# Прогнозирование сроков пригодности твердых ракетных топлив методом рентгеновской компьютерной томографии

# Suitability period forecasting of solid rocket by x-ray computed tomography method

### Ляшевский / Lyashevskiy A.

Александр Валерьевич (lyashevskyav@mail.ru) ФКВГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А. Ф.Можайского» МО РФ (ВКА им. А. Ф. Можайского), адъюнкт. г. Санкт-Петербург

### Миронов /Mironov E.

Евгений Андреевич (john682@mail.ru) кандидат технических наук. ВКА им. А. Ф. Можайского, доцент кафедры. г. Санкт-Петербург

## Ведерников / Vedernikov M.

Михаил Васильевич (m-wedernikow@mail.ru) кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ВКА им. А. Ф. Можайского, доцент кафедры. г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: твердое ракетное топливо — solid rocket propellant; ускоренное старение — accelerated ageing; прогнозирование — forecasting; рентгеновская компьютерная томография — x-ray computed tomography.

В данной статье рассматривается возможность прогнозирования сроков пригодности (служебной пригодности) твердых топлив на примере модельного заряда по показателю, определяемому рентгеновским компьютерным томографом. Применение такого показателя позволит для каждого индивидуального заряда назначать и уточнять сроки служебной пригодности в процессе эксплуатации без его разрушения.

In this article suitability period forecasting possibility for solid propellant on the example of a model charge on the indicator determined by the x-ray computed tomography is considered. Application of the indicator allows to appoint and specify suitability period for each individual charge without its destruction.

#### Введение

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что около 90% двигательных установок на существующих и вновь разрабатываемых ракетах являются ракетными двигателями твердого топлива (РДТТ). Ракеты с РДТТ применяются не только во всех классах современных ракет военного назначения, но также исполь-

зуются и в народно-хозяйственных целях, например для борьбы с градом, бурения скважин, зондирования верхних слоев атмосферы и т.д. [1, 2]. В качестве источника энергии в твердотопливных ракетах используются баллиститные и смесевые твердые топлива [3]. Появление смесевых твердых топлив (СТТ) и совершенствование технологии их производства позволило расширить область применения ракет на твердом топливе, и в настоящее время смесевое топливо применяются практически во всех видах твердотопливных ракет [2].

СТТ являются сложными системами, включающими в себя компоненты с различными физико-химическими свойствами. В процессе длительного хранения компоненты твердых топлив претерпевают необратимые изменения, которые сопровождаются снижением или даже потерей необходимых эксплуатационных свойств [4].

Задача обеспечения стабильности СТТ является одной из наиболее сложных на практике. Постоянство физико-химических, физико-механических и баллистических свойств в процессе длительного хранения является важнейшим условием эксплуатационной готовности топлив и оценивается показателем физической стабильности (далее стабильность). Под стабильностью понимают сохранность во времени целостности заряда и комплекса его эксплуатационных характеристик в пределах, определяющих работоспособность и эффективность РДТТ. Таким образом, стабильность определяет сроки служебной пригодности зарядов топлива, в течение которых обеспечивается их надежное функционирование [1].

Правильное определение сроков служебной пригодности СТТ позволяет, с одной стороны, решить вопросы

экономического характера (например, по американским данным увеличение срока службы ракеты «Minuteman» на один год позволило бы получить экономию более 240 млн. долларов), а с другой - обеспечивать гарантированную надежность и эффективность данного вида боеприпаса [1, 2, 4].

Появление новых топлив, усложнение геометрии и увеличение габаритов зарядов, неопределенность условий хранения в районах эксплуатации - все это значительно усложняет оценивание сроков хранения и требует разработки как объективных методов прогнозирования сроков служебной пригодности при выпуске ракет, так и способов уточнения этих сроков в процессе эксплуатации.

# пригодности СТТ

Оценка стабильности предполагает прогнозирование времени сохранения эксплуатационных характеристик топлив в допускаемых пределах в условиях высоких температур, влажности, нагрузок и других факторов. Обычно изменение свойств топлив в эксплуатационном диапазоне температур происходит очень медленно. Поэтому на этапе исследования эксплуатационных свойств зарядов и определения сроков служебной пригодности прибегают к форсированию старения топлива. В качестве фактора, ускоряющего процессы старения, обычно выбирают температуру: проводят старение в форсированных условиях при повышенных температурах, а затем экстраполируют полученные результаты на нормальную или другую интересующую температуру и прогнозируют сроки служебной пригодности при данных условиях хранения [1, 5].

Большое значение имеет выбор эксплуатационных характеристик, по изменению которых в процессе форсированного старения судят о стабильности топлив. К числу таких важнейших эксплуатационных характеристик топлив относятся: энергетические, баллистические и физико-механические характеристики, химический состав, химическая и термическая стабильность, сохранность целостности и формы зарядов. Изменение этих характеристик допустимо в достаточно узких пределах, и по их изменению в процессе старения можно судить об эксплуатационной надежности зарядов и определять сроки их служебной пригодности.

Желательно контролировать изменения всех основных параметров заряда топлива. Однако среди них можно выбрать наиболее чувствительные, критические параметры, значения которых изменяются наиболее существенно, и по ним вести расчет сроков служебной пригодности топлива [1, 5]. Накопленный опыт показывает, что для СТТ критическими являются параметры, характеризующие физико-механические свойства, тогда как все остальные свойства этих топлив изменяются в пределах, не имеющих существенного значения для практики. Поэтому назначение сроков служебной пригодности для СТТ проводится, прежде всего, с учетом изменений физико-механических характеристик (ФМХ): модуля упругости, прочности при растяжении и сжатии, относительной деформации, коэффициента Пуассона.

Как отмечалось выше, физическая природа твердых топлив такова, что даже при соблюдении норм и требований по условиям хранения и эксплуатации изделий в пределах гарантийного срока эксплуатации, и особенно за его пределами, наблюдается старение топлива. Процесс старения заряда ускоряется при длительном нахождении РДТТ в условиях предельно допустимого уровня относительной влажности окружающей среды и максимального положительного значения температуры, особенно при хранении изделий вне герметичного контейнера.

Если при проведении лабораторных исследований Проблема оценки сроков служебной образцов топлива в ходе длительного или ускоренного старения имеется возможность оценки перечисленных выше характеристик, то их определение в процессе эксплуатации ракет с РДТТ традиционными методами неразрушающего контроля либо ограничено по объему заряда, либо вообще невозможно. В связи с этим для зарядов топлива, находящихся длительное время на хранении, в большинстве случаев невозможно уточнение исходного прогноза изменения физико-механических свойств топлив. Таким образом, отсутствие эффективных методов неразрушающего контроля зарядов топлива приводит к очевидному увеличению риска нахождения в эксплуатации неисправных РДТТ с одной стороны, и к необоснованному снижению сроков служебной пригодности исправных РДТТ - с другой.

### Способ оценки сроков служебной пригодности СТТ

Из всего выше сказанного следует, что для прогнозирования и уточнения сроков служебной пригодности необходимо выявить характерный показатель старения топлива - показатель, характеризующий свойство топлива, по изменению значения которого можно определить степень старения. Этот показатель должен:

- иметь связь с ФМХ топлива (модулем упругости, коэффициентом Пуассона);
  - иметь количественную оценку;
  - определяться методом неразрушающего контроля.

Физико-механические свойства топлив как полимеров определяются их структурой, физическим и фазовым состоянием [5]. В этой связи одной из важнейших задач является установление связи между структурой полимера и его физико-механическими свойствами. Это позволит в процессе эксплуатации судить о прочностных характеристиках твердого топлива по результатам исследования его структуры, не прибегая к измерениям механических параметров.

Одной из основных физических характеристик любого материала является его плотность. По ее пространственному распределению можно судить о структуре объекта исследования. Из всех известных методов косвенного

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

определения плотности вещества для решения выше сформулированной задачи наиболее подходит рентгеновская компьютерная томография (РКТ), так как этот метод позволяет получить количественную оценку плотности и ее распределение, а также изображение внутренней структуры объекта. Это происходит за счет проведения сложных вычислительных процедур при анализе первичных данных, получаемых посредством измерения поглощения рентгеновского излучения объектом контроля [6].

Количественная оценка плотности материала с помощью РКТ основана на измерении поглощения рентгеновского излучения различными материалами [7]. Коэффициент ослабления излучения контролируемого материала при заданном значении энергии рентгеновского излучения является функцией, зависящей от плотности материала и его толщины. При постоянной толщине исследуемого объекта коэффициент ослабления зависит только от плотности материала. Вычисляемый коэффициент ослабления отображается в виде так называемых КТ-чисел — условных единиц плотности [7].

Для выявления связи параметров, определяемых РКТ, и ФМХ топлива проведено экспериментальное исследование по ускоренному старению зарядов твердого топлива, с учетом требований ГОСТ на ускоренное старение [8], а также работ Б. Д. Гойхмана [9], Г. В. Манелиса и др., путем воспроизведения тех изменений характеристик изделий, которые ожидаются в процессе хранения и эксплуатации.

В эксперименте в процессе старения контролировалось изменение модуля упругости модельного топлива (далее топливо) и параметров, определяемых РКТ (рис. 1). При исследовании на РКТ не обнаружено значительное влияние старения на количественную характеристику плотности топлива — КТ-число, и одновременно выяв-

лено заметное влияние старения на его стандартное отклонение (SD) (рис.2). По данным дополнительных исследований установлены наиболее вероятные причины изменения SD, его физический смысл, получено соотношение, связывающее модуль упругости и SD, а также выявлена сильная корреляционная связь между E и SD (r=-0.96).

На рис. З представлено изменение структуры заряда через появление областей пониженной плотности и дальнейшее увеличение объема этих областей и их количества при старении. Однако изменение SD выявляется и до появления видимых на РКТ областей, что дает возможность предполагать о начале окислительно-восстановительных процессов в топливе и образовании на границе раздела компонентов твердого топлива продуктов реакции, имеющих другое агрегатное состояние, другую плотность. Эти продукты реакции образуют микроскопические объемы, размеры которых соизмеримы с длиной волны рентгеновского излучения.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют рассматривать возможность прогнозирования изменения свойств СТТ по характерному показателю старения — SD. С этой целью проведены ускоренные испытания по старению топлива при воздействии различных температур для установления характера кинетической зависимости изменения показателя SD при старении, построении кривой прогноза и определении значения показателя SD после заданной продолжительности хранения или продолжительности хранения до достижения заданного значения показателя SD.

В эксперименте фактором старения является температура, так как объекты исследования в основной массе эксплуатируются в герметичных условиях. Испытания проведены в термостате с интервалом температур  $10~\rm K$  при температурах от  $T_1=338~\rm K$  – температура на  $10~\rm K$ 

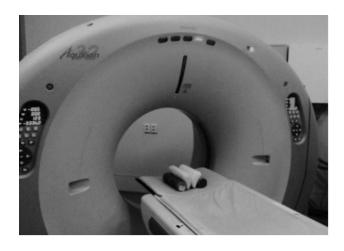


Рис. 1. Модельное топливо в кольие гентри томографа

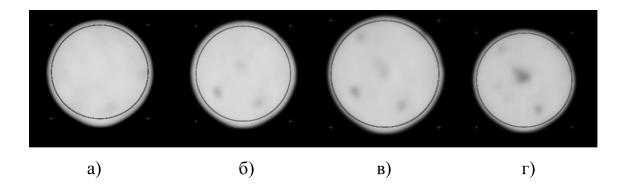


Рис. 2. Изображения среза образца объекта исследования при различном времени старения: а) исходное состояние — SD=20,93; б) 21 сутки — SD=23,84; в) 35 суток — SD=31,11; г) 49 суток — SD=38,21

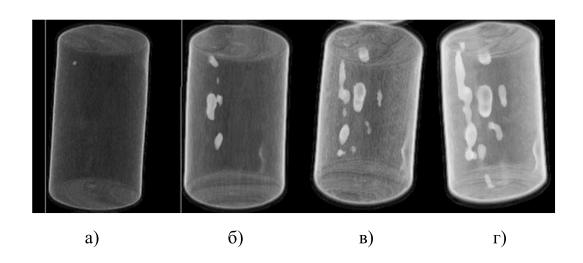


Рис. 3. Трехмерное томографическое изображение образца объекта исследования при различном времени старения: а) исходное состояние; б) 21 сутки; в) 35 суток; г) 49 суток

выше абсолютного максимума температуры хранения топлива, до  $T_5=373~\rm K$  — температура на  $20~\rm K$  ниже той, при которой в образце топлива начинаются физические и химические процессы, не имеющие место при температуре эксплуатации. Продолжительность старения в сутках между съемами образцов для измерения SD при обеих температурах установлена кратной  $7~\rm (в$  соответствии с требованием  $\Gamma$ OCT 9.713-86) и до  $63~\rm суток$  — времени достижения заданного показателя при  $T_1$ .

Нормой для оценки срока служебной пригодности для СТТ является, например, время, в течение которого модуль упругости понизится не более чем на 20% (t) [8]. Так как  $t > t_{\text{табл}}$ , гипотеза о разначений, так как оно сопровождается резким ухудшением эксплуатационной надежности изделий. Поэтому в качестве предельного значения показателя старения показателя — существенным.

выше абсолютного максимума температуры хранения выбрано значение  $SD_{\rm пред}$ , соответствующее значению топлива, до  $T_5=373~{\rm K}$  – температура на  $20~{\rm K}$  ниже той, модуля упругости на  $20~{\rm \%}$  ниже исходного.

Для нового характерного показателя старения SD проведена проверка существенности его изменения. Существенность изменения показателя определялась после каждого съема образцов путем проверки статистических гипотез о равенстве генеральных дисперсий и равенстве средних значений. Проверка гипотезы о равенстве генеральных дисперсий проведена по критерию Фишера, а проверка гипотезы о равенстве средних значений — с помощью критерия Стьюдента (t) [8]. Так как  $t > t_{\text{табл}}$ , гипотеза о равенстве средних значений отвергнута и расхождения между средними значениями считаются неслучайными и обусловленными старением материала при испытаниях, а изменение показателя — существенным.

# АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Для каждого значения показателя  $SD_i$  вычислены температурные коэффициенты скорости процесса (кажущаяся энергия активации процесса)  $E_i$  (ккал/моль) для назначенных температур. Учитывая правомерность применения уравнения Аррениуса для изучения процессов старения, тангенс угла наклона прямой  $\ln t = f(1/T)$  позволяет определить  $E_i$ . Тангенс угла каждой прямой к оси абсцисс определяется по формуле:

$$tg \alpha_{i} = \frac{n \sum_{j=1}^{n} \frac{\ln t_{iT_{j}}}{T_{j}} - \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{T_{j}} \sum_{j=1}^{n} \ln t_{iT_{j}}}{n \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{1}{T_{j}}\right)^{2} - \left(\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{T_{j}}\right)^{2}} \tag{1}$$

где n — число температур испытаний;

 $T_i$  — температура испытаний;

 $t_{iT_j}$ — продолжительность испытаний до достижения каждого показателя  $X_i$  при температуре  $T_j$ .

Коэффициент  $E_i$  для каждого значения показателя  $SD_i$  определяется по формуле  $E_i$ =R·tg $\alpha_i$ .

Вычисленные коэффициенты  $E_i$  — монотонно изменяются, различие между максимальным и минимальным значениями  $E_i$  не более 6,0 ккал/моль [8]. Затем вычислено среднее арифметическое коэффициента  $E_{\rm cp}$ .

Для учета нестационарных температурных условий эксплуатации объектов исследования вводится так называемая эквивалентная температура [9]. Под этой величиной подразумевают такую условную постоянную температуру, при которой в материале за рассматриваемое время происходят те же изменения, что и в нестационарных температурных условиях.

Используя значение  $E_{\rm cp}$ , по номограмме (рис. 4) определена эквивалентная температура  $T_3$  [9].

Если не указан конкретный климатический район предполагаемого хранения объекта испытания, то  $T_3$  устанавливают для климатического района с очень жарким сухим климатом. Если указаны конкретные условия хранения, то  $T_3$  устанавливают для заданных условий.

По вычисленным значениям  $E_{\rm cp}$  и  $T_{\rm 3}$  определяется продолжительность испытаний  $t_{Xi}$   $T_{\rm 3}$  до достижения значений  $SD_{\rm 1}$ ,  $SD_{\rm 2}$ , ... и  $SD_{\rm пред}$  при  $T_{\rm 3}$  для очень жаркого сухого, умеренного климатов и отапливаемого помещения по формуле:

$$t_{X_{i}T_{s}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} t_{iT_{j}} \exp \frac{E_{cp}}{R} \left( \frac{1}{T_{s}} - \frac{1}{T_{j}} \right)$$
 (2)

График зависимости относительного изменения показателя [8] от продолжительности испытания — кривая прогноза, построена с учетом погрешности прогноза

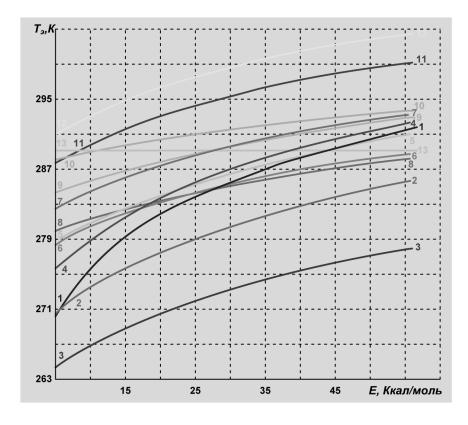
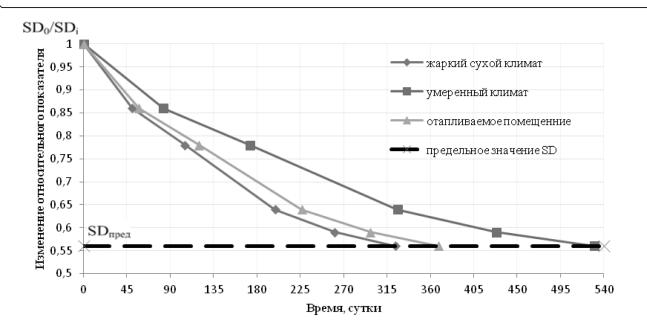


Рис. 4. Зависимость  $T_{\ni}(E)$  для климатических районов: 1 – очень холодный; 2 – холодный; 3 – арктический западный; 4 – умеренно холодный; 5 – умеренный; 6 – умеренно влажный; 7 – умеренно теплый; 8 – умеренно теплый влажный; 9 – умеренно теплый с мягкой зимой; 10 – теплый влажный; 11 – жаркий сухой; 12 – очень жаркий сухой; 13 – отапливаемое хранилище



Puc. 5. Кривая прогноза показателя SD модельного топлива

 $\frac{t_{X_1T_2}}{O}$  (рис.5). Полученная кривая прогноза позволяет определить значение показателя SD после заданной продолжительности хранения или продолжительность хранения до достижения заданного значения показателя SD в условиях эксплуатации.

Приведённые на рис. 5 кривые прогноза для различных климатических зон для модельного топлива с предельным значением показателя  $SD_{\rm пред}$  позволяют принимать решение по дальнейшей эксплуатации объекта исследования, а также производить оценку его поведения в различных условиях эксплуатации.

#### Выводы

Рассмотрен вопрос о возможности прогнозирования срока служебной пригодности СТТ по параметру, определяемому методом РКТ. По итогам экспериментальных исследований получены выводы:

- 1. Показатель SD имеет сильную корреляционную связь с модулем упругости топлива.
- 2. Изменение показателя SD существенно и обусловлено старением топлива, поэтому является характерным показателем старения.
- $3.\,\mathrm{Пo}$  значению SD возможно прогнозирование сроков служебной пригодности топлива, а в процессе эксплуатации инструментальное уточнение прогноза.

Таким образом, использование РКТ и нового характерного показателя старения SD позволяет проводить индивидуальное прогнозирование срока служебной пригодности для каждого отдельно взятого заряда твердого топлива, а также уточнение прогноза в процессе длительной эксплуатации. Уточнение сроков служебной пригодности позволит, с одной стороны, решить вопросы

экономического характера, а с другой – обеспечить требуемый уровень безопасности и эффективности применения данного изделия.

### Литература

- 1. Рогов, Н. Г. Физико-химические свойства порохов и твердых ракетных топлив: Учебное пособие / Н.Г. Рогов, Ю.А. Груздев. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2005. 200 с.
- 2. Фахрутдинов, И. Х. Ракетные двигатели твердого топлива: Учебное пособие / И.Х. Фахрутдинов. М.: Машиностроение, 1981. 223 с.
- 3. Цуцуран, В. И. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив: Учебное пособие / В.И. Цуцуран, Н.В. Петрухин. М.: МО РФ, 1999. 332 с.
- 4. Синюков, А. М. Баллистическая ракета на твердом топливе. / А.М. Синюков, Д.И. Волков. – М.: Воениздат, 1972. – 512 с.
- 5. Кузнецов, Н. П. Испытания ракетных двигателей твердого топлива. В 2 ч. Ч.1: Наземные испытания РДТТ / Н.П. Кузнецов. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 704 с.
- 6. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль и диагностика / В. В. Клюев. Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 2007.—656 с.
- 7. Календер, В. Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображений и области клинического использования: пер. с англ. / В. Календер. М.: Техносфера, 2006. 344 с.
- 8. ГОСТ 9.707-81 ЕСКЗС. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. Введен 1981-12-25. М.: Изд-во стандартов, 1981. 69 с.
- 9. Гойхман, Б. Д. Прогнозирование изменений свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации / Б. Д. Гойхман // Успехи химии. 1980. № 3 (49). С. 1554-1573.