

С. А. Бигун, канд. техн. наук М. С. Хорольский, А. И. Скоков

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РУКАВОВ СТЫКОВКИ СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ РКН

Предложена методика оценки характеристик надежности рукавов узлов стыковки систем термостатирования воздухом низкого давления ракет космического назначения. Расчетным методом подтверждена высокая степень надежности рукавов узлов стыковки как интерфейсного элемента стартовых комплексов ракет-носителей.

Запропоновано методику оцінювання характеристик надійності рукавів вузлів стикування систем термостатування повітрям низького тиску ракет космічного призначення. Розрахунковим методом підтверджено високий ступінь надійності рукавів вузлів стикування як інтерфейсного елемента стартових комплексів ракет-носіїв.

The technique is proposed of reliability evaluation of space launch vehicle low pressure air thermostating system joints hoses. By calculation method, high reliability level was confirmed of hoses of joints being an interface elements of launch vehicle launch complexes.

Введение

В процессе создания узлов стыковки (УС) систем термостатирования РКН впервые возник вопрос оценки надежности. Методик расчета надежности рукавов УС, как интерфейсного элемента стартовых комплексов РКН, не существовало. Перед разработчиками систем термостатирования возникла задача оценки надежности такого ответственного узла, как рукав УС. Методика определения и подтверждения теоретической надежности рукавов УС была предложена кандидатом технических наук В. Н. Цыгановым. Согласно техническому заданию [1] на РКН "Циклон-4" к рукавам УС предъявлялись следующие требования надежности и технические требования:

1. Вероятность безотказной работы в процессе подачи термостатирующего воздуха в течение расчетного цикла применения в составе системы термостатирования должна составлять не менее 0,9999. При этом под расчетным циклом применения рукавов понимается совокупность технологических операций по присоединению (отсоединению) к горловинам термостатирования РКН, подаче воздуха на термостатирование РКН и операций при отмене пуска РКН в течение не менее 72 ч. Под отказом понимается нарушение работоспособного состояния, приводящее к невыполнению системой термостатирования операции по выдаче термостатирующего воздуха в установленное

время.

2. Среднее время восстановления (замены) с применением элементов запасных частей, инструментов и принадлежностей не должно превышать одного часа. Время восстановления работоспособного состояния – это оперативное время, затраченное на обнаружение, поиск причин отказа и устранение его последствий.

3. Назначенный ресурс – не менее 200 циклов с общим количеством пусков не менее 80 в течение срока эксплуатации не менее 15 лет при соблюдении предъявляемых технических требований.

4. Непрерывная подача термостатирующего воздуха с расходом до 3850 м³/ч в интервале температур от 5 до 25 °С под избыточным давлением до 20 кПа.

5. Герметичность и целостность.

Задача расчета надежности состоит в идентификации основных условий работоспособности и количественной оценке всех вышеперечисленных требований, предъявляемых к рукавам УС.

Исходные данные для расчета и принцип работы рукава УС

Рабочее избыточное давление термостатирующего воздуха – 20 кПа.

В системе термостатирования используются два типоразмера рукавов с внутренними диаметрами 150 и 220 мм, у которых минимальная толщина стенки

$S=4$ мм.

Усилие отсоединения для рукава диаметром 220 мм равно 100 ± 10 кгс; максимальное усилие отсоединения – 110 кгс.

Усилие отсоединения для рукава диаметром 150 мм равно 90 ± 10 кгс; максимальное усилие отсоединения – 100 кгс.

Среднее (допустимое) значение прочности материала рукава при растяжении – 90 кгс/см^2 .

Максимальное значение прочности материала рукава при растяжении – 131 кгс/см^2 .

Среднее квадратическое отклонение прочности материала составляет $13,6 \text{ кгс/см}^2$.

Среднее значение усилия раскрытия чеки узла фиксации-расфиксации (УФР) – 1,85 кгс; среднее квадратическое отклонение усилия – 0,22 кгс; максимальное усилие раскрытия чеки – не более 2,5 кгс.

Принцип работы рукава УС заключается в следующем (рисунок): снимаются заглушки 1 и 3 и рукав соединяется с трубопроводом системы термостатирования и горловиной отсека РКН вручную с применением специальных приспособлений. Со стороны системы термостатирования рукав крепится двумя стандартными хомутами, а к горловине – одним оригинальным хомутом (УФР 2), который фиксируется чекой, соединенной с провисающим тросом. Отклонением стрелы установщика рукав растягивается, при этом трос, натягиваясь, выдергивает чеку из гнезда. После этого УФР 2 расфиксируется и прижатие рукава к горловине уменьшается до значения усилия натяжения. В результате дальнейшего отклонения стрелы рукав УС с приемлемым усилием плавно отсоединяется от горловины отсека РКН.

Условия работоспособности рукава УС и расчет надежности

Рукав УС выполнит свою функцию, если последовательно будут иметь место следующие события:

- сохраняется целостность и герметичность в течение 72 ч;

- отклонением стрелы установщика чека УФР 2 перемещается из исходного положения в конечное (на упор);

- отклонением стрелы установщика рукав отсоединяется от горловины термостатирования РКН, сохраняя собственную целостность и герметичность.

Первое условие работоспособности эквивалентно тому, что прочность рукава УС выше напряжения, которое создает в материале рукава избыточное давление 20 кПа.

Второе условие работоспособности эквивалентно тому, что усилие натяжения рукава, вызванного отклонением стрелы установщика, всегда превосходит значение силы 2,5 кгс.

Третье условие работоспособности эквивалентно утверждению, что усилие отсоединения рукава УС от горловины РКН создает в материале рукава напряжение, которое меньше допустимых напряжений прочности материала рукава.

Чтобы убедиться в том, что первое условие выполняется, достаточно вычислить минимальное давление, которое может выдержать рукав не разрушаясь. Таким давлением может быть испытательное давление, вычисляемое по формуле [2]

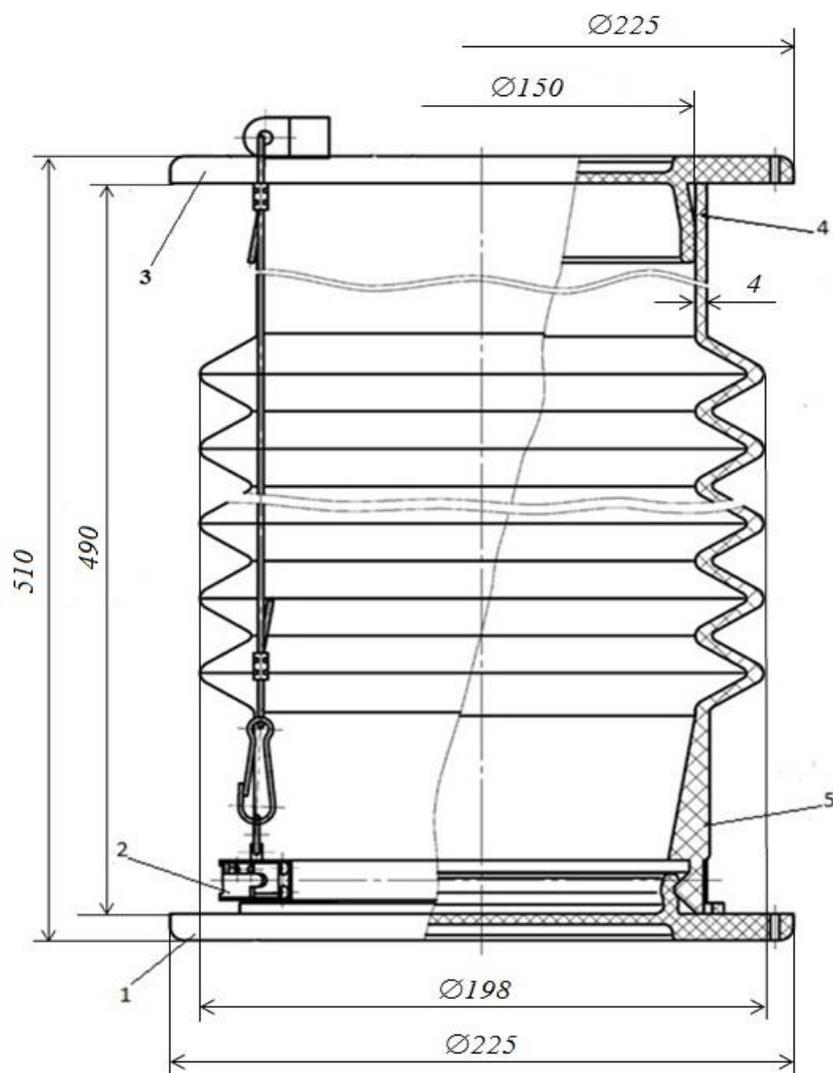
$$P \geq \frac{2S\sigma}{d}, \quad (1)$$

где S – минимальная толщина стенки, см;
 d – номинальный внутренний диаметр, см;
 σ – допустимое напряжение при испытании, кгс/см^2 (в нашем случае минимально допустимое значение прочности материала при растяжении).

Расчет по формуле (1) дает следующее значение для рукава диаметром 220 мм:

$$P = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 90}{22} \approx 3,27 \text{ кгс/см}^2.$$

Таким образом, рукав может выдержать давление, которое превосходит рабочее в 16 раз ($3,27/0,2 = 16,35$). Следовательно, первое условие работоспособности выполняется с детерминированной определенностью, т. е. с вероятностью, практически равной единице.



Общий вид рукава УС: 1, 3 – заглушки; 2 – УФР;
4 – корпус рукава; 5 – фланец рукава

Второе условие выполняется как минимум с 40-кратным запасом ($100 \text{ кгс}/2,5 \text{ кгс} = 40$), т. е. с единичной вероятностью.

Остается третье условие, которое справедливо с меньшей вероятностью для рукава диаметром 150 мм. При этом у рукава диаметром 220 мм допустимые напряжения материала, вызываемые усилием отсоединения, будут ниже, чем у рукава диаметром 150 мм. Соответственно вероятность отсоединения от РКН рукава с диаметром 220 мм с сохранением своей целостности будет выше.

Напряжение в материале рукава диаметром 150 мм создается усилием отсоединения, среднее значение которого равно 90

кгс, а среднее квадратическое отклонение – 3,3 кгс. Коэффициент вариации (отношение среднего квадратического отклонения к среднему значению прочности) как для прочности материала $\left(\frac{13,6 \text{ кгс/см}^2}{90 \text{ кгс/см}^2} = 0,1511\right)$,

так и для усилия отсоединения $\left(\frac{3,3 \text{ кгс/см}^2}{90 \text{ кгс/см}^2} = 0,0366\right)$, меньше 0,3. Следовательно, в этом случае можно воспользоваться нормальным распределением и для существенно положительных величин согласно [3].

Вероятность справедливости третьего условия вычисляется по формуле [4]

$$p = \text{Вер}(\sigma_p > \sigma_T), \quad (2)$$

где σ_p – допустимое напряжение прочности материала рукава;

σ_T – напряжение, возникающее в материале рукава от усилия отсоединения.

В формуле (2) принято, что случайные величины σ_p , σ_T независимы и распределены по нормальному закону. При этом математическое ожидание m_p допустимого напряжения σ_p равно 90 кгс/см², а среднее квадратическое отклонение $\sigma_1 = 13,6$ кгс/см². Для напряжения в рукаве математическое ожидание m_m допустимого напряжения σ_T равно 4,65 кгс/см²; $\sigma_2 = 0,17$ кгс/см² (напряжение в рукаве определяется делением усилия отсоединения 90 кгс на площадь поперечного сечения рукава, равную 19,34 см², образованную внутренним диаметром 150 мм и толщиной стенки 4 мм). Что касается среднего квадратического отклонения σ_2 , то оно находится из следующих соображений. Вычисляется максимальное напряжение в рукаве делением максимального усилия отсоединения 100 кгс на площадь поперечного сечения рукава 19,34 см² $\left(\frac{100}{19,34} = 5,17 \text{ кгс/см}^2\right)$.

После этого вычисляется напряжение в рукаве, возникающее от рабочего номинального усилия 90 кгс $\left(\frac{90}{19,34} = 4,65 \text{ кгс/см}^2\right)$.

В итоге получаем $\sigma_2 = \frac{5,17 - 4,65}{3} = 0,17 \text{ кгс/см}^2$.

Чтобы вычислить вероятность p , необходимо рассмотреть случайную величину $X = \sigma_p - \sigma_T$. Такая случайная величина представляет собой композицию двух случайных величин σ_p , σ_T и согласно [4] распределена по нормальному закону с параметрами:

$$m_x = 90 - 4,65 = 85,35 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_x = \sqrt{13,6^2 + 0,17^2} \approx 13,6 \text{ кгс/см}^2.$$

В результате вероятность безотказной работы рукава будет определяться как вероятность условия $X > 0$ и может быть вычислена как значение табличной функции

$F_0(m_x/\sigma_x)$ согласно [3]. Выполняя вычисления, находим

$$F_0\left(\frac{85,35}{13,6}\right) = F_0(6,275) = 0,9999999.$$

Выводы

1. В результате анализа и расчета установлено, что рукав УС сохраняет свою целостность и герметичность в течение 72 ч с вероятностью, практически равной единице.

2. Целостность рукава УС при отсоединении его от горловины термостатирования РКН отклонением стрелы установщика на стартовый угол сохраняется с вероятностью 0,9999999, т. е. практически равной единице.

3. Показатели надежности рукава УС системы термостатирования РКН, вычисленные на этапе выпуска РКД, отвечают требованиям технического задания [1] с гарантированным запасом.

Список использованной литературы

1. Разработка рукавов узлов разового действия системы термостатирования космического ракетного комплекса "Циклон-4": ТЗ на ОКР 2Г40.12.8599.608ТЗ/ГП "КБ "Южное". – 2009. – 41 с.
2. Абрамов Е. И., Колесниченко К. А., Маслов В. Т. Элементы гидропривода (Справочник). – Киев: Техника, 1969. – 320 с.
3. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. – М.: Сов. радио, 1968. – 286 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

Статья поступила 06.04.2016