

Определение оптимального времени смены стареющего воздушного судна на судно новой разработки

(Влияние технико-экономических характеристик пассажирского самолета новой разработки на фактический ресурс стареющего самолета и время ввода в эксплуатацию)

Представлена методика определения оптимального времени смены стареющего пассажирского самолета на самолет новейшей разработки, при условии сохранения необходимого и достаточного уровня безопасности. Сформулирован критерий, по которому производится выбор между вариантом продления (или сокращения) назначенного ресурса стареющему самолету и вариантом замены стареющего самолета на самолет нового поколения. На основании сравнительного анализа темпов снижения затрат при продлении (или сокращении) назначенного ресурса (срока службы) стареющего самолета с темпами снижения затрат при смене его на новый самолет, определяется максимально возможное продление (или сокращение) назначенного ресурса (срока службы) стареющему самолету и время ввода в эксплуатацию самолета новой разработки.

Смена стареющих средств производства на новые средства производства требует крупных единовременных капитальных вложений, экономический эффект от которых может быть получен только через продолжительное время. В таких случаях всегда возникает интерес к сверхнормативному продлению ресурса стареющей техники за счет заложенного в конструкцию запаса прочности, который позволяет продолжать её эксплуатацию, скачкообразно снижая затраты за счет окончания выплат за амортизацию, и дает возможность не привлекать дополнительные капитальные вложения на приобретение новой техники. Проведем сравнительный экономический анализ и определим момент времени, при достижении которого дальнейшее продление срока службы стареющего самолета будет экономически не эффективно по сравнению с вводом в эксплуатацию самолета новейшей разработки. Т.е. определим момент времени, когда, как при продлении срока службы стареющему самолету, так и при вводе в эксплуатацию самолета новой разработки, средний темп снижения затрат окажется одинаковым.

Рассмотрим процесс изменения затрат на производство единицы продукции, которая выпускается на каком либо средстве производства. В общем виде этот процесс можно показать в виде известного и часто используемого типового графика определения экономически оптимального срока службы какого либо технологического оборудования, или другого средства производства.

На рисунке 1 показаны графики изменения затрат на производство единицы продукции выпускаемой на технике, для которой необходимо определить

оптимальный срок службы. $A=C/X$ - график изменения затрат в единице продукции на создание самой техники, C – затраты на создание техники, $X=q \cdot T$ объем производства, T – срок службы, q - среднегодовой объем выпуска продукции.

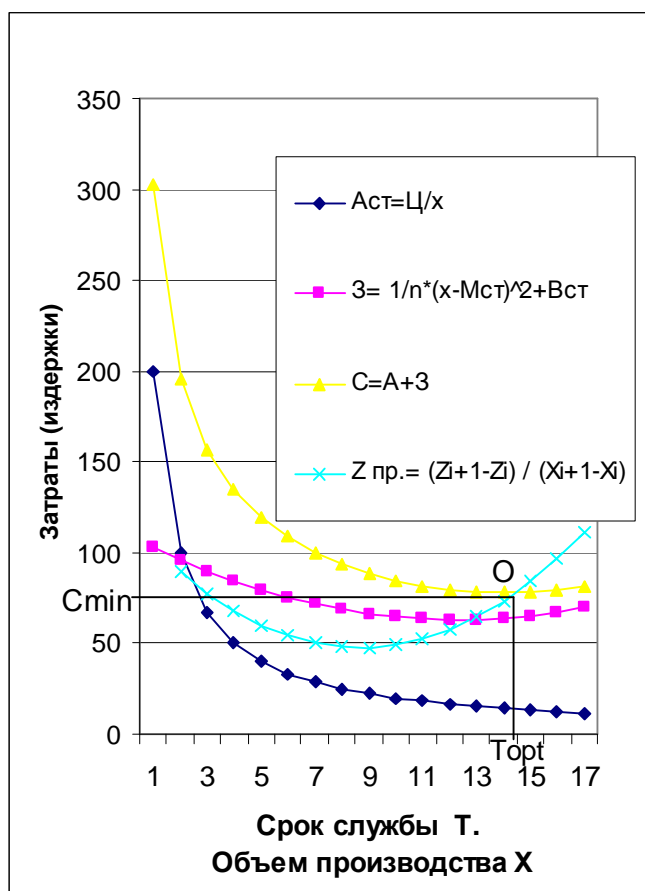


Рисунок 1 - Изменение структуры затрат единицы продукции за срок службы техники.

$$Z = \frac{1}{n} \times (X - M)^2 + B$$

-величина изменения средних переменных затрат в единице продукции, где B –коэффициент изменения переменных затрат, характеризующий снижение затрат от технологического совершенства техники. Коэффициент M -характеризует величину срока службы техники. Коэффициент $1/n$ –определяет скорость роста переменных затрат.

График изменения средних полных затрат на единицу продукции является суммой средних затрат на создание самого средства производства и средних переменных затрат на единицу выпускаемой продукции.

$$C = \frac{C}{X} + \frac{1}{n} \times (X - M)^2 + B$$

На рисунке 1 четко проявляется минимум полных затрат единицы продукции $C=A+Z$, обозначенный точкой O , который образуется как результат суммирования двух взаимоисключающих тенденций, - снижающихся затрат на восстановление самого средства производства A , и нарастающих переменных затрат Z .

График изменения предельных затрат рассчитывается по формуле

$$Z_{пр} = (Z_{i+1} - Z_i) / (X_{i+1} - X_i) = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{X_{i+1} - X_i}$$

Предельными затратами называются затраты на каждую последующую дополнительную единицу произведенной продукции. Где Z_{i+1} - полные затраты при производстве X_{i+1} - единиц продукции в $i+1$ году, Z_i - полные затраты на производство X_i единиц продукции в i году. Предельные затраты могут использоваться для определения минимума полных средних затрат, так как пересечение кривой предельных затрат $Z_{пр}$ и кривой полных средних затрат C определяют точку минимальных полных затрат единицы продукции. В этой точке величина полных средних затрат становится равной предельным затратам $C=Z_{пр}$. После точки O начинается рост полных средних затрат на единицу выпускаемой продукции. Продолжение эксплуатации этого средства производства становится нецелесообразно. Точка C_{min} определяет оптимальный срок службы средства производства T_{opt} . На рисунке 1 оптимальный срок службы обозначен отрезком $O T_{opt}$.

Если сравнивать график предельных затрат и график интенсивности отказов, показанные на рисунке 2, то можно заметить, что в основе изменения величины предельных затрат $Z_{пр}$ лежит зависимость изменения интенсивности отказов $\lambda(t)$.

Интенсивность отказов исчисляется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N(t)\Delta t}$$

где: $r(t + \Delta t)$ - число отказов до момента времени $(t + \Delta t)$,

$r(t)$ - число отказов до момента времени t ,

$N(t)$ - число объектов работоспособных к моменту времени t ,

Δt - длительность интервала.

Логика расчета интенсивности отказов и предельных затрат почти полностью совпадает. Единственное отличие состоит в том, что интенсивность отказов рассчитывается по группе или парку объектов, а предельные затраты рассчитываются на один объект. Моменты времени для расчета величин числа отказов $r(t + \Delta t)$, $r(t)$ и полных затрат Z_{i+1} , Z_i совпадают. Так как объем выпускаемой продукции X_{i+1} или X_i зависит от времени t и производительности машины q , и рассчитывается как $X_{i+1} = q \cdot (t + \Delta t)$; $X_i = q \cdot t$. Величина Δt может быть равна одному году работы машины.

Расчеты интенсивности отказов и предельных затрат, показывают что график предельных затрат по сути является графиком величины затрат на устранение этих повреждений и износа. Поэтому график предельных затрат повторяет конфигурацию графика интенсивности повреждений. Их снижение или рост происходит в одно и то же время. Чем меньше отказов, тем меньшие затраты требуются для их устранения, и чем больше отказов, тем большая величина затрат необходима для их устранения. В свою очередь величина предельных затрат влияет на конфигурацию кривой средних переменных затрат и полных средних затрат. Рост предельных затрат $-Z_{пр}$ зависит не только от количества отказов, но и от их сложности и трудоемкости ремонтов. По мере увеличения наработки все больше дает о себе знать явление усталостных повреждений конструкции, из-за чего растет количество отказов, увеличивается степень их опасности, возрастает вероятность отказа конструкции. Из-за этого растет величина затрат на устранение каждого повреждения, что приводит к ускорению роста предельных затрат на выпуск каждой

последующей единицы продукции. Эти затраты соответственно увеличивают средние полные затраты выпускаемой единицы продукции.

Для авиационной техники характер функциональных зависимостей (графиков) изменения полных средних затрат на производство одного полета в зависимости от срока службы (ресурса в полетах) воздушного судна не отличается от других видов техники. Величина изменения полных средних затрат на производство одного полета зависит от физического износа воздушного судна, который происходит от непрерывного воздействия эксплуатационных нагрузок. Кривая интенсивности отказов и повреждений, отражающая закономерности износа воздушного судна, как и других видов техники, по сути, формирует кривую предельных затрат, которая в стоимостной форме отражает закономерности изменения величин отказов и износа, что хорошо видно из рисунка 2. Предельные затраты, в свою очередь, переносят в стоимостном выражении законы износа воздушного судна на величины средних переменных затрат и полных затрат на один полет пассажирского самолета и существенным образом влияют на закономерности их изменения за период эксплуатации.

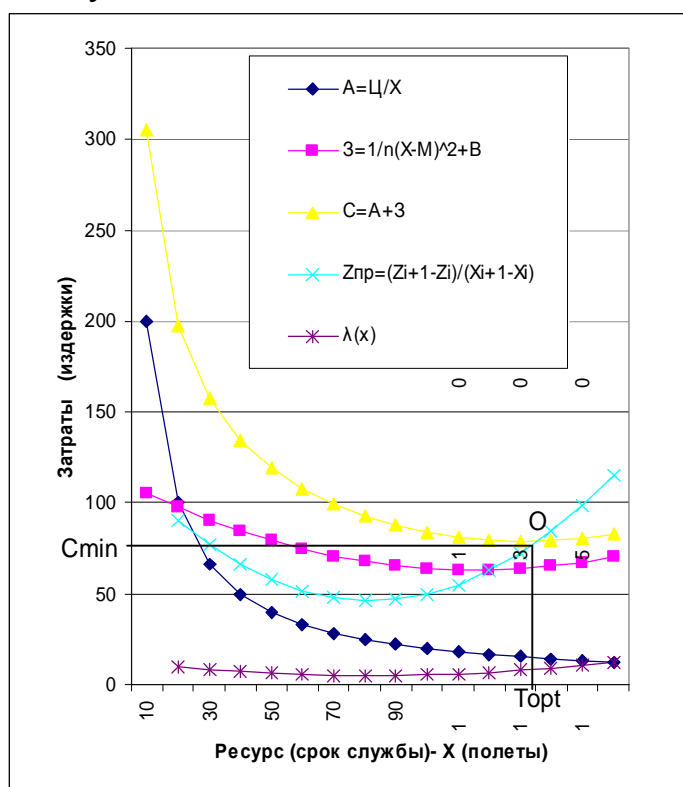


Рисунок 2 - Влияние интенсивности отказов $\lambda(x)$ на величины затрат $Z_{пр}$, Z , C .

В определенном классе техники не требуется высокий уровень безопасности. Отказ такой техники не приводит к катастрофическим результатам. Например, отказ механизма подачи суппорта в металлорежущем станке, конечно же, увеличивает затраты на производство единицы выпускаемой детали за счет ремонта станка и стоимости испорченной заготовки детали, но он не приводит к уничтожению станка и гибели людей. Технический ресурс техники такого класса совпадает с её экономически оптимальным сроком службы T_{opt} , который ограничивается временем достижения минимума затрат C_{min} на единицу выпускаемой продукции.

На рисунках 1,2 C_{min} обозначен точкой O. Отрезок 0- T_{opt} является одновременно и экономически оптимальным сроком службы T_{opt} и техническим ресурсом T_r (сроком службы), где $T_{opt}=T_r$. Уровень безопасности эксплуатации такой техники за время отработки ресурса $T_{opt}=T_r$ вполне достаточен. В таком классе техники, конечно же возможно продление технического ресурса, и тогда технический ресурс будет больше чем экономически оптимальный срок службы $T_r > T_{opt}$. Но экономически эффективным такое продление ресурса не будет, так как средние полные затраты на единицу продукции C в этом случае будут всегда выше своего минимального значения $C_{min} < C$ и при продолжении эксплуатации их рост будет продолжаться.

Но имеется и другой класс техники, в котором безопасность приобретает первостепенное значение. От того, насколько безопасна техника, начинает зависеть жизнь людей. Например, такой же отказ, такого же механизма, как и для подачи суппорта в станках, но который предназначен для изменения угла стабилизатора высоты в конструкции пассажирского самолета, может привести к гибели пассажиров, потере самолета, и трагедии на земле, когда могут пострадать совершенно случайные люди. При той же самой вероятности отказа затраты измеряются не увеличивающейся стоимостью технологического процесса, а многократно возрастающей стоимостью выходящей за рамки технологического процесса, где произошел отказ. В авиационной технике, если ее надежность не достигает необходимого уровня, рост затрат следует ожидать уже не на величину ремонтов, а на величину потерь техники и затрат на ликвидацию техногенных катастроф, кроме того следует ожидать потерь человеческих жизней, что совершенно неприемлемо. Плата за недостаточную надежность становится чрезмерна. Для того, чтобы избежать нежелательных последствий из-за подобного рода отказов, необходимо обеспечить высокую надежность для конструкций такого класса.

В авиастроении разработана и существует система обеспечения безопасности с помощью различных сложных и дорогостоящих мероприятий на всех этапах жизненного цикла воздушного судна [6]. От самых ранних стадий его проектирования и проведения всех видов испытаний, до производства и эксплуатации.

При соблюдении всех норм, процедур и правил существующей системы обеспечения безопасности в авиастроении в пределах устанавливаемых ресурсов (назначенных ресурсов) вероятность разрушения конструкции воздушных судов за час полета должна составлять (10^{-9}) . [5,7]

По нормативным требованиям **ПРОЕКТНЫЙ РЕСУРС (СРОК СЛУЖБЫ) конструкции - интервал времени (в полетах, летных часах, годах), установленный при проектировании и/или сертификации, в течение которого обеспечивается необходимый уровень безопасности конструкции по условиям прочности.** [5,7].

Одним из важнейших элементов существующей системы обеспечения безопасности в авиастроении является требование, что бы **общий объем натурных испытаний на сопротивление усталости должен быть не менее трех проектных ресурсов** [7]. Таким образом, если проектный ресурс самолета равен 60 000 летным

часам, то наземные ресурсные испытания натурной конструкции самолета на выносливость должны быть равны более чем $60\,000 \cdot 3 = 180\,000$ летным часам. В процессе ресурсных испытаний выявляются усталостные трещины и повреждения, которые показывают слабые места конструкции. Все выявленные слабые места конструкции подлежат ремонту и усилению, а затем испытания продолжаются до достижения заданной наработки - 180 000 летных часов. По каждому выявленному повреждению выпускается бюллетень проведения доработок, на основании которого выполняются ремонты серийных самолетов находящихся в эксплуатации, и изменяются чертежи конструкции самолетов, производство которых продолжается. Когда наработка конструкции достигает $2/3$ от заданной, в нашем случае это 120 000 летных часов, дальнейшие испытания конструкции должны продолжаться уже с повреждениями, возникшими во время испытаний, а если они отсутствуют, то с искусственно внесенными повреждениями (имитацией трещин). По скорости развития трещин определяются характеристики живучести конструкции самолета. Затем, если конструкция выдержала воздействие переменных нагрузок, равных нагрузкам при налете 180 000 летных часов, проводят испытания на остаточную прочность. После завершения ресурсных испытаний натурной конструкции планера самолета, можно считать, что любая другая доработанная по результатам испытаний конструкция, если к ней приложить те же нагрузки, может с очень большой долей вероятности отработать без разрушений тот ресурс, который отработан на натурной конструкции в лабораторных условиях. Но нагрузки, которые прикладываются к натурной конструкции самолета во время испытаний, никогда не могут полностью соответствовать ни величине, ни периодичности, ни месту их приложения к самолету во время реального полета. Спектр случайных нагрузок, действующих на самолет в воздушной среде, достаточно широк, и не может быть полностью воспроизведен на единичной натурной конструкции, предназначенной для наземных ресурсных испытаний. Прикладываемые нагрузки являются только усредненной моделью реальных нагрузок, действующих на конструкцию самолета. Случайные переменные нагрузки, действующие на каждый самолет из парка данного типа воздушных судов, всегда будут отличаться от нагрузок действующих на самолет во время испытаний. А значит, будет отличаться и величина ресурса самолета. Чтобы компенсировать разброс нагрузок по каждому экземпляру самолета и исключить наиболее тяжелые и более вероятные повреждения конструкции на конечной части ресурсных испытаний равных $2/3$ наземной лабораторной наработки ресурса самолета, ресурс самолета устанавливают в размере $1/3$ от наработанного ресурса в наземных условиях. Такой ресурс называют «проектным». Вероятность отказа на час полета за время его отработки будет значительно ниже, чем при полной отработке ресурса в лабораторных условиях. Назначение ресурса самолету в 3 раза ниже, чем наработка конструкции во время наземных испытаний компенсирует все неточности определения величины ресурса. Уменьшенная величина проектного ресурса содержит тот запас (резерв) прочности, который компенсирует незнание реакции конструкции самолета на воздействие реальных нагрузок на начальном этапе ее эксплуатации. При накоплении опыта эксплуатации и подтверждении результатов расчетов и наземных испытаний этот резерв может быть использован. Устанавливая проектный ресурс в 3 раза меньший, чем срок проведенных наземных

лабораторных испытаний и, выполняя другие мероприятия, предписанные системой обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла воздушного судна, становится возможным достижение необходимого уровня безопасности конструкции, при котором вероятность отказа на час полета становится равной заданной величине 10^{-9} .

Проектный ресурс всего самолета определяется ресурсом самого долговечного и самого дорогого элемента его конструкции. Таким элементом самолета является его планер (фюзеляж, крыло, оперение и киль). Другие элементы конструкции самолета: двигатели, оборудование, шасси, авионика и прочие элементы могут иметь меньший ресурс, чем планер самолета, так как всегда имеется возможность их смены во время проведения планового ремонта или выполнения другого вида технического обслуживания. График интенсивности повреждений планера самолета отличается от типового графика интенсивности повреждений, который имеет вид вогнутой кривой. Интенсивность повреждений планера пассажирского самолета во время испытаний на выносливость близка к наклонной прямой (См. рисунок 3). Такой график интенсивности повреждений характеризует технику, имеющую высокий уровень проектирования и хорошую предварительную отработку. На начальном этапе работы такой техники исключаются случайные отказы приработки, и вогнутая кривая интенсивности отказов становится похожей на наклонную прямую. Это хорошо заметно по графикам интенсивности повреждений, построенных по результатам лабораторных ресурсных испытаний натуральных конструкций всех видов авиационной техники, которые проводятся на протяжении многих десятилетий. В соответствии с графиком интенсивности повреждения формируются графики предельных и переменных издержек, которые, также как и график интенсивности повреждений, будут иметь вид наклонных прямых. Если предположить, что минимальные издержки производства C_{\min} приходятся на максимальную величину наработки натурной конструкции во время испытаний T_{\max} исп, то тогда можно совместить эти графики на одном рисунке (См. рисунок 3). В этом случае точка минимальных затрат C_{\min} на графике полных средних затрат за один полет находится над точкой максимальной наработки T_{\max} исп в лабораторных условиях, и можно найти полные средние затраты на один полет, которые образуются при отработке проектного ресурса самолета $T_{\text{пр}}$ в эксплуатации. Так как проектный ресурс $T_{\text{пр}}$ равен $1/3$ наработки натурной конструкции в лабораторных испытаниях $T_{\text{пр}} = (1/3) \cdot T_{\max}$ исп, то величина полных средних затрат на этом интервале отработки ресурса будет соответствовать точке $C_{\text{пр}}$ на рисунке 3. Полные средние затраты на один полет за проектный ресурс можно рассчитать по формуле $C_{\text{пр}} = A/T_{\text{пр}} + B + K T_{\text{пр}}$. На рисунке 3 они равны отрезку $T_{\text{пр}} C_{\text{пр}}$.

Когда срок эксплуатации достигает величины проектного ресурса $T_{\text{пр}}$, который на рисунке 3 обозначен отрезком $OT_{\text{пр}}$, то это означает, что средство производства полностью восстановило затраты на своё производство, т.е. перенесло их в виде амортизационных затрат на произведенный объем продукции.

В случае продления ресурса (срока службы) воздушному судну средние полные затраты на каждую единицу продукции будут ниже его предыдущих затрат на величину амортизации $A = C/T_{\text{пр}}$. А полные средние затраты на единицу продукции, после продления срока эксплуатации воздушному судну, становятся равными средним переменным затратам на единицу продукции, которые обозначены

отрезком $T_{пр}Z_{пр}$. Снижение затрат на единицу продукции (на один полет) без дополнительных капитальных вложений для всех авиакомпаний мира является непреодолимым соблазном для получения сверхприбыли за счет отсутствия амортизации, и они всегда требовали и будут требовать продления эксплуатации воздушных судов. Полная выработка проектного ресурса не означает, что наступил конец эксплуатации воздушного судна. Техническая экспертиза может определить, что возможно продление ресурса, так как на дополнительный период эксплуатации воздушного судна его безопасность остаётся на приемлемом уровне. На

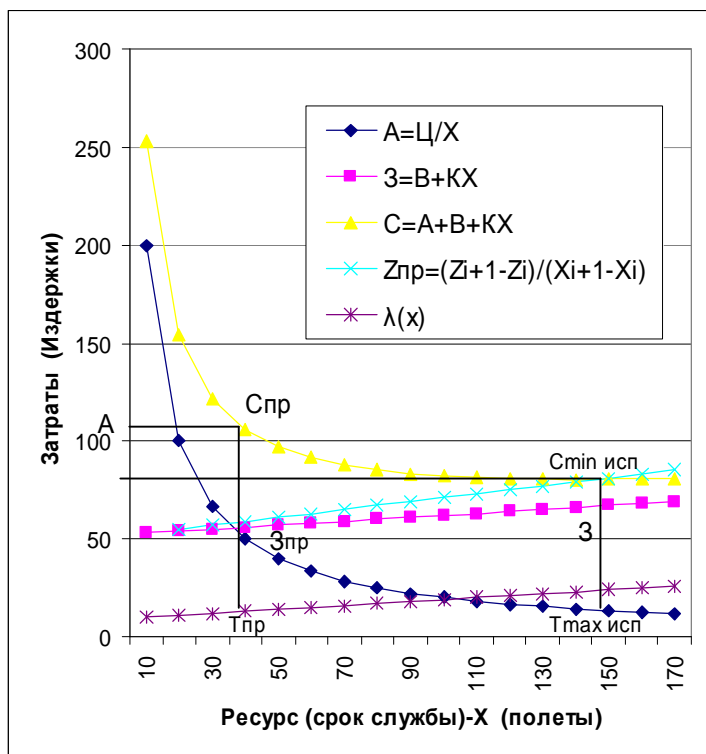


Рисунок 3– Влияние линейного изменения величины интенсивности отказов $\lambda(x)$ на затраты $Z_{пр}$, Z , C .

основание заключения технической экспертизы, обоснованно, может быть принято решение о продолжении эксплуатации не только отдельному экземпляру самолета, но и всему парку данного типа самолетов. Продление ресурса производится поэтапно на сравнительно небольшие интервалы времени, чтобы в случае возникновения трещины и ее развития её можно было надежно обнаружить и устранить возникшее повреждение, не давая ему возможности развиться до опасных размеров. Если в момент времени, когда принимается решение о продлении эксплуатации стареющего воздушного судна, не существует альтернативы в виде возможности сменить его на самолет новейшей разработки, то поэтапное продление ресурса будет происходить до того момента времени, пока техническая экспертиза не запретит дальнейшую эксплуатацию самолета по условиям снижения уровня безопасности. Нарушение запрета грозит катастрофическими последствиями.

При продлении ресурса сверх проектного изменение полных средних затрат будет происходить по линии графика переменных затрат Z , которая обозначена точками $Z_{пр}Z$ на рисунке 3. График средних переменных затрат на единицу

продукции 3 имеет линейную зависимость. Затраты будут медленно возрастать сразу после их скачкообразного снижения из-за прекращения выплат на амортизацию.

Предположим, что одновременно с продлением ресурса (срока службы) стареющего самолета возможна его смена на новый более совершенный самолет, эксплуатация которого обходится с меньшими затратами на один полет, или на один пассажирокилометр. Определим, до какого момента времени более выгодно продлевать ресурс стареющему самолету, а не вводить в эксплуатацию новый, и в какой момент времени становится более выгодно ввести в эксплуатацию самолет новейшей разработки, а не продлевать ресурс стареющему самолету.

Продление ресурса стареющему самолету, или замена его на самолет новейшей разработки призваны влиять на одну и ту же величину производственного процесса - на общий темп снижения затрат авиаперевозок. Поэтому выбор, предложенных вариантов будем проводить по среднему темпу снижения затрат на один и тот же момент времени: или продления ресурса стареющему самолету, или смены стареющего самолета на самолет новейшей разработки.

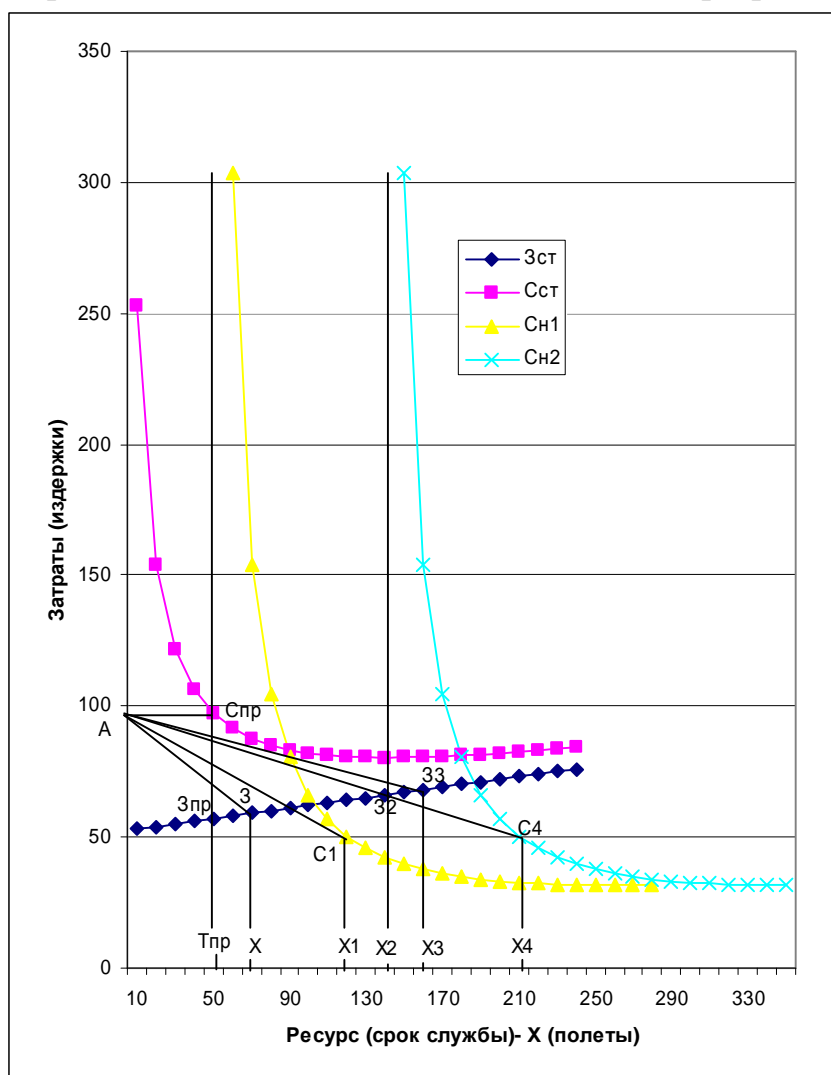


Рисунок 4 - Сравнение темпов снижения затрат как при возможности продления ресурса стареющему самолету, так и при возможности смены стареющего самолета на новый более совершенный самолет.

Рассчитаем и сравним темпы снижения полных затрат как от продления ресурса стареющего самолета, так и от смены его новым, более совершенным самолетом. Наиболее предпочтительным будет тот вариант на выбранный момент времени, который обеспечит наиболее высокий темп снижения полных средних затрат.

В случае продления ресурса стареющему самолету **средний темп снижения затрат на выполнение одного полета равен отношению величины снижения минимальных полных затрат (ΔC_{min}) на один полет стареющего самолета к сумме проектного срока службы старого самолета $T_{ст пр}$ и величины продления ему ресурса (срока службы) X**

$$T_{емп} = \Delta C_{пр} / (T_{ст пр} + X) = (C_{ст пр} - Z_{пр}) / (T_{ст пр} + X)$$

На рисунке 4 видно, что если в момент времени $T_{пр}$ принято решение о продлении ресурса стареющего самолета на срок $T_{пр}X$, и (на предполагаемый срок продления ресурса уровень безопасности остается на приемлемом уровне), то тогда затраты на единицу продукции будут равны отрезку XZ , а средний темп снижения затрат от продления ресурса самолета равен углу $СпрАЗ$, или тангенсу угла $СпрАЗ$. На рисунке 4 средний темп снижения затрат равен отношению отрезков $tg C_{пр}A3 = (T_{пр}C_{пр} - XZ) / (0T_{пр} + T_{пр}X)$.

Если происходит смена стареющего самолета на самолет новой разработки, то **средний темп снижения затрат на выполнение одного полета равен отношению величины снижения минимальных полных затрат (ΔC_{min}) на один полет стареющего и нового самолета к сумме сроков службы проектного ресурса стареющего самолета $T_{ст пр}$, величины продления его ресурса (срока службы) X и проектного ресурса (срока службы) нового самолета $T_{н пр}$**

$$T_{емп} = \Delta C_{min} / (T_{ст пр} + X + T_{н пр}) = (C_{ст пр} - C_{н пр}) / (T_{ст пр} + X + T_{н пр})$$

Темп снижения затрат для самолета новой разработки одинаков для любого момента времени действия проектного ресурса и рассчитывается на момент окончания выработки проектного ресурса. Только к этому моменту времени происходит полная амортизация воздушного судна, и формируются полные средние затраты на выполнение одного полета $C_{н пр}$. На рисунке 4 полные средние затраты на один полет самолета новой разработки равны отрезку $X1C1$, т.е. ($C_{н пр} = X1C1$). Проектный ресурс нового самолета равен отрезку $T_{пр}X1$. Средний темп снижения полных средних затрат на один полет будет равен углу наклона $СпрАС1$, или тангенсу угла $СпрАС1$. На рисунке 4 средний темп снижения затрат можно показать как отношение отрезков $(T_{пр}C_{пр} - X1C1) / (0T_{пр} + T_{пр}X1) = tg C_{пр}A1$

Если сравнивать углы снижения затрат, или темпы снижения затрат, то вариант первоначального продления ресурса стареющему самолету всегда имеет больший угол снижения затрат, или больший средний темп снижения затрат, чем вариант смены стареющего самолета на новый самолет. Например, если после отработки проектного ресурса в момент времени $T_{пр}$ имеется возможность продлить ресурс стареющему самолету на величину $T_{пр}X$ и в этот же момент времени имеется возможность ввести в эксплуатацию новый самолет, то темп снижения затрат от продления срока службы стареющему самолету будет выше темпа снижения затрат от смены его на новый самолет $tg C_{пр}A3 > tg C_{пр}A1$. Больший угол снижения затрат от продления ресурса получается из-за сравнительно небольшого срока продления ресурса и снижения затрат на один полет на величину амортизации. Если

в этот же момент времени вводить в эксплуатацию новый самолет, то для этого необходимы новые капитальные вложения для приобретения самолета, затем необходима полная отработка его проектного ресурса и восстановление его стоимости через амортизационные затраты, только после этого можно получить фактическую или планируемую величину затрат для выполнения одного полета. После чего сформируется темп снижения затрат.

Продление ресурса стареющему самолету будет обеспечивать больший темп снижения затрат по сравнению с вводом нового самолета только до достижения точки X2. Если в момент времени X2 мы будем продлевать ресурс стареющему самолету на достаточно небольшую величину X2X3, то угол снижения затрат будет меньше угла снижения затрат, чем от ввода в эксплуатацию в тот же момент времени самолета нового поколения со значительным проектным ресурсом. На рисунке 4 видно, что $tg \text{ Спр}A33 < tg \text{ Спр}A4$ т.е. темп снижения затрат от продления ресурса будет меньше темпа снижения затрат от ввода в эксплуатацию самолета новой разработки с большим проектным ресурсом.

Таким образом можно найти момент времени когда дальнейшее снижение темпа затрат за счет продления срока службы стареющему самолету становится не выгодно. С момента времени - X2 необходимо обязательное введение в эксплуатацию самолета новейшей разработки, так как только с началом его эксплуатации обеспечивается более высокий средний темп снижения затрат на один полет пассажирских авиаперевозок.

Равенство средних темпов снижения затрат для варианта продления ресурса и варианта смены стареющего самолета определяет предельно длительное продление ресурса стареющему самолету, после достижения которого необходим немедленный и обязательный ввод в эксплуатацию самолета новейшей разработки.

Расчет величины продления ресурса воздушным судам проводится из условия равенства среднего темпа снижения затрат, который возникает и при продлении ресурса стареющему воздушному судну и при вводе в эксплуатацию воздушного судна новейшей разработки.

$$tga_{\text{продления}} = tga_{\text{смены самолета}}.$$

Формула равенства средних темпов снижения затрат, может применяться только при подтверждении приемлемого уровня безопасности эксплуатации стареющего воздушного судна. По формуле равенства средних темпов снижения затрат производится расчет максимальной, экономически обоснованной величины продления ресурса стареющему воздушному судну, и смены его новым воздушным судном.

$$\frac{C_{\text{ст пр}} - 3_{\text{ст}}(x)}{T_{\text{ст пр}} + x} = \frac{C_{\text{ст пр}} - C_{\text{н пр}}}{T_{\text{ст пр}} + T_{\text{н пр}} + x} \quad (1)$$

Где - $C_{\text{ст пр}}$; $C_{\text{н пр}}$ – полные проектные затраты на один полет стареющего и нового воздушного судна т.е.

$$\begin{aligned} C_{\text{ст пр}} &= A_{\text{ст}} + B_{\text{ст}} + K_{\text{ст}} T_{\text{ст пр}}; \\ C_{\text{н пр}} &= A_{\text{н}} + B_{\text{н}} + K_{\text{н}} T_{\text{н пр}} \end{aligned}$$

Или

$$C_{ст пр} = \frac{Ц_{ст}}{T_{ст пр}} + B_{ст} + K_{ст} T_{ст пр}$$

$$C_{н пр} = \frac{Ц_{н}}{T_{н пр}} + B_{н} + K_{н} T_{н пр}$$

$Z_{ст}(x) = B_{ст} + K_{ст}(T_{ст пр} + x)$ – переменные затраты на один полет стареющего воздушного судна в период эксплуатации свыше проектного ресурса.

$Ц_{ст}$; $Ц_{н}$ – затраты на создание старого и нового воздушного судна.

x – продление ресурса стареющему воздушному судну.

$T_{ст пр}$; $T_{н пр}$ – проектный ресурс (срок эксплуатации) для старого и нового воздушного судна.

$B_{ст}$; $B_{н}$ – постоянный коэффициент изменения переменных затрат на производство одного полета на стареющем и новом воздушном судне. Коэффициент, который включает в себя все качественные изменения в любой технике, в том числе и воздушных судов, влияющие на величину переменных затрат в единице продукции (т.е. рост производительности труда, снижение затрат на топливо, технологическое совершенство и т.д.).

$K_{ст}$; $K_{н}$ – коэффициент изменения переменных затрат на один полет стареющего и нового воздушного судна.

График изменения структуры полных затрат на один полет воздушного судна, где переменные затраты имеют характер линейной функции, показан на рисунке 4.

Используя формулу равенства средних темпов снижения затрат (1) найдем величину продления ресурса стареющему воздушному судну - x , для этого преобразуем его

$$\frac{C_{ст пр} - Z_{ст}(x)}{T_{ст пр} + x} = \frac{C_{ст пр} - C_{н пр}}{T_{ст пр} + T_{н пр} + x}$$

$$(C_{ст пр} - Z_{ст}(x))(T_{ст пр} + T_{н пр} + x) = (C_{ст пр} - C_{н пр})(T_{ст пр} + x)$$

Где - $Z_{ст}(x) = B_{ст} + K_{ст}(T_{ст пр} + x)$

$$(C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст}(T_{ст пр} + x))(T_{ст пр} + T_{н пр} + x) = (C_{ст пр} - C_{н пр})(T_{ст пр} + x)$$

$$(C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр} - K_{ст} x)(T_{ст пр} + T_{н пр} + x) = (C_{ст пр} - C_{н пр})(T_{ст пр} + x)$$

$$(C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр})(T_{ст пр} + T_{н пр}) - K_{ст} x(T_{ст пр} + T_{н пр}) + (C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр})x - K_{ст} x^2 =$$

$$= (C_{ст пр} - C_{н пр})T_{ст пр} + (C_{ст пр} - C_{н пр})x$$

В общем виде полученное уравнение является квадратным уравнением

$$K_{ст} x^2 + (K_{ст}(T_{ст пр} + T_{н пр}) - (C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр}) + (C_{ст пр} - C_{н пр}))x -$$

$$- (C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр})(T_{ст пр} + T_{н пр}) + (C_{ст пр} - C_{н пр})T_{ст пр} = 0$$

Упростим уравнение.

$$K_{ст} x^2 + (K_{ст}(T_{ст пр} + T_{н пр}) + B_{ст} + K_{ст} T_{ст пр} - C_{н пр})x + (B_{ст} + K_{ст} T_{ст пр} - C_{н пр})T_{ст пр} - (C_{ст пр} - B_{ст} - K_{ст} T_{ст пр})T_{н пр} = 0$$

получили квадратное уравнение. Найдем его решение в виде

$$X_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4ac}}{2a} \quad (2)$$

Где коэффициенты:

$a = K_{ст}$;

$$V = (K_{ст} (T_{ст пр} + T_{н пр}) + V_{ст} + K_{ст} T_{ст пр} - C_{н пр});$$

$$C = (V_{ст} + K_{ст} T_{ст пр} - C_{н пр}) T_{ст пр} - (C_{ст пр} - V_{ст} - K_{ст} T_{ст пр}) T_{н пр}.$$

Решение этого уравнения может дать положительное, нулевое и отрицательное решение. Положительное решение означает, что экономически целесообразно продление ресурса стареющему самолету на величину - х. Если получено нулевое решение, т.е. х=0, то это решение означает что продление ресурса стареющему воздушному судну экономически нецелесообразно, и его смена на воздушное судно новой разработки должно быть произведена немедленно.

Любая задержка в смене самолетов приводит к уменьшению темпов снижения затрат. (Разумеется, что самолет новой разработки к этому моменту времени должен быть уже разработан, испытан, а в серийном производстве должен начаться его выпуск). Решение уравнения равенства темпов снижения средних затрат (2) может дать и отрицательный результат. Это означает, что смена стареющего самолета должна быть произведена до окончания срока отработки проектного ресурса стареющего самолета на величину - х. Досрочный вывод из эксплуатации стареющего самолета объясняется тем, что технико-экономическое совершенство самолета новейшей разработки настолько высоко, что он может быть введен в эксплуатацию раньше окончания проектного ресурса стареющего самолета. Необходимо отметить, что в настоящее время создать самолет с уменьшением затрат на один полет до степени досрочного ввода в эксплуатацию воздушного судна новой разработки практически невозможно. К сожалению, нет таких новых открытий, которые могли бы дать надежду на достижение этого результата. Поэтому приходится повышать эффективность техники, используя заложенные в ней резервы, через продление ресурса.

Расчеты показывают, что величина продления и сокращения ресурса стареющим самолетам зависит от технико-экономических характеристик самолетов новейшей разработки.

Расчет предполагаемой величины уменьшения ресурса стареющему самолету по формуле (1) не учитывает потерь от недоамортизированной стоимости досрочно выведенного из эксплуатации стареющего самолета. Чтобы учесть эту величину необходимо, чтобы эта недоамортизированная величина была перенесена на стоимость самолета новейшей разработки. Тогда уравнение равенства средних темпов снижения затрат будет выглядеть следующим образом.

$$\frac{C_{ст пр} - Z_{ст пр}(x)}{T_{ст пр} - x} = \frac{C_{ст пр} - C_{н пр}(x)}{T_{ст пр} + T_{н пр} - x} \quad (3)$$

Где $Z_{ст пр}(x) = Z_{ст пр} - K_{ст} \cdot x$

$$C_{н пр}(x) = \frac{C_{н пр} + \frac{C_{ст пр}}{T_{ст пр}} \cdot x}{T_{н пр}} + V_{н пр} + K_{н пр} T_{н пр}$$

В полной форме уравнение можно записать в виде

$$\frac{C_{ст пр} - (З_{ст пр} - K_{ст} \cdot x)}{T_{ст пр} - x} = \frac{C_{ст пр} - \left(\frac{Ц_{ст} + \frac{Ц_{ст}}{T_{ст пр}} x}{T_{н пр}} + V_{н} + K_{н} T_{н пр} \right)}{T_{ст пр} + T_{н пр} - x} \quad (4)$$

Подставляя исходные данные, найдем величину x (полетов). Величина x найденная по формуле (4) будет несколько меньше, чем величина x найденная по формуле (1). Это оказывает влияние величина переноса части недоамортизированной стоимости со стареющего самолета на самолет новой разработки.

Из графиков изменения затрат при смене стареющих самолетов на новые самолеты и фактических статистических данных можно заметить, что величины и средних полных затрат $C_{ст пр}$, $C_{н пр}$, и средних переменных затрат $З_{ст пр}$ и $З_{н пр}$ на протяжении проектного и продленного ресурса имеют линейный характер и почти не изменяется. Величины минимумов затрат плохо выражены и малочувствительны к проводимым расчетам. Углы наклона переменных затрат $З$ почти горизонтальны. Поэтому величину переменных затрат $З_{ст пр}$ стареющего самолета можно принять за постоянную неизменяемую величину (константу). Расчет величины продления назначенного ресурса будем проводить по прежней формуле равенства темпов снижения затрат, но переменные затраты $З_{ст}$ и $З_{н}$ будем считать постоянными величинами. Упрощенная формула будет иметь вид

$$\frac{C_{ст пр} - З_{ст}}{T_{ст пр} + x} = \frac{C_{ст пр} - C_{н пр}}{T_{ст пр} + T_{н пр} + x} \quad \text{или} \quad \frac{A_{ст пр}}{T_{ст пр} + x} = \frac{C_{ст пр} - C_{н пр}}{T_{ст пр} + T_{н пр} + x} \quad (4)$$

Ошибка при выполнении таких расчетов составляет 5-6%.завышения экономически обоснованного продления ресурса по сравнению с результатами, полученными по формуле (1).

Соответственно, упрощенная формула расчета сокращения ресурса стареющему самолету будет выглядеть следующим образом.

$$\frac{C_{ст пр} - З_{ст}}{T_{ст пр} - x} = \frac{C_{ст пр} - \left(\frac{Ц_{ст} + \frac{Ц_{ст}}{T_{ст пр}} x}{T_{н пр}} + З_{н} \right)}{T_{ст пр} + T_{н пр} - x} \quad (5)$$

Список использованных источников:

- 1.Новожилов В.В. Методы определения оптимальных сроков службы средств труда. Ленинградский инженерно-экономический институт. Труды Вып.44.
2. Когут А.Е., Новожилов В.И. Выбор экономических параметров машин при конструировании. Ленинград. «Машиностроение» 1974 г.
3. Кликушин С.Н. Определение оптимального времени досрочной смены морально стареющих средств производства. *Часть 1. (Моделирование процесса изменения переменных затрат квадратичной функцией $З = \frac{1}{n} \times (X - M)^2 + B$).* РЭиЖ опубликовано 30.01.2010 г.

4. Кликушин С.Н. Определение оптимального времени досрочной смены морально стареющих средств производства. *Часть 2. (Моделирование процесса изменения переменных затрат линейной функцией $Z=B+KX$)*
5. Нормы летной годности гражданских транспортных самолетов стран-членов СЭВ 1985
6. Отчет. «Концепция и программа мероприятий по обеспечению надёжности и безопасности технических средств по условиям прочности». 2008 г.
Л.Л. Чернышев. В.Д. Вермель. Г.Н. Замула. В.М. Чижов. В.И. Цымбалюк. Г.И. Нестеренко. В.С. Дубинский. И.С. Яблонский. В.И. Гришин. И.Г. Хлебникова. К.С. Щербань. Ю.М. Никитченко. И.Е. Ушаков.
7. Авиационные правила. Часть 25. 2004 г.