

## Оценка стоимости пассажирских перевозок на среднемагистральных самолетах

Ю. И. Лобановский

### Краткое содержание

На основе созданной ранее калибровочной теории транспортных перевозок [1] вычислена стоимость пассажира-места на одной из трасс авиакомпании-дискаунтера, эксплуатирующей там среднемагистральный самолет Boeing 737-800. Эта величина практически совпала с ценой билетов на этот рейс. Таким образом, данный пример показывает, что теория вполне позволяет получать основные экономические параметры среднемагистральных пассажирских самолетов по их техническим характеристикам. Показано также, что экономические данные из других источников обладают существенно большими погрешностями.

*Ключевые слова: Стоимость перевозки – Цена билета – Среднемагистральный самолет – Полезная нагрузка – Энергетическая эффективность – Удельная стоимость*

### Таблица символов

$m_p$  – относительная масса полезной нагрузки  
 $f$  – доля горючего в стартовой массе аппарата  
 $q$  – теплотворная способность горючего  
 $c_s$  – стоимость транспортировки единицы массы полезного груза в стандартной транспортной операции  
 $c_{ps}$  – стоимость транспортировки одного пассажира в стандартной транспортной операции  
 $s$  – масштабный фактор  
 $K_c$  – крейсерское аэродинамическое качество  
 $K_s$  – грузовой эмпирический инвариант  
 $K_{ps}$  – пассажирский эмпирический инвариант  
 $I_{sp}$  – удельный импульс  
 $L$  – число произведенных транспортных средств  
 $N$  – среднее число транспортных операций за время жизненного цикла транспортного средства  
 $v$  – скорость  
 $\eta_e$  – энергетический коэффициент  
 $\eta_p$  – пропульсивный коэффициент полезного действия  
 $p$  – показатель степени

### I. Введение

В работе [1] были получены универсальные корреляционные зависимости между стоимостью транспортировки единицы массы полезного груза и удельной энергией, затрачиваемой на транспортное средство в течение всего срока его жизненного цикла, его масштабом, а также масштабами его производства и эксплуатации. Представляет интерес выяснить, возможно ли эти зависимости, пусть и в несколько скорректированном виде, использовать для оценки стоимости пассажирских перевозок на среднемагистральных самолетах типа Boeing 737 или Airbus A320? В случае положительного ответа на этот вопрос возникает возможность получить основные экономические характеристики таких самолетов по их конструктивным данным, а также масштабам производства и эксплуатации, что позволило бы обеспечить оптимальное с экономической точки зрения управление проектом разработки нового самолета такого типа на всех его стадиях.

### II. Эмпирические оценки стоимости

Первым этапом такой работы должно стать сравнение теоретических экономических параметров с теми их значениями, которые следуют из эмпирических данных. Однако самый элементарный анализ этих данных, приводимых в различных современных источниках, показывает, что существует довольно большое расхождение между ними самими, и, поэтому, нет никакой уверенности в их надежности. В качестве примера можно указать на источники [2, 3]. В таблице 1 приводятся данные 2010 года по топливной стоимости пассажира-мили, а также по всем другим затратам, и общая стоимость пассажира-мили (CAST) для 6 типов среднемагистральных самолетов при полете на дистанцию 500 миль и при цене реактивного топлива 2.25 \$/галлон [2]. При этом число значащих цифр такое же, как в первоисточнике. Первая составляющая CAST пересчитана на 2012 год с учетом роста цены топлива до 3.0 \$/галлон (см. рис. 1 из источника [3]).

### Jet Fuel (US Gulf Coast) & Crude Oil (WTI) Prices 1990 - 2012

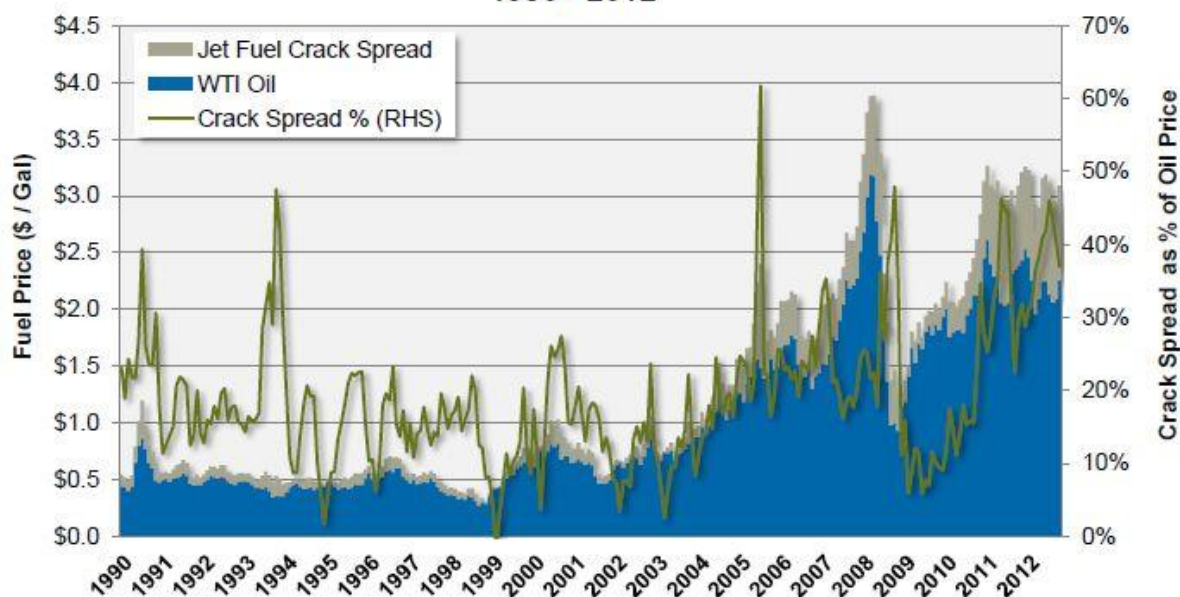


Рис. 1

Вторая составляющая CAST определена с учетом инфляции за 2 года, равной 5.3 % (см. [4]).

Таблица 1

N	Самолет	Топливо	Другое	Стоимость пасс-мили (¢)	Топливо	Другое	Стоимость пасс-мили (¢)
		2010 год			2012 год		
1	<b>Boeing 737-800W</b>	2.859	3.096	5.955	3.812	3.261	7.072
2	<b>Air bus A320</b>	2.891	3.565	6.456	3.855	3.753	7.608
3	<b>Boeing 737-700W</b>	3.349	3.688	7.037	4.465	3.884	8.349
4	<b>Air bus A319</b>	3.383	3.672	7.055	4.511	3.866	8.377
5	<b>Boeing 737-300</b>	3.750	3.955	7.705	5.001	4.165	9.165
6	<b>MD-83</b>	4.268	3.558	7.826	5.691	3.746	9.437
7	<b>Среднее</b>	3.417	3.589	7.006	4.556	3.779	8.335

Средняя топливная стоимость пассажира-мили по этим данным составила 3.4 ¢/мили в 2010 году и 4.6 ¢/мили в 2012 году. При этом из рис. 1 видно, что цены на реактивное топливо с 2011 года остаются практически постоянными на уровне 3 \$/галлон. Известно также, что в 2013 году средние цены на сырую нефть даже снизились на несколько процентов по сравнению с предыдущим годом [3], и ожидать какого либо значимого увеличения стоимости реактивного топлива в 2013 году по сравнению с 2011 – 2012 годами нет никаких оснований. Поэтому сравним значения топливной стоимости пассажира-мили за 2012 год из источника [2] с данными из источника [3] за 2011 год (см. рис. 2), а также будем использовать их далее и для сравнения с данными за 2013 год.

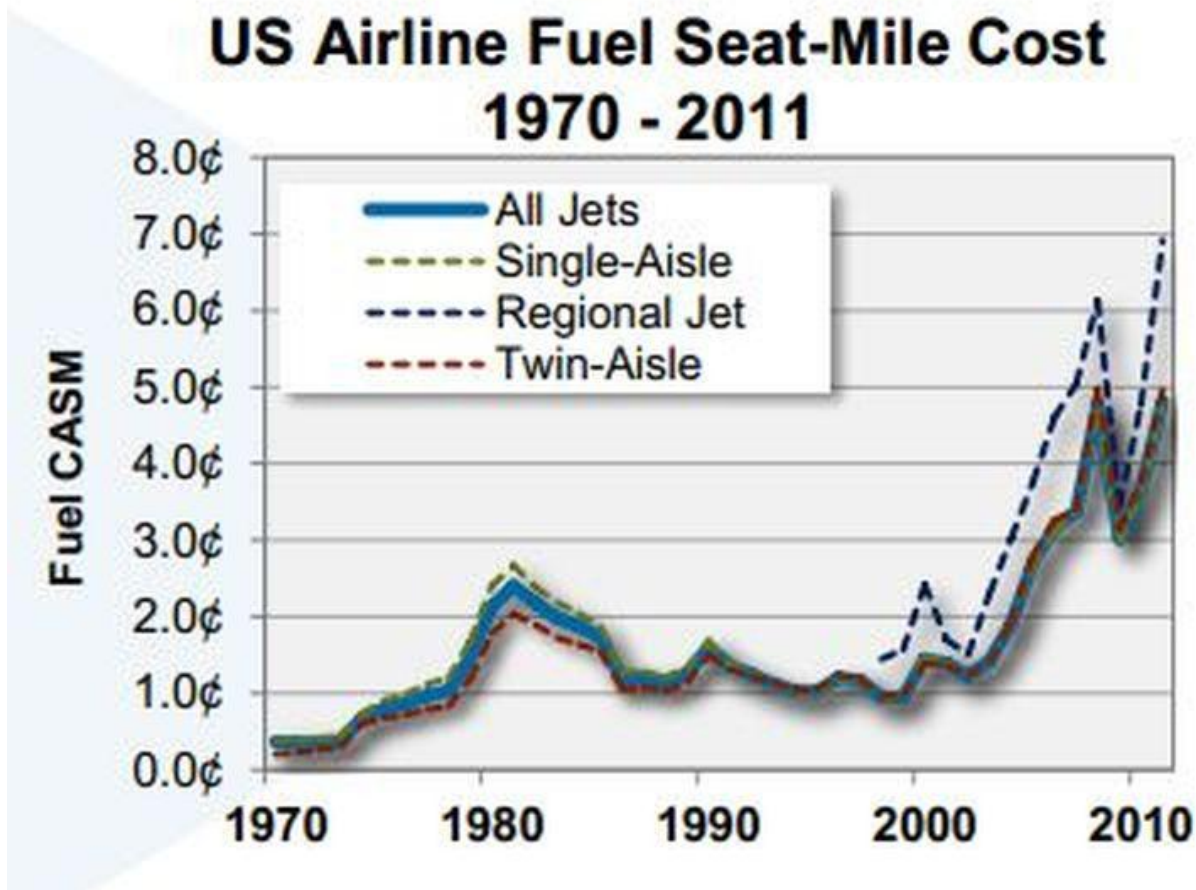


Рис. 2

Топливные стоимости пассажиро-мили для узкофюзеляжных самолетов (Single-Aisle) составляли в 2010 и 2011 годах соответственно 3.0 ¢/миля и 5.0 ¢/миля [3]. То есть расхождения с данными из таблицы 1 составляют около 10 %. Однако, если учесть что из-за очень короткого участка крейсерского режима при полете на 500 миль (800 км) расход топлива там должен быть существенно выше (что и подтверждается характеристиками региональных самолетов на рис. 2), то данные по источникам [2] и [3] в 2012 году (7 и 4.6 ¢/миля) расходятся не меньше, чем в 1.5 раза. Таким образом, полагаться на них было бы опрометчиво.

Поэтому, для определения связи между техническими и экономическими параметрами было решено использовать просто цену билетов, продаваемых авиационными компаниями. Но так как исходной точкой при построении теории являются данные по перевозке грузов, то необходимо было использовать цены компании-дискаунтера, чтобы максимально исключить все дополнительные затраты по перевозке пассажиров по сравнению с перевозкой грузов. Эта компания должна быть достаточно крупной, парк ее должен состоять из единственного типа самолетов, чтобы быть уверенным в их технических характеристиках на любом маршруте. Эта компания должна осуществлять рейсы на среднемагистральных самолетах на достаточно большие расстояния, чтобы крейсерский участок полета доминировал над участками взлета и посадки. Первой найденной авиакомпанией, удовлетворяющей этим условиям, оказалась турецкая компания Pegasus Airlines [5], у которой весь парк состоит из самолетов Boeing 737 – 38 самолетов Boeing 737-800 и 1 – Boeing 737-400.

Был выбран один из самых длинных маршрутов компании Стамбул – Алма-Ата, протяженностью 3900 км, см. рис. 3.

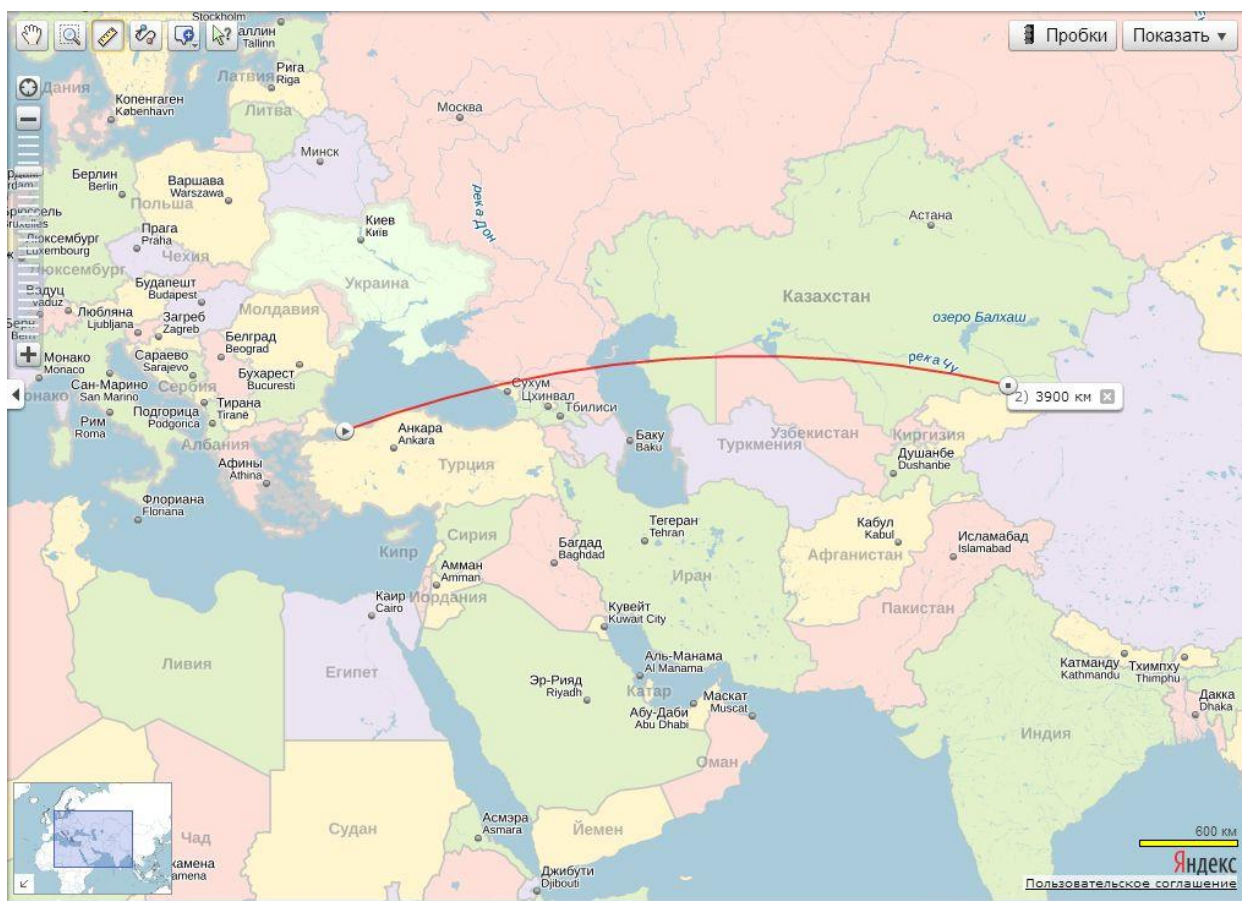


Рис. 3

По выборкам цен на билеты на этом рейсе с 31 октября по 30 ноября 2013 года, выполненных в течение нескольких дней конца октября, оказалось, что средняя цена билета из Стамбула в Алма-Ату составила \$270 – \$279, а обратно – \$197. Таким образом, средняя цена билета, при которой, как следует ожидать, этот рейс должен окупаться с нормальным для авиакомпаний уровнем рентабельности [6], составляет \$233 – \$238, то есть в среднем около \$235. Если умножить стоимость 4.40 ¢/км (7.07 ¢/миля) из таблицы 1 для самолета Boeing 737-800 на 3900 км, то получается, что средняя цена билета рейса Стамбул – Алма-Ата должна была бы быть равна \$170, что на 40 % ниже реальной. То есть расхождение данных здесь того же уровня, что было получено при сравнении источников [2] и [3].

### III. Сравнение теоретических и эмпирических данных

Теперь посмотрим, какая цена билета получится из формул работы [1] для перевозки грузов, если считать пассажира дискаунтера эквивалентом груза соответствующей массы. Первая формула теории используется для расчета коэффициента энергетической эффективности рассматриваемого крейсерского транспортного средства  $\eta_c$ :

$$\eta_c = - \frac{m_p \eta_p K_c \ln(1-f)}{f} \quad (1)$$

В ней  $m_p$  – относительная масса полезной нагрузки,  $\eta_p$  – пропульсивный коэффициент полезного действия силовой установки,  $K_c$  – крейсерское аэродинамическое качество,  $f$  – доля топлива в стартовой массе самолета.

Крейсерское качество самолета Boeing 737-800  $K_c = 16.6$  [7], пропульсивный коэффициент полезного действия  $\eta_p$  определяется как

$$\eta_p = \frac{I_{sp} v}{q},$$

где  $I_{sp}$  – удельный импульс двигателя на крейсерском режиме полета,  $v$  – крейсерская скорость,  $q$  – удельная теплота сгорания топлива (для авиационного керосина Jet A-1  $q = 43.1$  МДж/кг, см. [8]). Удельный импульс

получается делением 3600 с на удельный расход топлива в килограммах на ньютон тяги в час. При крейсерском удельном расходе двигателя CFM56-7B26, установленного на самолете Boeing 737-800, составляющем 0.0639 кг/(Н·час) [9], его удельный импульс равен 56.3 км/с, крейсерская скорость самолета  $v = 0.230$  км/с [9], и пропульсивный коэффициент  $\eta_p = 0.300$ .

Взлетная масса самолета равна 79.0 т, максимальная масса топлива при полете на дистанцию 5765 км составляет 20.8 т при плотности топлива 800 кг/м<sup>3</sup> [8, 10]. При пересчете затрат топлива на интересующую нас дистанцию 3900 км по формуле Бреге, получим, что масса топлива составит 14.7 т. При сухой массе 41.0 т на полезную нагрузку остается 23.3 т, что при 189 пассажирах дает 124 кг нагрузки на одно пассажирское место. Это находится в хорошем согласовании с известными оценками для среднемагистральных самолетов – около 125 кг на место. Тогда все параметры формулы (1) становятся определенными, и коэффициент энергетической эффективности самолета Boeing 737-800 на трассе Стамбул – Алма-Ата  $\eta_e = 1.63$ .

Стоимость перевозки одного килограмма полезной нагрузки по трассе  $c_s$  определяется по второй формуле:

$$c_s = \frac{K_s}{s^{1-p} \eta_e (LN)^{0.30}}, \quad (2)$$

где  $K_s$  – эмпирический инвариант,  $s$  – масштабный фактор,  $p$  – степень,  $L$  – число произведенных транспортных средств,  $N$  – среднее число транспортных операций за время жизненного цикла транспортного средства.

Эмпирический инвариант  $K_s$  – это коэффициент связи между удельными энергозатратами рассматриваемого транспортного средства при осуществлении им перевозок и их удельной стоимостью. Для крейсерских транспортных средств от морских судов до сверхзвуковых самолетов и проектов многоразовых аэрокосмических носителей в 1995 году он был равен 520 \$/кг [1]. Из-за изменения реальной стоимости доллара США с течением времени он также изменяется. Инфляция за 1995 – 2012 годы удешевила доллар в 1.491 раза [4], поэтому инвариант  $K_s$  должен был соответственно увеличиться, и сейчас он оценивается в 775 \$/кг.

Масштабный фактор  $s$  – это отношение стартовой массы транспортного средства к некоторой критической величине, равной 82.5 т [1]. Если стартовая масса превышает критическую величину, то степень  $p = 0.80$ , если меньше, то эта степень начинает зависеть от величины  $s$ . Однако, практически до значений  $s$  не менее 0.8 эта степень остается практически неизменной. Так что для самолета Boeing 737-800  $s = 0.958$  и  $p = 0.80$ . Число  $L$  произведенных самолетов Boeing 737NG – нового семейства среднемагистральных самолетов компании Боинг, к которому принадлежит Boeing 737-800, к настоящему времени составляет около 6520 единиц. Продолжительность полета по трассе Стамбул – Алма-Ата равна 5 часам, и при сроке службы самолета 80000 часов (что является сейчас проектной величиной для новых самолетов рассматриваемого типа, см., например, [11]), число его полетов по этой трассе должно составить 16000.

По этим данным по формуле (2) легко получить стоимость перевозки полезной нагрузки по трассе Стамбул – Алма-Ата – 1.89 \$/кг. Умножив эту величину на эквивалент массы одного пассажирского места – 124 кг, можно вычислить стоимость пассажирского билета у компании-дискаунтера. Она составит \$234, что практически совпадает с определенной выше его ценой – около \$235. При этом стоимость пассажиро-километра составляет 6.0 ¢, а стоимость пассажиро-мили – 9.65 ¢ по сравнению с 7.1 ¢ для самолета Boeing 737-800 и 8.3 ¢ для парка самолетов в целом по данным из источника [2]. Следует отметить, что для обычных авиакомпаний, которые не являются дискаунтерами, цены и стоимости будут еще выше. Так что даже предварительный анализ реальных цен на авиабилеты показывает, что приводимые в источниках рекламного характера [2, 3] стоимости пассажиро-мили являются сильно заниженными, так как они, видимо, рассчитываются при загрузке самолетов, около 100 %, а на практике ее величина обычно близка к 60 % [12].

Для того, чтобы сразу вычислять стоимость пассажиро-места  $c_{ps}$  на данной трассе, достаточно в формуле (2) заменить «грузовой» эмпирический инвариант  $K_s$  на «пассажирский» –  $K_{ps} = 9.6 \cdot 10^4$  \$/пасс-место по данным на 2013 год:

$$c_{ps} = \frac{K_{ps}}{s^{1-p} \eta_e (LN)^{0.30}},$$

и далее изменять его каждый год на коэффициент инфляции или дефляции, если таковая случится.

## Выводы

Таким образом, данный пример показывает, что созданная ранее калибровочная теория транспортных перевозок вполне позволяет получать экономические характеристики среднемагистральных пассажирских самолетов по их техническим данным. На ее основе при открытии соответствующей темы в ОКБ стало бы возможным прогнозировать экономические параметры новых пассажирских самолетов на различных этапах разработки и оценивать влияние различных изменений проекта и/или вариантов на экономику самолета.

## Литература

1. Ю. И. Лобановский – Цена космоса: сколько стоит выход на орбиту. *Synerjetics Group*, 10.10.2008 // <http://www.synerjetics.ru/article/cost.htm>
2. 737NG vs A320neo: an interesting chess game. *Leeham News and Comment*. 10.12/2010 // <http://leehamnews.wordpress.com/2010/12/10/737ng-vs-a320neo-an-interesting-chess-game/>
3. A. Guthorn – Fuel Trends in Aviation. *Aero-Engines USA 2013, ICF SH&E*. 20.02/2013 // [http://www.aeroenginesusa.com/files/2013/03/ICF\\_SHE\\_Adam\\_Guthorn.pdf](http://www.aeroenginesusa.com/files/2013/03/ICF_SHE_Adam_Guthorn.pdf)
4. US Inflation Calculator // <http://www.usinflationcalculator.com/>
5. Pegasus Airlines // <http://www.flypgs.com/en/default.aspx>
6. Итоги деятельности авиакомпаний мира за 1998 год. *Авиатранспортное обозрение*, N 20, 1999.
7. Д. В. Кантемиров – Частное сообщение, 07.02.2012.
8. Jet fuel. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Jet\\_fuel](http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_fuel)
9. Civil Turbojet/Turbofan Specifications // <http://www.jet-engine.net/civtfspec.html>
10. Boeing 737 Next Generation. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_737\\_Next\\_Generation](http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_737_Next_Generation)
11. Ю. Н. Геремес и др. – Концепция создания пассажирского самолета для местных воздушных линий. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, N 47, 2010 // [http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/vikit/2010\\_47/p20-33.pdf](http://archive.nbu.gov.ua/portal/natural/vikit/2010_47/p20-33.pdf)
12. Авиакомпании мира подвели итоги. *Авиатранспортное обозрение*, N 30, 2000 // <http://www.aviaport.ru/news/Aviation/16230.html>

Москва  
30.11.2013

Ю. И. Лобановский