УДК 629.76.017:533.6.011.6

**Оценка старения материалов конструкций изделий
при длительном хранении с использованием вероятностных моделей тепловлажностных воздействий**

Геннадий Ф.К.1, д.т.н.; Хлыбов В.И.1, 2, д.ф.-м.н.; Новиков А.И.2, 3, к.ф.-м.н.

Genady Kostin; Vladimir Khlybov; Anatoly Novikov

novan\_48@mail.ru

1*Южно-Уральский научный центр*

2*АО «ГРЦ Макеева»*

3*Южно-Уральский государственный университет*

***Аннотация:***

В работе представлена технология разработки законов распределения тепловлажностных режимов при длительном хранении на основе вероятностных моделей эксплуатации. Приведены результаты применения технологии при оценке изменения теплопроводности материалов при длительном тепловлажностном воздействии.

***Ключевые слова:***

температурно-влажностные режимы, вероятностная модель эксплуатации, эквивалентная температура, закон распределения ТВР.

***Abstract:***

The paper is devoted to a methodology used to develop distribution laws of temperature and humidity conditions on the basis of probability models of operation of a rocket in long storage. The paper contains the results of application of the methodology to varying thermal conductivities of materials aging in temperature and humidity conditions.

***Keywords:***

temperature and humidity conditions, probability model of operation, equivalent temperature, distribution law of temperature and humidity conditions.

При длительной эксплуатации изделий сложной техники свойства композиционных, полимерных, резиновых и других неметаллических материалов подвержены изменениям, скорость и характер протекания которых зависят от многих факторов, воздействующих на материалы, их сочетания и интенсивности. Одним из таких факторов является воздействие температурновлажностных режимов (ТВР) в процессе эксплуатации.

С другой стороны, надежность работы сложных технических систем зависит от способности материалов сохранять свои свойства при воздействии факторов внешней среды, то есть от их долговечности. Как правило, в качестве основных характеристик полимерных материалов, изменение которых подлежит контролю при изготовлении, рассматриваются механические, электрические и некоторые другие, перечень которых выбирается с учетом целевого назначения материалов. Так, например, ГОСТ Р54072-2010 регламентирует более 20 механических, физико-химических характеристик полимерных материалов, подлежащих контролю.

В современных ракетах стратегического назначения (РСН) полимерные материалы, помимо конструкционного назначения, используются также в качестве тепловой защиты несущих элементов и систем от воздействия высокотемпературных потоков различной физической природы.

В настоящее время РСН разрабатываются на увеличенные гарантийные сроки (ГС), к большинству материалов, в том числе и к полимерным, предъявляются повышенные функциональные требования. В то же время в технических заданиях на разработку ракет ТВР задаются в виде диапазонов или верхних границ воздействий, что для большинства материалов и элементов конструкции недостаточно. Для таких систем требуется задание законов распределения ТВР в течение назначаемого ГС. Например, для ракет, эксплуатирующихся на открытом воздухе или под навесом, а также в неотапливаемых сооружениях такие законы регламентируются ГОСТ 16350-80 и отраслевыми стандартами.

Поддержание ТВР в ограниченных диапазонах осуществляется с помощью систем термостатирования различных типов – от традиционных систем отопления в хранилищах до автоматизированных систем кондиционирования в шахтах и пусковых установках. Характер изменения температуры и влажности в диапазонах регулирования зависит от моделей эксплуатации РСН, условий окружающей среды, технического уровня систем термостатирования, их морального и физического устаревания и многих других факторов.

В АО «ГРЦ Макеева», учитывая большую номенклатуру полимерных материалов и широкий спектр выполняемых ими задач в составе РСН, традиционно проводятся работы по исследованию сохранности механических, теплофизических и других эксплуатационных характеристик полимерных материалов при воздействии ТВР.

Одновременно на предприятии реализуется программа мониторинга ТВР в объектах эксплуатации РСН, результаты систематизируются, исследуется характер и закономерности изменения ТВР в диапазонах эксплуатации с целью определения видов законов распределения для использования как при продлении сроков службы эксплуатируемых ракет, так и в перспективных разработках.

Реализация этой программы обусловлена тем фактором, что для необслуживаемых изделий спецтехники, к которым относятся ракеты разработки АО «ГРЦ Макеева», элементы конструкции и системы должны сохранять работоспособность и заданные характеристики при применении в любой момент времени как в течение ГС, так и при продлении сроков службы (СС). Введение на стадии проектирования большого коэффициента запаса с целью компенсации ухудшения эксплуатационных свойств материалов и элементов конструкции при длительных сроках эксплуатации не всегда возможно из-за ограничений на массогабаритные характеристики ракет и повышенных требований к основным характеристикам ракет.

Частично решить эту проблему возможно путем разработки законов распределения ТВР еще на проектной стадии. С этой целью в АО «ГРЦ

Макеева» разработана технология, включающая:

1) Создание вероятностной модели эксплуатации РСН с момента выдачи с завода-изготовителя и до момента окончания ГС, или до окончания продлеваемого СС;

2) Расчеты температурных режимов ракеты с учетом влияния собственных тепловыделений ракеты и внешних воздействий;

3) Построение законов распределения температур в заданных диапазонах за период эксплуатации.

**1 Основные принципы создания модели эксплуатации РСН**

Создание модели эксплуатации РСН рассмотрим на примере эксплуатации ракет, размещаемых на подводных лодках (ПЛ) . При повседневной эксплуатации ракеты могут находиться в шахтах ПЛ или храниться в хранилищах. При нахождении ракет в шахтах ПЛ модель эксплуатации ракет связана с эксплуатацией ПЛ, заключающейся в чередовании подводного и надводного положений. Подводное положение реализуется при выходах ПЛ в море, надводное – при стоянке в базе. Длительности нахождения в указанных положениях определяются техническими и другими регламентами. Учет этой особенности эксплуатации необходим, так как изменяется окружающая среда, воздействующая на ПЛ: при подводном положении окружающая среда – вода, при надводном – воздух. На основе последовательного чередования положений ПЛ строится ряд диапазонов определяющих температур окружающей среды. Так как диапазоны температур распределены случайным образом, внутри диапазонов температуры окружающей среды распределены на основе статистической обработки многократных наблюдений, то модель эксплуатации носит вполне вероятностный характер.

При продлении сроков службы эксплуатируемых ракет аналогично строится теперь уже не модель, а фактическая схема эксплуатации, индивидуальная для каждой ракеты. Данные по температуре окружающей среды могут быть получены как на основе метеоданных в точке базирования, так и по записям из вахтенного журнала ПЛ. Такие данные несут фиксированную информацию, но при большом объеме приобретают случайный характер и могут обрабатываться вероятностными методами.

**2 Расчет температурных режимов**

Расчет температурных режимов ракеты осуществляется на основе теплофизической модели ракеты с учетом внутренних и внешних воздействующих факторов. Принцип построения модели докладывался на одной из предыдущих конференций. В качестве примера на рисунке 1 приведены расчетные температуры некоторых элементов ракеты.

Рис. 1 – Температурные режимы ракеты в шахте ПЛ

при температуре окружающей среды минус 25°С

**3 Построение законов распределения температур за период эксплуатации**

*3.1 Построение законов распределения температур за период ГС*

Построение законов распределения температур в заданных диапазонах за период ГС проводится на основе вероятностной модели эксплуатации и результатов расчетов температурных режимов ракет с использованием теплофизической модели ракеты для установления зависимости температуры на элементах конструкции ракеты от температуры окружающей среды, как показано на рисунке 1. На основе полученных результатов строятся последовательности диапазонов температур и их длительностей реализации в течение ГС, которые преобразуются в гистограммы. На гистограмме по оси абсцисс отложены интервалы (поддиапазоны) температур, по оси ординат – вероятности реализаций.

В качестве примера на рисунке 2 приведена гистограмма прогнозируемого распределения температуры одной из ракет в течение ГС.

–

*3.2 Построение законов распределения температур при продлении СС*

Построение законов распределения температур в заданных диапазонах на продлеваемый период проводится на основе фактических схем эксплуатации ракет, данных по температурам окружающей среды, показаний регистрирующих приборов систем термостатирования, а также результатов расчетов температурных режимов ракет с использованием теплофизических моделей «ракета в шахте ПЛ», учитывающих фактическое состояние систем термостатирования шахт (мощность тепловыделения, термическое сопротивление теплоизоляции).

На рисунках 3, 4 приведены гистограммы фактического распределения температуры двух разных ракет с продлеваемыми СС.

Значения эквивалентных температур, рассчитанные согласно ГОСТ 15150-69 по приведенным распределениям, составляют соответственно 22…23°С, 16…18°С и 13…15°С при значениях энергии активации в диапазоне 35…125 кДж/моль.

**4 Применение технологии разработки законов распределения ТВР к исследованию изменения характеристик материалов**

Рассмотрим эффективность применения указанной технологии при оценке изменения теплопроводности двух новых теплоизоляционных материалов (с условным названием“М1” и “М2”). Материалы были подвергнуты ускоренному старению в условиях, приведенных в таблице 1; там же приведены значения коэффициента теплопроводности до и после испытаний и значения энергии активации.

Таблица 1

Условия и результаты испытаний теплозащитных материалов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Температура УКИ,°С | ДлительностьУКИ, сутки | Коэффициент теплопроводности  | Энергия активации, кДж/моль |
| до исп. | после исп. |
| “М1” | 102 | 32 | 0,13 | 0,15 | 62±6 |
| “М2” | 105 | 53 | 0,11 | 0,12 | 54±6 |

Для определения изменения коэффициента теплопроводности во времени использована формула из стандарта ГОСТ 9.707-81:

 (1)

где – константа скорости процесса, *К*0 – коэффициент; *λпред* – предельное значение коэффициента теплопроводности, *τ* – время.

На основе обработки результатов испытаний по формуле (1) получены уравнения зависимости коэффициентов теплопроводности от

времени:

– для материала “М1”,

 – для материала “М2”.

Пересчетом константы скорости старения на эквивалентные температуры получены соотношения для расчета зависимости коэффициентов теплопроводности от длительности эксплуатации. Для удобства анализа введем коэффициент старения по формуле:

где коэффициент теплопроводности в текущий момент времени, – коэффициент теплопроводности в начальный момент.

Результаты расчетов изменения коэффициента старения в течение срока службы при разных значениях эквивалентных температур *tэ* приведены на рисунках 5 и 6.

Рис. 5 – Изменение во времени коэффициента старения теплопроводности
материала “М1”

Рис. 6 – Изменение во времени коэффициента старения

теплопроводности материала “М2”

Как видно из приведенных графиков величина коэффициента старения теплопроводности зависит от эквивалентной температуры, величина которой, в свою очередь, определяется законом распределения температуры в заданном диапазоне.

Очевидно, что для материала “М1” потребуется введение коэффициента запаса на ухудшение теплопроводности для условий эксплуатации, соответствующих эквивалентной температуре выше 10°C. Для материала “М2” введение коэффициента запаса возможно не потребуется.

**Выводы и рекомендации**

Для повышения эффективности исследований свойств материалов при тепловлажностном старении и снижения коэффициента запаса на старение необходимо:

а) используя вероятностные модели эксплуатации прогнозировать законы распределения температур в заданных диапазонах;

б) определить уровень изменения коэффициента старения исследуемой характеристики материалов;

в) на основе полученных результатов принимать решение либо о введении в конструкцию коэффициентов запаса на старение, либо о корректировке схемы и условий эксплуатации.