

УДК 621.052.08

Д.Н. ГУЛА, кандидат технических наук
Р.Н. АИТОВ, кандидат технических наук
В.М. МОТОРИН, кандидат технических наук,
 доцент

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛАСТОМЕРНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В статье представлена методика прогноза остаточного срока службы эластомерных уплотнительных элементов оборудования стартовых комплексов. Изложен теоретический подход, позволяющий организовать испытания эластомерных уплотнений без демонтажа оборудования.

Ключевые слова: прогноз остаточного срока службы; уплотнительные элементы; оборудование стартовых комплексов; испытания.

Многообразие технических средств, используемых на космодромах для подготовки и проведения пусков ракет космического назначения, приводит к необходимости контроля фактического технического состояния [1; 2] эластомерных уплотнений в гидравлических агрегатах наземного технологического оборудования. Практика эксплуатации показывает, что темпы естественного старения таких элементов отличаются от интенсивности протекания деградиационных процессов в остальных элементах гидравлических агрегатов, например, металле, хромовом покрытии и т.д., следовательно, срок службы силовых гидравлических агрегатов может существенно ограничиваться сроком службы эластомерных уплотнительных элементов.

Срок службы определяется временем от момента проведения испытаний гидравлических агрегатов, узлов до достижения ими предельного состояния. Переход в предельное состояние исследуемых элементов характеризуется невозможностью их дальнейшей эксплуатации вследствие недопустимого увеличения эквивалентной остаточной деформации уплотнения.

Исходными данными для определения величины срока службы уплотнений являются сведения об условиях эксплуатации, конструктивные характеристики узла уплотнения и результаты испытаний (см. таблицу 1).

Выходными данными является срок службы узла уплотнений до достижения предельного состояния $\tau_{пр}$.

Таблица 1 – Сведения об условиях эксплуатации, конструктивные характеристики узла уплотнения

Параметр	Обозначение	Размерность
Плотность рабочей жидкости	ρ	кг/м ³
Испытательное давление	P_1	МПа
Давление окружающей среды	P_2	МПа
Радиус герметизируемой поверхности	r	м
Объем перетечек при заводских испытаниях	Q_0	м ³ /сек
Предельно допустимый объем перетечек	$Q_{пр}$	м ³ /сек
Объем перетечек при полигонных испытаниях	Q_{τ}	м ³ /сек

Теоретические положения и основные расчетные соотношения

Особенности эксплуатации элементов уплотнений в составе уникальных агрегатов стартовых комплексов и интенсивность использования по назначению определяют целесообразность оценивания их срока службы с точки зрения старения, с точки зрения оценивания срока службы, среди всей номенклатуры материалов, из которых изготавливаются уплотнения, наиболее подвержены старению эластомерные элементы силовых гидродомкратов стартового оборудования ракетно-космических комплексов.

Эластичные материалы уплотнений представляют собой сложную композицию из каучука и ингредиентов. К классу эластомеров относятся сетчатые полимеры, в частности, резина. Они наиболее распространены как уплотнительные элементы гидросистем.

Вопросы прочности, долговечности и разрушения резинотехнических изделий в настоящее время развиваются по трем независимым направлениям: теория рассеянного разрушения, теория развития трещин и статистическая теория разрушения [3]. Для рассматриваемого объекта исследований и его элементной базы наиболее рационально рассматривать процессы старения с точки зрения механики распространения трещин.

Сеть микротрещин в интегральном виде на макроуровне можно рассматривать как кольцевую щель между поверхностью металла и самого материала уплотнения. Причины такого старения зачастую остаются невыясненными, так как они являются следствием комплекса случайных факторов. В связи с этим характеристику повреждения уплотнений рационально ориентировать на выявление интегрального выходного параметра. Это является вынужденной мерой, так как возникают трудности непосредственной численной оценки степени повреждения элементов изделия¹. В интегральном выходном параметре опосредованно будут учтены последствия ряда факторов старения эластомерных уплотнений, которые включают:

свойства окружающей среды, ее химическую активность и влияние на процессы структурирования с образованием новых связей в молекулярной сетке или деструкции с разрушением таких связей;

воздействие ионизирующих излучений озоном, кислородом, ультрафиолетовым потоком и т.д., которые вызывают значительные физико-химические изменения;

совместимость с материалами других изделий, что определяет пригодность уплотнений для работы в условиях взаимного контакта;

температурные воздействия.

Последний фактор оказывает наибольшее воздействие на ресурс эластомерных уплотнений, рабочая область применения которых занимает диапазон от температуры стеклования $-(20\div 70)^\circ\text{C}$ до температуры пластичности $+(150\div 200)^\circ\text{C}$.

В основу разработанной модели расходования ресурса уплотнений [4] положим изменение исходного значения контактного давления $P_{к0}$, которое несколько уменьшается со временем до $P_{кт}$ после их установки при изготовлении элементов арматуры в заводских условиях.

Формирование зазора в таких уплотнениях связано с релаксационной природой уплотнений. По мере старения материала контактное давление P_k снижается, но при этом увеличивается зазор между уплотнением и герметизируемым элементом. Это подтверждено результатами исследований, которые проводились с резиновыми образцами².

Введем понятие «эквивалентная остаточная деформация» Δh^3 , что является выходным (интегральным) параметром и отражает развитие неплотности прилегания уплотнений к герметизируемому элементу за счет развития сети микротрещин в самом уплотнении.

Представленные выше рассуждения показывают очевидность влияния на процесс старения множества случайных факторов, что связано с использованием аппарата теории случайных событий. Однако, для прогноза остаточного ресурса наиболее перспективны

¹ Щурин К.В. Надежность машин: учебник. СПб.: Лань, 2019. – 592 с.

² Мозгалева В.В., Липлянин П.К. Расчет и конструирование резиновых изделий и форм: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2010. – 149 с.

аналитические зависимости³, которые базируются на физике явлений и учитывают влияние основных факторов.

Экспериментальное определение P_k на смонтированном оборудовании и контроль его изменения сопряжены со значительными трудностями. Следовательно, необходим новый подход, в основу которого положено то, что критерием качества уплотнений является контактное давление. Для его количественной оценки целесообразно построить испытания с использованием испытательного внешнего давления или же создание градиента давления рабочей жидкости на уплотнении ($P_1 - P_2$). В результате этого в кольцевом зазоре между уплотнением и уплотняемыми элементами появится перетекание рабочей жидкости с расходом⁴:

$$Q = K_p f \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}, \quad (1)$$

где K_p – коэффициент расхода щели; f – площадь проходного сечения щели; ρ – плотность рабочей жидкости; P_1 – испытательное давление; P_2 – давление окружающей среды.

Принимая, что размер щели достаточно мал по сравнению с размером (диаметром) уплотнений, зависимость для определения площади проходного сечения щели представим в виде:

$$f = 2\pi r \Delta h^3, \quad (2)$$

где r – радиус герметизируемой поверхности.

Интенсивность изменения параметра Δh^3 может быть определена на основании известного значения перетечек Q_0 , полученных при заводских испытаниях агрегата гидроарматуры. В таком случае на основании (1, 2) начальное значение параметра Δh_0^3 выразится зависимостью:

$$\Delta h_0^3 = \frac{Q_0 \rho^{0,5}}{K_p \pi r \sqrt{8(P_1 - P_2)}}. \quad (3)$$

Предельное значение $\Delta h_{\text{пр}}^3$ может быть определено по известной величине предельно допустимых перетечек $Q_{\text{пр}}$, которые экспериментально получены для конкретных образцов уплотнений в лабораторных условиях и приведены в эксплуатационной документации на агрегат. Тогда, аналогично (3), значение $Q_{\text{пр}}$ может быть определено с использованием зависимости:

$$\Delta h_{\text{пр}}^3 = \frac{Q_{\text{пр}} \rho^{0,5}}{K_p \pi r \sqrt{8(P_1 - P_2)}}. \quad (4)$$

Соответственно, промежуточное значение эквивалентной остаточной деформации Δh_τ^3 на момент испытаний силового агрегата без его демонтажа спустя время τ после проведения заводских испытаний выражается соотношением:

$$\Delta h_\tau^3 = \frac{Q_\tau \rho^{0,5}}{K_p \pi r \sqrt{8(P_1 - P_2)}}, \quad (5)$$

где Q_τ – расход через уплотнение, полученный при испытаниях.

Значения Δh_0^3 и $\Delta h_{\text{пр}}^3$ представлены на рисунке 1 пунктирными линиями.

Неотъемлемой частью в решении задач надежности и ресурса является знание временных зависимостей [5]. Согласно [4] физическая суть процесса старения образца уплотнения (разрушения полимеров) и уменьшение давления прижатия P_k описывается уравнением долговечности:

$$P_k = P_{k0} e^{-K\tau}, \quad (6)$$

где $K = A e^{-E/RT}$ – константа скорости старения, которая зависит от температуры (уравнение Аррениуса [4]); A – постоянная, зависящая от природы материала уплотнения; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

³ Щурин К.В. ... Указ. соч.

⁴ Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: справоч. пособие. М.: Машиностроение, 1971. – 671 с.

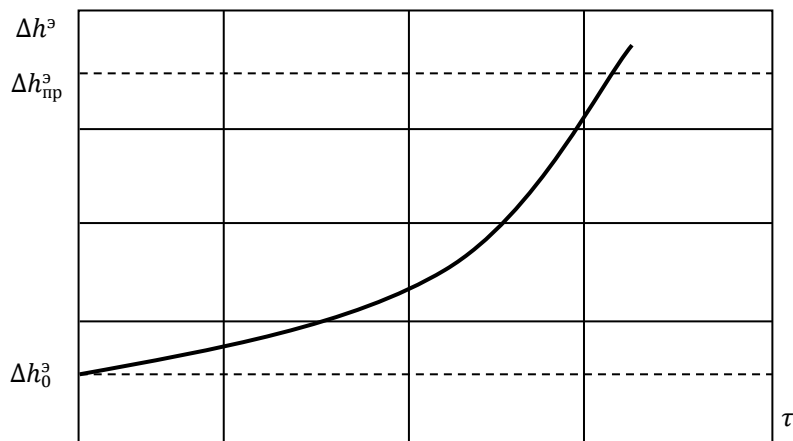


Рисунок 1 – Скорость изменения эквивалентной остаточной деформации во времени

Поскольку экспериментальное определение P_k сопряжено со значительными трудностями, то для малоагрессивных жидкостей, приводящих к набуханию образца уплотнения не более 5% по массе, согласно⁵ вместо P_k можно использовать величину накопления остаточных деформаций Δh^3 . Проведенные ранее исследования показали, что кривые этих процессов являются зеркальным отображением друг друга. Следовательно, уравнение (6) может быть представлено в виде:

$$\Delta h^3 = \Delta h_0^3 e^{K\tau}. \quad (7)$$

Логарифмируя (7), получаем выражение для определения константы скорости старения. Для этого используются значения времени старения τ , полученного в промежуточных испытаниях перетекания рабочей жидкости через уплотнение:

$$K = \frac{\ln \Delta h_\tau^3 - \ln \Delta h_0^3}{\tau}. \quad (8)$$

Аналогичная операция логарифмирования (7) приводит к получению предельного срока старения уплотнений:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\ln \Delta h_{\text{пр}}^3 - \ln \Delta h_0^3}{K}. \quad (9)$$

Алгоритм определения срока службы

Расчет показателей технического состояния и прогнозирования срока службы включает следующие этапы:

1. Получение исходной информации о конструктивных характеристиках узла уплотнений, температурных условиях функционирования элементов уплотнений, свойствах рабочей жидкости, результатах заводских испытаний на основе анализа конструкторской и эксплуатационной документации, справочных материалов по природно-климатическим условиям.
2. Расчет начального значения «эквивалентной остаточной деформации» Δh_0^3 согласно зависимости (3).
3. Расчет предельного значения «эквивалентной остаточной деформации» $\Delta h_{\text{пр}}^3$ согласно зависимости (4).
4. Проведение испытаний узла уплотнений с помощью специального гидравлического стенда с целью определения величины перетечек Q_τ .

⁵ Бойко Н.З. Рабочие жидкости, смазки и уплотнения: учеб. пособие. Алчевск: Дон ГТУ, 2018. – 204 с.

5. Расчет значения «эквивалентной остаточной деформации» Δh_t^3 на момент проведения испытаний согласно зависимости (5).
6. Расчет экспериментального значения константы старения K согласно зависимости (8).
7. Расчет срока службы уплотнительных элементов $\tau_{пр}$ до достижения предельного состояния согласно зависимости (9).

Предложенная методика прогноза остаточного срока службы эластомерных уплотнительных элементов оборудования стартовых комплексов и новый теоретический подход в организации испытаний позволит повысить расчетный прогноз времени достижения предельного состояния эластомерных уплотнительных элементов в силовых гидравлических агрегатах стартовых комплексов космических ракетных комплексов.

Список использованных источников

1. Бирюков Г.П., Зброжек Ю.М. Эксплуатация стартовых комплексов по фактическому состоянию. М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 2000. – 172 с.
2. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Т.1: Объекты космической инфраструктуры: монография / Н.Д. Аникейчик, О.А. Антропов, Л.Т. Баранов и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.
3. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
4. Кондаков Л.А. Уплотнения гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
5. Прохорович В.Е. Прогнозирование состояния сложных технических комплексов. СПб.: Наука, 1999. – 158 с.