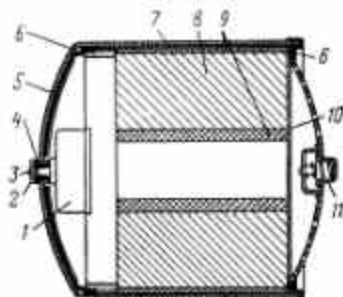
показатель горения $n = 0,5$

отношение удельных теплоемкостей	$k = 1,28$
весовая плотность	$\rho_{\text{гдо}} = 0,00144 \text{ кг/см}^3$
коэффициент температурной чувствительности	$(\alpha_{\text{гд}})_{\text{к}} = 0,00414 \left[\frac{1}{^\circ\text{К}} \right]$
молекулярный вес	$\lambda = 19,5$

6. 10. 4. Газогенераторы [41]

Газогенераторы бывают с длинными зарядами, горящими по торцу, предназначенными для вспомогательных силовых установок, или с пусковыми зарядами различных конструкций. Очень продолжительные времена горения (порядка нескольких минут) могут быть получены при использовании медленно горящих твердых топлив (заряд может состоять из нескольких последовательно скрепленных шашек). Газогенераторы для вспомогательных силовых установок обычно имеют рабочее давление порядка $50 \div 100 \text{ кг/см}^2$; газ из камеры сгорания подается на лопатки активной турбины через одно или несколько сопел.

На фиг. 6. 37 показан пусковой заряд из двухосновного топлива, горящий сразу с обоих торцов. Его рабочее давление 75 кг/см^2 и время горения примерно 9,5 сек. (при $T_{\text{г}} = 20^\circ \text{C}$); этот пусковой заряд обычно применяют для запуска турбореактивных двигателей.



Фиг. 6. 37. Типичный заряд, применяемый для запуска реактивных двигателей.

1—изоляция, 2—датчик, 3—контакт для подачи напряжения, 4—заземление, 5—часть двигателя, 6—бронировка, 7—резиновый корпус, 8—топливная шашка, 9—бронировка, 10—герметизирующая мембрана, 11—решетка.

6. 11. ДВИГАТЕЛИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ЖИДКО-ТВЕРДЫХ ТОПЛИВАХ, ИЛИ ГИБРИДНЫЕ ДВИГАТЕЛИ [42]

У двигателей, работающих на жидко-твердых топливах (у гибридных двигателей), один компонент находится в жидком, а другой — в твердом состоянии. Хотя сведений по таким двигателям опубликовано мало, возможность их применения заслуживает серьезного внимания. Схема двигателя, работающего на жидко-твердом топливе, показана на фиг. 6. 38; двигатель работает при довольно низком соотношении компонентов и для уменьшения размеров камеры в твердом состоянии взято горючее.