

## **Анализ эффективности модификаций самолетов транспортной категории с учетом затрат на их жизненный цикл**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

### **Введение**

Процесс разработки модификаций пассажирских и транспортных самолетов [1] получил широкое распространение как путь согласования технических параметров самолета с постоянно изменяющимися требованиями авиаперевозок.

При создании модификаций с увеличенными пассажироместимостью и дальностью полета неизбежно изменяются все параметры, определяющие конкурентоспособность модификации на рынке самолетов и рынке авиаперевозок, такие, как характеристика «груз - дальность», топливная эффективность, себестоимость тонно-километра перевозок, эксплуатационные расходы, приходящиеся на час полета, и т.п. [2], [3], [4].

### **Постановка задачи исследований**

Важной экономической характеристикой самолета транспортной категории являются затраты, приходящиеся на его жизненный цикл, которые наряду с вышеназванными параметрами и определяют конкурентоспособность воздушного судна.

Для количественной оценки таких характеристик, как «груз - дальность», топливная эффективность, себестоимость перевозки тонны груза на один километр, и эксплуатационных расходов, приходящихся на час полета, существуют оправдавшие себя методики [5], [6], которые позволяют определять их как для базового самолета, так и для его модификаций.

Подходы же к оценке затрат на весь жизненный цикл самолета только формируются [7], и расчетных моделей по определению этой величины пока не существует.

### **Решение поставленной задачи**

Одним из методов определения затрат такого вида является нахождение этой интегральной характеристики по заявленному ресурсу самолета.

Для современных пассажирских и транспортных самолетов ресурс самолета, т.е. срок службы от начала эксплуатации самолета до его списания, задается в летных часах. Этот технический параметр закладывается в нормы проектирования, производства и эксплуатации самолета и является нормированной величиной.

Если при этом известны расходы, приходящиеся на час полета самолета, то величину затрат на весь жизненный цикл самолета ( $Z_{ж.ц}$ ) можно определить по выражению

$$Z_{ж.ц}^ч = T_ч \cdot C_ч, \quad (1)$$

где  $C_ч$  – приведенные расходы, приходящиеся на один час полета;

$T_ч$  – амортизационный срок службы самолета в летных часах.

Если же амортизационный срок задан в календарном времени, то

$$Z_{ж.ц}^г = T_г \cdot C_ч \cdot B_г, \quad (2)$$

где  $B_г$  – годовой налет самолета в часах;

$T_r$  – календарный срок службы в годах.

В обе основные зависимости по определению затрат  $Z_{ж.ц}$  (1) и (2) входит важный стоимостный параметр – затраты, приходящиеся на 1 час полета, которые могут быть найдены на основе использования известного выражения [3]:

$$Z_{ч} = C \cdot k_{ком} \cdot m_{к.н} \cdot V_p, \quad (3)$$

где  $C$  – приведенная себестоимость перевозки 1 т груза на 1 км пути;

$k_{ком}$  – коэффициент коммерческой загрузки самолета;

$m_{к.н}$  – масса коммерческой нагрузки;

$V_p$  – рейсовая скорость самолета.

При оценке  $Z_{ж.ц}$  годового налета часов  $V_r$  следует вычислять по статистическим зависимостям для среднемагистрального самолета:

$$V_r = 656 \ln(L) - 2800. \quad (4)$$

Расчетная дальность ( $L$ ) в выражении (4) рассматривается как средневзвешенная дальность перевозок за год.

Как следует из выражений (1) и (2), затраты на жизненный цикл модификаций могут быть оценены при переменных значениях коммерческой нагрузки  $m_{к.н}$  и дальности ее перевозки  $L$ , что является основной целью создания модификации.

При изменении этих величин, естественно, изменяются и все другие технические параметры самолета, которые могут быть оценены с учетом известных выражений:

$$m_{к.н} = m_0 - m_{пс} - m_T, \quad (5)$$

где  $m_{пс}$  – масса пустого самолета;  $m_{к.н}$  – масса коммерческой нагрузки;  $m_0$  – взлетная масса самолета;  $m_T$  – масса топлива.

Величина дальности  $L$ , входящая в (4), также взаимосвязана с общими параметрами самолета. Согласно формуле Бреге [2]

$$L = \frac{KV_{крейс}}{C_R} \ln \frac{1}{1 - \bar{m}_T}, \quad (6)$$

где  $C_R$  – расход топлива;  $K$  – аэродинамическое качество;  $V_{крейс}$  – крейсерская скорость полета;  $\bar{m}_T$  – относительная масса топлива.

Таким образом, система уравнений (5) и (6), т.е.

$$\begin{cases} m_{к.н} = m_0 - m_{пс} - m_T, \\ L = \frac{KV_{крейс}}{C_R} \ln \frac{1}{1 - \bar{m}_T}, \end{cases} \quad (7)$$

предопределяет связь параметров производительности с общими параметрами самолета.

Изменение параметров конкурентоспособности базового самолета и его модификаций с учетом затрат на весь жизненный цикл проанализируем на примере пассажирского самолета (рис. 1, таблица).

Как видно, этот самолет выполнен по нормальной компоновочной схеме гражданского самолета-высокоплана с Т-образным оперением и двигателями на крыле. Трехопорное убираемое в полете шасси позволяет базироваться на

полосах класса „Б” и „В”. Компоновка традиционна для магистральных пассажирских самолетов. Пассажирская кабина выполнена по схеме “3+2”.

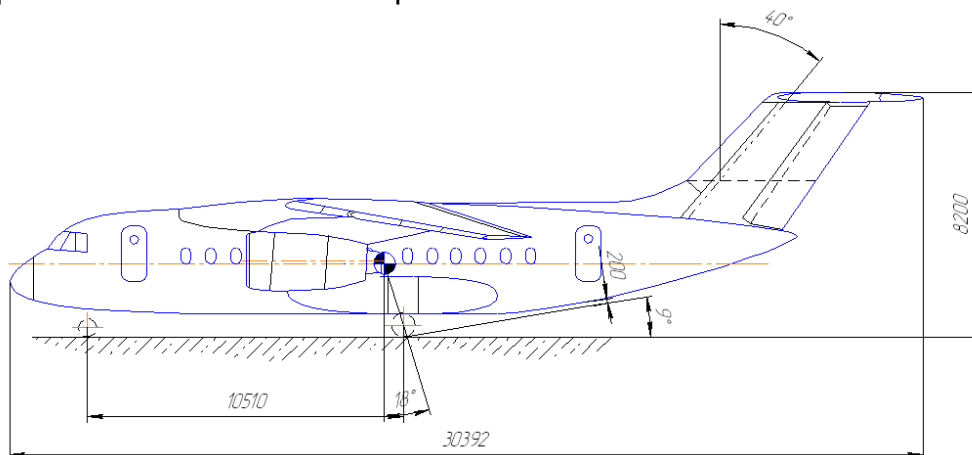


Рис. 1. Базовый вариант регионального пассажирского самолета на 75 мест

Модификационные изменения в этом самолете осуществлены из-за увеличения числа перевозимых пассажиров с общей массой от 9 до 12 т путем увеличения длины фюзеляжа, в результате чего получены и параметры модификаций, представленные в таблице.

Расчетные значения параметров «груз - дальность»  
пассажирского самолета и его модификаций

Варианты модификаций	Параметры характеристик «груз - дальность»				
	$m_{к.н}, т$				
Базовый самолет $m_0=37,6 т$	$m_{к.н}, т$	9	6	3	0
	$m_T, т$	9,06	12,06	15,06	18,06
	L, км	2869	4025	5325	6812
1-я модификация $m_0=41,91 т$	$m_{к.н}, т$	9	6	3	0
	$m_T, т$	13,37	16,37	19,37	22,37
	L, км	3999	5154	6455	7942
2-я модификация $m_0=46,65 т$	$m_{к.н}, т$	12	9	3	0
	$m_T, т$	15,11	18,11	24,11	27,11
	L, км	3543	4448	6585	7878
3-я модификация $m_0=51,58 т$	$m_{к.н}, т$	12	9	3	0
	$m_T, т$	20,045	23,045	29,045	32,045
	L, км	4402	5296	7408	8686

Приведенные в таблице значения получены при неизменных параметрах: аэродинамического качества базового самолета и его модификаций  $K=18$ , максимальной крейсерской скорости  $V_{крейс}=850$  км/ч и массе топлива, необходимой для перевозки заданной коммерческой нагрузки ( $m_{к.н}$ ) на заданную дальность.

С учетом таких параметров по методике, изложенной в работе [3] для базового самолета и его модификаций, построены характеристики „груз - дальность” (рис. 2).

Кроме того, на этом же рисунке приведена характеристика рейсовой производительности базового варианта известного российского самолета RRJ.

Как видно, транспортные характеристики анализируемых модификаций вполне соответствуют требованиям времени, т.е. по фактору рейсовой производительности анализируемые модификации могут рассматриваться как конкурентоспособные на рынке самолетов.

Весьма важным технико-экономическим параметром самолетов транспортной категории является показатель топливной эффективности, поскольку стоимость топлива занимает наиболее значимое место в эксплуатационных расходах.

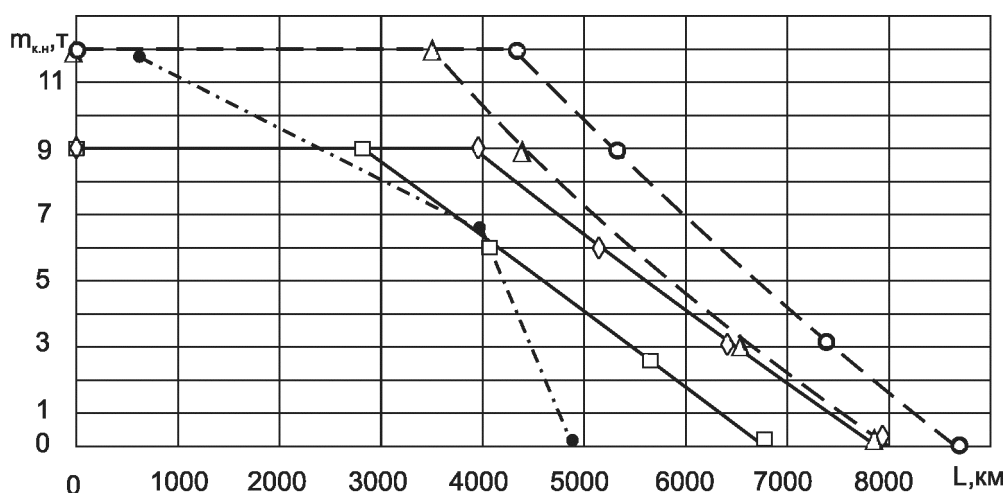


Рис. 2. Характеристики „груз - дальность” модификации ближнемагистрального пассажирского самолета

- — базовый самолет;
- ◇— — 1-я модификация;
- △— — 2-я модификация;
- — 3-я модификация;
- — базовый вариант самолета RRJ

Методика оценки этого параметра приведена в работе [8]. Специфика применения этой методики для рассматриваемых модификаций состоит лишь в том, что для таких случаев следует учитывать взаимосвязь массы топлива и массы коммерческой нагрузки из соотношения

$$m_T = m_{пн} - m_{кн},$$

т.е. потребная масса топлива определяется не только по величине полезной нагрузки  $m_{пн}$ , но и изменением числа пассажиров в каждой из модификаций.

Расчеты по оценке топливной эффективности базового самолета и его модификаций приведены на рис. 3.

Как видно, топливная эффективность модификаций несколько хуже, чем у базового самолета, однако у второй и третьей модификациях этот показатель примерно такой же, как и у российского пассажирского самолета RRJ.

Произведенное моделирование характеристик рейсовой производительности (см. рис. 2) и топливной эффективности (рис. 3) позволяет осуществить переход к определению стоимостных показателей рассматриваемых модификаций.

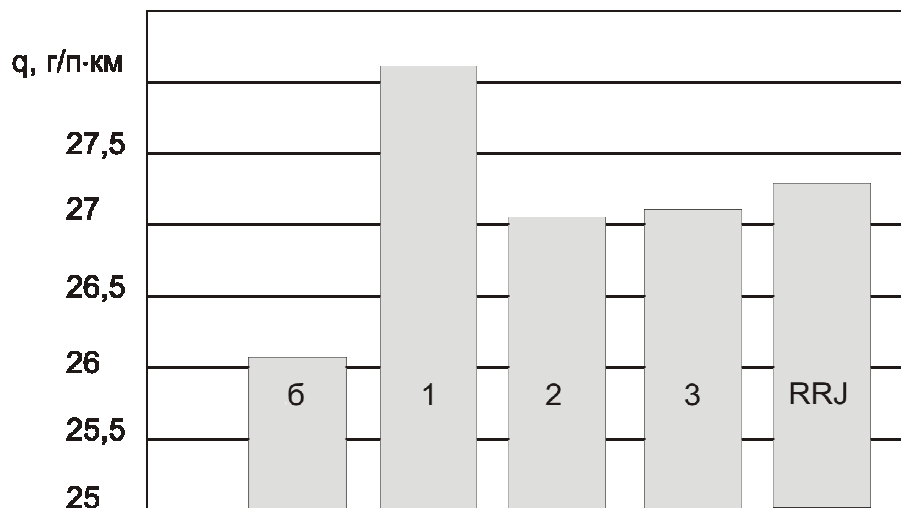


Рис. 3. Топливная эффективность рассматриваемых модификаций: б – базовый самолет; 1, 2 и 3 – модификации; RRJ – российский пассажирский самолет

Самой распространенной стоимостной характеристикой самолета, принятой в ИКАО [5], является себестоимость перевозки тонно-километра, определяемая в данном случае выражением (3). Результаты таких расчетов приведены на рис. 4 при величине крейсерской скорости  $V_{\text{крейс}} = 850 \text{ км/ч}$ .

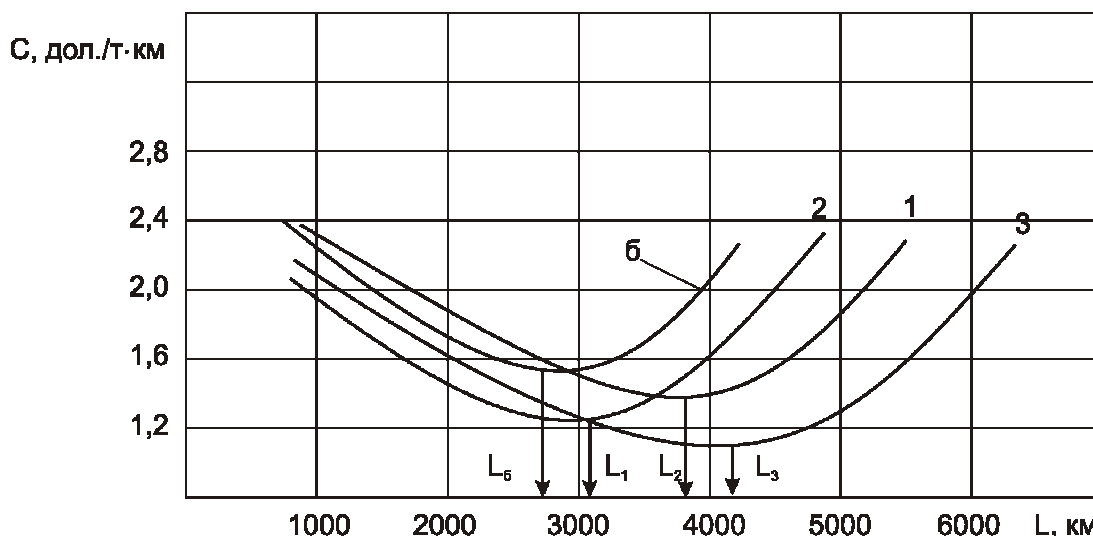


Рис. 4. Влияние дальности на себестоимость перевозки одной тонны груза на один километр модификации регионального пассажирского самолета: б – базовый самолет, 1, 2, 3 – модификации

Как следует из представленных данных (рис. 4), себестоимость перевозки одной тонны груза на 1 км существенно зависит от типа модификации, в особенности от дальности полета с заданной коммерческой нагрузкой. У всех рассматриваемых модификаций величина  $C_{\text{min}}$  несколько ниже, чем у базового самолета, но только при определенной дальности. Это означает, что для каждой

модификации существует свое значение ( $L_6, L_1, L_2$  и  $L_3$  – рис. 4), при котором наиболее эффективно можно использовать каждую из них.

Другой важной стоимостной характеристикой самолета транспортной категории являются эксплуатационные расходы, приходящиеся на один час полета, так как они во многом определяют тарифы на стоимость билетов.

Численные значения таких видов расходов определялись по выражению (3) и приведены на рис. 5 для рассматриваемых модификаций.

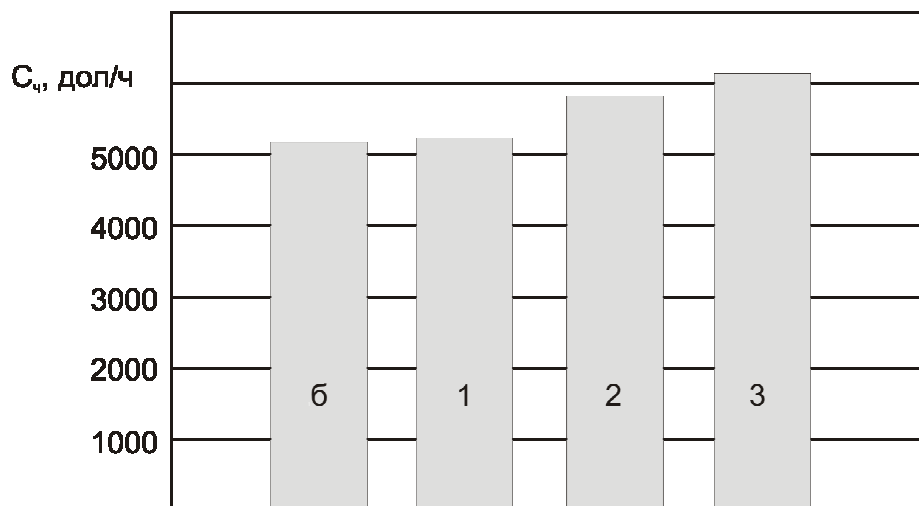


Рис. 5. Эксплуатационные расходы, приходящиеся на 1 час полета:  
б – базовый самолет; 1, 2, 3 – модификации

Анализ данных, представленных на рис. 5, показывает, что часовые расходы базового самолета и первой модификации примерно равны и несколько ниже, чем у второй и третьей модификаций.

Сопоставление стоимостных характеристик, приведенных на рис. 4 и 5, не дает однозначного ответа по поводу экономической целесообразности того или иного варианта модификации.

Более определенный ответ можно получить, если рассматривать эти модификации по величине затрат на их жизненный цикл как интегральные экономические характеристики.

Такая стоимостная оценка рассматриваемых модификаций осуществлена на основе выражения (1), а результаты расчетов приведены на рис. 6.

Здесь интегрально учтены не только массовые и перевозочные характеристики, но и технический ресурс каждой модификации.

Анализируя суммарные затраты за весь жизненный цикл, необходимо отметить следующее:

- они в несколько раз превышают стоимость самого самолета;
- затраты на модификации с увеличенной дальностью и пассажироместимостью существенно выше, чем у базового самолета, из-за увеличенного расхода топлива;

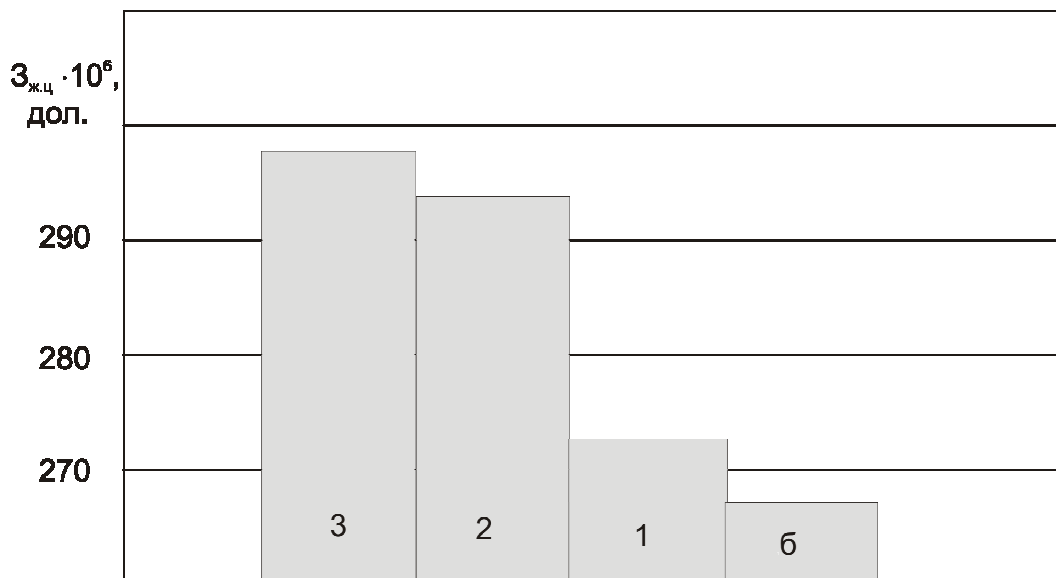


Рис. 6. Зависимость затрат на весь жизненный цикл базового самолета и его модификаций  $Z_{ж.ц.}^ч$  при техническом ресурсе 50000 летных часов: б – базовый самолет; 1, 2 и 3 – модификации

Определение  $Z_{ж.ц.}^ч$  на основе выражений (1), (2) позволяет количественно оценить не только абсолютную, но и относительную величины этого параметра для каждой из рассматриваемых модификаций в зависимости, например, от числа пассажиров ( $N$ ) (рис. 7), перевезенных самолетом за весь жизненный цикл в 50000 летных часов.

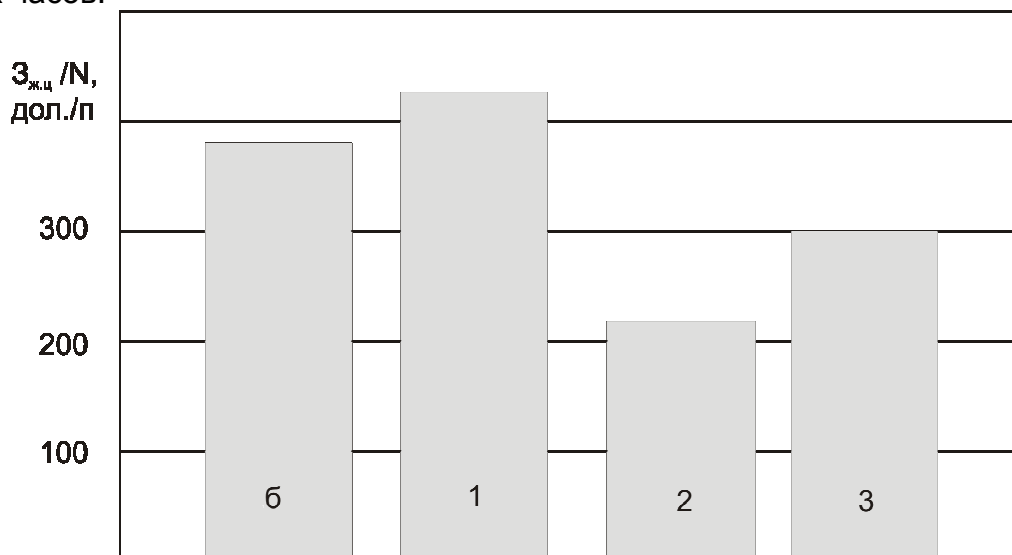


Рис. 7. Величина затрат на жизненный цикл, приходящаяся на одно пассажирское кресло: б – у базового самолета; 1, 2, 3 – у первой и второй модификаций

Приведенные величины  $Z_{ж.ц.}/N$  могут служить минимальными значениями тарифов, обеспечивающих экономически оправданную эксплуатацию базового самолета и его модификаций на момент их создания.

Предложенная модель их определения относительной величины затрат на весь жизненный цикл позволяет количественно оценить их изменение в связи с изменением, например, стоимости топлива, и других затрат на обслуживание в течение календарного ресурса.

Таким образом, и абсолютная величина затрат на весь жизненный цикл, и его относительная величина, приходящаяся на одно пассажирское кресло, являются наиболее интегральными критериями экономической эффективности самолетов транспортной категории.

### **Выводы**

В работе наряду с традиционно определяемыми параметрами конкурентоспособности, такими, как рейсовая производительность, топливная эффективность, себестоимость перевозок, предложены расчетные модели по оценке затрат на жизненный цикл модификаций самолета транспортной категории с учетом заявленной величины технического и календарного ресурса.

Показано, что стоимость жизненного цикла является суммарным параметром полных затрат, осуществляемых при проектировании, производстве и в период эксплуатации самолета. Численно эти затраты на весь жизненный цикл в несколько раз превосходят стоимость самолета. Однако их относительная величина, приходящаяся на одно пассажирское кресло, при обоснованном выборе характеристики «груз - дальность» может привести к существенному снижению тарифов на авиаперевозки, что и делает модификации экономически оправданными, но только при строго определенной дальности для каждой из таких модификаций.

### **Список литературы**

1. Роль модификаций в развитии авиационной техники / В.М Шейнин, В.М. Макаров. – М.: Наука, 1983. – 226 с.
2. Экономическая оценка летательных аппаратов / С.А. Саркисян, Э.С. Минав – М.: Машиностроение, 1972. – 180 с.
3. Проектирование пассажирских самолетов с учетом экономики эксплуатации / А.А. Бадягин, Е.А. Овруцкий. – М.: Машиностроение, 1964. – 295 с.
4. Конструкция и экономика самолета / Д.Л. Томашкевич – М.: Оборонгиз, 1960. – 202 с.
5. Временная методика сравнительной экономической оценки транспортных самолетов (МЭО-82) ГосНИИГА. – М.: Воздушный транспорт, 1984. – 103 с.
6. Техничко-экономическое обоснование конструкции самолетов и двигателей: учеб. пособие по дипл. Проектированию / А.И. Бабушкин, А.И. Лысенко, В.А. Пильщиков и др. Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-т”, 2000. – 51 с.
7. Бабенко Ю.В. Метод управления основными технико-экономическими параметрами самолета на этапе разработки его модификаций // Вісті Академії інженерних наук України. – 2006. – Вип. 3(30). — С. 121 - 125.
8. Андриенко Ю.Г. Особенности расчета топливной эффективности самолетов гражданского назначения как одного из критериев оценки принимаемых решений // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 14. – Х., 2002. – С. 41 - 47.