

УДК 621.454.3

Канд. техн. наук В.В. Оглих, В.А. Вахромов, А.С. Кириченко, М.Г. Косенко

РАЗРАБОТКА ПОРОХОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНОМЕТНОГО СТАРТА РАКЕТ – ВАЖНЕЙШЕЕ УСЛОВИЕ ЕГО УСПЕШНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Рассмотрены основные проектно-конструкторские решения, которые были приняты при разработке пороховых аккумуляторов давления с высокопрогрессивной расходной характеристикой, благодаря чему стал возможным минометный старт ракет.

Розглянуто основні проектно-конструкторські рішення, які було прийнято під час розроблення порохових акумуляторів тиску з високопрогресивною витратною характеристикою, завдяки чому став можливим мінометний старт ракет.

The basic design solutions are considered that were adopted in developing the powder pressure accumulators with highly-progressive flow characteristic due to which the pop-up rocket launch became possible.

В 1960-х гг. на ГП «КБ «Южное» (в то время ОКБ-586) впервые в мировой практике ракетостроения зародилась идея минометного старта ракет из транспортно-пускового контейнера (ТПК) с помощью порохового аккумулятора давления (ПАД). Дальнейшая разработка этой идеи позволила значительно улучшить характеристики ракет и всей системы старта как из шахтной стационарной, так и из подвижной пусковых установок.

Для создания минометного старта потребовались специальные ПАДы с высокопрогрессивным законом изменения расхода по времени $\dot{G}(t)$. ПАДы создают в подракетном объеме ТПК давление газов, обеспечивающее страгивание, разгон и выход ракеты из ТПК. После сбрасывания поперечных опор, отделения и увода поддона, защищающего ракету от воздействия пороховых газов, включается маршевый двигатель – и ракета уходит в управляемый полет. При этом важно, чтобы скорость ракеты и ее расстояние от среза контейнера перед запуском маршевого двигателя были не менее определенных значений, которые гарантируют своевременное выполнение вышеуказанных действий и безопасность стартовой позиции.

Такие условия реализуются в том случае, если давление пороховых газов в подракетном объеме контейнера не опускается ниже определенного значения (желательно, постоянного по времени) и в то же время не

превышает допустимого максимума для его прочности. Для выполнения указанных условий необходимо, чтобы расходная кривая $\dot{G}(t)$ ПАДа имела высокопрогрессивный характер и находилась внутри промежутка, ограниченного двумя предельными кривыми (рис. 1), имеющими вид экспоненты.

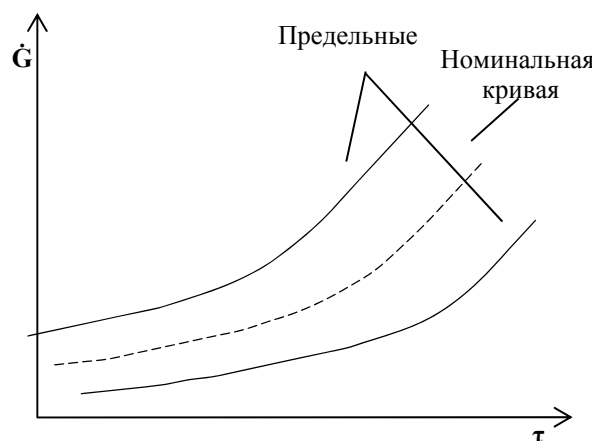


Рис. 1. Расходные кривые

Верхняя кривая соответствует условиям прочности контейнера, а нижняя обеспечивает достижение ракетой требуемой скорости и высоты подъема. Расчеты процесса движения ракеты в контейнере показывают, что расход ПАДа за 1-2 с должен увеличиться в 50-100 раз.

Однокамерный ПАД с такой прогрессивностью при начальном давлении в камере на уровне 10-12 кгс/см² (минимальный уровень устойчивого горения) в конце ра-

боты может иметь давление примерно 500-1000 кгс/см², а с учетом разбросов скорости горения – еще выше. Давление свыше 400 кгс/см² – это область неопределенных и неотработанных вопросов как по твердому топливу, так и по корпусу ПАДа, что делает нерациональной или невозможной разработку однокамерного ПАДа с такой прогрессивностью расхода.

На ГП «КБ «Южное» было найдено оригинальное решение: создана конструкция многоступенчатого ПАДа, состоящего из цепочки ПАДов, в которой каждый последующий ПАД срабатывает после того, как закончит работу предыдущий. В результате высокопрогрессивная расходная характеристика обеспечивается последовательным срабатыванием нескольких (двух-трех) ПАДов, имеющих существенно более низкую прогрессивность расхода (не более 10). Запуск каждого последующего ПАДа обеспечивается автоматически с помощью сигнализатора давления, устанавливаемого на ПАД предыдущей ступени.

Рассмотрим кратко технологический процесс проектирования стартовых ПАДов и основные принципиально новые проектно-конструкторские решения, которые использовались при их разработке на ГП «КБ «Южное», а также некоторые особенности их экспериментальной отработки, которые дали положительный результат и могут быть применены при создании аналогичных изделий. Необходимо отметить, что поскольку стартовый ПАД непосредственно в состав ракеты не входит и не участвует в полете, к нему не предъявляются жесткие ограничения по массе. Поэтому при его проектировании и экспериментальной отработке была поставлена задача достижения повышенного по сравнению с другими узлами ракеты запаса работоспособности и высокого уровня надежности, гарантирующих безопасный и успешный пуск ракеты из ТПК, несмотря на некоторое увеличение массы. Летные испытания ракет 3-го и 4-го поколений и их последующая эксплуатация показали, что реализация такого подхода была оправдана, так как позволила не только обеспечить заданные гарантийные сроки

эксплуатации, но и значительно их продлить.

Выбор твердого топлива и формы заряда

Основное требование к стартовому ПАДу – это выполнение расходной характеристики, которая не должна выходить за установленные в техническом задании предельные кривые при всех возможных разбросах скорости горения, энергетических характеристик топлива, его плотности, геометрических параметров заряда и площади критического сечения сопла. С этой точки зрения предпочтение следует отдавать смешевым топливам, у которых указанные разбросы меньше, чем у баллиститных составов, хотя в отдельных случаях могут использоваться и баллиститы, если температурный диапазон применения заряда не слишком широк, а заданные пределы по расходу при этом выполняются.

Заряд должен быть вкладной. Он более простой и надежный в отработке, чем прочноскрепленный, а масса не учитывается, поскольку масса корпуса в 5-10 раз превышает массу топлива. Кроме того, вкладные заряды обеспечивают более длительные сроки эксплуатации (примерно в два раза по опыту ГП «КБ «Южное»), чем прочноскрепленные.

Для стартовых ПАДов, разработанных на ГП «КБ «Южное», была выбрана простая легко изменяемая при отработке форма заряда в виде цилиндрического многоканального моноблока (рис. 2), в различных вариантах частично или полностью бронированного по наружной поверхности, за исключением каналов. В дальнейшем она стала типовой для реализации высокопрогрессивных расходных характеристик.

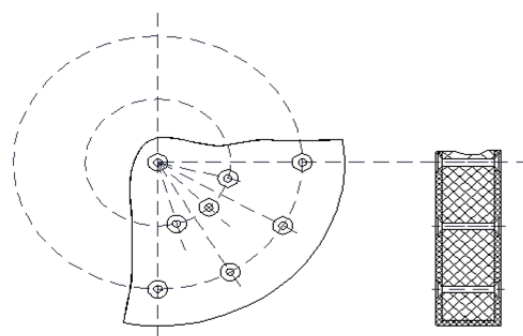


Рис. 2. Заряд для ПАДа

Эта форма позволяет, изменяя число и расположение каналов, а также вводя или устраняя бронирующее покрытие на наружной цилиндрической поверхности, подбирать необходимый закон изменения поверхности горения. Причем топливо для заряда должно использоваться с «жесткими» физико-механическими характеристиками. Опыт применения «мягкого» топлива для зарядов стартовых ПАДов дал отрицательный результат и показал, что оно не пригодно для указанной формы заряда и внутрикамерных условий ПАДов. Скорость горения твердого топлива для стартового ПАДа должна быть достаточно высокой – на уровне 15-19 мм/с при стандартных условиях (при давлении в камере $P_k=40$ кгс/см² и температуре $T=20^\circ\text{C}$). При этом показатель степени ν в законе скорости горения должен быть в пределах 0,3-0,5. Эти требования обусловлены стремлением получить высокую прогрессивность расходной характеристики при безэрозийном горении в каналах заряда.

Содержание алюминия в смесевом твердом топливе должно быть не менее 3%, поскольку образующаяся в процессе горения конденсированная окись алюминия Al_2O_3 стабилизирует процесс горения и гасит (демпфирует) колебательный вибрационный процесс, реализующийся в случае отсутствия конденсированных частиц. Как показали эксперименты, в случае отсутствия в топливе алюминия расходная кривая искажается вследствие развития колебательного процесса и не соответствует расчетной. Повышение температуры продуктов сгорания топлива из-за введения в его состав 3% алюминия существенного влияния на работоспособность всей системы старта не оказывает.

Бронирующее покрытие на торцах заряда вокруг отверстий каналов примерно до 2-3 диаметров канала должно иметь переменную толщину от 0 до номинального значения. Благодаря этому при горении заряда реализуется постепенный разгар бронирующего покрытия на выходе из каналов, уменьшается перепад давления продуктов сгорания на бронировке и исключается

ее отрыв от заряда, приводящий к искажению расчетной расходной кривой.

Расчет внутрибаллистических характеристик ПАДа

В связи с тем, что давление в камере сгорания ПАДа динамично и прогрессивно изменяется в широких пределах от 10 до 400 кг/см², упрощенный внутрибаллистический расчет на основе уравнения Бори, который часто проводится при проектировании как малогабаритных, так и крупногабаритных РДТТ, в данном случае будет давать значительную погрешность. Поэтому для расчета кривой $p(\tau)$ стартового ПАДа должна использоваться более точная система уравнений, учитывающая процессы прихода и расхода массы, а также освобождение объема, связанные с горением и истечением продуктов сгорания:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k}{V} \left(SpuRT - AF_{кр}RTp - \frac{p}{k} \frac{dV}{dt} \right);$$

$$u = \frac{de}{dt}; \quad S = f(e); \quad \frac{dV}{dt} = Su;$$

$$\dot{G}(\tau) = ApF_{кр}; \quad u = u_1 p^\nu,$$

- где p – давление в камере сгорания;
 S – поверхность горения;
 $f(e)$ – зависимость поверхности горения от свода e ;
 u – скорость горения топлива;
 u_1 – коэффициент;
 ν – показатель степени в зависимости скорости горения от давления;
 ρ – плотность топлива;
 \dot{G} – массовый секундный расход;
 R, T – газовая постоянная и температура продуктов сгорания;
 A – коэффициент истечения;
 k – показатель адиабаты газа;
 V – свободный от топлива объем камеры сгорания;
 τ – время;
 $F_{кр}$ – площадь критического сечения сопла.

Данная система уравнений также является упрощенной, поскольку в ней отсутствует уравнение энергии, а температура газа в камере сгорания считается постоянной. Однако в данном случае она достаточно точно описывает процесс горения, так как результаты расчета по ней хорошо совпадают с экспериментальными данными. Полученная в результате расчета номинальная кривая $\dot{G}(r)$ пересчитывается по методике Р.Е. Соркина* в предельные кривые – максимальную и минимальную, которые уже сравниваются с заданными в техническом задании. В случае их несоответствия корректируется поверхность горения $S(e)$ путем изменения числа и места расположения каналов заряда. После того как окончательно будет определена форма заряда, приступают к разработке конструкции корпуса ПАДа.

Конструкция стартового ПАДа

Типовая конструкция стартового ПАДа приведена на рис. 3. Укрупненно в состав ПАДа входят следующие основные узлы:

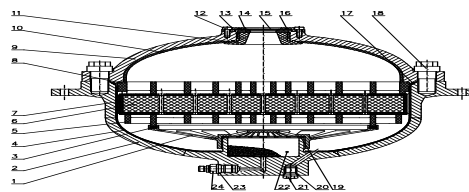
- корпус в сборе, состоящий из собственно корпуса 2 и крышки 9;
- заряд твердого топлива 6;
- система воспламенения, состоящая из воспламенителя 22, электровоспламенителя 24 и рассекателя 1, совмещенного с опорой заряда;
- решетка 5, на которую устанавливается заряд;
- сопловая диафрагма 8, ограничивающая осевое перемещение заряда.

Решетка и диафрагма представляют собой набор колец, соединенных радиальными ребрами.

Корпус в сборе является камерой сгорания ПАДа и имеет фланец для крепления ПАДа в контейнере. В связи с тем, что давление продуктов сгорания в камере ПАДа достигает большого значения (300-400 кгс/см²), корпус и крышка выполняются из высокопрочной стали СП-28 ($\sigma_B \sim 160$ кгс/мм²).

Применение высокопрочной стали обусловлено еще и технологическими соображениями, потому что, как показали прочностные расчеты с повышенным коэффициентом безопасности 2, даже для такой стали расчетная минимальная толщина стенок корпуса и крышки может составлять до 16 мм. При штамповке и сварке такого листа пришлось преодолеть серьезные технологические трудности.

На внутреннюю поверхность корпуса и крышки с целью защиты от нагрева наносится теплозащитное покрытие на основе резины Р-864.



Заряд крепится в корпусе таким образом, чтобы в процессе его горения обеспечивался свободный выход продуктов сгорания из каналов в обе стороны и из донного объема в предсопловой.

Рис. 3. Пороховой аккумулятор давления:

- 1 – опора; 2 – корпус; 3 – компенсатор; 4, 10 – теплозащита; 5 – решетка; 6 – заряд; 7 – сухарь;
- 8 – диафрагма; 9 – крышка; 11 – входной контроль;
- 12 – винт; 13 – прижим; 14 – вкладыш; 15 – мембрана;
- 16, 17 – уплотнительное кольцо; 18 – болт;
- 19 – матрица; 20, 23 – прокладка; 21 – заглушка;
- 22 – воспламенитель; 24 – электровоспламенитель

Продольное перемещение заряда ограничивается с одной стороны решеткой, устанавливаемой на эластичный резиновый компенсатор в опоре, а с другой – диафрагмой, вклеиваемой в посадочное место крышки. Поперечное перемещение заряда ограничивается «сухарями», изготовленными из того же материала, что и ТЗП, при этом между цилиндрическими поверхностями заряда и корпуса образуется кольцевой зазор для прохода газа. Для исключе-

* Соркин Р.Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

ния перекрытия каналов в любом положении заряда кольца решетки и диафрагмы расположены между отверстиями каналов, а ребра относительно колец на расстоянии 10 мм.

Диафрагма и решетка выполнены из пресс-материала ДСВ, представляющего собой отрезки стеклонити, заполненные связующим – фенолформальдегидной смолой. Опора, на которую крепится решетка, одновременно выполняет функцию рассекателя и представляет собой усеченный корпус с боковыми окнами, выполненный литьем из углеродистой стали 35Л.

Сопловой блок имеет вкладыш в критическом сечении, выполненный из жаропрочного материала типа молибдена или вольфрама. Сопловой блок загерметизирован мембраной, выполненной из тонкого листа стали или алюминия. После срабатывания такая мембрана не наносит ущерба материальной части контейнера. Для ПАДов, которые срабатывают во втором или третьем звене цепочки, на мембрану наносится теплозащита с целью исключения преждевременного их запуска при работе первого звена.

Экспериментальная отработка

Экспериментальная отработка стартового ПАДа проводилась по схеме, обычно принятой для малогабаритных РДТТ, однако с ориентацией на завышение испытательных нагрузок от эксплуатационных факторов с целью получения максимальных запасов работоспособности. При этом она отличалась от отработки РДТТ обязательным проведением такого вида испытаний, как функциональные (бросковые). После завершения начального этапа отработки, когда безаварийная работа ПАДа гарантируется, проводятся его бросковые испытания в составе имитатора части контейнера и ракеты («короткий бросок») или имитатора полноразмерного контейнера и ракеты («длинный бросок»). Эти испытания позволяют проверить правильность задания расходной кривой $\dot{G}(r)$ в техническом задании. По результатам бросковых испытаний требования к расходной кривой ПАДа

могут быть откорректированы, вследствие чего возникает необходимость изменения конструкции заряда. Окончательное подтверждение пригодности ПАДа происходит при проведении летных испытаний ракеты.

Во время огневых испытаний ПАДа, которые проводятся при его установке в вертикальное положение, происходит такое нежелательное явление, как затекание конденсированной фазы Al_2O_3 в измерительный канал датчика давления, что приводит к искажению или полному исчезновению электрического сигнала. Для исключения данного явления отверстие измерительного канала в корпусе ПАДа должно быть закрыто от прямого попадания конденсированных частиц специальным «грибком», установка которого обеспечивает надежный и качественный замер давления в камере сгорания ПАДа.

Описанные выше проектные решения по конструкции заряда и ПАДа в целом и его экспериментальная отработка позволили разработать ПАД с высокопрогрессивной расходной характеристикой, что, в свою очередь, сделало возможным создание для двух поколений межконтинентальных стратегических ракет принципиально нового в ракетной технике вида минометного старта. При этом благодаря повышенным запасам работоспособности срок эксплуатации ПАДа стало возможным увеличить в два раза по сравнению с ранее установленными гарантийными сроками.

Статья поступила 20.12.2015