

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ И ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ПНЕВМОКЛАПАНОВ СВЕРХТЯЖЁЛОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

© 2010 В. П. Сазанов

ЗАО ВКБ РКК «Энергия»

Приведены результаты работы по обеспечению требуемых показателей надёжности функционирования при разработке и автономных испытаниях группы криогенных агрегатов окислительной системы центрального блока ракеты-носителя «Энергия».

*Ракета-носитель, пневмоклапан, пневмопривод, демпфер, надёжность функционирования, динамическое нагружение.*

Разработка и создание пневмоклапанов окислительной системы центрального блока ракеты-носителя (РН) «Энергия» представляют большой научный интерес, так как на основе теоретических разработок и новых методик расчёта на практике была решена сложная задача обеспечения высоких показателей ресурса и надёжности функционирования крупногабаритных и уникальных агрегатов пневмогидравлической системы (ПГС).

Ко всем агрегатам ПГС ракетно-космической техники предъявляются очень высокие требования по надёжности, так как последствия отказов могут быть катастрофическими. Поэтому при их создании для каждого изделия или группы изделий предусматривается разработка программы обеспечения надёжности, содержащей комплекс организационно-технических мероприятий, подлежащих последовательному выполнению на всех этапах жизненного цикла изделий (разработки, изготовления, эксплуатации).

Как показывает практика, одной из самых важных задач повышения надёжности функционирования криогенных пневмоклапанов, выполненных по принципиальной схеме с концентрической тарелью, является снижение до допустимых значений уровня динамического нагружения при срабатывании

агрегата. Причиной остроты этой проблемы являются большие расходы компонента, большие подвижные массы, высокий уровень рабочего давления в магистрали, высокая силовая характеристика пневмопривода, связанная с обеспечением жёстких требований по герметичности затвора.

Решение задачи снижения уровня динамического нагружения при срабатывании для пневмоклапанов окислительной системы центрального блока РН «Энергия» было выполнено на этапах проектирования, разработки конструкторской документации и подтверждалось испытаниями автономной отработки. На этапе проектирования были созданы более совершенные методики газодинамического расчёта, расчёта статической прочности, динамического нагружения при срабатывании, которые позволили выбрать параметры пневматической и гидравлической систем из условий обеспечения нормативных запасов по прочности и сохранения параметров работоспособности. Пример исследования процесса динамического нагружения при срабатывании топливного пневмоклапана и разработки условий его допустимого уровня приведён в [1].

Конструктивно снижение уровня динамического нагружения было выполнено установкой дроссельных шайб на входе в управляющую и выхлопную полости пневмопривода, установкой встроенных демпферов гидравлического и пневматического

действия, установкой элементов пониженной жёсткости в виде прорезных пружин.

Автономная отработка исследуемых пневмоклапанов была составлена таким образом, чтобы поэтапно довести агрегаты до требуемого уровня надёжности, и включает в себя испытания по программам конструкторско - доводочных испытаний (КДИ), чистовых испытаний (ЧИ) и испытаний на надёжность (ИН). Конструкторско-доводочные испытания подтверждают правильность выбранных конструктивных решений, соответствия технических характеристик агрегата требованиям технического задания, при этом все возможные неисправности и отказы должны быть выявлены и устранены. Чистовые испытания свидетельствуют о достаточности принятых доработок агрегата и о постоянстве технологии изготовления. В случаях, когда статистическая информация недостаточна по объёму для обеспечения требуемого уровня безотказности, дополнительно проводятся испытания на надёжность. И только после положительного завершения указанных испытаний агрегат допускается к летно-конструкторским испытаниям в составе изделия ракетно-космической техники.

В основу обеспечения надёжности для высоконадёжных агрегатов положен принцип недопустимости отказов в процессе автономных испытаний опытных образцов на гарантийный ресурс. При этом испытания ведутся в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации или заведомо более жёстких (при одновременном воздействии заданных температур, давлений, вибраций, ударных нагрузок и других внешних воздействий). В случае любого отказа или неисправности, выявленных на предварительных испытаниях, испытания останавливаются и возобновляются только после выяснения и устранения причины и разработки мероприятий по их устранению.

При этом испытания начинаются, как правило, с нулевого цикла.

Для оценки надёжности функционирования агрегатов ПГС ракетно-космической техники используется нормальное распределение времени (ресурса) безотказной работы [2], которое в теории надёжности применяется для описания отказов, вызванных износом деталей. Плотность распределения времени безотказной работы при нормальном законе распределения

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где параметры распределения  $\bar{t}$  и  $\sigma$  – среднее значение времени (ресурса) и среднее квадратическое отклонение.

Данное распределение графически представлено на рис. 1.

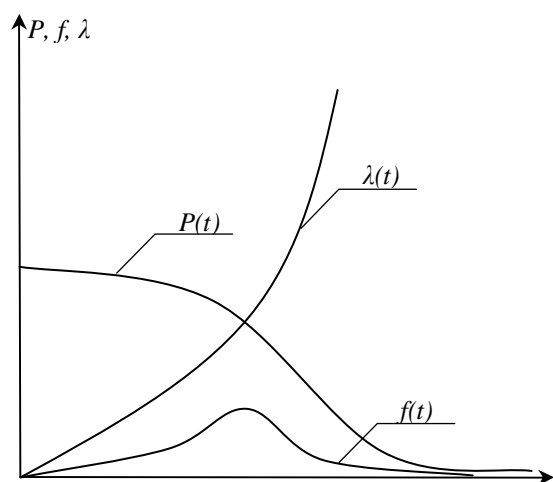


Рис. 1. Нормальное распределение времени (ресурса) безотказной работы

При нормальном распределении времени (ресурсе)  $t$  может быть отрицательным, что противоречит физическому смыслу. Однако, если среднее время (ресурс)  $\bar{t}$  значительно превышает  $\sigma$  ( $\bar{t} > 3\sigma$ ), отрицательная часть распределения не имеет практического значения.

Функция распределения

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t-\bar{t}}{\sigma}\right), \quad (2)$$

где  $\Phi$  – функция Лапласа.

Вероятность безотказной работы при нормальном распределении

$$P(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}}{\sigma_t}\right). \quad (3)$$

Значение интенсивности отказов

$$f(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}}}{\sqrt{2} \left[ \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t-\bar{t}}{\sigma_t}\right) \right]}. \quad (4)$$

При больших значениях  $t$  ( $t > \bar{t} + 2\sigma_t$ )

$$f(t) \approx \frac{t - \bar{t}}{2\sigma_t^2}.$$

При  $t \rightarrow \infty$ ,  $f(t) \rightarrow 0$ ,  $P(t) \rightarrow \infty$ .

Для пневмоклапанов окислительной системы центрального блока РН «Энергия» техническим заданием была определена очень высокая вероятность безотказной работы  $P = 0,999$  при доверительной вероятности  $\alpha = 0,9$ . Выполнение таких показателей требует разработки специальных испытаний по доведению разрабатываемых конструкций агрегатов до ресурса, значительно превышающего гарантированный уровень для эксплуатации.

Оценка надёжности всех агрегатов и узлов пневмогидравлических систем РН «Энергия» была выполнена по отраслевой методике на основе результатов автономных испытаний. В методике предусмотрена количественная оценка, как для параметрической, так и для непараметрической модели надёжности агрегатов. Оценка надёжности на основе параметрической модели позволяет использовать дополнительную информацию о фактических запасах работоспособности при достаточно малом количестве изготовленных образцов и объеме испытаний. Именно такой подход позволяет значительно сократить сроки отработки и затраты на проведение испытаний.

При определении показателей надёжности по результатам испытаний агрегатов ракетно-космических систем были приняты следующие основные допущения:

1. Параметры работоспособности агрегатов имеют нормальный закон распределения.

2. Функции работоспособности являются линейными функциями от параметров работоспособности и, соответственно, имеют нормальный закон распределения.

3. Оценка надёжности по каждому параметру определяется по результатам испытаний как функция нормального распределения, зависящая от фактических значений параметра и от его допустимого (критического) значения, задаваемого техническим заданием.

4. Рассматриваемые агрегаты обладают эргодическим свойством, т.е. каждое из  $N$  испытаний является статистически независимым.

5. Система отработки агрегатов построена таким образом, что при наличии отказов проводится их анализ, доработка конструкции агрегата или отладка технологического процесса изготовления, сборки, испытаний и последующее подтверждение эффективности принятых решений. В итоге все испытания должны быть успешными (без отказов). Такая система позволяет получить нижнюю границу оценки надёжности как наименьшую из её нижних границ в отношении каждого из параметров работоспособности.

6. При наличии большого числа измерений параметров работоспособности допускается при оценке надёжности агрегатов вычислять их среднеарифметическое значение и дисперсию по выборке, включающей не менее тридцати значений. При этом выбранные параметры работоспособности должны быть равномерно распределены по наработке, по температуре окружающей среды, по давлениям подаваемого компонента и другим условиям испытания.

7. Если значения параметров работоспособности, полученные по результатам испытаний, выходят за допустимые пределы, то за критические принимаются значения, отраженные в отчётах о проведённых испытаниях, согласованных с разработчиком технического задания.

Количественная оценка надёжности пневмоклапанов окислительной системы центрального блока РН «Энергия» была выполнена на параметрической модели надёжности на основании результатов испытаний. В качестве параметров работоспособности рассмат-

ривались прочность конструкции, герметичность рабочей (гидравлической) полости, герметичность управляющей полости, время срабатывания агрегата.

Показатели надёжности для пневмоклапанов исследуемой группы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количественные показатели надёжности для пневмоклапанов окислительной системы блока «Ц» РН «Энергия»

Наименование пневмоклапана	Количество образцов на испытаниях			Гарантированный ресурс на этапной эксплуатации*			Вероятность безотказной работы $P$ ( $\approx 0,9$ )
	КДИ	ЧИ	ИН	А	Б	В	
отсечной	5	3	5	30	100	3	0,999610
циркуляции	5	3	4	30	100	5	0,999891
закольцовки циркуляции	5	6	5	30	100	3	0,999123
слива	5	3	5	30	50	5	0,999080
заправки и термостатирования	5	7	5	30	150	100	0,999941
отсечки магистрали циркуляции	4	3	5	30	50	50	0,999310

\*Этап А – сборка РН;

Этап Б – технологическая подготовка на стартовой позиции;

Этап В – штатная эксплуатация РН.

В результате автономных испытаний топливных пневмоклапанов исследуемой группы был подтверждён полуторный запас по гарантированному ресурсу безотказной работы, а также набран необходимый статистический материал для количественной оценки надёжности.

#### Вывод

Полученные показатели надёжности подтвердили правильность выбранных методов расчёта при проектировании и разработке конструкторской документации, а также требуемый уровень надёжности.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП.2.1.1/3397).

#### Библиографический список

1. Сазанов, В.П. Математическое моделирование нагружения при срабатывании пневмоклапанов ракетносителей [Текст] / В.П. Сазанов // Математическое моделирование и краевые задачи МЗЗ.: Тр. VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Ч.1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 305–308.

2. Биргер, И.А. Расчёт на прочность деталей машин [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич // Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

#### References

1. Sazanov, V. P. Mathematical modeling of loading during launch vehicle pressure-operated valve response [Text] / V. P. Sazanov // Mathematical modeling and boundary prob-

lems M33. Transactions of the Seventh All-Russia science conference with international participation. – P.1: Mathematical models of mechanics, durability and reliability of construction elements. – Samara: SamSTU, 2010. – PP. 305-308.

2. Birger, I. A. Strength analysis of machine parts [Text] / I. A. Birger, B. F. Shorr, G. B. Yosilevich // Manual. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 702 p.

## **DYNAMIC LOADING AND QUESTIONS OF ASSURING THE RELIABILITY OF FUNCTIONING OF SUPERHEAVY LAUNCH VEHICLE CRYOGENIC PRESSURE-OPERATED VALVES**

© 2010 V. P. Sazanov

Space Rocket Centre “Energiya”

The paper presents the results of work aimed at assuring the required parameters of the reliability of functioning of a group of cryogenic units of the “Energiya” launch vehicle central block oxidizing system.

*Launch vehicle, pressure-operated valve, pneumatic actuator, damper, reliability of functioning, dynamic loading.*

### **Информация об авторах**

**Сазанов Вячеслав Петрович**, начальник сектора прочности. ЗАО Волжское конструкторское бюро РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Область научных интересов: прочность конструкций. E-mail: [sazanow@mail.ru](mailto:sazanow@mail.ru).

**Sazanov Vyacheslav Petrovich**, head of the durability sector. Space Rocket Centre “Energiya”. Area of research: structural strength. E-mail: [sazanow@mail.ru](mailto:sazanow@mail.ru).