

УДК 629.196.3

Ж. В. Кабакова, С. А. Куда, канд. техн. наук А. И. Логвиненко, В. А. Хомяк

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПНЕВМОСИСТЕМЫ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ГОЛОВНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Обобщен опыт проектирования и экспериментальной отработки пневмосистемы для отделения и сброса створок головного аэродинамического обтекателя. Приведен алгоритм расчета ее параметров. Показана удовлетворительная сходимость результатов расчета параметров пневмосистемы с экспериментальными данными наземных и летных испытаний.

Узагальнено досвід проектування й експериментального відпрацювання пневмосистеми для відокремлення та скидання створок головного аеродинамічного обтічника. Наведено алгоритм розрахунку її параметрів. Показано задовільну збіжність результатів розрахунку параметрів пневмосистеми з експериментальними даними наземних і льотних випробувань.

The paper presents the generalized experience of designing and development testing of the pneumatic system for nose aerodynamic fairing halves jettisoning. The algorithm of its parameters calculation is given. The satisfactory convergence of the pneumatic system parameters calculation results with the experimental data from the ground and flight tests is shown.

На ракетах-носителях для обеспечения и сохранения работоспособности КА или других объектов космического назначения при прохождении ими плотных слоев атмосферы (когда скорость полета соответствует числу Маха  $\geq 1$  и достигается максимальный аэродинамический нагрев) принято устанавливать головной обтекатель (ГО). После выполнения своей миссии с целью повышения энергетика без ущерба надежности РН в целом ГО отделяется. Обычно это происходит при полете II ступени перед отделением полезного груза.

Несмотря на кратковременность процесса отделения (0,3-1,5 с в зависимости от характеристик КА, параметров траектории и конструктивных особенностей РН), система отделения ГО – весьма важная и ответственная, динамичная и технически сложная. В ее состав наряду со многими механическими замками (фиксаторами) и пирозементами входит пневмосистема отделения и сброса створок ГО (с последующим разворотом), получившая в настоящее время широкое применение (например, на РН «Зенит», «Циклон-4» и др.).

При создании этих систем предъявляются следующие требования:

- обеспечение требуемого начального усилия для отделения (за заданное минимальное время);
- создание требуемого импульса для обеспечения необходимой скорости;
- обеспечение минимальных возмущений при срабатывании.

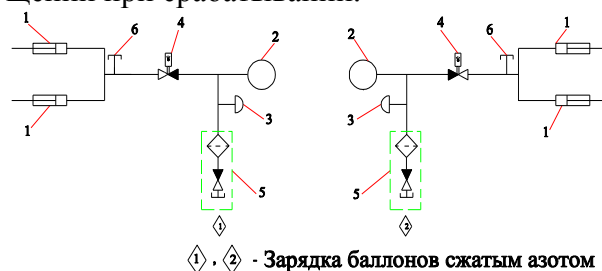


Рис. 1. Пневматическая принципиальная схема системы сброса обтекателя:

1 – пневмотолкатели; 2 – баллоны; 3 – сигнализаторы давления; 4 – пироклапаны; 5 – зарядные клапаны; 6 – проверочные штуцеры

Пневмосистема сброса ГО (рис. 1) состоит из двух автономных линий, пневмотолкателей 1, баллонов 2, сигнализаторов давления 3, пироклапанов 4, зарядных клапанов 5, трубопроводов и элементов их крепления.

Для обеспечения одинакового давления в баллонах зарядка баллонов азотом проводится на технической позиции через заряд-

ные клапаны 5, закольцованные между собой с помощью специальных отжимных приспособлений. Контроль давления при зарядке осуществляется по манометру в наземной части, а перед пуском – по сигнализаторам давления 3. Сброс давления из баллонов в случае необходимости проводится через клапаны 5.

Работа системы происходит в следующей последовательности.

По команде от системы управления в полете срабатывают пироклапаны 4, которые соединяют баллоны 2 с пневмоторкательями 1. Газ высокого давления поступает в полость пневмоторкательей и, воздействуя на поршни, приводит в движение их и связанные с ними штоки, которые, перемещаясь, создают необходимые усилия для отделения створок ГО.

Ниже приведены основные характеристики пневмосистемы сброса створок ГО РН «Циклон-4»:

- рабочее тело – азот;
- объем баллона –  $1,85 \text{ дм}^3$ ;
- количество баллонов – 2;
- расчетное давление зарядки баллонов  $150 \pm 4 \text{ кгс/см}^2$  при температуре  $22^\circ\text{C}$ ;
- тип сигнализатора давления ТУ-3СД-68;
- давление настройки сигнализаторов  $134 \pm 6 \text{ кгс/см}^2$ ;
- давление в баллоне на момент срабатывания пироклапана:
  - расчетное  $150 \pm 15 \text{ кгс/см}^2$ ;
  - допустимое  $150_{-22}^{+15} \text{ кгс/см}^2$ ;
- температура газа в баллонах на момент отделения обтекателя  $15 \dots 40^\circ\text{C}$ ;
- диаметр поршня толкателя  $50 + 0,16 \text{ мм}$ ;
- ход поршня толкателя  $350 \text{ мм}$ ;
- коэффициент сопротивления пироклапана ( $d_y = 10 \text{ мм}$ )  $\leq 3,5$ ;
- диаметры магистралей:
  - баллон-пироклапан –  $10 \text{ мм}$ ;
  - пироклапан-тройник –  $10 \text{ мм}$ ;
  - тройник-толкатель –  $6 \text{ мм}$ ;
  - зарядный трубопровод –  $4 \text{ мм}$ ;

- масса элементов конструкции пневмосистемы  $27 \text{ кг}$ ;
- масса газа в пневмосистеме  $0,620 \text{ кг}$ ;
- выход пневмосистемы на режим (после срабатывания пироклапана)  $\leq 0,15 \text{ с}$ ;
- максимальная разнотяговость пар пневмоторкательей (разность усилий на поршнях) при работе пневмосистемы составляет не более  $10\%$ . При оценке этого значения учитывали все факторы: разбросы площади поршня, углы установки, силы трения, разность давлений, действующих на поршни пневмоторкательей;
- в зависимости от конфигурации ГО время движения поршня пневмоторкателя может составить от  $0,36$  до  $0,72 \text{ с}$ .

На рис. 2 приведена зависимость давления в баллонах пневмосистемы от температуры азота, настройки сигнализаторов давления.

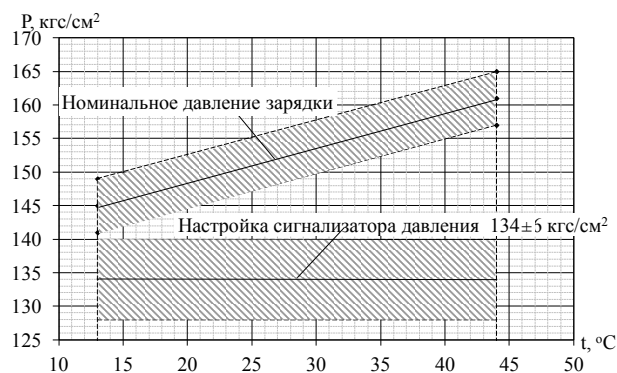


Рис. 2. Давление в баллонах пневмосистемы сброса ГО в зависимости от температуры азота

Алгоритм расчета пневмосистемы:

- определение параметров газа в баллоне при его опорожнении;
- расчет давления и усилия в пневмоторкателье при заданном ходе его поршня, закон изменения которого по времени получается по предварительным динамическим расчетам.

Рассмотрены некоторые методические особенности [1].

Изменение давления газа в баллоне при опорожнении определяется выражением

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{(k-1)}{V} \left[ EQ_w - \frac{kGR}{k-1} \right],$$

где тепловой поток от конструкции баллона к газу рассчитывается по уравнению

$$Q_w = F_w \alpha_w (T_w - T) = \frac{Nu_w \lambda_w F_w}{d_w} (T_w - T),$$

где  $Nu_w = 0,1(GrPr)^{0,315}$ .

Пренебрегая из-за быстроты протекания процессов растеканием тепла по поверхности и его поглощением конструкцией баллона (т. е.  $T_w \approx T_{wn}$ ), из уравнения теплового баланса для стенки емкости получаем выражение для определения ее средней температуры

$$\frac{dT_w}{d\tau} = \frac{Q_{wn} - Q_w}{C_w G_w}.$$

Уравнение теплообмена с окружающей средой поверхности баллона можно представить в виде

$$Q_{wn} = \frac{Nu_n \lambda_n F_{wn} (T_n - T_w)}{d_{wn}}.$$

Для определения  $Nu_n$  обычно используют зависимости для свободной конвекции типа

$$Nu_n = 0,135(GrPr)^{0,33}.$$

Температура газа в баллоне определяется по формуле

$$T = \frac{P}{\gamma R}.$$

Производная удельного веса газа в баллоне находится по зависимости

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = -\frac{1}{V} \frac{dG}{d\tau}.$$

Расход газа из баллона  $G$ , рассчитываемый в предположении, что из-за кратковременности процесса теплообмен в газовой магистрали отсутствует и его температура  $T$  по длине магистрали не изменяется,

определяется как

$$G = \frac{Pf_{np}mq(\lambda)}{\sqrt{RT \left[ 1 + \frac{m^2}{g} \cdot q^2(\lambda)\xi \right]}}.$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

- $E$  – тепловой эквивалент энергии;
- $Q_w, Q_{wn}$  – тепловые потоки от конструкции баллона к газу и окружающей среде;
- $Nu, Gr, Pr$  – числа подобия Нуссельта, Грасгофа и Прандтля соответственно;
- $V$  – объем баллона;
- $\lambda_i, \alpha$  – коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи соответственно;
- $g$  – ускорение земного тяготения;
- $R$  – газовая постоянная азота;
- $f_{np} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{np}^2$  – площадь приведенного проходного сечения магистрали;
- $m = \sqrt{kg \left( \frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$  – газодинамический комплекс, для азота  $m = 2,14 \frac{\sqrt{M}}{c}$ ;
- $q(\lambda)$  – газодинамическая функция, зависящая от показателя адиабаты газа  $k$  и относительной скорости  $\lambda$ ;
- $\xi$  – коэффициент сопротивления газовой магистрали от баллона до пневмотолкателя. Для разработанной конструкции системы принимается  $\xi = 16$ .

Расчет изменения давления в пневмотолкателе проводится по уравнению, полученному в предположении, что из-за кратковременности происходящий процесс соответствует изотермическому:

$$P_n = \frac{P_i V_i + 0,5RT \int_0^\tau G dt}{V_i + S_n L(\tau)},$$

где  $P_i$  – давление в пневмотолкателе;  
 $V_i = V_0 + V_{mp}$  – объем газа в пневмотолкателе;  
 $S_n, L(\tau)$  – площадь и текущий ход поршня пневмотолкателя.

В этой формуле коэффициент 0,5 принят исходя из того, что газ от одного баллона подводится к двум одинаковым толкателям.

Усилие, развиваемое на поршне пневмотолкателя,

$$F = k_m P_n S_n,$$

где  $k_m = 0,8 \dots 0,9$  – коэффициент учета степени совершенства конструкции толкателя, определяемый по результатам экспериментальной обработки.

В табл. 1 приведены основные расчетные параметры пневмосистемы отделения ГО для различных случаев начальных давлений в баллонах.

Таблица 1

$\tau, c$	$L, cm$	$F, кг$		$\tau, c$	$L, cm$	$F, кг$	
		$P_{min}=135$ кгс/см <sup>2</sup>	$P_{max}=165$ кгс/см <sup>2</sup>			$P_{min}=135$ кгс/см <sup>2</sup>	$P_{max}=165$ кгс/см <sup>2</sup>
0,000	0,00	19	20	0,000	0,00	19	20
0,050	0,00	485	620	0,050	0,11	481	614
0,100	0,00	918	1177	0,100	0,91	850	1090
0,150	0,01	1294	1660	0,150	3,01	1032	1324
0,200	0,20	1562	2006	0,200	6,93	1029	1321
0,250	0,74	1689	2171	0,250	13,00	926	1190
0,300	1,75	1699	2183	0,300	21,37	800	1028
0,350	3,29	1636	2103	0,350	32,08	683	878
0,400	5,40	1536	1975	0,362	35,00	662	851
0,450	8,09	1424	1831	–	–	–	–
0,500	11,39	1312	1687	–	–	–	–
0,550	15,35	1203	1546	–	–	–	–
0,600	20,00	1100	1414	–	–	–	–
0,650	25,41	1004	1290	–	–	–	–
0,700	31,64	915	1176	–	–	–	–
0,724	35,00	872	1120	–	–	–	–

Примечание.  $\tau$  – текущее время работы пневмосистемы;  $L$  – ход поршня по времени;  $F$  – усилия, действующие на поршень, рассчитанные для двух предельных случаев начальных давлений в баллонах  $P_{max}$  и  $P_{min}$ .

Ноль отсчета времени соответствует моменту срабатывания пироклапана, принятому  $\leq 0,1$  с (от момента подачи команды).

Для проведения прочностных расчетов изменение максимального давления в пневмотолкателе при перемещении  $L$  поршня приведено в табл. 2.

Из-за нестационарных и динамичных процессов при сбросе створок ГО и трудностей их комплексного учета в проектно-конструкторской практике ракетно-космической отрасли встречались случаи аварийных пусков РН, связанные с нештатным отделением ГО. Например, по причине ошибочного учета распределения действующих усилий (вместо «толчка» обшивка створок была повреждена поршнем пневмотолкателя) ГО не отделился. При срабатывании пироэлементов ГО были разрушены кабели энергопитания приборов системы управления. Кроме того, недавний аварийный пуск корейской РН KSLV-1 был обусловлен нештатным отделением ГО.

При разработке РН различного класса обязательно предусмотрено проведение так называемых наземных функциональных испытаний (ФИ). Их смысл состоит в проверке работы системы в целом в условиях, максимально близких к натурному исполнению.

Для примера в табл. 2 приведены экспериментальные данные по результатам двух наземных испытаний [2].

Время выхода толкателей на режим составляет 0,065 – 0,075 с.

Таблица 2

Графики рис. 3–4 наглядно демонстрируют изменение основных характеристик системы отделения ГО по результатам обработки функциональных испытаний.

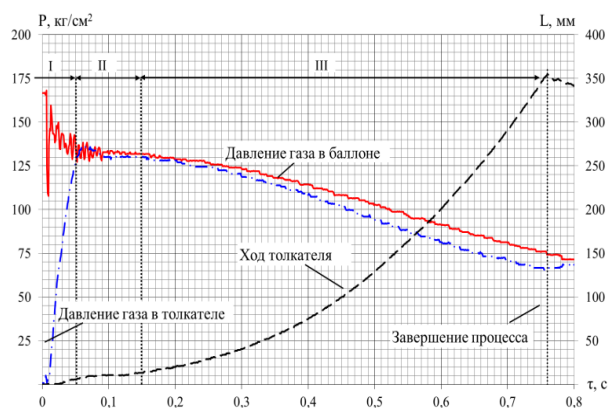


Рис. 3. Экспериментальные данные пневмосистемы сброса створок ГО

Как видно из рис. 3, процесс изменения давления в баллонах и пневмотолкателях можно условно разделить на три стадии.

Первая, когда происходит процесс заполнения свободных полостей магистралей и пневмотолкателей (после срабатывания пироклапана), и он соответствует критическому режиму истечения газов. Давление в баллонах падает с исходного  $165 \pm 2$  до  $125 - 135$  кг/см<sup>2</sup>, а в пневмотолкателях растет с начального атмосферного до указанных выше значений. Движения цилиндра толкателя практически нет. Таким образом, это подготовительный этап приведения пневмотолкателя в исходное рабочее положение.

Третья стадия является заключительной. Шток толкателя движется равноускоренно, проходя весь свой рабочий ход, равный 350 мм. Соответственно и давления в баллонах и пневмотолкателях постепенно уменьшаются. На второй и третьей стадиях перетекание газа происходит в докритическом режиме. Этот этап характеризуется полным динамическим раскрытием створок обтекателя и завершением процесса.

$\tau$ , с	$L$ , см	$P$ , кг/см <sup>2</sup>		$F$ , кг
		в баллоне	в толкателе	
0,000	0	166,7	1,05	16,67
0,050	0,6	136,5	121,7	2027,95
0,100	1,04	131,7	129,7	2248,42
0,150	1,29	131,7	130,6	2215,63
0,200	1,94	128,6	128,5	2165,4
0,250	2,89	126,7	123,8	2088,9
0,300	4,15	123,2	119,6	2024,3
0,350	5,1	118,2	113,7	1941,01
0,400	5,1	114,4	106,9	1823,7
0,450	9,47	108,2	100,2	1714
0,500	12,16	102,7	94,2	1592,9
0,550	15,58	96,7	86,4	1465,1
0,600	19,51	91,5	80,4	1360,2
0,650	24,15	85,3	74,5	1259,3
0,700	28,82	81,1	68,5	1169,8
0,750	35,0	75,8	63,5	1124,2

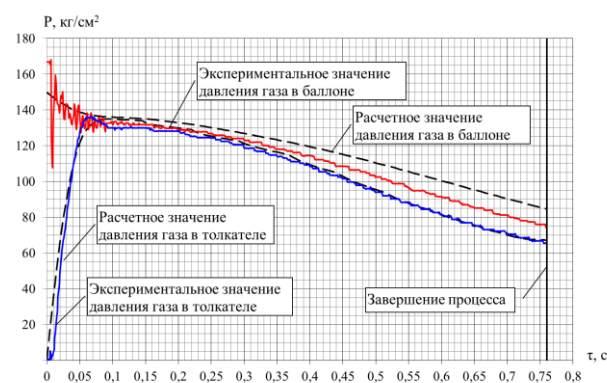


Рис. 4. Изменение давления в баллоне и толкателях пневмосистемы сброса створок ГО

Таким образом, для проектной разработки, анализа и прогнозирования поведения параметров пневмосистемы сброса створок ГО разработан достаточно точный и удобный метод оценки и расчета ее параметров, применение которого способствует обеспечению оптимальных параметров, сокращает время и материальные затраты при создании подобных систем.

### Список использованной литературы

1. Основы расчета параметров газа при работе пневмосистем: Метод. пособие ГКБЮ. – 21.7217.123 ОТ. – 1988.
2. КРК «Циклон-4». Анализ экспериментальных данных по пневмосистеме сброса створок ГО: Техн. отчет / ГП «КБ «Южное». – Циклон-4 21.17689.213 ОТ. – 2014.

Статья поступила 17.07.2017