

## ЦЕЛЕСЪОБРАЗНОСТ ЗА УДЪЛЖАВАНЕ НА ЛЕТАТЕЛНАТА ГОДНОСТ НА МОРАЛНО ОСТАРЕЛИ ВЪЗДУХОПЛАВАТЕЛНИ СРЕДСТВА

Светлозар Асенов<sup>1</sup>, Ангелина Чожгова<sup>1</sup>, Николай Загорски, Георги Сотиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Технически университет – София, Филиал Пловдив

<sup>2</sup>Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: nzagorski\_bbc@abv.bg; angelinachozhgova@gmail.com; asenov49fish@abv.bg; office@space.bas.bg

**Ключови думи:** стареещи въздухоплавателни средства, жизнен цикъл, летателна годност, ресурс

**Резюме:** Проблемът с жизнения цикъл на въздухоплавателните средства (ВС) е актуален за съвременната авиация и изисква своевременно разрешаване. Той е особено важен за стареещите самолети и вертолетите. Към момента голям брой различни типове ВС в световен мащаб са отработили заложените ресурси (брой полети, летателни часове) и календарно време (в години). Но поради факта, че тези стареещи самолети и вертолетите практически е невъзможно да бъдат заменени с нови модели, то авиационните органи са принудени да търсят решение на този изключително важен проблем. В доклада са разгледани целесъобразността за удължаване на летателната годност на ВС и възможните проблеми от икономически и организационно-технически характер.

## APPROPRIATE TO EXTEND THE AIRWORTHINESS OF OBSOLETE AIRCRAFT

Svetlozar Asenov<sup>1</sup>, Angelina Chozhgova<sup>1</sup>, Nikolay Zagorski, Georgi Sotirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technical University – Sofia, Branch Plovdiv

<sup>2</sup>Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: asenov49fish@abv.bg; angelinachozhgova@gmail.com; nzagorski\_bbc@abv.bg; office@space.bas.bg

**Keywords:** ageing aircraft, life cycle, airworthiness, resource

**Abstract:** Life-cycle management of resources of aircraft is a current issue for modern aviation, which requires timely resolution. In particular it is highly important for the aging aircraft and helicopters. Nowadays a large number of different types of aircraft all around the world are set exhaust resources (number of flights, flight hours) and calendar time (years). Moreover, since these aging aircraft and helicopters impossible to be replaced with new ones, the aeronautical authorities are forced to cope with this major issue. The paper justified the reasons for extending the airworthiness of the aircraft, as well as outlines the economic, organizational and technical problems in this regard.

### Въведение

Проблемът с ресурса (жизненият цикъл) на конструкциите на въздухоплавателните средства (ВС) е особено актуален за съвременната авиация. Той придобива важно значение за стареещите (продължително експлоатирани) ВС. Към настоящия момент много типове ВС са отработили ресурса, заложен в етапа на проектиране (брой полети, пролетени часове), както и срока на работа (измерван в години). Поради това, че тези ВС практически е невъзможно да бъдат заменени с нови типове, то авиационните власти са принудени да удължават ресурса и срока на работа на стареещите ВС над определеният им ресурс.

По стандартите на Международната организация за гражданска авиация ICAO (International Civil Aviation Organization), така наречени, "стари" и "нови" ВС не съществуват. Основният критерий, свързан с безопасността е летателната им годност, а не тяхната възраст. Пряка зависимост между катастрофите на ВС и възрастта им няма. Статистиката показва, че

броя катастрофи в света за самолети с повече от 50 места, в последните пет години е еднакъв за самолетите на възраст до 5 години и тези с над 30 години [4].

### **Формулиране на проблема**

В момента в САЩ, Европейския съюз (ЕС) и Русия около 70% от ВС, които са в експлоатация, имат срок на служба и ресурс, който е 1,5 - 2,5 пъти над заложените при проектирането. Тези ВС са произведени през 60-те години на миналия век. Проектирани са със срок на работа 20 - 25 години, а към настоящия момент тези срокове са над 50 години (например: Ил-18, Ан-12, Локхид „Електра“, С-130 и др.) [6]. Американският бомбардировач В-52, създаден в края на 40-те и началото на 50-те години на миналия век има вече назначен срок на служба около 80 години. В ЕС за стареещи се считат ВС, срокът на служба на които надхвърля 15 години. В този период могат да се променят характеристиките на конструкцията на планера, електрическите кабели и др.

Погледнато хронологично, проблемите със стареенето на ВС се решават в два периода, разделени от 1988 година, годината на катастрофата със самолета Боинг-737-200 на авиокомпанията „Алоха“. Тогава Авиационното управление по безопасни превози на САЩ (NTSB) определя тази авария като крах на националната система за техническо обслужване на ВС [6]. Под егидата на Федералната авиационна агенция на САЩ (FAA) е организиран международен екип за разглеждане на въпросите на техническото обслужване на ВС. Конгресът на САЩ приема специален акт по авиационна безопасност, който възлага на FAA да разработи дългосрочна изследователска програма по проблемите на стареещите ВС. В работата по програмата взимат участие NASA, Министерството на отбраната (DoD) и много университети [9].

Програмата за поддържане на стареещи ВС обхваща следните въпроси:

- допълнителни прегледи на конструкцията;
- ремонт на конструкциите;
- конструктивни модификации;
- програми за защита от корозия;
- програми за отстраняване (WFD);
- ограничение на ресурсите (LOV).

Извършена е промяна на Нормите FAR 25.571 чрез поправка 96 към FAR 25.571, потвърдена с циркуляр AC 25.571-1C, в която три са най-важните промени:

- изискването да се включат производствените дефекти, като източници на повреди;
- изискване да се началото на прегледите;
- изискване за потвърждаване с достатъчно количество натурни изпитвания на умора.

Доказателство, че повредите от умора на материала (WFD) няма да се реализират в течение на определения технически ресурс на ВС [8].

Усъвършенстването на системата за техническо обслужване и ремонт (ТОР) зависи от степента на взаимодействие между обективно съществуващия процес на промяна на техническото състояние на обекта и процеса на техническата експлоатация, предназначен за поддържане на летателната годност и работоспособност на ВС. Системата за ТОР, основана на предварително определен обем от възстановителни работи, в планирани интервали от време или наработка независимо от фактическото състояние на системата или изделияето, осигурява слабо взаимодействие между посочените процеси за поддържане на необходимото ниво на надеждност на обектите и ефективност на използване.

### **Решения на изследвания проблем**

Инженерният подход при формиране на стратегията за поддържане и възстановяване изправността на стареещите ВС е ограничаване на количеството разглеждани възможни направления и пътища за решаване на тази задача. Тя се състои от множество взаимосвързани елементи, поради което описването на функционалните връзки на този процес се извършва с много уравнения и неравенства със значителен брой променливи. Всичко това налага прилагането на математически модели и съвременни методи за оптимизация, задълбочен анализ на функционалните връзки и алгоритми за оптимизация на процеса [1, 3, 5].

За да се отчетат частните свойства на ефективността на процеса на поддържане на летателната годност на стареещите ВС се въвеждат три вида показатели:  $W$  – целева ефективност;  $S$  – стойност и  $T$  – продължителност. Във всяка сложна организационно-техническа система, за всяка конкретна задача, списъкът на показателите се определя от целта и същността на планираното мероприятие. Например стойността  $S$  може да отразява разходите на материалните ресурси, измерени в натурални единици или разхода на ресурси в

парично изразяване. Показателят на целевата ефективност  $W$  показва смисъла на ефективността на извършеното мероприятие – удължаване на жизнения цикъл на ВС. Показателят на продължителността  $T$  отразява продължителността на цялостния цикъл на определени етапи.

В зависимост от целта на решаваната задача, всеки един от избраните показатели се избира в качеството си на целева функция, а на другите два показателя се налага ограничение.

В най-общ вид се формулират три варианта на задачата за оптимизация, които математически се описват по следния начин:

$$(1) \quad \begin{aligned} W &\rightarrow \max, C \leq C_{\text{план}}, T \leq T_{\text{зад}} \\ C &\rightarrow \min, W \geq W_{\text{план}}, T \leq T_{\text{зад}} \\ T &\rightarrow \min, W \geq W_{\text{план}}, C \leq C_{\text{план}} \end{aligned}$$

където  $C_{\text{план}}$  е обем на планираните ресурси за изпълнение на удължаване на жизнения цикъл на ВС,  $W_{\text{план}}$  – минимално планирана стойност на показателя за целева ефективност,  $T_{\text{зад}}$  – максимално допустима продължителност на изпълнение на процеса, удължаване на жизнения цикъл на ВС.

В зависимост от конкретно поставената цел се решава всеки един от посочените варианти, анализират се резултатите за всеки вариант и се избира пътя и рамката за изпълнение на поставената задача – удължаване на жизнения цикъл на ВС.

Известно е че, всеки образец ВС потенциално притежава определено качество, а процесът на неговото използване в съответствие с неговото предназначение се характеризира с определена ефективност. Поради факта, че ефективността на използване на един образец ВС съществено зависи от неговите технически характеристики, най-целесъобразно е за количествена оценка на ВС с удължен ресурс да се използва – коефициент на ефективност на възстановяване  $K_{\text{ев}}$ , който се определя от израза:

$$(2) \quad K_{\text{ев}} = \frac{\Delta K_M}{\Delta K_{\text{п}}}$$

където  $K_{\text{ев}}$  е коефициент на ефективност на мероприятията за удължаване на ресурса на ВС,  $\Delta K_M$  – прираст на интегралния показател на качеството на базовия образец ВС за сметка на предполагаемите мероприятия за удължаване на ресурса на ВС,  $\Delta K_{\text{п}}$  – разсъгласуване на интегралния показател на качество на базовия образец ВС спрямо техническите изисквания на перспективния (ВС с удължен ресурс) образец ВС.

Всеки един от показателите може да бъде определен със следните изрази:

$$(3) \quad \Delta K_M = K_{\text{КВСМ}} - K_{\text{КВСБ}}$$

където  $K_{\text{КВСМ}}$  е коефициент на качеството на образца след извършване на мероприятията за удължаване на ресурса на ВС,  $K_{\text{КВСБ}}$  – коефициент на качеството на базовия образец ВС.

Разсъгласуването на интегралния показател на качеството  $\Delta K_{\text{п}}$  се изразява чрез:

$$(4) \quad \Delta K_{\text{п}} = K_{\text{ТХМ}} - K_{\text{КВСБ}}$$

където  $K_{\text{ТХМ}}$  е коефициент за качество на образца ВС с удължен ресурс съгласно ТХ,  $K_{\text{КВСБ}}$  – коефициент за качество на базовия образец.

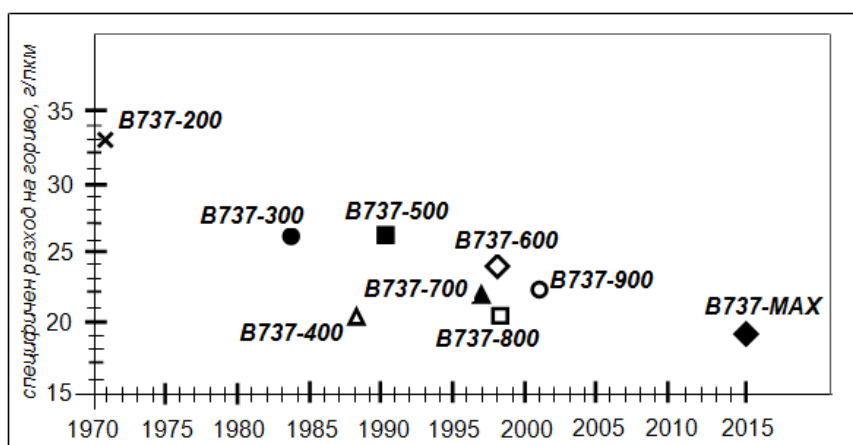
При условие  $R_{\text{ОСТВТ}} / T_{\text{ОСТВТ}} < R_{\text{ГНВТ}}$  изразът е от следния вид:

$$(5) \quad \frac{K_{\text{ТХМ}_i}}{K_{\text{ТХ}}} \cdot \frac{\frac{C_{\text{ОССТВТ}}}{T_{\text{ОСТВТ}}} + C'_{\text{ЕРТВТ}}}{\frac{(C_{\text{ОСТВТ}} + C_{\text{М}_i}) \cdot R_{\text{ГНВТ}}}{R_{\text{ОСТВТ}} + \Delta R_{\text{ВВТ}_i}} + C'_{\text{ЕРТВТ}}} \geq 1 \Rightarrow \max$$

Съществуват редица варианти за поддържане на летателно-техническите характеристики (ЛТХ) на стареещите ВС. Например в резултат на модернизация коефициентът на техническото ниво на  $i$ -тия модернизиран аналог ( $i=1\dots n$ ) може да нарасне до величината  $K_{\text{ТХМ}_i}$ . Принципно се залага при модернизация на ВС по  $i$ -тия вариант да се увеличи неговия

жизнен цикъл (пределния срок на експлоатация) – с  $\Delta T_{\text{ввТМ}i}$ , а пределния ресурс на експлоатация – с  $\Delta R_{\text{ввТМ}i}$ . Стойността на модернизацията на  $i$ -тия вариант ще се оценява с величината  $C_{\text{М}i}$ , а средната годишна стойност на експлоатационните разходи ще се определя от  $C_{\text{ЕРВвТМ}i}$ . Като предпочитан вариант на модернизация следва да се избере този, за когото е максимално съотношението на коефициентите на техническото ниво на модернизация и базов образец ВС отнесени към сумата от средногодишните амортизационни и експлоатационни разходи [5].

По-голямата част от традиционните технологии в областта на гражданското самолетостроене в настоящия момент са близки до изчерпване на пределите за усъвършенстване на ВС. Това се потвърждава например и от данните за динамиката на основните тактико-икономически показатели на авиационните двигатели на съвременните ВС. На фиг. 1 е представен специфичният разход на гориво, пресметнат за пътничико-километър, на средномагистралните пътнически самолети от семейството Boeing-737. Намалването на специфичния разход на гориво за периода 1970 - 2015 г. за различните модели Boeing-737 се осъществява с незначителни темпове, като този процес на намаляване на разхода на гориво е съпътстван с рязко увеличаване цените на изделията. Така например, пресмятанията показват, че горивната ефективност на новия перспективен модел Boeing-737MAX, на който летателните изпитания ще започнат през 2016г. ще се подобри с 14%, като цената на самолета прогнозно се счита че ще бъде 90 - 100 млн. \$, което е значителен ръст 20 - 30 % в сравнение с предходните модели [7].



Фиг. 1. Специфичният разход на гориво на пътническите самолети Boeing-737

Ако разгледаме динамиката на авиационния пазар на пътнически самолети и приемем, че цената расте с времето по закон  $C_{\text{ГСМ}}(t)$ , а параметрите на новите изделия, предлагани на пазара през годината  $t$  приемат следните значения:

- среден специфичен разход на горивото  $-g(t)$ ;
- разходи за ТОР –  $C_{\text{ТОР}}(t)$ ;
- амортизационни разходи за пролетян час –  $C_{\text{АМ}}(t)$

Тогава, през годината  $t$ , оперативните разходи за експлоатация на изделията произведени през периода  $\tau < t$ , пресметнати за пролетян час, ще се определят по следната формула:

$$(6) \quad C_{\text{ОПЕР}}(\tau < t) = C_{\text{ТОР}}(\tau) + g(t) \cdot P_{\text{ГСМ}}(t)$$

Пълните експлоатационни разходи (пресметнати за един пролетян час) за новите ВС, произведени през годината  $t$ , се определят по следната формула:

$$(7) \quad C_{\text{час}}^{\text{нов}}(t) = C_{\text{час}}(t, t) = C_{\text{АМ}}(t) + C_{\text{ТОР}}(t) + g(t) \cdot P_{\text{ГСМ}}(t)$$

Като се съпоставят тези величини, всяка авиационна компания (АК) формира своята техническа политика за удължаване експлоатацията на ВС, произведени през годината  $t$ , или тяхната замяна с нови самолети и вертолети.

Ако едновременно се изпълняват следните неравенства:

$$(8,9) \quad \begin{cases} C_{\text{час}}^{\text{нов}}(t-1) > C_{\text{опер}}(t-1, \tau); \\ C_{\text{час}}^{\text{нов}}(t) < C_{\text{опер}}(t, \tau); \end{cases}$$

то самолетите, произведени през годината  $t$ , стават морално остарели през годината  $t$  и даже техният ресурс да не е изчерпан до края, авиокомпаниите ще се стремят да ги подменят с нови. По този начин, времето на морално остарелите ВС, произведени през годината  $t$  ще се измерва с  $\Delta t(\tau) = t - \tau$ . При това, експлоатацията на ВС трябва да бъде преустановена в момента на изчерпване на общия технически ресурс.

Ако приемам, че средногодишното пролетяно време на едно ВС за година е  $\mu$ , а интензивността на експлоатация на ВС в периода на моделиране не се променя съществено, то ресурсът на ВС ще бъде напълно изработен след  $\frac{T}{\mu}$  години (където  $T$  – общ ресурс на ВС) и самолета ще бъде свален от експлоатация.

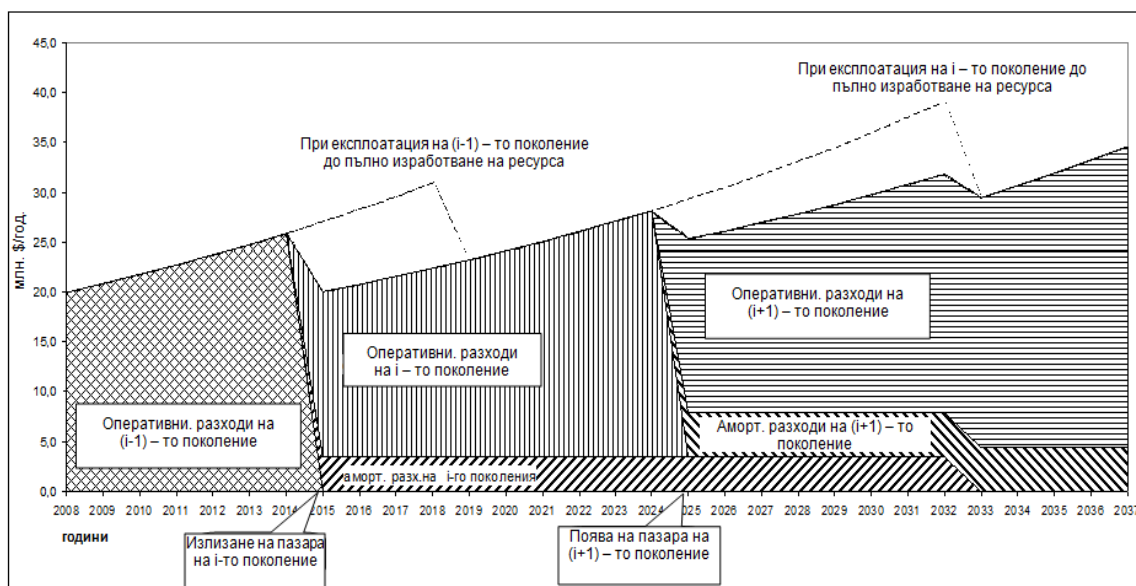
По този начин фактическият срок на експлоатация на ВС се определя съгласно условията на израза:

$$(10) \quad \Delta t_{\text{факт}}(\tau) = \min \left\{ t - \tau; \frac{T}{\mu} \right\}$$

Ако условията (8) и (9) се изпълняват продължително време, то е възможно да възникне режим на верижна смяна на поколенията. При него ВС преустановяват да се експлоатират и се бракуват, като се заменят с по-икономични новопроизведени, които също ще бъдат снети от експлоатация след определено време при появата на нови, по-съвършени ВС. Този цикъл се повтаря периодично. Поради факта, че при посочената верижна подмяна на новите поколения ВС, закупените за замяна на морално остарелите след време също морално остаряват, то след няколко години експлоатация се преустановява и тяхното използване. Поради това фактическият им срок на използване е по-малък от очаквания в момента на закупуване. Всички тези разсъждения влияят при вземане на решения от страна на АК при придобиване на нови ВС. Подновяване на парка от ВС и извеждане от употреба на старите самолети е целесъобразно за АК само при изпълнение на условието:

$$(11) \quad C_{AM}^{\text{нов}} = \frac{P^{\text{нов}}}{T^{\text{нов}}}, C_{\text{опер}}^{\text{стар}} - C_{\text{опер}}^{\text{нов}}$$

При изпълнение на условие (11) ресурсът на новите ВС няма да се оползотворява напълно, поради което АК търпят значителни загуби.



Фиг. 2.

На фиг. 2 е показано, че възможността за преждевременно извеждане от експлоатация на ВС от ново поколение не намалява заинтересоваността на АК за тяхното закупуване при изпълняване на условията в (8, 9).

### **Заключение**

Изложените виждания, направените пресмятания и предложените критерии за възстановяване изправността на стареещи ВС налагат следните основни изводи:

- съществуват редица финансово-икономически алтернативни пътища за решаване на проблема с ресурса на стареещите ВС и тяхната подмяна;
- този процес е икономически най-целесъобразен при постигане на високи показатели по критерия "стойност-ефективност-време".

### **Литература:**

1. Б а б а е в, Б., С. К р у г л о в. Моральный износ техники. Современное состояние проблемы. Иваново, 1985.
2. В л а д о в, М., Г. С о т и р о в, Д. Д о б р о в. Методика за прогнозиране на остатъчния ресурс на носещия винт на вертолета, Хемус, 2012. ISSN 1312-2916, стр. 132-138.
3. К л о ч к о в, В., А. Ш к а д о в а, А. Ж д а н о в с к и й. Экономические аспекты морального устаревания техники. Технология машиностроения, 2008, с. 65-70.
4. К н и в е л ь, А. "Новые" – "старые" воздушные суда. Анализ риска. Сайт- ФГУП "АВИАПРОМСЕРВИС".
5. К р у г л о в, С. Моральное старение техники. Автореферат диссертации, Ивановский государственный университет, 1997.
6. Н е с т е р е н к о, Б., Г. Н е с т е р е н к о. Ресурс конструкции стареющих транспортных самолетов.
7. Презентация фирмы "Боинг". Статистический отчет о несчастных случаях на коммерческих реактивных самолетах. Мировая практика 1959-2012.
8. N e s t e r e n k o, B. G., G. I. N e s t e r e n k o. Analysis of requirements on fatigue and damage tolerance for civil transport airplanes. Proceedings of the 26–th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Montreal, Canada, 1-3 June, 2011, p. 39-59.
9. S w i f t, T. Fail-safe design requirements and features, regulatory requirements. AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: The next 100 Years, 14–17 July 2003, Dayton, Ohio, AIAA 2003-2783, 23 p.

### **Благодарности**

Работата беше подкрепена финансово от Вътрешен проект към ТУ София за подкрепа на докторанти 142ГД0024-24/27.03.2014г.