

СПОСОБЫ ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСА РДТТ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

На основании обобщения и анализа обширного опыта работ ГП "КБ "Южное" по созданию РДТТ различных типов установлены зависимости сроков их эксплуатации от основных действующих факторов. Рассмотрены способы проектной оценки ресурса работоспособности вновь разрабатываемых РДТТ на основе методов учета разрушающих напряжений и накопленных повреждений (разрушающих деформаций). Предложен алгоритм проектной оценки ресурса РДТТ и выработаны рекомендации по обеспечению длительной эксплуатации двигателей.

На підставі узагальнення й аналізу великого досвіду робіт ДП "КБ "Південне" щодо створення РДТТ різних типів встановлено залежності строків їх експлуатації від основних діючих факторів. Розглянуто способи проектного оцінювання ресурсу працездатності новорозроблюваних РДТТ на основі методів обліку руйнівних напруг і нагромаджених пошкоджень (руйнівних деформацій). Запропоновано алгоритм проектного оцінювання ресурсу РДТТ і вироблено рекомендації щодо забезпечення тривалої експлуатації двигунів.

Based on generalization and analysis of Yuzhnoye SDO's extensive experience of developing the SRM of various types, the dependences of their service life on main operative factors are determined. The techniques of engineering evaluation of operability margin of newly developed SRM are considered based on the methods of taking into account the breaking stresses and accumulation of damages (breaking deformations). An algorithm of engineering evaluation of SRM service life is proposed and the recommendations were elaborated to ensure long operation of the motors.

Введение

Одной из важнейших характеристик ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) является срок его надежной эксплуатации (ресурс работоспособности), в течение которого обеспечивается выполнение предъявляемых к нему требований. Гарантийный срок эксплуатации (ГСЭ) РДТТ назначается, как правило, заказчиком, затем определяется разработчиком двигателя расчетным путем на этапе проектирования и подтверждается экспериментально при отработке РДТТ.

Следует отметить, что возможное снижение фактического ресурса работоспособности двигателя по сравнению с назначенным проектным сроком может потребовать доработки конструкции РДТТ, либо его замены. Реализация этих мер связана со значительными временными, материальными и финансовыми затратами [1].

Проблема достоверного определения ресурса РДТТ стала актуальной в 70–80-е гг. XX века, когда начали использовать крупногабаритные РДТТ для МБР и истекли первоначально установленные сроки эксплуатации 7–7,5 лет. Проведенные исследова-

ния показали [2, 3], что ресурс работоспособности РДТТ зависит, в основном, от работоспособности зарядов и характеристик топлив.

В настоящее время в крупногабаритных РДТТ в основном применяются смесевые твердые топлива, состоящие из окислителя, металлического горючего и горючесвязывающего, а также небольшого количества (1–3 %) технологических добавок различного назначения.

Большое разнообразие применяемых компонентов топлив и их свойств приводит к соответствующим отличиям в степенях изменения прочностных характеристик топлив при длительном хранении. В связи с этим при проектной оценке срока эксплуатации (ресурса) РДТТ возникает необходимость в анализе следующей информации:

- опытных данных по срокам эксплуатации однотипных двигателей и топлив;
- результатов оценки влияния особенностей эксплуатации данного типа РДТТ на ресурс работы;
- результатов лабораторных исследований по определению параметров изменения характеристик данного топлива при длительном хранении.

На основании обобщения и анализа данной информации разрабатывается методология оценки ресурса работоспособности двигателя. При этом рассматривают два подхода к оценке работоспособности РДТТ:

- метод разрушающих напряжений;
- метод накопленных повреждений (разрушающих деформаций).

Постановка задачи

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что срок эксплуатации РДТТ зависит не только от значений действующих нагрузок, но и от изменяющихся со временем свойств материалов, прежде всего твердых топлив [2–4].

Изменение свойств материалов во времени в результате процесса их старения может происходить за счет действия различных факторов при хранении и эксплуатации: температуры материала (тепловое старение), влажности, миграции компонентов материалов, газовыделений из материалов, нагрузок.

Эти факторы в наибольшей степени влияют на изменение свойств полимерных материалов, резин и твердых ракетных топлив. Топлива весьма чувствительны к воздействию этих факторов из-за их сложного химического состава, включающего окислительные элементы и свободные радикалы. Это приводит к протеканию остаточных химических реакций между компонентами топлива, изменению структуры топлива и его физико-механических свойств. Кроме того, под действием нагрузок происходит нарушение внутренних связей в материале и накопление этих микрповреждений.

В связи с этим достоверное определение ресурса двигателя на начальном (проектном) этапе его разработки имеет важное практическое значение, так как обеспечивает возможность своевременного внесения необходимых корректировок в проектно-конструкторские решения по РДТТ.

С учетом изложенного актуальной научно-практической задачей является анализ экспериментальных данных, обобщение

способов проектной оценки ресурса работоспособности РДТТ и выбор оптимальной методологии его расчета.

Экспериментальные данные

Задача обеспечения длительной эксплуатации РДТТ МБР для КБ "Южное" стала особенно актуальной в конце 90-х гг. XX века – после истечения первоначально установленного срока эксплуатации 10 лет для крупногабаритных РДТТ изделий 15Ж60 и 15Ж61 (11,5 лет для зарядов РДТТ) [5, 6].

В результате исследований [2, 3] установлено, что срок эксплуатации РДТТ в наибольшей степени зависит от ресурса работоспособности заряда твердого топлива, зависящего, в свою очередь, от типа топлива.

В РДТТ ракет 15Ж60 и 15Ж61 применялись различные типы топлив [5, 8]:

- Т-9БК и Опал – на первых ступенях;
- Старт – на вторых ступенях;
- АП – на третьих ступенях.

Эти топлива имеют различную чувствительность к воздействию температур и влажности при хранении, а также различную склонность к газовыделениям из объема топлива. Следовательно, при одинаковых условиях хранения и эксплуатации эти топлива в разной степени изменяют (ухудшают) свои первоначальные прочностные свойства со временем, т.е. имеют разный ресурс работоспособности [7, 8].

Топлива типа Т-9БК (15Ж61) и Опал (15Ж60) являются относительно стабильными и сохраняют свою работоспособность в двигателях в условиях эксплуатации, оговоренных техническими заданиями, в течение более чем 15 лет. Расчетные оценки показывают, что этот срок может превышать 20 лет. Так, РДТТ ракеты "Тополь" (Россия) на топливах типа Опал успешно испытаны после 23 лет хранения в штатных условиях [9].

Топлива типа Старт и, особенно, типа АП являются более чувствительными к факторам старения, в основном, из-за повышенной их чувствительности к увлажнению, а также из-за относительно высокой склонности к газовыделениям из объема заряда.

Расчетные оценки допустимого срока эксплуатации зарядов из топлив типа АП и Старт меньше, чем для топлив типа Т-9БК и Опал. Например, по данным США [2, 3], ресурс топлива, однотипного с топливом АП (в части активного металлического горючего), может составлять до 7,5 лет вследствие повышенного газовыделения из топлива и соответствующего ухудшения прочностных свойств. Однако ресурс таких топлив может быть повышен (до 12 лет и более) за счет введения в состав топлив специальных стабилизаторов-поглотителей выделяющихся из топлива газов.

Следовательно, при выборе типа топлива для двигателя необходим поиск компромисса между высокой энергетикой топлива и возможным сроком его эксплуатации.

Алгоритм проектной оценки ресурса

Приведенные материалы позволяют предложить следующий алгоритм проектной оценки ресурса работоспособности твердых ракетных топлив и прогнозируемых сроков эксплуатации двигателей:

- обобщение информации и анализ сроков эксплуатации однотипных РДТТ;
- определение параметров чувствительности топлива к воздействующим факторам (энергии активации процесса старения и др.);
- анализ запасов прочности по напряжениям и деформациям по результатам прочностного расчета;
- оценка ресурса работоспособности по методу разрушающих напряжений;
- оценка уровня накопленных повреждений заряда при хранении и эксплуатации;
- оценка ресурса по методу накопленных повреждений;
- обобщенная оценка ресурса.

Методология оценки ресурса работоспособности

В практике работ по определению ресурса топлива и срока эксплуатации РДТТ основное внимание обычно уделяют следующим факторам:

- увлажнению;
- миграции компонентов;
- газовыделению;
- тепловому старению;

– нагрузкам.

Влияние увлажнения предотвращается применением специальной защиты в конструкции двигателя, например слоем барьерной резины, а также условиями хранения.

Влияние миграционных процессов на границе топливо-теплозащита стабилизируется обычно к первому году после изготовления заряда и в дальнейшем практически не изменяется.

Влияние газовыделений из заряда зависит, в основном, от состава топлива, температуры и времени хранения. Это влияние может быть снижено введением стабилизаторов в топливо.

По результатам лабораторных исследований устанавливается зависимость физико-механических характеристик топлива от этих влияющих факторов. Степень их влияния учитывается соответствующими коэффициентами при прочностных расчетах.

Тепловое старение, приводящее к изменению прочности топлива при длительном хранении, является одним из основных факторов, определяющих работоспособность заряда.

Влияние теплового старения на прочностные свойства топлива можно рассмотреть на основе использования зависимости Аррениуса для скоростей реакций в полимерах [9]:

$$V = K \exp(-U / RT), \quad (1)$$

где V – скорость реакции (например, изменение прочностной характеристики X);

K – коэффициент скорости реакции (учитывает свойства материала);

U – энергия активации процесса (теплового старения);

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Значения параметров K и U определяются специальными лабораторными исследованиями топлива. Энергия активации U является важнейшей характеристикой процесса теплового старения.

Приведенная выше формула является основой для получения базовой зависимости для проведения ускоренных, имитирующих испытаний теплового старения на

основе принципа температурно-временной эквивалентности [6, 7]:

$$t_y = t_0 \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2)$$

где t_y и t_0 – время ускоренного и полного режимов; T_y и T_0 – абсолютная температура при ускоренном и полном (штатном) режимах.

В качестве T_0 принимается средняя или эквивалентная температура в процессе хранения/эксплуатации.

Например, при $T_0=273+15=288$ К и $T_y=273+60=333$ К и при $U=20$ ккал/моль получим $K_t=t_y/t_0=0,0089$, т.е. значение временного ускорения составит ~ 100 . Следовательно, при заданном сроке эксплуатации 10 лет длительность имитирующего (ускоренного) режима может составить 36,5 сут.

При $U=30$ ккал/моль ускорение будет равно ~ 1000 .

При хранении и эксплуатации заряд в составе двигателя подвергается воздействию различных нагрузок – массовых, транспортировочных, при погрузочно-разгрузочных работах, вследствие температурных перепадов, сил внутрикамерного давления и др.

Эти нагрузки вызывают напряжения и деформации в материалах, которые могут приводить к повреждениям либо разрушениям (в случае их превышения относительно прочности материала).

В связи с этим важной задачей является определение прочности материала при длительном хранении (долговременной прочности).

Исходя из вышеприведенной зависимости Аррениуса (1) процесс изменения, например, начальной прочности топлива во времени можно записать в следующей форме:

$$\ln \sigma(t) = \ln \sigma_0 - K_\sigma t \exp(-U/RT)$$

или

$$\ln \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = -[K_\sigma \exp(-U/RT)] t_0,$$

где σ_0 и $\sigma(t)$ – начальная прочность и прочность в момент времени t (долговременная прочность) соответственно.

Отсюда следует, что прочность топлива снижается при хранении по логарифмическому закону (рис. 1).

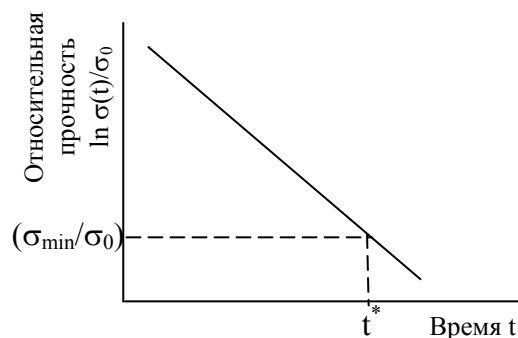


Рис. 1. Изменение прочности материала по времени

Данная зависимость позволяет оценить значение времени t^* до достижения минимально допустимой прочности материала σ_{\min} .

В практике работ используют следующее выражение для определения долговременной прочности во времени:

$$t = B \sigma^{-m}$$

или

$$\lg \sigma = \frac{1}{m} \lg \frac{B}{t},$$

где B и m – коэффициенты, определяемые экспериментально на образцах топлива.

В качестве примера на рис. 2 приведено изменение относительной долговременной прочности топлива типа Т9БК двигателя 15Д206 ракеты 15Ж61.

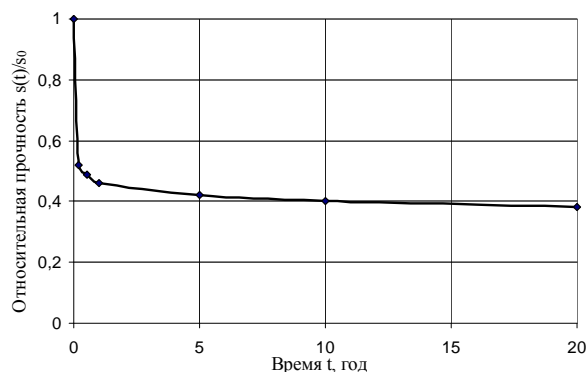


Рис. 2. Изменение долговременной прочности топлива Т9БК во времени

Из приведенных данных следует, что прочность топлива стабилизировалась к первому году после изготовления и далее снижается с малым отрицательным градиентом.

При проектной оценке ресурса топлива и прогноза срока эксплуатации РДТТ можно использовать два основных метода: разрушающих напряжений и разрушающих деформаций (накопленных повреждений) [2–4].

1. Метод разрушающих напряжений основан на сравнении минимальных прочностных характеристик топлива с максимальными напряжениями и деформациями в заряде при хранении и эксплуатации.

При этом определяются запасы прочности по напряжениям и деформациям к заданному сроку эксплуатации:

$$\eta_{\sigma} = \sigma_T^{\min} / \sigma_{\text{экр}}^{\max};$$

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_T^{\min}}{\varepsilon_{\text{экр}}^{\max}},$$

где η_{σ} и η_{ε} – минимальные коэффициенты запаса прочности по напряжениям σ и относительным деформациям ε ,

σ_T^{\min} и ε_T^{\min} – минимальные прочность и относительное удлинение топлива соответственно;

$\sigma_{\text{экр}}^{\max}$ и $\varepsilon_{\text{экр}}^{\max}$ – максимальные эквивалентные напряжения и деформация.

Значения σ_T^{\min} и ε_T^{\min} определяются на образцах топлива с учетом их изменения (теплового старения) к заданному сроку эксплуатации.

Эквивалентные напряжения и деформации $\sigma_{\text{экр}}^{\max}$ и $\varepsilon_{\text{экр}}^{\max}$ определяются прочностным расчетом как результирующие от воздействия различных видов нормальных и касательных нагрузок.

Работоспособность заряда обеспечивается при выполнении условий:

$$\eta_{\sigma} \geq 1;$$

$$\eta_{\varepsilon} \geq 1.$$

Полученные при этом запасы прочности к заданному гарантийному сроку позволяют оценить запас времени эксплуатации (возможный срок продления эксплуатации):

$$\tau_0^* = \tau_0 \eta \frac{K_{CT}(\tau_0^*)}{K_{CT}(\tau_0)},$$

где τ_0 и τ_0^* – установленный и возможный продленный срок эксплуатации;

$K_{CT}(\tau_0)$ и $K_{CT}(\tau_0^*)$ – коэффициент старения топлива по прочности (деформации) для τ_0 и τ_0^* ;

η – коэффициент запаса прочности по рассматриваемой характеристике (прочность, деформация).

Минимальные запасы прочности обычно реализуются:

- по напряжениям – на границе зарядкорпус;
- по деформациям – в канале заряда, особенно в вершинах щелей.

Наиболее опасными расчетными случаями для заряда при этом считаются старт ракеты или полет в пассажирском режиме, когда давление в камере двигателя отсутствует или сравнительно невелико по сравнению с установившимся рабочим уровнем.

2. Метод накопленных повреждений основан на определении суммарного повреждения заряда от действия всех предыдущих нагрузок.

Метод накопленных повреждений требует оценки степени повреждения топлива при каждом его нагружении, начиная от изготовления заряда. Метод основывается на использовании интеграла повреждений Бейли [2, 3]:

$$D(t, \tau, \sigma) \int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_i[\sigma_i(t)]},$$

где t – время нагружения нагрузкой σ_i ; τ_i – время до разрушения (долговечность) при действии нагрузки σ_i ; σ_i – напряжение.

При достижении значения интеграла, равного единице, возможно разрушение материала.

Проектная оценка ресурса по методу повреждений может быть выполнена с помощью зависимости

$$D_{\Sigma} = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \sum_1^n D_i,$$

где D_i – оценка степени повреждения заряда в период действия нагрузки σ_i в течение времени t_i .

Условие работоспособности заряда с учетом предыстории всех нагружений можно записать в таком виде:

$$D_{\Sigma} \leq 1.$$

Величина D_i может быть рассчитана по формуле

$$D_i(\sigma_i) = t_i(\sigma_i) / \tau_i(\sigma_i). \quad (1)$$

Тогда проектная оценка ресурса может быть представлена в таком виде:

Операция	$\delta\tau$, ч	T , °С	σ , кгс/см ²	$\tau_{\text{разр}}$, ч	D_i	D_{Σ}
Монтаж, проверка	720	27	0,28	$4,0 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,0002
Транспортировка	0,001	27	2,8	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	0,0092
	0,01	27	2,1	$7,9 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,0222
	0,1	27	1,4	$1,3 \cdot 10^0$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,0301
	119	27	0,4	$4,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,0301
Сборка	120	27	0,3	$4,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,0302
Хранение	4930	27	0,3	$3,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,0315
Другие операции и нагрузки	31341	–	–	–	$6,304 \cdot 10^{-1}$	0,06619
Всего	37230	–	–	–	–	0,6619

Из приведенных данных следует, что суммарное значение накопленных повреждений в расчетном случае составило 66,2 % (уровень снижения прочности заряда). При этом особое внимание следует уделить операциям при транспортировке, в том числе кратковременным.

Соответствующие расчеты для двигателя 15Д206 на топливе Т9БК ракеты 15Ж61 показали, что наибольшее повреждение (~32 %) может быть при длительной транспортировке (~10 лет).

Анализ опытных данных по зависимости (1) показал, что повреждения заряда РДТТ происходят не только при эксплуатации двигателя, но и при кратковременных нестационарных процессах, например при по-

$$t_0^* = t_0 / D_{\Sigma},$$

где t_0 – заданный срок эксплуатации заряда РДТТ.

Реализация данного метода требует учета интервалов времени всех этапов хранения и эксплуатации, действующих напряжений, а также построения зависимости времени разрушения материала под действием данной нагрузки (напряжения)

$$\tau = f(\sigma). \quad (2)$$

Зависимость (2) устанавливается по результатам специальных испытаний на образцах материала.

Пример расчета накопленных повреждений для одного из типов РДТТ [3] приведен в таблице.

грузочно-разгрузочных работах, торможениях и ускорениях при транспортировке и др.

Сравнительный анализ вышеприведенных методов показывает, что оценки сроков эксплуатации по методам напряжений и накопленных повреждений можно рассматривать в качестве максимального и минимального сроков соответственно.

Метод максимальных напряжений разработан в предположении абсолютной упругости топлива и не учитывает его вязкоупругих свойств и повреждений материала. Это приводит к некоторому завышению расчетного запаса прочности, т.е. к его верхней оценке.

Метод повреждений не учитывает упругих свойств материала, что приводит к некоторому занижению расчетного запаса прочности, т.е. к его нижней оценке.

Следовательно, при оценке реального запаса прочности РДТТ целесообразно учитывать результаты расчетов по обоим приведенным методам.

Эти особенности могут быть учтены путем введения корректирующих поправок по результатам экспериментальных исследований.

Заключение

1. Проведенные обобщение и анализ большого опыта работ ГП "КБ "Южное" по созданию РДТТ различных типов показали, что минимальный проектный срок эксплуатации маршевых РДТТ определяется минимальным запасом работоспособности (ресурсом) его комплектующих элементов. К таким критичным элементам прежде всего относятся твердые топлива и заряды вследствие снижения их прочности и работоспособности в процессе старения материалов при длительном хранении.

2. Показано, что при проектной оценке срока эксплуатации разрабатываемого РДТТ необходимо учитывать как влияние максимальных нагрузок (метод максимальных напряжений), так и влияние накопленных повреждений материалов и конструкций (метод накопленных повреждений) на работоспособность элементов РДТТ.

3. Достигнутый уровень ресурса работоспособности современных РДТТ составляет от 15 до 25 лет. Уровень ресурса конкретного типа РДТТ зависит от ряда факторов: химического состава топлива, конструкции заряда и условий эксплуатации (диапазона температур, величин и продолжительности действия нагрузок, увлажнения и других факторов).

Список использованной литературы

1. Шапошников В.А., Уткин В.Ф., Беляев Н.М. Оценка гарантийного срока эксплуатации ракет. – М.: Машиностроение, 1967.
2. Браунинг С.К., Даниэльс А.С. Определение ресурса двигателя третьей ступени

ракеты "Минитмен-II" M57A1 методом тяжелых испытаний // AIAA Paper. – 1976. – № 75 (1283).

3. Андерсон Г.П. Исследование предельного срока хранения РДТТ первой ступени МБР "Минитмен" // РЖ ВТЭ. – 1977. – Сер. Р. – № 1.

4. Самсонов А.Е. Метод определения сроков хранения РДТТ // РЖ АРД. – 1977. – № 10.

5. Призваны временем. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро "Южное" / Под общ. ред. С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2004. – 232 с.

6. Тутов Н.И. О некоторых методических особенностях оценки возможности продления сроков эксплуатации изделий / Н.И. Тутов, Г.Н. Чепель, Н.П. Ушкин, А.С. Кириченко // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГКБ "Южное", 2008. – Вып. 1. – С. 128–145.

7. Кириченко А.С. Проблемы длительной эксплуатации и экспериментального подтверждения ресурса крупногабаритных РДТТ / А.С. Кириченко, Н.И. Тутов, Н.П. Ушкин, В.Н. Шнякин // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГКБ "Южное", 2011. – Вып. 2. – С. 100–111.

8. Кириченко А.С. Повышение эффективности РДТТ на основе разработки и реализации новых проектно-конструкторских решений ГП "КБ "Южное" / А.С. Кириченко, Н.П. Ушкин, Б.И. Кушнир // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Днепропетровск: ГП "КБ "Южное", 2014. – Вып. 1. – С. 89–96.

9. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Краткий курс физической химии. – М.: Металлургия, 1979. – С. 231–236.

Статья поступила 24.01.2015