

УДК 621.454.2: 006.015.5

В. А. Паталаха, А. В. Рыжко

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАРАНТИЙНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖРД В УСЛОВИЯХ ЗАМЕЩЕНИЯ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ МЕЖОТРАСЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены современные аспекты прогнозирования и установления гарантийных сроков эксплуатации жидкостных ракетных двигателей. Приведены этапы и последовательность проведения работ по назначению гарантийных сроков. Изложены физические основы определения режимов испытаний на термическое старение, воздействие повышенной влажности. Даны математические зависимости для определения времени проведения испытаний при повышенных температуре и относительной влажности, эквивалентной температуры хранения изделия. Изложен обобщенный перечень и последовательность испытаний для установления гарантийного срока. Рассмотрено содержание работ по поиску и внедрению новых комплектующих изделий межотраслевого применения, в частности материалов-заместителей для резиновых смесей при производстве резиновых технических изделий, полимерных материалов (фторопластов, полиамидов), изотропного пирографита, озоноберегающих средств для обезжиривания узлов жидкостных ракетных двигателей, контактирующих с компонентом топлива – кислородом, а также поиску альтернативных подшипников.

Ключевые слова: изотропный пирографит, ускоренные климатические испытания, фторопласт, эквивалентная температура хранения, энергия активации.

Розглянуто сучасні аспекти прогнозування та встановлення гарантійних строків експлуатації рідинних ракетних двигунів. Наведено етапи та послідовність проведення робіт з призначення гарантійних строків. Викладено фізичні основи визначення режимів випробувань на термічне старіння, вплив підвищеної вологості. Дано математичні залежності для визначення часу проведення випробувань за підвищених температури і відносної вологості, еквівалентної температури зберігання виробу. Викладено узагальнений перелік і послідовність випробувань для встановлення гарантійного строку. Розглянуто зміст робіт з пошуку та впровадження нових комплектувальних виробів міжгалузевого використання, зокрема матеріалів-замісників для гумових сумішей під час виробництва гумових технічних виробів, полімерних матеріалів (фторопластів, поліамідів), ізотропного пирографіту, озонозберігаючих засобів для знежирювання вузлів рідинних ракетних двигунів, що контактують з компонентом палива – киснем, а також пошуку альтернативних підшипників.

Ключові слова: ізотропний пірографіт, прискорені кліматичні випробування, фторопласт, еквівалентна температура зберігання, енергія активації.

The article considers the present-day aspects of predicting and establishing the guaranteed service life of liquid rocket engines. The phases and sequence of works to specify the guarantee periods are presented. The physical ground for determining thermal ageing test modes and increased humidity test modes is set forth. The mathematical dependencies are given to determine the time of testing at increased temperature, increased relative humidity, equivalent article storage temperature. The generalized list and sequence of tests to establish a guarantee period are set forth. The content of works is considered to seek for and introduce new components of inter-industry application, in particular, replacing materials for rubber mixtures during production of rubber technical goods, polymer materials (fluoroplastics, polyamides), isotropic pyrographite, ozone friendly means for degreasing liquid rocket engine assemblies being in contact with propellant component – oxygen and to seek for alternative bearings.

Key words: isotropic pyrographite, accelerated environmental tests, fluoroplastic, equivalent storage temperature, activation energy.

Введение

Разработка и изготовление современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), как составной части ракеты, требуют значительных интеллектуальных, трудовых и материальных затрат. При этом считается, что увеличение гарантийного срока эксплуатации изделия приводит к уменьшению общих затрат.

При установлении гарантийных сроков на технику учитывают следующие факторы:

- опыт эксплуатации ранее разработанных и изготовленных образцов;
- результаты исследований опытного хранения материальной части в различных климатических условиях;
- опыт широкого комплекса ускоренных конструкторских испытаний.

Обеспечение высокой надежности и долговечности достигается большим объемом сложных и дорогостоящих работ. Такие работы ведутся при разработке и отработке конструкции и технологии изготовления отдельных деталей, узлов, систем, а также ЖРД в целом. В дальнейшем ведутся испытания и исследования по установлению и обеспечению необходимых гарантийных сроков и условий эксплуатации ЖРД, определяются оптимальные объемы и сроки регламентных работ.

Установление гарантийного срока эксплуатации ЖРД

Гарантийные сроки на все узлы и элементы ЖРД устанавливаются автономно.

Метод учета опыта эксплуатации ранее разработанных конструкций двигателей относительно прост, его выводы наиболее достоверны. Однако он не позволяет прогнозировать гарантийные сроки на принципиально новые элементы, которые не использовались в предыдущих конструкциях, а также устанавливать достоверные гарантийные сроки, превышающие сроки натурального хранения прототипов.

Актуальным является прогнозирование гарантийных сроков для проектируемых изделий, а также продление их для изделий, находящихся в длительной эксплуатации, значительно превышающей первоначально установленные гарантийные сроки. В результате теоретических и экспериментальных исследований были разработаны и приняты к использованию ряд методик, позволяющих установить сроки надежной эксплуатации элементов и узлов ракеты в натуральных условиях. Большая часть этих методик основывается на интенсификации физико-химических процессов при увеличении воздействия ряда метеорологических факторов, в частности температуры и относительной влажности воздуха.

Такие испытания называют ускоренными климатическими испытаниями. При этом образцы, отобранные на испытания, в течение определенного времени выдерживаются в среде с повышенной постоянной температурой или относительной влажностью и периодически проверяются на работоспособность с замером основных параметров и характеристик.

Испытания на работоспособность образцов, прошедших ускоренное старение, позволяют судить об их сохранности при длительной эксплуатации и устанавливать обоснованные гарантийные сроки эксплуатации.

Методики ускоренных испытаний обычно предусматривают режимы, позволяющие имитировать длительную эксплуатацию исследуемых объектов в сравнительно короткие сроки. Однако длительность даже ускоренных испытаний соизмерима со сроками конструкторской отработки изделия, поэтому гарантийные сроки устанавливаются в два этапа:

- на период конструкторских испытаний и опытной отработки;
- на серийные изделия.

В первом случае гарантийный срок незначительно превышает время, необходимое для отработки, и заведомо меньше продолжительности эксплуатации двигателя в составе ракеты. При этом используются данные, полученные при хранении и эксплуатации ранее разработанных образцов и при специально проводимых несложных экспериментах. Такая методика позволяет минимизировать затраты и время на отработку двигателей при обеспечении высокой достоверности результатов их экспериментальной отработки на всех этапах испытаний.

Работы по установлению гарантийных сроков для серийных двигателей начинаются непосредственно на этапе конструкторской разработки. Все разрабатываемые узлы и элементы двигателя подвергаются специальному анализу, при котором определяются:

- идентичность конструкций разрабатываемых элементов и уже находящихся в эксплуатации;
- схожесть условий работы разрабатываемых элементов и уже находящихся в эксплуатации;
- возможность распространения гарантийных сроков, установленных для прототипных конструкций, на разрабатываемые конструкции;
- объем и порядок проведения специальных испытаний.

Известно, что в материалах при хранении протекают необратимые физико-химические процессы, вызывающие старение материалов. Одни материалы изменяют свойства вследствие окисления, другие – вследствие релаксации и ползучести, третьи – вследствие изменения структурных решеток и т. д. Основываясь на обширном экспериментальном материале, были разработаны методики ускоренных испытаний, предусматривающие выдержку изучаемых материалов и элементов при повышенных температурах или повышенной относительной влажности. При этом предполагается, что в материалах и элементах ускоряются естественные процессы, и таким образом в сравнительно короткие сроки могут быть получены образцы, состаренные идентично прошедшим длительное хранение в натуральных условиях.

Для оценки количественных соотношений (сроков и режимов) искусственного и натурального старения часто используют известное в химической кинетике правило Вант-Гоффа, согласно которому скорость химической реакции при повышении температуры на 10 °С возрастает в два-три раза.

При выборе режимов и сроков испытаний образцов на длительную сохранность на практике принимают термический коэффициент равным двум, т. е. предполагают, что при повышении температуры на 10°С скорости естественных процессов увеличиваются не менее чем в два раза, что дает возможность сократить срок испытаний при такой температуре не менее чем в два раза. Для многих естественных процессов этот коэффициент больше 2, соответственно создается своеобразный коэффициент запаса.

Срок выдержки определяют из уравнения

$$\tau_s = \tau_u k_1 \frac{T_u - T_{np}}{10},$$

где τ_s – эквивалентный срок натурального хранения при приведенной температуре T_{np} ; T_u – срок испытаний (выдержки) при температуре испытания T_u ; k_1 – термический коэффициент.

Для моделирования температурного воздействия окружающей среды на материалы двигателя, учитывая значение $k_1 = 2$ и ряд ограничений, выражение для продолжительности теплового старения τ_u выглядит следующим образом:

$$\tau_u = \tau_s \cdot \exp\left(-\frac{E}{R} \cdot \frac{T_u - T_s}{T_u \cdot T_s}\right),$$

где τ_s – эквивалентное время хранения, ч; T_s – эквивалентная температура хранения, К; T_u – температура старения (испытаний) при ускоренных климатических испытаниях, К; E – энергия активации процесса теплового старения материала, кал/моль; R – универсальная газовая постоянная, 1,987 кал/(К·моль) или 8,314 Дж/(К·моль).

При прогнозировании изменений свойств различных материалов необходимо учитывать изменения температуры окружающей среды при хранении и эксплуатации изделия.

В инженерных расчетах нестационарные температурные условия учитываются введением постоянной эквивалентной температуры T_s , при которой в материале изделия за рассматриваемое время происходят те же изменения, что и в переменном температурном поле:

$$T_s = -\frac{E}{R} \cdot \frac{1}{\ln\left[\frac{1}{\tau_s} \cdot \sum_{j=1}^n \Delta\tau_j \cdot \exp\left(-\frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T_j}\right)\right]},$$

где T_j – средняя температура интервала (не более 5 К), К; τ_j – продолжительность существования интервала температуры, ч (сут); n – число интервалов температуры.

По указанным формулам рассчитываются эквивалентная температура, продолжительность испытаний тепловым старением материалов с предполагаемым сроком хранения и эксплуатации для определенных условий в различных климатических зонах.

Температура нагрева при испытании выбирается не ниже предельной положительной температуры, воздействующей на двигатель.

Температура испытаний может быть повышена (с целью сокращения длительности выдержки) при условии, что ее увеличение не приведет к появлению процессов, не возникающих в материалах при нахождении двигателя в реальных условиях и изменяющих механизм старения.

Воздействие влажности на двигатель можно также изучить при ускоренных климатических испытаниях с помощью отдельной процедуры (этапа). При этом создают специальные условия, оказывающие более интенсивное влияние влаги воздуха на объект исследования, чем при натурном хранении. Результаты таких исследований считают достоверными. Это было подтверждено сравнением с результатами натуральных испытаний.

Опытные работы и теоретический анализ показывают, что устойчивость к воздействию повышенной влажности зависит от температуры и с повышением последней существенно снижается.

Время испытаний определяют по формуле, учитывающей закон Аррениуса и закон действия масс,

$$\tau_{\text{вн}} = k_n \cdot \sum_{i=1}^N \left\{ \tau_{\text{э}i} \cdot \left(\frac{\bar{\psi}_{\text{э}i}}{\psi_u} \right)^2 \cdot \exp \left[-\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{э}i}} - \frac{1}{T_u} \right) \right] \right\},$$

где $\tau_{\text{вн}}$ – время испытания на влагостойкость, ч; k_n – поправочный коэффициент, учитывающий факторы окружающей среды при хранении двигателя; $\tau_{\text{э}i}$ – время, в течение которого влажность находилась в определенном диапазоне значений, ч; $\bar{\psi}_{\text{э}i}$ – среднее значение относительной влажности воздуха в i -том диапазоне, %; ψ_u – относительная влажность воздуха в камере во время испытаний, примерно 96-100%; $T_{\text{э}i}$ – эквивалентное значение температуры в i -том диапазоне, К; T_u – температура воздуха в камере во время испытаний, К; N – количество диапазонов влажности.

Коэффициент k_n определяется опытным путем после сопоставления результатов натуральных и лабораторных исследований,

при которых были получены аналогичные изменения в материалах деталей двигателя. Для каждого конкретного набора условий поправочный коэффициент имеет свое значение. Например, для случая хранения в отапливаемом хранилище максимальное значение поправочного коэффициента k_n составит 0,015.

На основании проведенных работ используется методика проверки на стойкость к влажности, рекомендуемая выдерживать испытуемые образцы при относительной влажности не менее 96 % и температуре 20 °С.

В подавляющем большинстве случаев натурального хранения периоды высокой влажности воздуха совпадают с периодами пониженных температур. В связи с этим режимы, предусмотренные методиками испытаний на стойкость к повышенной влажности (при сочетании температур 20–50°С и влажности 90–100 %), являются заведомо ужесточенными.

Сравнение образцов, прошедших испытания по методике при температуре испытаний 20 °С и относительной влажности 96–100 %, с образцами, находящимися в течение одного года в полевых условиях района с высокой влажностью, показывает, что их состояния сходны между собой.

Полная процедура определения гарантийного срока для полевых условий хранения включает в себя комплекс испытаний:

1-й этап. Выдержка при нормальной температуре. При этом двигатель выдерживается при нормальной температуре 20–23 °С и относительной влажности 80–90 % для выравнивания температур всех его частей и снятия температурных градиентов по всем сечениям изделия.

2-й этап. Испытание на сезонно-температурные перепады и холодостойкость. При этом имитируются температурные колебания окружающего воздуха (сезонные перепады, перепады при смене условий и мест эксплуатации) для выявления технического состояния ЖРД и его сборочных единиц при крайних заданных значениях температуры воздуха. При этих испытаниях выявляется наибольшее количество неисправностей. Результаты много-

численных испытаний свидетельствуют, что для оценки правильности применения материалов в конструкции (с учетом коэффициентов линейного расширения) достаточным является проведение 3–5 циклов температурных перепадов от допустимой отрицательной до максимально возможной положительной температуры с промежуточной выдержкой при нормальной (цеховой) температуре воздуха. Продолжительность выдержки узлов (агрегатов) при каждой температуре выбирается из расчета их полного охлаждения (прогрева) до момента наступления теплового равновесия.

3-й этап. Испытания на суточную циклоустойчивость (с переходом через 0 °С). Для оценки стойкости ЖРД к многократным температурным нагрузкам при суточных перепадах температуры воздуха в составе ракеты в полевых условиях проводятся испытания на суточную циклоустойчивость, включающие последовательные переходы от положительного значения температуры (10...25 °С) к отрицательному значению (–10...–15 °С) с выдержкой при каждой температуре после наступления теплового равновесия. С учетом экспериментальных данных предусматривается десять переходов температуры сборочной единицы через 0 °С при одногодичном нахождении в полевых условиях.

4-й этап. Испытания на тепловое старение, при которых двигатель нагревается и выдерживается при температуре старения. При этом повышение температуры должно быть ограничено определенным пределом во избежание появления в материалах (особенно в неметаллах) изменений, не свойственных естественному старению в природных условиях. Поэтому методикой предусмотрена температура старения не выше 70 °С, при этом относительная влажность в камере тепла составляет не более 10–15 %.

5-й этап. Испытания на влагостойкость (с переходом через 0 °С), при которых двигатель выдерживается в камере влажности и перемещается в течение 5–7 мин в камеру холода. Испытания проводятся поочередно десять раз.

Отработка гарантийного срока хранения в складских условиях предусматривает сокращенную процедуру, включающую только испытания на тепловое старение и влагостойкость, имитирующие требуемый период эксплуатации.

После этих испытаний проводятся внешний осмотр и работы по подтверждению работоспособности двигателя.

Опыт, накопленный многолетней практикой конструирования и отработки ЖРД различного назначения, применения традиционных для ЖРД металлических и неметаллических материалов и покупных комплектующих изделий позволил с большой вероятностью прогнозировать работоспособность ЖРД в течение заданного гарантийного срока в новых разработках, а также снизить затраты на подтверждение гарантийных сроков при наземной экспериментальной отработке.

Замещение комплектующих изделий и материалов

Последняя пятилетка характеризуется усилением проблемы комплектации ЖРД. Это вызвано изменением структуры производства традиционных поставщиков, определенными сложностями поставки комплектующих изделий из других стран, необходимостью замены исходного сырья, в частности, для изготовления резинотехнических изделий (РТИ), выходом на зарубежный рынок предоставления услуг, переходом на новое оборудование и технологии.

В настоящее время ведутся работы по замещению металлических и неметаллических материалов, обезжиривающих средств и комплектующих изделий. В качестве поставщиков в первую очередь рассматриваются предприятия Украины.

Наиболее критичными в плане обеспечения гарантийных сроков и надежности работы узлов в течение длительного срока являются неметаллические материалы и вновь применяемые комплектующие изделия.

Работы по замещению резиновых смесей для изготовления РТИ проводились в связи с трудностями доставки импортных каучуков производства РФ на предприятия Украины. В результате тесной и плодотворной кооперации на ГП УНИКТИ «ДИНТЭМ» удалось заместить всю актуальную на данный момент номенклатуру РТИ.

Работы по организации производства на предприятиях Украины привели к разработке новых рецептур резиновых смесей на основе импортных каучуков производства Германии, КНР, Южной Кореи. Перечень новых рецептур резиновых смесей позволяет изготавливать РТИ для использования в широком диапазоне рабочих сред.

Поиск новых поставщиков заготовок из полимерных материалов вызван невозможностью их изготовления на предприятиях Украины и невозможностью обеспечения требуемого качества продукции и направлен на приобретение материалов-заместителей у ведущих мировых производителей.

Основная проблема замещения фторопласта-4 (химическое соединение – политетрафторэтилен, PTFE) – отличие технологии изготовления у импортных производителей от технологии предприятий РФ. Кристалличность материала в таких заготовках составляет от 50 до 75 % при требуемых 50–55 %. В дальнейшем это проявляется в неравномерном распределении плотности материала, нестабильности показателей твердости по длине заготовки, в редких случаях возможно растрескивание материала при обработке резанием. Отмечена также более высокая текучесть политетрафторэтилена китайских производителей в процессе горячей запрессовки в полость «ласточкин хвост» по сравнению с образцами из фторопласта-4 российского производства.

Был испытан аналог материала полиамид-6 производства Южной Кореи. Результаты исследований физико-механических характеристик аналога показали схожесть с характеристиками ранее применявшегося материала производства РФ. Детали из материала-аналога прошли испытания в составе агрегатов автоматики без замечаний. Результаты испытаний однозначно подтверждают возможность применения данного материала в ракетной технике.

Поиск заменителя изотропного пирографита для уплотнительных элементов турбонасосных агрегатов ЖРД позволил найти украинского производителя. Данный материал изготавливается в соответствии со специально разработанной под наше техническое задание технологией осаждения

из газовой фазы с внесением порозаполнителей. В процессе испытаний изделий отмечены их удовлетворительные физико-механические характеристики.

Процесс поиска аналогов подшипников качения осложнялся особыми условиями работы в составе турбонасосных агрегатов. В результате поисков были найдены производители подшипников с традиционными металлическими и керамическими телами вращения. Однако материалы сепараторов ранее не применялись, поэтому необходимо дополнительное изучение возможности обеспечения требуемого гарантийного срока подшипников.

Запрет использования хладона-113 в качестве обезжиривающего средства в узлах, контактирующих с компонентом топлива – кислородом, обозначил необходимость использования новых озоносберегающих веществ. В качестве альтернативы была использована жидкость 3M Novac 71DE производства США. Данная жидкость является близким аналогом хладона, но благодаря специальным добавкам менее агрессивно вступает во взаимодействие с озоном атмосферы. При этом моющая способность 71DE не хуже, чем у хладона-113, что подтверждено в процессе отработки технологии обработки узлов «под оксид» новым средством.

Наряду с техническими трудностями, частично приведенными в данном разделе, актуальным становится вопрос сохранения физико-механических характеристик и работоспособности неметаллических материалов и комплектующих изделий в течение требуемого гарантийного срока. Большинство производителей материалов и комплектующих дальнего зарубежья поставляют продукцию с гарантийным сроком 1-2 года (в частности, это обусловлено сроком действия договорных отношений), что значительно меньше требуемого для ЖРД.

Выводы

Анализ работ показал, что в связи с недостаточными гарантийными сроками у большинства комплектующих изделий и материалов целесообразно на стадии их отработки и внедрения во избежание дополнительных затрат при отработке в составе

узлов и агрегатов предусматривать работы по подтверждению стабильности характеристик материалов в течение требуемого гарантийного срока.

Список использованной литературы

1. Василина В. Г. и др. Автономная экспериментальная отработка агрегатов и систем пневмогидросистемы подачи ЖРДУ / В. Г. Василина, Г. И. Ильин, В. Ф. Несвит, В. И. Перлик. – Харьков: НАУ «ХАИ», 2005. – 113 с.

2. Шапошников В. А., Уткин В. Ф., Беляев Н. М. Оценка гарантийных сроков эксплуатации ракет. – М.: Машиностроение, 1967. – 164 с.

3. ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. – М.: Госстандарт, 1990. – 79 с.

Статья поступила 14.08.2018