

УДК 620.192-67:629.7.01

**Проблема подтверждения
ресурсных характеристик комплектующих систем
космических аппаратов
с длительными сроками функционирования**

Е. С. Переверзев

Институт технічної механіки НАН України та НКАУ, Дніпропетровськ

Надійшла до редакції 10.01.97

Обговорюються методичні питання підтвердження прискореними методами ресурсних показників комплектуючих систем космічних апаратів тривалого функціонування. Приведено наближені вирази для оцінки коефіцієнтів прискорення для типових моделей накопичення пошкоджень, а також співвідношення для розрахунку числа і тривалості форсованих випробувань для підтвердження заданих вимог по надійності.

Известно, что определяющая роль при создании изделий ракетно-космической техники принадлежит испытаниям. Не будем здесь характеризовать сложившуюся и хорошо зарекомендовавшую себя практику отработки образцов ракетной техники. Заметим только, что для ракетных систем ввиду малого времени работы в полете ресурсные характеристики не имеют преобладающего значения (исключая длительные сроки хранения и боевого дежурства). Однако для космических аппаратов большое значение приобретает отработка ресурсных характеристик, связанных с подтверждением способности как всего аппарата, так и его узлов длительно функционировать в космическом пространстве.

Совершенно новое звучание эти вопросы приобретают для вновь создаваемых КА, сроки активного существования которых существенно увеличиваются, что вызывает необходимость пересмотра программы отработки КА и включение в нее ресурсных испытаний как составной части. Это связано с

тем, что длительное воздействие различных факторов в процессе функционирования КА может привести к накоплению повреждений, и как следствие, к снижению работоспособности отдельных элементов, изменению физико-механических, электрических, оптических и других характеристик (Малинский и др., 1993).

Следует заметить, что даже за счет длительного естественного старения под действием факторов окружающей среды могут существенно измениться физико-механические свойства материалов и функциональные параметры элементов. Поэтому весьма актуальна проблема подтверждения влияния длительного воздействия факторов космического пространства и условий функционирования КА при их наземной отработке. Актуальность этой проблемы возрастает с увеличением требуемых сроков активного существования. Сложность указанной проблемы состоит в невозможности полностью имитировать условия функционирования аппарата в космическом пространстве. Но даже при умении

имитировать действие факторов космического пространства, проведение испытаний при значениях воздействий, равных эксплуатационным, в связи с большими требуемыми сроками функционирования КА значительно увеличили бы сроки их отработки. Поэтому возникает задача подтверждения заданного срока функционирования КА за время, в несколько раз меньшее, требуемого срока функционирования. Сокращение длительности испытаний обычно достигается за счет уменьшения календарного срока при сохранении машинного времени, методов прогнозирования, увеличения частоты нагружения. Но наиболее эффективным способом сокращения длительности испытаний является форсирование нагрузок, т. е. проведение испытаний при нагрузках, превышающих эксплуатационные.

Проблема проведения форсированных ускоренных испытаний является весьма сложной и включает в себя большой круг как организационно-технических, так и научно-методических задач, и требует, прежде всего создания соответствующей экспериментальной базы, позволяющей длительное время имитировать действие факторов космического пространства. Среди научно-методических задач можно указать на изучение влияния факторов космического пространства, определение характеристик режимов работы основных элементов, разработку методов пересчета результатов испытаний с форсированного режима на эксплуатационный, методов оценки погрешности таких пересчетов, обоснование критериев эквивалентности форсированного и эксплуатационного режимов, обоснование числа и длительности ускоренных испытаний для подтверждения заданных требований по надежности и т. п.

Остановимся кратко на некоторых из них. Один из основных вопросов — выбор критерия эквивалентности форсированного и номинального режимов испытаний. Наиболее просто эта задача решается, когда удастся найти конкретный параметр, по изменению которого можно судить о степени износа, деградации или старости элемента. В этом случае режим ускоренных испытаний выбирается из равенства значений этого параметра в форсированных и эксплуатационных условиях. При комплексном воздействии факторов и действии нескольких механизмов отказов по изменению одного конкретного параметра нельзя оценить величину накопленных повреждений. В этом случае необходимо вводить обобщенные критерии, которые являются функциями параметров окружающей среды, режимов нагружения и внутренних свойств элементов. Среди обобщенных критериев можно указать на линейный принцип накопления повреждений,

термодинамические критерии, в частности энтропийный, метод равных вероятностей Седякина и др.

Наиболее часто при назначении режимов ускоренных испытаний используется линейный принцип накопления повреждений, в соответствии с которым при заданной нагрузке скорость накопления повреждений постоянная во времени и не зависит от истории нагружения. В момент отказа относительная величина накопленных повреждений равна единице. Основной принцип, которым следует руководствоваться при выборе режимов ускоренных испытаний, состоит в том, что эти режимы не должны приводить к возникновению новых механизмов отказов и протеканию физико-механических процессов, не свойственных функционированию аппарата в нормальных эксплуатационных условиях. В связи с этим устанавливаются границы области допустимого форсирования, то есть предельные нагрузки, выше которых нельзя подвергать системы в процессе ускоренных испытаний.

Приведем некоторые рекомендации по выбору предельных значений нагрузок. При комплексном воздействии факторов и при наличии нескольких механизмов накоплений, необходимо чтобы число механизмов и их виды оставались неизменными в форсированных и эксплуатационных условиях. Кроме того, значения коэффициентов, определяющих скорости накопления повреждений, должны быть одними и теми же при номинальном и форсированном режимах нагружения. Важным также является установление элементов, для подтверждения работоспособности которых нужно производить обоснование режимов форсированных испытаний. Одним из важнейших параметров при назначении режимов форсированных испытаний является коэффициент ускорения, под которым понимается отношение длительности испытаний в номинальных условиях к длительности испытаний в форсированном режиме. Существует несколько способов определения коэффициентов ускорения.

1. По результатам испытаний — как отношение времен в номинальном и форсированном режимах для приведения узлов в одинаковое состояние, например до отказа.
2. Экспертный метод.
3. Расчетный метод, если известны физические механизмы отказов или модель накопления повреждений.

Приведем приближенные выражения для определения коэффициентов ускорения для известных моделей накопления повреждений. При тепловом старении, если скорость деградационных процессов

описывается законом Аррениуса, коэффициент ускорения k рассчитывается по формуле

$$k = \exp \left[\frac{E}{RT_0} \left(\frac{T_\phi - T_0}{T_\phi} \right) \right],$$

где E — энергия активации старения; T_0 — эквивалентная температура эксплуатации; T_ϕ — температура форсированных испытаний; R — универсальная постоянная. При проведении расчетов полагают $R = 2 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$.

Если при проведении испытаний в климатической камере учитывают влияние влажности, то

$$k = \exp \left[\frac{E}{RT_0} \left(\frac{T_\phi - T_0}{T_\phi} \right) \right] \left(\frac{\varphi_\phi}{\varphi_0} \right)^m,$$

где φ_ϕ, φ_0 — значения относительной влажности соответственно при ускоренных испытаниях и в эксплуатационных условиях; m — эмпирический коэффициент.

Для элементов, подверженных воздействию постоянным растягивающим напряжением в случае, когда накопление повреждений происходит в соответствии с термофлюктуационной теорией, коэффициент k определяется по формуле

$$k = \exp \left[\frac{U}{RT} \left(\frac{\sigma_\phi - \sigma_0}{\sigma_*} \right) \right].$$

Здесь σ_ϕ, σ_0 — напряжения, соответственно возникающие в элементе в процессе ускоренных испытаний и в эксплуатационных условиях; σ_* — предельное напряжение, при котором происходит разрушение; U — энергия активации разрушения.

Если в процессе функционирования элемент КА подвержен воздействию избыточного давления, то

$$k = \exp \left[\frac{U}{RT} \left(\frac{q_\phi - q_0}{q_*} \right) \right],$$

где q_ϕ — значение давления при проведении форсированных испытаний; q_0 — значение давления в эксплуатационных условиях; q_* — значение давления, при котором происходит разрушение.

При виброиспытаниях коэффициент ускорения находится так

$$k = \frac{\omega_\phi}{\omega_0} \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_0} \right)^m.$$

Здесь σ_ϕ, ω_ϕ — амплитуда напряжений и частота колебаний форсированных испытаний; σ_0, ω_0 — амплитуда напряжений и частота колебаний в эксплуатационных условиях; m — параметр кривой усталости.

При $\omega_\phi = \omega_0$ имеем

$$k = \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_0} \right)^m.$$

Если эксплуатационный режим нагружения имеет r ступеней, на каждой из которых в течение времени t_i действует напряжение σ_i с частотой ω_i , то продолжительность эквивалентного гармонического нагружения на частоте ω_ϕ равна

$$t_\phi = \frac{\sum_{i=1}^r \sigma_{i0}^m t_{i0} \omega_{i0}}{\sigma_\phi^m \omega_\phi}.$$

Если при ступенчатом нагружении изменяется только амплитуда, то

$$t_\phi = \frac{\sum_{i=1}^r \sigma_{i0}^m t_{i0}}{\sigma_\phi^m}.$$

Если при форсированных испытаниях используется l ступеней нагружения, то режим форсирования выбирается из равенства

$$\sum_{j=1}^l \omega_{j\phi} \sigma_{j\phi}^m t_{j\phi} = \sum_{i=1}^r \omega_{i0} \sigma_{i0}^m t_{i0}.$$

Если интенсивность нагружения выражать в перегрузках n , то

$$\sum_{j=1}^l \omega_{j\phi} n_{j\phi}^m t_{j\phi} = \sum_{i=1}^r \omega_{i0} n_{i0}^m t_{i0}.$$

Если число ступеней при обоих режимах нагружения одинаковое, а амплитуда эквивалентного нагружения на каждой ступени увеличивается в η раз, то

$$\eta^m \sum_{j=1}^r \omega_{j\phi} n_{j\phi}^m t_{j\phi} = \sum_{i=1}^r \omega_{i0} n_{i0}^m t_{i0}.$$

Если испытания для всех ступеней проводятся на одной частоте, то

$$\eta^m \sum_{j=1}^r n_{j\phi}^m t_{j\phi} = \sum_{i=1}^r n_{i0}^m t_{i0}.$$

При форсировании электрическим током

$$k = \left(\frac{I_\phi}{I_0} \right)^m,$$

где I_ϕ, I_0 — значения плотности тока соответственно в форсированном и эксплуатационном режимах, m — эмпирическая константа.

При форсировании электрическим напряжением

$$k = \exp[\alpha(U_\phi - U_0)],$$

где U_ϕ, U_0 — значения электрического напряжения в форсированном и эксплуатационном режимах, α — эмпирическая константа.

При форсированных испытаниях зубчатых пере-

* 1 кал = 4.1868 Дж

дач коэффициент ускорения вычисляется по формуле

$$k = \left(\frac{n_{\Phi}}{n_0} \right)^m.$$

Здесь m — эмпирический коэффициент; n_{Φ} , n_0 — обороты вращения в форсированном и номинальном режимах за единицу времени.

При одновременном форсировании по r факторам коэффициент ускорения рассчитывается по приближенной формуле

$$k = \prod_{i=1}^r k_i,$$

где k_i — коэффициент ускорения по i -му фактору.

Для узлов, состоящих из нескольких элементов, коэффициент ускорения полагают равным либо минимальному значению коэффициента ускорения для составляющих элементов, либо вычисляют так:

$$k = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} k_{ij},$$

где k_{ij} — коэффициент ускорения j -го механизма отказа i -го элемента; α_{ij} — весовой коэффициент, характеризующий относительную долю вероятности отказа устройства из-за отказа i -го элемента вследствие развития j -го механизма; r — число механизмов отказов; n — число элементов.

После того как установлено значение коэффициента ускорения, длительность форсированных испытаний на долговечность равна

$$t_{\Phi} = \eta \frac{t_0}{k},$$

где η — эмпирический коэффициент, играющий роль коэффициента запаса. Рекомендуемые значения коэффициента $\eta = 1.25$ — 1.5 . Число испытаний устанавливается экспертным путем.

Приведем соотношения, которые позволяют назначать число ускоренных испытаний и их длительность для подтверждения нижней доверительной вероятности $P_{\text{тр}}$ с заданной доверительной вероятностью γ . Будем рассматривать системы, результаты испытаний которых оцениваются как успешные или неуспешные.

Для оценки показателей надежности в этом случае используется биномиальная модель отказов. Для сокращения числа контрольных ускоренных испытаний предлагается использовать априорную информацию о виде закона распределения времени безотказной работы и значении коэффициента вариации наработки до отказа (Переверзев, 1990, 1995).

При выводе соотношений предполагалось, что закон распределения наработки до отказа в форсированном и эксплуатационном режимах не изменя-

ет своего вида и остается неизменным значение коэффициента вариации времени безотказной работы. Приведем такие соотношения для случая, когда наработка до отказа описывается распределением Вейбулла. Это распределение нами выбрано потому, что оно является предельным распределением минимальных значений и из физических соображений лучше всех распределений подходит для описания наработок до отказа. Кроме того, из него, как частный случай, следует экспоненциальное распределение. Для распределения Вейбулла выражения для определения числа и длительности испытаний принимают наиболее простой вид и удобны для уяснения физической сущности входящих в них параметров, а вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется следующим выражением:

$$P(t) = \exp[-\lambda(t - t_*)^{\beta}],$$

где λ , β , t_* — параметры распределения. Параметр t_* представляет время, в течение которого разработчик гарантирует безотказную работу узла.

Коэффициент вариации

$$v = \frac{\sigma}{T_0}$$

наработки до отказа следующим образом выражается через параметры распределения:

$$v = \frac{\left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/\beta} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^{1/2}}{t_* + \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{1/\beta} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)},$$

где $\Gamma(\dots)$ — гамма функция; σ , T_0 — соответственно среднее квадратичное отклонение и математическое ожидание времени безотказной работы. Полагаются известными величины t_* и v .

Число n и длительность ускоренных безотказных испытаний t_y определяют из соотношений

$$\begin{aligned} n &\geq \frac{\ln(1 - \gamma)}{\kappa^{\beta} \ln P_{\text{тр}}}, \\ \kappa &= \frac{kt_y - t_*}{t_0 - t_*}, \\ t_y &\geq \frac{1}{k} \left\{ t_* + (t_0 - t_*) \left[\frac{\ln(1 - \gamma)}{n \ln P_{\text{тр}}} \right]^{1/\beta} \right\}, \end{aligned}$$

где $P_{\text{тр}}$ — требуемое значение нижней границы вероятности безотказной работы; γ — уровень доверительной вероятности; k — коэффициент ускорения; t_0 — требуемая длительность функционирования узла.

При $t_* = 0$ коэффициент вариации определяется из соотношения

$$v = \frac{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^{1/2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$$

Из этого соотношения, зная коэффициент вариации v , определяется значение параметра β .

Число и длительность ускоренных ресурсных испытаний находят из соотношений

$$n \geq \frac{\ln(1 - \gamma)}{\left(k \frac{t_y}{t_0} \right)^\beta \ln P_{\text{тр}}},$$

$$t_y \geq \frac{t_0}{k} \left[\frac{\ln(1 - \gamma)}{n \ln P_{\text{тр}}} \right]^{1/\beta},$$

Для r раз резервированного устройства имеем

$$n \geq \frac{\ln(1 - \gamma)}{r k^\beta \ln [1 - (1 - P_{\text{тр}})^{1/r}]},$$

$$t_y \geq \frac{1}{k} \left\{ t_* + (t_0 - t_*) \left[\frac{\ln(1 - \gamma)}{r n \ln [1 - (1 - P_{\text{тр}})^{1/r}]} \right]^{1/\beta} \right\}.$$

Аналогичные соотношения можно привести для наиболее часто употребляемых распределений наработки до отказа: нормального, нормально-логарифмического, равномерного, двойного экспоненциального, гамма-распределения, диффузионного и др. При неизвестном виде закона распределения можно использовать неравенство Чебышева.

Заметим, что при $k = 1$ получим соотношения для ресурсных испытаний в номинальном режиме.

После проведения ускоренных испытаний все системы и узлы подвергаются типовым испытаниям на проверку работоспособности и соответствия значений контролируемых параметров требованиям технического задания. Заметим, что ускоренные испытания следует рассматривать прежде всего как инструмент для подтверждения требуемых ресурсных показателей или метод контроля выполнения заданных требований по ресурсу комплектующих систем. Для обеспечения же требуемых значений ресурсных характеристик КА с длительными сроками функционирования необходимо решить целый ряд задач, к которым можно отнести следующие:

- создание новой элементной базы с интенсивностью отказов, по крайней мере на порядок ниже интенсивностей отказов существующей элементной базы;
- разработка методов выявления слабейших элементов, определяющих срок функционирования КА;
- разработка методов распределения требований к ресурсным характеристикам комплектующих элементов и систем;

- разработка методов прогнозирования ресурсных характеристик комплектующих элементов;
- разработка достоверных методов расчета срока активного существования КА и обоснование рационального срока функционирования КА;
- разработка режимов приработочных и тренировочных испытаний, как отдельных приборов и узлов, так и систем КА;
- выбор щадящих режимов нагружения комплектующих элементов;
- разработка систем технической диагностики на основе неразрушающих методов контроля;
- обоснование рациональных схем резервирования;
- разработка рациональной системы технического обслуживания;
- разработка системы обеспечения высокого качества изготовления, монтажа и сборки комплектующих элементов и систем.

Как уже отмечалось, проблема ускоренных испытаний включает в себя большой круг задач, их нужно решать постепенно, а главное — необходимо начинать ускоренные испытания хотя бы на воздействия тепловых, механических и электрических нагрузок. Даже такие испытания позволят для некоторых элементов и систем выявить слабейшие места и выработать единый методический подход к выбору режимов ускоренных испытаний, обоснованию их числа и длительности. Затем по мере накопления опыта проведения ускоренных испытаний будет улучшаться согласие между результатами ускоренных и натуральных испытаний. По мере развития экспериментальной базы будет увеличиваться число факторов, на воздействия которых будут проводиться ускоренные испытания.

Малинский В. Д., Бегларян В. Х., Дубицкий Л. Г. Испытания аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов. — Справочник. — М.: Машиностроение, 1993.— 576 с.

Переверзев Е. С. Надежность и испытания технических систем. — Киев: Наук. думка, 1990.—328 с.

Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995.—358 с.

PROBLEM ON THE CONFIRMATION OF CHARACTERISTIC LIFE FOR SPACE VEHICLE COMPONENT SYSTEMS OF A LONG-TERM FUNCTIONING

E. S. Pereverzev

Methodological problems of confirming by express methods the characteristic life of space vehicle component systems of long-term functioning are discussed. Approximate expressions are presented for estimating the acceleration coefficients for standard models of failure accumulation, given also are relations for calculating the number and duration of express tests which are to confirm the prescribed requirements on reliability.