

12, декабрь 2015

УДК 662.1:629.78

Методика проектирования пиротехнических устройств систем отделения

*Буянова Л.В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет, кафедра «Аэрокосмические системы»*

*Научный руководитель: Журавлёв Е.И., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Аэрокосмические системы»
bauman@bmstu.ru*

1. Назначение пиротехнических систем отделения. Конструктивные особенности систем отделения

Широкое применение пиротехнических устройств в ракетно-космической технике объясняется рядом преимуществ перед устройствами других типов (гидравлическими, пневматическими, электрическими), предназначенных для решения аналогичных задач. По мере усложнения задач, решаемых КА, количество узлов пироавтоматики, устанавливаемых на них, постоянно возрастает. Так, например, на КА «Меркурий» имел на борту 57 пироустройств, «Джемини» - 90, «Союз» - 166, «Аполлон» - 234.

Конструктивно, в общем случае, пиротехнические устройства представляют собой систему, состоящую из энергодатчика, коммуникации, подводящей энергию, и исполнительного органа, чаще представляющего собой поршневой механизм, приводимый в действие сжатым газом.

К числу задач, решаемых ракетно-космической техникой пиротехническими устройствами, относятся:

- открытие и закрытие топливных магистралей;
- разделение отсеков корабля;
- раскрытие антенн и солнечных батарей;
- отделение парашютных люков;
- перерезание чек, тросов, трубопроводов и электрических кабелей;
- открытие замков и т.д.

Основными преимуществами пиротехнических устройств являются:

- высокая надёжность срабатывания ($P=0,999$ при доверительной вероятности 0,95);
- малое время срабатывания (менее 0,01 сек);
- высокая стойкость к воздействию космического вакуума и радиации, высоких и низких температур;

- малые габариты и масса;
- высокая плотность энергии на единицу объёма;

Высокая надёжность работы пиротехнических систем достигается, в основном, за счёт высокого объёма проверочных операций. Надёжное функционирование систем разделения, которое заключается не только в безотказном срабатывании всех элементов, но и в обеспечении заданных параметров относительного движения, является одним из условий выполнения задач, поставленных перед ракетно-космическим комплексом. Отказ в работе любой из систем разделения или неправильный выбор её параметров ведёт, как правило, к нарушению нормального функционирования всего комплекса в целом.

К числу недостатков пиротехнических устройств относятся:

- существование вероятности срабатывания от мощных электромагнитных излучений, ядерных взрывов и т.д.;

- необходимость проведения большого количества испытаний подобных устройств в условиях, аналогичных условиям их практического применения, для получения достоверных сведений о надёжности срабатывания.

Примером пиротехнического устройства, применяемого в космической технике, является система, предназначенная для отделения крышек парашютных контейнеров спускаемого аппарата (СА) и сообщения им кинетической энергии для последовательного ввода в действие связанных с крышками блоков парашютной системы (рис.1).

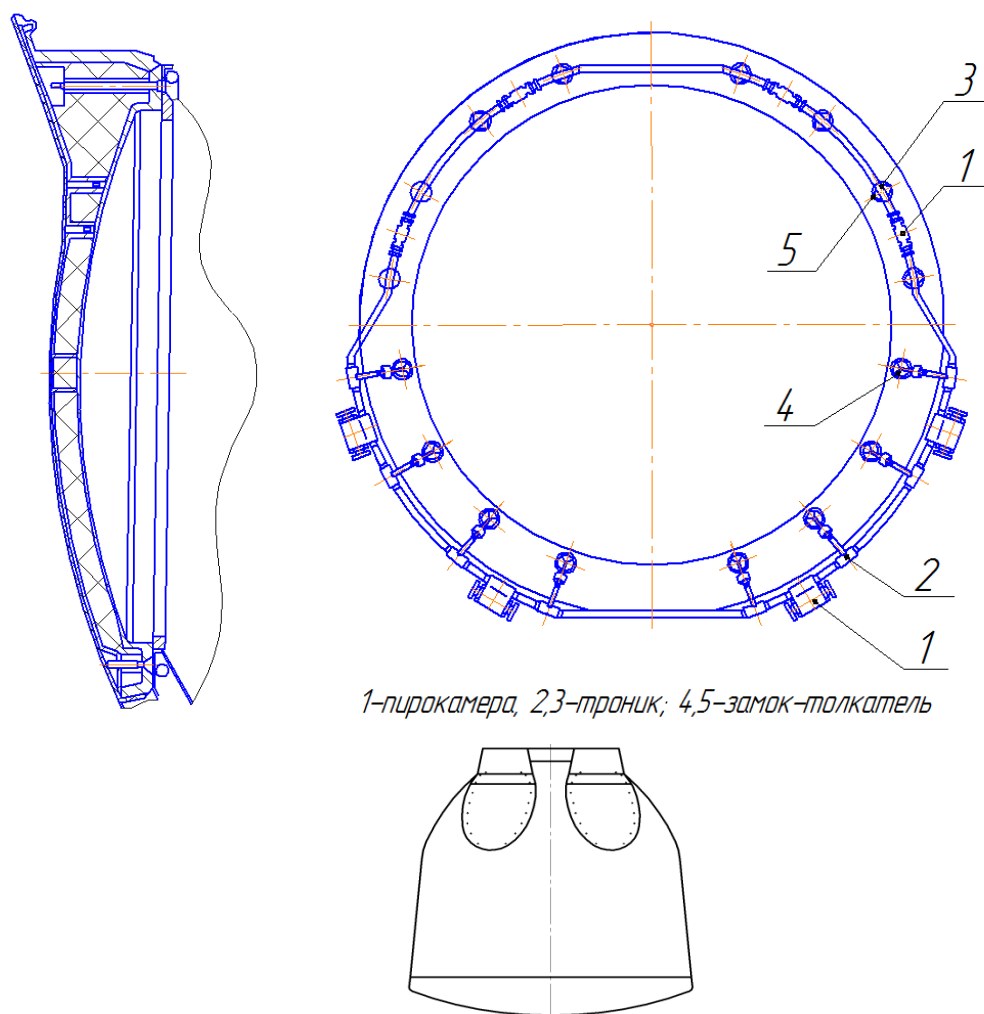


Рис. 1. Конструкция системы отделения крышки парашютного контейнера

Каждая система отделения состоит из 16 замков-толкателей (исполнительные органы), коллектора (коммуникация), на пирокамерах которого установлено 16 пиропатронов ДП4, сгруппированных попарно в 8 пирокамерах (энергодатчик).

Конструкция системы отделения представлена на рисунках (рис. 2, 3).

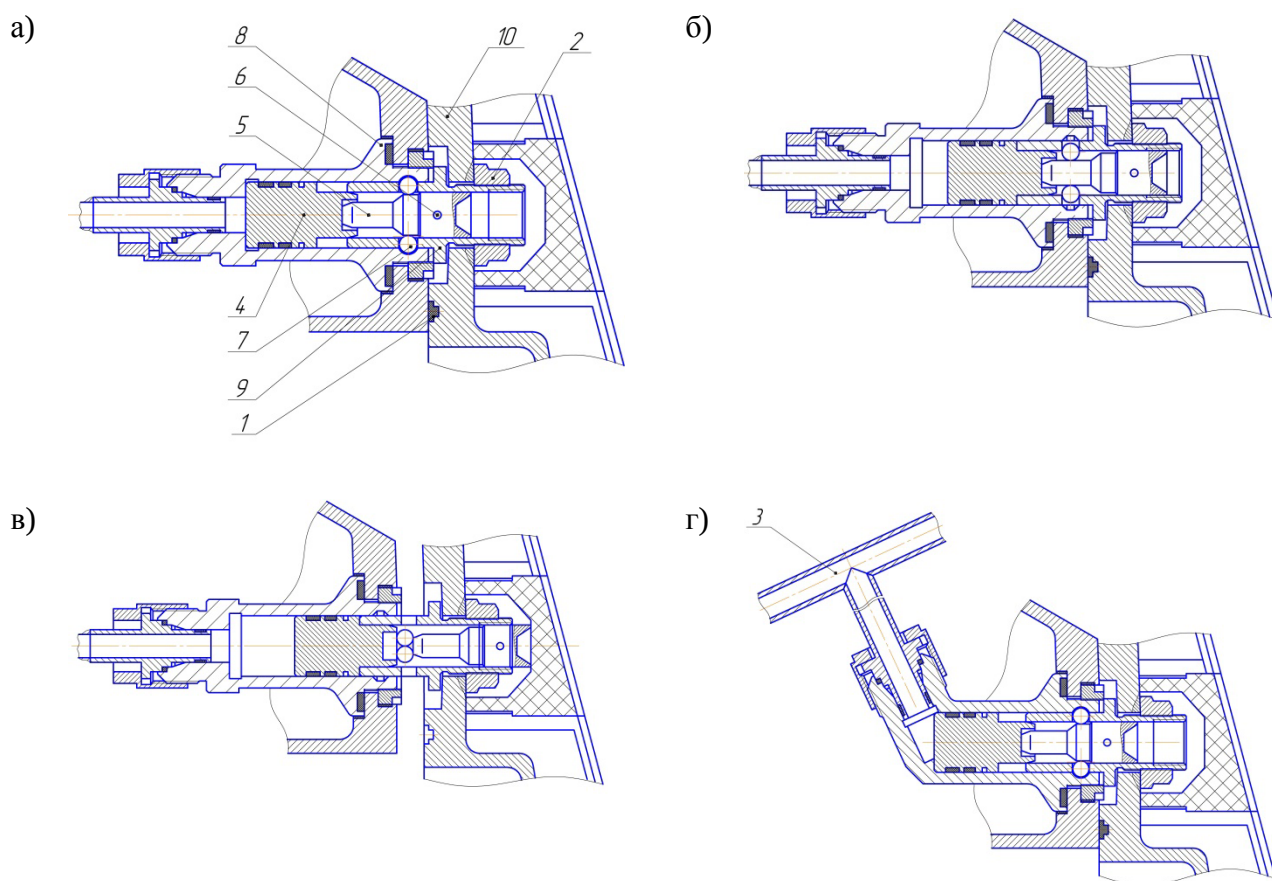


Рис. 2. Система отделения крышек основной системы приземления (ОСП) и запасной системы приземления (ЗСП): а) штатное положение; б) раскрытие замка; в) рабочее положение; г) вариант соединения с коллектором

Каждый замок является одновременно болтом, стягивающим шпангоут крышки со шпангоутом корпуса СА и обеспечивающим надёжное герметичное соединение этих фланцев путём раздавливания резиновой прокладки (поз. 1). Это раздавливание осуществляется за счёт осевой силы, возникающей в замке, при затяжке установочной гайки (поз. 2).

При подаче на мостики пиропатронов электропитания, давление газов, образующихся при сгорании пиросмеси, распространяется по коллектору (поз. 3) и действует на поршни замков-толкателей (поз. 4), которые давят на штоки (поз. 5), зафиксированные с болтом замка шпильками-чеками (поз. 6). При достижении определённого давления шпилька срезается, шток перемещается и освобождает шарики (поз. 7), являющиеся объектом механической связи между болтом и корпусом замка. При наличии момента затяжки на шарик действует постоянная осевая сила (вдоль замка), которая из-за опорной поверхности в корпусе (поз. 8), расточенной под углом 45° , создаёт

боковую составляющую, постоянно выталкивающую шарик по нормали к оси замка, что позволяет освободить шарик в момент перемещения штока, т.е. связь между болтом (поз. 9) и корпусом замка освобождается, замок раскрывается и поршень упирается в заплечики болта. Дальнейшее движение поршня, связанное с сообщением кинетической энергии крышке (поз. 10), носит название рабочего периода (хода) замка-толкателя. В дальнейшем кинетическая энергия крышки затрачивается на ввод в поток вытяжного парашюта.

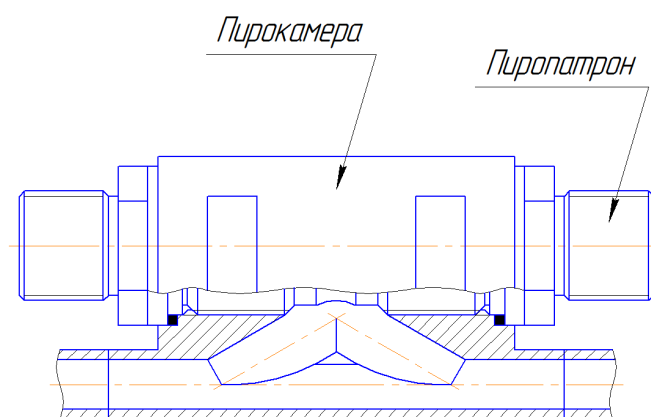


Рис. 3. Конструкция пирокамеры

2. Конструкция пиропатрона

В качестве источника рабочего газа в пиротехнических устройствах используются пиропатроны типа ДП4-1, ДП4-2, ДП4-3, ДП4-4, ДП4-5 и др.. Конструктивно эти патроны состоят из корпуса, внутри которого находится узел контактов (колодка), с проходящими сквозь него проводками, мостика накаливания (два моста), на поверхность которого нанесено инициирующее взрывчатое вещество, заряда пиротехнического состава, колпачка, предохраняющего пиротехнический состав от высыпания, и форсажной втулки (рис. 4). Кроме этого в патронах ДП4 имеется обтюрирующее устройство (чашечка), расположенное между инициирующим взрывчатым веществом и пиротехническим составом, что позволяет их использовать в пиромеханизмах с более высоким давлением рабочего газа.

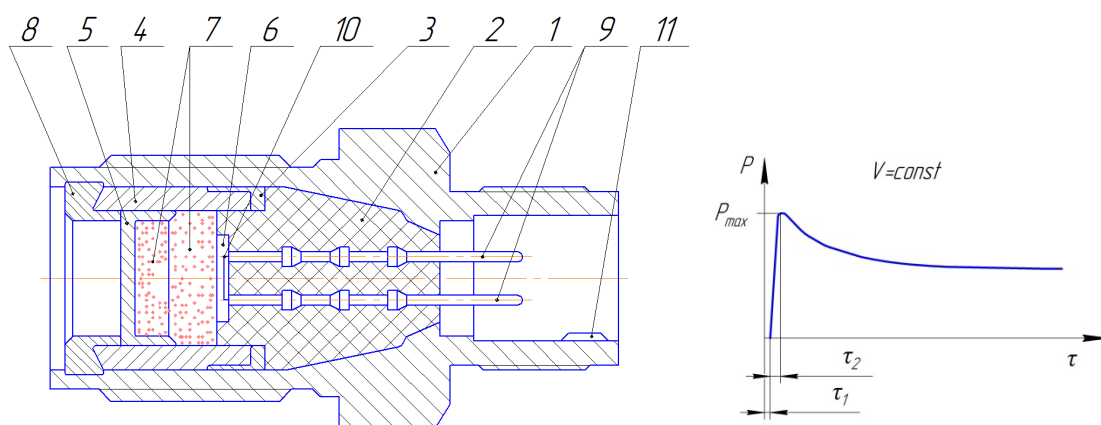


Рис. 4. Схема пиропатрона ДП4:

1-корпус; 2-колодка; 3-обтюрирующая чашечка; 4-гильза; 5-колпачок;
6-инициирующее взрывчатое вещество; 7-пиротехнический состав;
8-поджимающая гайка; 9-проводник; 10-мостик накаливания; 11-центрирующий зуб

Основными рабочими характеристиками пиропатронов являются следующие характеристики:

P_{max} - максимальное давление, развиваемое пиропатроном в замкнутом объеме (обычно в стандартной бомбочке объемом $W_0 = 5\text{см}^3, 10\text{см}^3, \dots$).

τ_1 - время от момента подачи тока на пиропатрон до начала подъема давления в замкнутом объеме;

τ_2 - время от начала подъема давления до момента достижения P_{max} : $\tau_1 = 0,6\text{мсек}$;

$\tau_1 + \tau_2 \leq 3\text{мсек}$

R - сопротивление мостиков цепи $R = 0,6 - 1,2\text{ Ом}$;

T_c - температура горения смеси $T_c = 2500^\circ\text{K}$;

T_0 - температура воспламенения $T_0 = 178^\circ\text{K}$.

При силе тока больше 1,5А на мостиках имеет место зона гарантированного срабатывания пиропатрона.

На основе экспериментальных исследований параметров срабатывания пиропатронов установлено:

1. Максимальное давление, развиваемое пиропатроном, практически не зависит (т.е. находится в пределах погрешности измерений) от величины подаваемого тока (0,8-10А) и температуры окружающей среды ($\pm 50^\circ\text{C}$).

2. Изменение температуры окружающей среды от $+50^\circ\text{C}$ до -50° увеличивает время срабатывания пиропатрона на 8-10%.

3. Время нарастания давления в бомбочке до максимального не зависит от величины подаваемого на пиропатрон тока и температуры окружающей среды.

4. Взаимное воспламенение двух пиропатронов возможно благодаря соосной их установке друг относительно друга на расстоянии не более 10 мм.

Для наиболее удобного и правильного выбора типа и количества пиропатронов при проектировании систем отделения, для каждого типа пиропатрона набирают статистику по величинам развиваемого ими давления в разных по объёму бомбочках и строят график зависимости величины от объёма исследуемых бомбочек (рис.5).

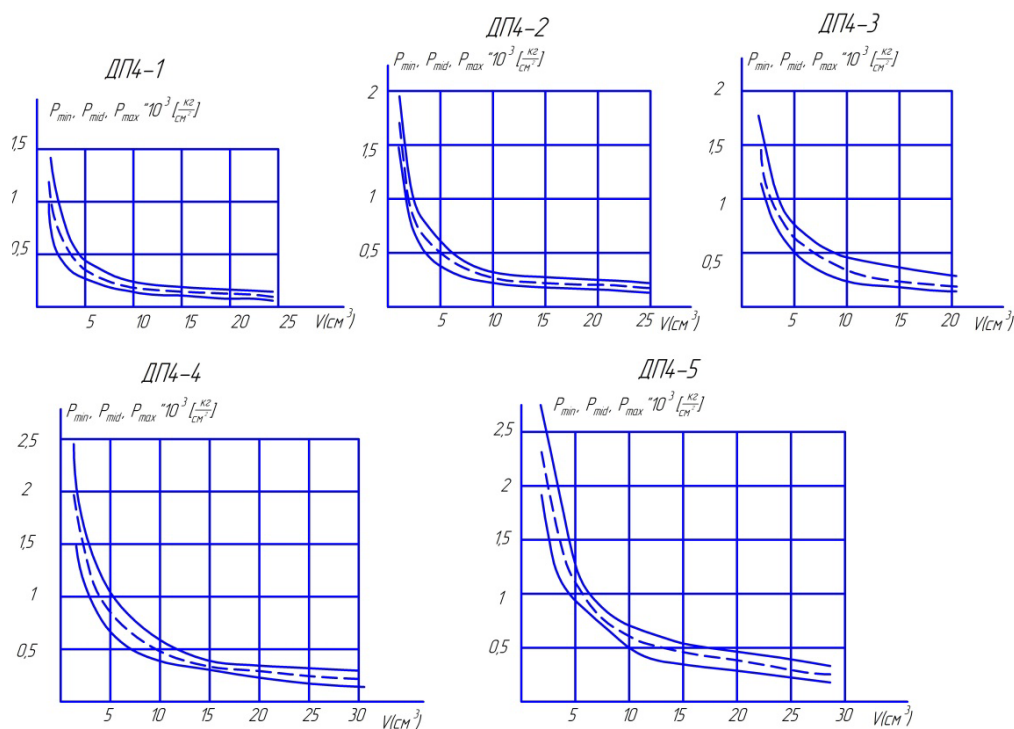


Рис.5. Величина развиваемого пиропатронами давления, в зависимости от стандартного объема, для разных пиропатронов

3. Общая задача проектирования пиротехнических систем.

При проектировании пиротехнических систем приходится решать следующие проблемы:

1. Выбор оптимального энергодатчика системы, т.е. определить тип и найти количество пиропатронов.
2. Выбор оптимальных коммуникаций для подвода энергии к исполнительному органу (пирозамку).
3. Определение давления, создаваемого датчиком в предпоршневом объёме исполнительного органа, до начала рабочего периода системы.

4. Определение закона изменения давления в процессе рабочего периода исполнительного органа

5. Определение кинематических параметров отделяемой массы.

Как показали экспериментальные исследования, общую задачу расчета пиротехнических систем КА, так как их работа практически протекает в два периода, можно разделить на две части:

1. период заполнения газом системы постоянного объёма;
2. рабочий период, связанный с движением поршня, т.е. сообщением кинетической энергии отделяемой массе.

Подобное деление не вносит существенных погрешностей, но позволяет значительно облегчить решение общей задачи.

Первая часть задачи сводится к определению давления в системе отделения к моменту начала рабочего периода.

В связи с тем, что в системах отделения КА отношение массы зарядов пиропатронов (граммы) к отделяемой массе (килограммы и тонны) крайне мало, поэтому с большой достоверностью можно считать, что до момента конца горения снаряжения пиропатрона поршень исполнительного органа не успевает тронуться с места. Что позволяет считать процесс до начала рабочего периода мгновенно-стационарным, т.е. система в данное мгновение не изменяет своего объёма. Поэтому данные по давлению (см. рис. 5), полученные при срабатывании пиропатронов в бомбочках (стандартных объёмах), можно с большой степенью точности использовать для определения начального давления в конкретной пиросистеме.

$$P_0 = \frac{P_\delta \cdot W_\delta}{W_{\text{сист.}}},$$

где P_0 - давление в системе до начала рабочего хода;

P_δ - давление, развиваемое пиропатроном в стандартном объёме W_δ ;

$W_{\text{сист.}}$ - объём системы отделения до начала рабочего периода.

В общем случае уравнения движения отделяемой массы m_1 , толкаемой пиросистемой массой m_2 , закреплённой на упругом основании с жёсткостью k , имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{x} &= P(x) \cdot S - Q \\ m_2 \cdot \ddot{y} &= F_{\text{с.о.}}(y) - k \cdot y, \end{aligned} \quad (1)$$

где x - перемещение отделяемой массы, толкаемой поршнем с площадью поперечного сечения S ;

$P(x)$ - изменение давления системы в период рабочего хода поршня;

Q - сила сопротивления движению отделяемой массы;

y - перемещение системы отделения под действием силы отдачи $F_{c.o.}(y)$;

k - жёсткость элемента конструкции КА, на котором установлен исполнительный орган систем.

Решение уравнений (1) осуществляется либо с помощью газовой динамики, либо методами классической внутренней баллистики ствольных систем, что находит применение для пиротолкателей, установленных на податливых основаниях и имеющих большой рабочий ход, как, например, пиротолкатель, представленный на рис. 6.

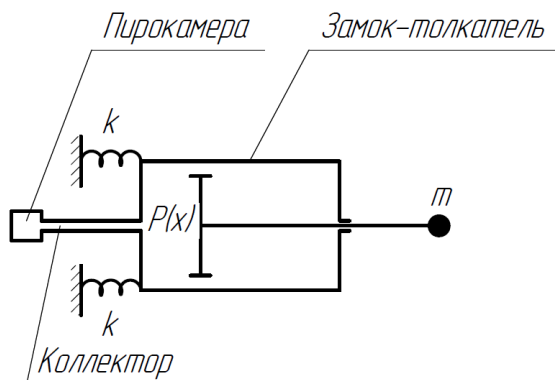


Рис. 6. Схема работы системы отделения

В случае установки системы отделения на элементы конструкции большой жёсткости, позволяющие иметь небольшие потери на энергию деформации от силы отдачи, вторым уравнением, как правило, пренебрегают.

Решая уравнения движения (1), находят основные кинематические параметры системы, которые определяют её эффективность.

4. Приближённый метод расчёта кинематических параметров систем отделения.

Известно, что основным кинематическим параметром любой системы отделения, применяемой на КА, является скорость отделения массы, поэтому в практике для её нахождения часто используют уравнение баланса кинетической энергии отделяемой массы и энергии пороховых газов в рабочий период.

$$\frac{m \cdot V^2}{2} + \frac{J \cdot w^2}{2} = S \cdot \int_0^{l_i} P(x) dx, \quad (2)$$

где m - отделяемая масса со скоростью V ;

$\frac{J \cdot \omega^2}{2} = 0$, как правило, при осесимметричном расположении исполнительных органов

относительно центра масс отделяемой системы;

$P(x)$ - изменение давления в процессе рабочего хода длиной l_i , поршня площадью S .

Методику расчета можно представить в следующем виде:

Давление в системе на момент начала рабочего периода ищется исходя из полного начального объема системы, используя данные технических условий на пиропатроны.

$$P_0 = (0,8 - 1,2) \cdot x \cdot \frac{n \cdot P_\delta \cdot W_\delta}{W_0},$$

где коэффициент 0,8 используется при оценке функционирования, а 1,2 – при оценке прочности системы;

n - число пиропатронов, используемых в системе;

P_δ - давление, развиваемое пиропатроном данного типа в стандартном объёме;

W_δ - объём бомбочки;

W_0 - полный начальный объём системы на момент начала рабочего периода.

Характер изменения давления в рабочий период, как показал обширный экспериментальный материал, в отличие от изотермического и политропического, принимается адиабатическим с показателем $k=1,25$.

$$P(x) = P_0 \cdot \left(\frac{W_{np.}}{W_0 + S \cdot x} \right)^{k=1,25}. \quad (3)$$

Причём, процесс расширения осуществляется исходя из только предпорпшевого начального объёма исполнительного органа с учётом объёма, необходимого для раскрытия замка, т.е. объём пирокамер и подводящих коммуникаций здесь не учитывается. Если в системе коммуникации отсутствуют, то объём берётся от среза пиропатрона плюс объём, необходимый для раскрытия замка.

Введя подстановку $C = \frac{S}{W_{np}}$, выражение для давления в рабочий период (3) примет вид:

$$P(x) = \frac{P_0}{(1 + C \cdot x)^k}.$$

Решая уравнение энергетического баланса (2), получим выражение для скорости отделяемой массы:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_0 \cdot S}{C \cdot (k-1) \cdot m} \cdot \left[1 - \frac{1}{(1 + C \cdot l_p)^{k-1}} \right]}. \quad (4)$$

При проектировании пиротехнических систем отделения исходными данными, как правило, являются:

- отделяемая масса;
- минимальная потребная скорость отделения;
- длина рабочего периода;
- площадь поршня и предварительный объём системы определяются предварительной компоновкой система на КА.

Тогда из выражения для скорости (4) находится потребное P_0 и далее из графиков зависимости давления от объёмов для каждого типа пиропатронов (см. рис. 5) находится потребное количество пиропатронов. Затем окончательное решение задачи осуществляется методом итераций. Причём при экспериментальной отработке на функционирование используются минимальные номера данного типа пиропатрона (оценка минимального порога функционирования). При отработке прочности - используются максимальные номера данного типа пиропатрона. При номиналах набирается статистика кинематических параметров, поэтому при выборе номера данного типа пиропатронов предпочтение из пяти разработанных отдаётся трём: ДПЧ-2; ДПЧ-3; ДПЧ-4.

Полученные в ходе эксперимента результаты отличаются от расчётных приблизительно на 1%, что говорит о состоятельности данной методики.

Список литературы

1. Колесников К.С., Кокушкин В.В., Борзых С.В., Панкова Н.В. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 376 с.:ил.
2. Климов Ю.М., Самойлов Е.А., Зезин Н.Л. Детали механизмов авиационной и космической техники: учебное пособие / под ред. Ю.М. Климова, Е.А. Самойлова. М.: Изд-во МАИ, 1996. 344с.: ил.
3. Гусаров А.С., Никитенко В.И., Портнов М.И. Бортовые системы летательного аппарата: учебное пособие по курсу «Основы спецтехники». М: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1988, 22 с.