

УДК 629.7.02  
УДК 629.7.04

Шаламов А. Н.

GESI GmbH. Германия, г. Гамбург

## АНАЛИЗ ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЁТОВ

*Проведён анализ топливной эффективности современных пассажирских самолётов. Определены наиболее экономичные модели узкофюзеляжных самолётов вместимостью 100...149, 150...199 и 200...250 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона, а также наиболее экономичный узкофюзеляжный самолёт во всём диапазоне вместимости от 100 до 250 пассажиров. Определены наиболее экономичные модели широкофюзеляжных самолётов вместимостью 180...299, 300...399 и 400...600 пассажиров в трёхклассной компоновке пассажирского салона, а также наиболее экономичный широкофюзеляжный самолёт во всём диапазоне вместимости от 180 до 600 пассажиров. Даны рекомендации по проектированию узкофюзеляжных и широкофюзеляжных пассажирских самолётов и по построению транспортной инфраструктуры с их использованием.*

*Ключевые слова:* топливная эффективность самолёта; узкофюзеляжный самолёт; широкофюзеляжный самолёт; транспортная инфраструктура; проектирование самолётов.

### 1. Введение

В настоящее время к пассажирским самолётам предъявляется ряд противоречивых требований конструктивного, технологического, экологического и эксплуатационного характера. Одним из важнейших критериев оценки эффективности пассажирских самолётов является коэффициент топливной эффективности, который выражает количество топлива, необходимое для транспортировки одного пассажира при заданных условиях комфорта в салоне самолёта на заданное расстояние.

На протяжении последних 60 лет производители пассажирских самолётов борются за снижение показателей коэффициента топливной эффективности [1], т.е. за более высокую топливную эффективность, которая в свою очередь оказывает существенное значение на стоимость авиационных перевозок.

### 2. Постановка задачи

Целью настоящей статьи является анализ топливной эффективности современных пассажирских самолётов в диапазоне вместимости от 100 до 600 пассажиров и выдача рекомендаций по проектированию узкофюзеляжных и широкофюзеляжных пассажирских самолётов с учётом достижения максимальной топливной эффективности, а также выдача рекомендаций по организации пассажир-

ских воздушных перевозок с минимальными топливными затратами.

### 3. Изложение основного материала исследования

Критерием, определяющим топливную эффективность самолёта, является коэффициент топливной эффективности:

$$k_{\text{тэ}} = \frac{Q_{\text{т}}}{n_{\text{пасс}} \cdot L} \quad (1)$$

где:

$k_{\text{тэ}}$  — коэффициент топливной эффективности самолёта, л/(пасс·км);

$Q_{\text{т}}$  — объём топлива, л;

$n_{\text{пасс}}$  — количество пассажиров на борту, пасс.;

$L$  — дальность полёта, км.

Коэффициент топливной эффективности является комплексным показателем, отражающим достижения в области технологии самолёто- и двигателестроения, проектирования и производства систем самолётов (таких как система управления, топливная, гидравлическая, электрическая и т.д.), а также в области общего проектирования самолётов.

Все современные пассажирские самолёты можно разделить на две группы: узкофюзеляжные и широкофюзеляжные.



### 3.1. Анализ топливной эффективности узкофюзеляжных самолётов

Узкофюзеляжными самолётами являются самолёты с диаметром фюзеляжа 3,5...4 м, вместимостью от 100 до 250 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона и дальностью полёта до 8000 км. Принимая во внимание величину диапазона вместимости современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов, представляется целесообразным разбить его на следующие подгруппы.

1. Самолёты вместимостью 100...149 пассажиров.
2. Самолёты вместимостью 150...199 пассажиров.
3. Самолёты вместимостью 200...250 пассажиров.

Результаты расчётов коэффициентов топливной эффективности узкофюзеляжных пассажирских самолётов подгрупп 1, 2 и 3 представлены в таблицах 1, 2 и 3 соответственно. График на рисунке 1 даёт наглядное представление о топливной эффективности современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов в диапазоне вместимости 100...250 пассажиров.

Таблица 1

#### Анализ топливной эффективности пассажирских самолётов вместимостью 100...149 пассажиров

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]
A318-100	24210	5700	107	0.0396950
A318-100SL	24210	5900	107	0.0383494
737-600	26020	5648	108	0.0426569
737-600WL	26020	5970	108	0.0403561
A319-100	30190	6700	124	0.0363385
A319-100SL	30190	6900	124	0.0352852
737-700	26020	6230	126	0.0331473
737-700WL	26020	6370	126	0.0324188

ER – extended range, WL – winglets, SL – sharklets.

Таблица 2

#### Анализ топливной эффективности пассажирских самолётов вместимостью 150...199 пассажиров

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]
A320-200	27200	5700	150	0.0318129
A320-200SL	27200	6100	150	0.0297268
737-800	26020	5665	160	0.0287070
737-800WL	26020	5765	160	0.0282090
737-900ER	29660	5925	174	0.0287696
737-900ERWL	29660	6045	174	0.0281985
A321-200	30030	5600	185	0.0289865
A321-200SL	30030	5900	185	0.0275126

Таблица 3

#### Анализ топливной эффективности пассажирских самолётов вместимостью 200...250 пассажиров

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]
757-200	43490	7222	200	0.0301094
757-200WL	43490	7600	200	0.0286118
757-300	43400	6287	243	0.0284080
757-300WL	43400	6658	243	0.0268250

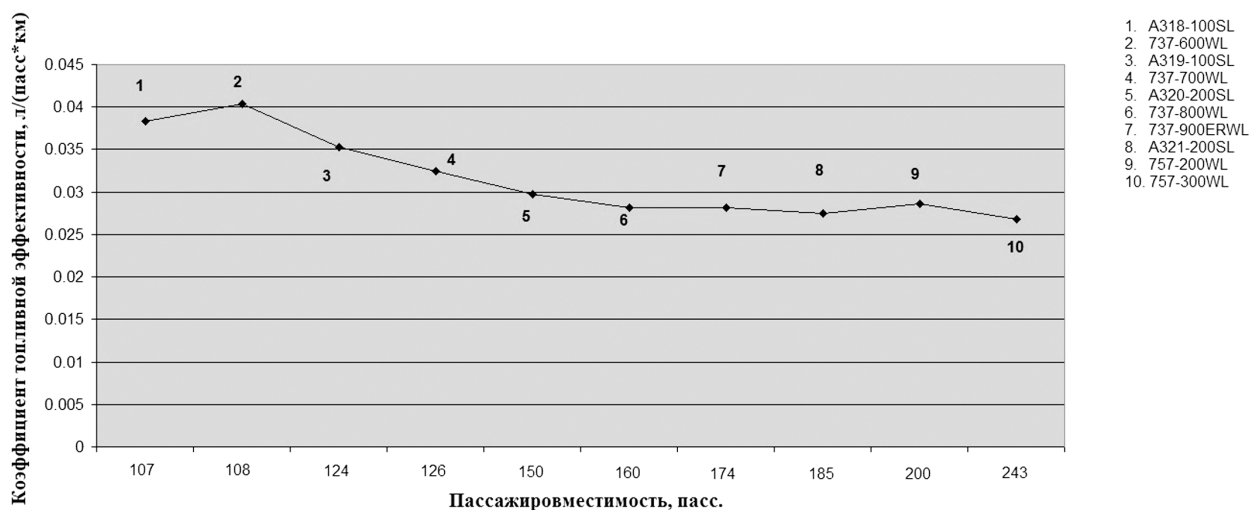


Рис. 1. Анализ топливной эффективности узкофюзеляжных самолётов

Анализируя результаты таблиц 1, 2 и 3, а также график (см. рис. 1), можно сказать, что наиболее экономичным самолётом в диапазоне вместимости 100...149 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона является самолёт компании Боинг 737-700WL, величина коэффициента топливной эффективности которого составляет 0.0324188 л/(пасс·км), наиболее экономичным самолётом в диапазоне вместимости 150...199 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона является самолёт компании Аэробус А321-200SL, величина коэффициента топливной эффективности которого составляет 0.0275126 л/(пасс·км), и наиболее экономичным самолётом в диапазоне вместимости 200...250 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона является самолёт компании Боинг 757-300WL с величиной коэффициента топливной эффективности 0.026825 л/(пасс·км).

Возможно также проследить следующую закономерность — при увеличении вместимости самолёта величина коэффициента топливной эффективности снижается, т.е. самолёт становится более экономичным. Например, самый экономичный самолёт третьей группы Боинг 757-300WL на 17.3% более экономичен по отношению к наиболее экономичному самолёту первой группы Боинг 737-700WL.

Сравнение конкурирующих моделей узкофюзеляжных пассажирских самолётов основных производителей даёт следующие результаты (см. таблицу 4).

Следует отметить, что в диапазоне вместимости 200...250 пассажиров в настоящее время существуют только самолёты компании Боинг: 757-200, 757-200WL, 757-300 и 757-300WL. Несмотря на то, что самолёт был создан в конце 70-х — начале 80-х годов XX века (первый полёт модификации 757-200 совершён 19 февраля 1982 года, ввод в эксплуатацию 1 января 1983 года [2]; модификация 757-300 является удлинённой на 7.1 м версией 757-200, которая была введена в эксплуатацию в 1999 году [2]), самолёт 757-200 имеет достаточно высокие показатели экономичности. Так, модификация 757-200WL, оснащённая двигателями PW2040 и дополнительными крылышками Уиткомба (winglets), имеет величину коэффициента топливной эффективности 0.0286118 л/(пасс·км). Сравнивая показатели коэффициентов топливной эффективности самолётов 757-200WL и 757-300WL с ближайшими по вместимости моделями 737-900ERWL и А321-200SL, получаем следующие результаты (см. таблицу 5).

Таким образом, принимая во внимание показатели коэффициентов топливной эффективности современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов в двухклассной компоновке пассажирского салона, установлено, что наиболее эффективным самолётом с точки зрения расхода топлива является самолёт 757-300WL, в связи с чем транспортную инфраструктуру следует выстраивать, используя этот тип самолёта для транспортировки пассажиров на расстояния

Таблица 4

#### Сравнение топливной эффективности конкурирующих моделей пассажирских самолётов

Самолёт	$k_{то}$ [л/(пасс·км)]	Самолёт	$k_{то}$ [л/(пасс·км)]	Разница %
737-700WL	0.0324188	A319-100SL	0.0352852	8.1
737-800WL	0.0282090	A320-200SL	0.0297268	5.1
737-900ERWL	0.0281985	A321-200SL	0.0275126	2.4

Таблица 5

**Сравнение топливной эффективности пассажирских самолётов  
757-200WL и 757-300WL с 737-900ERWL и A321-200SL**

Самолёт	$k_{тэ}$ [л/(пасс-км)]	Самолёт	$k_{тэ}$ [л/(пасс-км)]	Разница %
757-200WL	0.0286118	737-900ERWL	0.0281985	1.4
757-200WL	0.0286118	A321-200SL	0.0275126	3.8
757-300WL	0.0268250	737-900ERWL	0.0281985	4.9
757-300WL	0.0268250	A321-200SL	0.0275126	2.5

до 6000...6300 км при наличии соответствующего пассажиропотока и принимая во внимание гибкость расписания полётов для удобства пассажиров.

Определим и сравним затраты топлива четырёх моделей самолётов на маршруте Нью-Йорк (аэропорт имени Кеннеди JFK) – Сан-Франциско (SFO) при перевозке 174 пассажиров за один рейс самолётами Боинг 737-900ERWL, 757-200WL, 757-300WL и Аэробус A321-200SL.

Потребный объём топлива на борту самолёта  $Q_{тп}$  возможно вычислить, преобразовав выражение (1):

$$Q_{тп} = k_{тэ} \cdot L \cdot n_{пасс} \quad (2)$$

Расстояние между аэропортами составляет 4162 км [3]. Учитывая необходимость дополнительного запаса топлива на борту в связи с погодными условиями, загруженностью аэропорта, необходимостью выполнения дополнительных манёвров и т.д., примем необходимую дальность полёта 4300 км.

Результаты расчётов представлены в таблице 6.

Таким образом, эксплуатируя самолёты 757-300WL на данном маршруте, возможно добиться максимальной эффективности.

Самолёты 757-200WL, которые эксплуатируются на данном маршруте (например, компанией Delta Airlines) требуют на 1337 л топлива на один полёт больше по сравнению с самолётами 757-300WL. Самолёты 737-900ERWL требуют на 1028 л топлива больше, а самолёты A321-200SL – на 515 л больше. Учитывая то, что самолёты 757-200WL и 757-300WL не производятся в настоящее время (производство прекращено в 2004 году [2]), а самолёт 737-900ERWL, который производится в настоящее время, требует на 1028 л больше топлива, и самолёт A321-200SL, который также производится в настоящее время, требует топлива на 515 л больше, такие авиакомпании как Delta Airlines отдадут предпочтение модели A321-200SL [4].

Принимая во внимание стоимость авиационного топлива (январь 2015 года [5]), возможно рассчитать затраты на покупку топлива (см. таблицу 7).

Таблица 6

**Затраты топлива на транспортировку 174 пассажиров за один рейс  
по маршруту Нью-Йорк – Сан-Франциско различными самолётами**

Самолёт	$n_{пасс}$ [пасс]	$n_{пассвм}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{тэ}$ [л/(пасс-км)]	$Q_{тп}$ [л]
737-900ERWL	174	174	100	0.0281985	21098
A321-200SL	174	185	94	0.0275126	20585
757-200WL	174	200	87	0.0286118	21407
757-300WL	174	243	71.6	0.0268250	20070

Таблица 7

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 174 пассажиров за один рейс  
по маршруту Нью-Йорк – Сан-Франциско различными самолётами**

Самолёт	$Q_{тп}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
737-900ERWL	21098	0.45	9494.1
A321-200SL	20585	0.45	9263.25
757-200WL	21407	0.45	9633.15
757-300WL	20070	0.45	9031.5

Таким образом, при переходе с самолётов 757-200WL на самолёты A321-200SL экономия затрат на топливо составляет 369.9 долларов США на один полёт. В день авиакомпании совершают около 20 полётов по указанному маршруту. Таким образом гипотетически при переходе всех компаний с самолётов 757-200WL на самолёты A321-200SL при перевозке 174 пассажиров каждым рейсом экономия топлива составляет 10300 л, а экономия затрат на топливо составляет 4635 долларов США. Такой переход также имеет экологический аспект, так как в результате расходования меньшего количества топлива уменьшаются выбросы углекислого газа и двуокиси азота в атмосферу.

В результате проведённых расчётов установлено, что в классе узкофюзеляжных пассажирских самолётов наиболее выгодным диапазоном является интервал 200...250 пассажиров. Этот факт подтверждается стремлением компаний-производителей самолётов к разработке модификаций самолётов 737 [6] и A321 [7] повышенной вместимости (около 200 и более пассажиров). Вместе с тем, авиапроизводители не торопятся вкладывать средства в разработку новых самолётов с «чистого листа», а предпочитают создавать модификации увеличенной пассажировместимости уже существующих моделей самолётов, такие как 737MAX и A321-200 с увеличенной взлётной массой и дальностью полёта. Крупнейшими заказчиками самолётов 737MAX являются Ryanair [6] и Southwest Airlines [8], а потенциальными заказчиками A321-200 с увеличенной взлётной массой и дальностью полёта являются такие авиакомпании, как American Airlines, Continental Airlines, Delta Airlines и United Airlines [9], [10].

Кроме увеличения пассажировместимости самолётов компании-производители устанавливают новые более экономичные двигатели (A320neo и 737MAX), улучшают конструкцию крылышек Уиткомба (переход от 737NG к 737MAX), применяют новые алюминиево-литиевые сплавы и композиционные материалы в конструкции планера самолётов с целью снижения расхода топлива и, как следствие, — снижения эксплуатационных затрат и вредных выбросов.

В целом следует ожидать создания новых узкофюзеляжных пассажирских самолётов в самое ближайшее время (A320neo, A321neo — конец 2015 года [11], 737MAX — в 2017 году [2]).

Вместе с тем, как показывают результаты анализа современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов, наиболее выгодным с точки зрения топливной эффективности является создание и эксплуатация нового узкофюзеляжного пассажирского самолёта в диапазоне вместимости 200...250 пассажиров на смену самолётам Боинг 757-200WL и 757-300WL.

Принимая во внимание величины коэффициентов топливной эффективности современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов, можно сказать о создании в ближайшем будущем самолётов со следующими показателями (см. таблицу 8).

Учитывая характеристики самолётов 757-200WL и 757-300WL, можно сказать, что на смену им придут самолёты такой же вместимости (220...240 пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона) в 2020...2022 годах. Однако, судя по объёмам продаж таких самолётов, как A320, A320neo, 737-800 и 737MAX8, наиболее востребованными в настоящее время являются самолёты вместимостью 150...180 пассажиров (см. таблицу 9) [2].

Таблица 8

#### Характеристики перспективных узкофюзеляжных пассажирских самолётов

Самолёт	Дальность [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс·км)]
—	6000...7000	100...149	0.028...0.030
—	6000...7000	150...199	0.026...0.028
—	6500...7700	200...250	0.024...0.026

Таблица 9

#### Поставки и заказы узкофюзеляжных самолётов (январь 2015, все модификации каждой модели)

Самолёт	Количество шт.	Самолёт	Количество шт.
A318-100	79	737-600	69
A319-100	1433	737-700	1109
A320-200	3867	737-800	3515
A321-200	1036	737-900	293
		757-200	913
		757-300	55



Тем не менее, учитывая рост объёмов пассажирских перевозок [12] и тенденции развития узкофюзеляжных пассажирских самолётов, можно прогнозировать смещение большинства заказов из диапазона вместимости 150...180 пассажиров в диапазон 200...230 пассажиров. В этом случае разработка нового самолёта на смену 757-200WL и 757-300WL будет более чем актуальной.

### 3.2. Анализ топливной эффективности широкофюзеляжных самолётов.

Широкофюзеляжными самолётами являются самолёты с диаметром фюзеляжа более 5 м, вместимостью от 180 до 600 пассажиров в трёхклассной компоновке пассажирского салона и дальностью полёта в диапазоне от 7000 км до 17500 км. Принимая во внимание величину диапазона вместимости современных узкофюзеляжных пассажирских самолётов, представляется целесообразным разбить его на следующие подгруппы.

1. Самолёты вместимостью 180...299 пассажиров.
2. Самолёты вместимостью 300...399 пассажиров.
3. Самолёты вместимостью 400...600 пассажиров.

Результаты анализа топливной эффективности широкофюзеляжных пассажирских самолётов (подгруппы 1, 2 и 3) приведены в таблицах 10, 11 и 12, соответственно. График на рисунке 2 даёт наглядное представление о величинах коэффициента топливной эффективности современных широкофюзеляжных пассажирских самолётов в диапазоне вместимости 180...600 пассажиров.

Результаты показывают, что самым экономичным широкофюзеляжным самолётом в диапазоне вмести-

мости от 180 до 299 пассажиров является Аэробус А330-300 со значением коэффициента топливной эффективности 0,0292575 л/(пасс-км); самым экономичным широкофюзеляжным самолётом в диапазоне вместимости 300...399 пассажиров является Аэробус А350-1000 со значением коэффициента топливной эффективности 0,0301158 л/(пасс-км) и самым экономичным широкофюзеляжным самолётом в диапазоне вместимости 400...600 пассажиров является самолёт компании Боинг 747-81 со значением коэффициента топливной эффективности 0,0345795 л/(пасс-км). Несмотря на появление самолёта нового поколения Боинг 787-8 (значение коэффициента топливной эффективности 0,0359675 л/(пасс-км) и 787-9 (значение коэффициента топливной эффективности 0,0321660 л/(пасс-км), самолёт Аэробус А330-300 по-прежнему остаётся самым экономичным в диапазоне вместимости 180...299 пассажиров. Принимая во внимание последние новости компании Аэробус о том, что компания создаёт новую модификацию А330-900neo с более высокими показателями топливной эффективности [13], логично предположить, что значения коэффициента топливной эффективности самолёта А330-900neo будут находиться в пределах 0,027...0,028 л/(пасс-км). В то же время самолёты 787-8 и 787-9 имеют преимущество в дальности беспосадочного полёта по отношению к А330-300. Самым экономичным самолётом второй подгруппы является машина нового поколения Аэробус А350-1000 со значением коэффициента топливной эффективности 0,0301158 л/(пасс-км), что превосходит значение коэффициента топливной эффективности конкурирующей модели Боинг 777-300ER 0,0319704 л/(пасс-км). Ответом компании Боинг на

Таблица 10

Анализ топливной эффективности широкофюзеляжных самолётов вместимостью 180...299 пассажиров

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс-км)]
767-200	63000	7130	181	0.0488172
767-200ER	91400	11825	181	0.0427038
767-300	63000	7890	218	0.0366275
767-300ER	91400	11090	218	0.0378058
767-300ERWL	91400	11690	218	0.0358654
A340-200	155040	15000	240	0.0430667
787-8	126210	14500	242	0.0359675
767-400ER	91400	10418	245	0.0358093
A330-200	139090	13400	253	0.0410271
787-9	138700	15400	280	0.0321660
A330-300	97530	11300	295	0.0292575
A340-300	147850	13700	295	0.0365830

Таблица 11

**Анализ топливной эффективности широкофюзеляжных самолётов  
вместимостью 300...399 пассажиров**

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс-км)]
A340-500	214810	16060	313	0.0427331
777-200	117348	9700	314	0.0385278
777-200ER	171177	14310	314	0.0380957
777-200LR	181283	17370	314	0.0332374
A350-900	138000	14350	314	0.0306265
787-10	138700	13000	323	0.0330317
A350-1000	156000	14800	350	0.0301158
A340-600	195880	14350	380	0.0359215
777-300	171177	11120	386	0.0398798
777-300ER	181283	14690	386	0.0319704

LR – long range.

Таблица 12

**Анализ топливной эффективности широкофюзеляжных самолётов  
вместимостью 400...600 пассажиров**

Самолёт	$Q_T$ [л]	$L$ [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс-км)]
747-400	216840	13450	416	0.0387546
747-400ER	241140	14205	416	0.0408070
747-8I	239000	14800	467	0.0345795
A380-800	323546	15700	555	0.0371316

I – Intercontinental.

появление A350-900 и A350-1000 является разработка новых моделей самолётов 777-8X и 777-9X [14] с прогнозируемым значением коэффициента топливной эффективности 0,028...0,029 л/(пасс-км). Таблица 12 посвящена широкофюзеляжным пассажирским самолётам большой вместимости (400...600 пассажиров на борту) и её данные показывают, что самым экономичным самолётом является Боинг 747-8I со значением коэффициента топливной эффективности 0,0345795 л/(пасс-км). Следует отметить, что значение коэффициента топливной эффективности увеличивается при увеличении количества пассажиров на борту самолёта (т.е. экономичность самолёта снижается). Эта тенденция наглядно представлена на графике (см. рис. 2).

Сравнение топливной эффективности конкурирующих моделей широкофюзеляжных пассажирских самолётов представлено в таблице 13.

Таким образом, принимая во внимание значения коэффициентов топливной эффективности совре-

менных широкофюзеляжных самолётов в трёхклассной компоновке пассажирского салона, выявлено, что наиболее эффективным самолётом с точки зрения топливной эффективности является Аэробус А330-300, и, следовательно, транспортную инфраструктуру целесообразно строить с использованием этого типа самолёта для перевозки пассажиров на расстояние 10000...11000 км с учётом пассажиропотока и комфортности размещения пассажиров в салоне самолёта, а также гибкости расписания полётов.

Определим и сравним расход топлива и затраты на перевозку 240 пассажиров за один рейс по маршруту Амстердам (AMS) – Лос-Анджелес (LAX) при использовании самолётов Аэробус А330-300, А340-200, Боинг 767-400ER и 787-8. Расстояние между аэропортами составляет 8977 км [3]. Принимая во внимание необходимость наличия дополнительного топлива на борту из-за погодных условий, загруженности аэропорта, необходимости выпол-

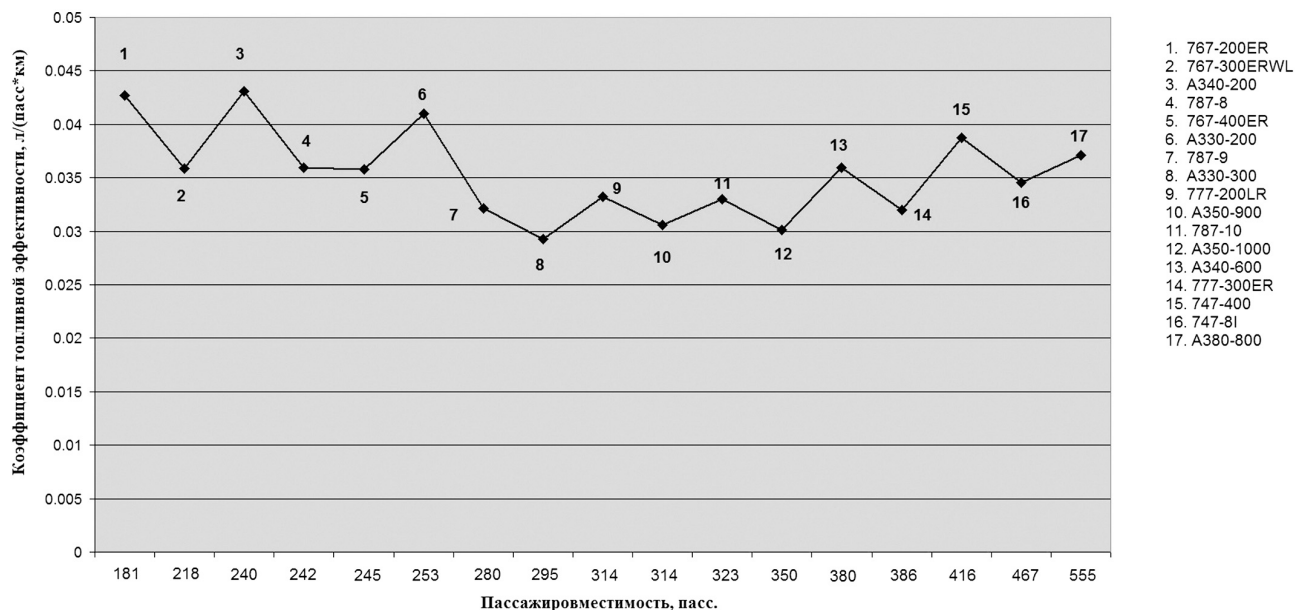


Рис. 2. Анализ топливной эффективности широкофюзеляжных самолётов

Таблица 13

**Анализ топливной эффективности конкурирующих широкофюзеляжных самолётов**

Самолёт	$k_{то}$ [л/(пасс·км)]	Самолёт	$k_{то}$ [л/(пасс·км)]	Разница %
767-400ER	0.0358093	A330-200	0.0410271	14.6
787-8	0.0359675	A330-200	0.0410271	14.1
787-9	0.0321660	A330-300	0.0292575	9.9
777-200LR	0.0332374	A340-500	0.0427331	28.6
777-200LR	0.0332374	A350-900	0.0306265	8.5
777-300	0.0398798	A340-600	0.0359215	11
777-300ER	0.0319704	A340-600	0.0359215	12.4
777-300ER	0.0319704	A350-1000	0.0301158	6.2
747-400ER	0.0408070	A380-800	0.0371316	9.9
747-8I	0.0345795	A380-800	0.0371316	7.4

нения дополнительных маневров и т.д., примем необходимую дальность полета 9200 км.

Результаты расчётов представлены в таблицах 14 и 15.

Таким образом, используя самолёт Аэробус А330-300 на указанном маршруте, возможно достичь максимальной эффективности использования топлива. Рейс, выполняемый А330-300, требует 64601 л топлива, что на 30490 л меньше затрат топлива для рейса, выполняемого А340-200, на 14466 л меньше в сравнении с рейсом, выполняемым 767-400ER и на 14815 л меньше по отношению к рейсу, выполняемому самолётом 787-8. Принимая во внимание стоимость авиационного топлива (январь 2015 [5]), возможно определить затраты на покупку топлива (см. таблицу 15). Результаты расчётов показывают, что использование А330-300 самолёта на маршруте

стоит на 13721 доллар США меньше сравнительно с использованием А340-200, на 6510 долларов США меньше сравнительно с использованием 767-400ER и на 6667 долларов США меньше сравнительно с рейсом, выполняемым 787-8.

Определим и сравним расход топлива и его стоимость для транспортировки 280 пассажиров за один рейс самолётами Аэробус А330-300, А340-300 и Боинг 787-9 по тому же маршруту.

Результаты анализа представлены в таблицах 16 и 17.

Самым экономичным самолётом является Аэробус А330-300, и для выполнения полета из Амстердама в Лос-Анджелес с 280 пассажирами на борту требуется 75367 л топлива, стоимость топлива составляет 33915 долларов США. Одновременно полет по тому же маршруту с тем же числом пасса-



Таблица 14

**Затраты топлива на транспортировку 240 пассажиров за один рейс по маршруту Амстердам – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$n_{\text{пассвм}}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс-км)]	$Q_{\text{тп}}$ [л]
A330-300	240	295	81.4	0.0292575	64601
A340-200	240	240	100	0.0430667	95091
767-400ER	240	245	98	0.0358093	79067
787-8	240	242	99.2	0.0359675	79416

Таблица 15

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 240 пассажиров за один рейс по маршруту Амстердам – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$Q_{\text{тп}}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
A330-300	64601	0.45	29070
A340-200	95091	0.45	42791
767-400ER	79067	0.45	35580
787-8	79416	0.45	35737

Таблица 16

**Затраты топлива на транспортировку 280 пассажиров за один рейс по маршруту Амстердам – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$n_{\text{пассвм}}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс-км)]	$Q_{\text{тп}}$ [л]
A330-300	280	295	94.9	0.0292575	75367
A340-300	280	295	94.9	0.0365830	94238
787-9	280	280	100	0.0321660	82860

Таблица 17

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 280 пассажиров за один рейс по маршруту Амстердам – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$Q_{\text{тп}}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
A330-300	75367	0.45	33915
A340-300	94238	0.45	42407
787-9	82860	0.45	37287

жиров, но на самолёте A340-300 требует дополнительно 18871 л топлива, что составляет 8492 доллара США дополнительных расходов, тот же рейс с 280 пассажирами на борту, но на 787-9 требует 7493 л топлива дополнительно или в стоимостном выражении на 3372 доллара США больше.

Определим и сравним расход топлива и его стоимость для выполнения рейса из Мельбурна (MEL) в Лос-Анджелес (LAX) с 310 пассажирами на борту самолётами Аэробус А340-500, А350-900 и Боинг 777-200LR. Расстояние между аэропортами

12748 км [3]. Принимая во внимание необходимость наличия дополнительного топлива на борту из-за погодных условий, загруженности аэропорта, необходимость выполнения дополнительных маневров, и т.д., примем необходимую дальность полета 13000 км.

Результаты расчётов представлены в таблицах 18 и 19.

Самым экономичным самолётом является Аэробус А350-900, и полет из Мельбурна в Лос-Анджелес с 310 пассажирами на борту при эксплуатации самолёта А350-900 требует 123425 л топлива,



Таблица 18

**Затраты топлива на транспортировку 310 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$n_{\text{пассвм}}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]	$Q_{\text{тп}}$ [л]
A340-500	310	313	99	0.0427331	172214
A350-900	310	314	98.7	0.0306265	123425
777-200LR	310	314	98.7	0.0332374	133947

Таблица 19

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 310 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$Q_{\text{тп}}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
A340-500	172214	0.45	77496
A350-900	123425	0.45	55541
777-200LR	133947	0.45	60276

стоимость топлива составляет 55541 доллар США. Вместе с тем, полет по тому же маршруту с тем же числом пассажиров при использовании самолёта A340-500 требует дополнительно 48789 л топлива или дополнительных расходов в размере 21955 долларов США, тот же рейс с 310 пассажирами на борту при эксплуатации самолёта Боинг 777-200LR требует на 10522 л топлива больше, стоимость которого составляет 4735 долларов США.

Определим и сравним расход топлива и его стоимость при транспортировке 350 пассажиров по тому же маршруту от Мельбурна до Лос-Анджелеса самолётами Аэробус А340-600, А350-1000 и Боинг 777-300ER.

Результаты расчётов представлены в таблицах 20 и 21.

Самым экономичным самолётом является Аэробус А350-1000, и полет из Мельбурна в Лос-Анджелес с 350 пассажирами на борту требует 137027 л топлива, стоимость топлива составляет 61662 доллара США. Полет по тому же маршруту с тем же числом пассажиров, но на самолёте А340-600 требует дополнительно 26416 л топлива или дополнительных расходов в размере 11887 долларов США, тот же рейс с 350 пассажирами на борту при эксплуатации самолёта Боинг 777-300ER требует на 8438 л топлива больше или дополнительных расходов в размере 3797 долларов США.

Таблица 20

**Затраты топлива на транспортировку 350 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$n_{\text{пассвм}}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]	$Q_{\text{тп}}$ [л]
A340-600	350	380	92.1	0.0359215	163443
A350-1000	350	350	100	0.0301158	137027
777-300ER	350	386	90.7	0.0319704	145465

Таблица 21

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 350 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$Q_{\text{тп}}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
A340-600	163443	0.45	73549
A350-1000	137027	0.45	61662
777-300ER	145465	0.45	65459

Определим и сравним расход топлива и денежные расходы на топливо для транспортировки 460 пассажиров по тому же маршруту от Мельбурна до Лос-Анджелеса самолётами Аэробус А380-800 и Боинг 747-8I.

Результаты расчётов представлены в таблицах 22 и 23.

Самым экономичным самолётом является 747-8I, и полет из Мельбурна в Лос-Анджелес с 460 пассажирами на борту требует 206785 л топлива, стоимость топлива составляет 93053 доллара США. Полет по тому же маршруту с тем же числом пассажиров при эксплуатации самолёта А380-800 требует дополнительно 15262 л топлива или дополнительных расходов в размере 6868 долларов США.

Сравнения показывают, какой самолёт является самым экономичным в каждом конкретном случае, но необходимо принимать во внимание коэффициент загрузки самолёта (отношение количества пассажиров на борту к количеству посадочных мест) и реальный пассажиропоток между конкретными аэропортами. В действительности для выполнения ежедневного рейса из Амстердама в Лос-Анджелес авиакомпания KLM Royal Dutch Airlines использует самолёт Боинг 747-400 в грузопассажирской конфигурации (268 пассажиров в трёхклассной компоновке пассажирского салона плюс дополнительный груз) [15]. Рейсы из Мельбурна в Лос-Анджелес обслуживаются авиакомпанией Qantas Airways в следующем порядке: ежедневные рейсы самолётами Аэробус А380-800 с максимальной пассажировместимостью 484 человека в трёхклассной компоновке пассажирского салона и рейсы, выполняемые самолётами Боинг 747-400 с 353 местами на борту три раза в неделю [16]. Кроме того, по этому же маршруту выполняются рейсы авиакомпании United Airlines на самолётах Боинг 787-9 вместимостью 252 пассажира один раз в день [17].

Проведенный анализ показывает тенденцию роста величины коэффициента топливной эффективности с ростом пассажировместимости самолётов. Другими словами, увеличиваясь в размерах, самолёты становятся менее эффективными с точки зрения расхода топлива для перевозки одного пассажира на заданное расстояние. Принимая во внимание этот факт, логично выстроить транспортную инфраструктуру по принципу предпочтения беспосадочных полётов (point-to-point destination principle) с использованием самолётов класса А330-300 (т.е. вместимостью около 300 пассажиров). В то же время необходимо обратить внимание на то, что самолёты класса А330-300 обеспечивают дальность беспосадочного полёта около 11000 км, что меньше дальности полёта таких самолётов, как Аэробус А380-800 и Боинг 747-8I (15000...16000 км).

Тенденции развития современных широкофюзеляжных пассажирских самолётов показывают возможность таких самолётов, как А350-900, А350-1000, 777-300ER и 787-9 преодолевать расстояния 14000...15000 км без посадки (другими словами они приближаются по показателям дальности полёта к самолётам класса 747-8I и А380-800). Самолёт 777-200LR с наиболее протяжённой дальностью полёта среди пассажирских самолётов 17370 км имеет значение коэффициента топливной эффективности 0,0332374 л/(пасс-км), что на 8,5% хуже по сравнению с А350-900. Но А350-900 способен совершать беспосадочный полёт на дистанции до 14350 км. Таким образом, на маршрутах до 11000 км (таких как Амстердам – Лос-Анджелес) с соответствующим пассажиропотоком имеет смысл использовать как самолёты класса А330-300, так и самолёты класса А350-1000 и 777-300ER, а самолёты класса А380 и 747-8I использовать на линиях дальностью 13000...15000 км (таких как маршрут Мельбурн – Лос-Анджелес). Сочетание самолётов

Таблица 22

**Затраты топлива на транспортировку 460 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$n_{\text{пассвм}}$ [пасс]	Коэффициент загрузки %	$k_{\text{тз}}$ [л/(пасс-км)]	$Q_{\text{тп}}$ [л]
А380-800	460	555	82.9	0.0371316	222047
747-8I	460	467	98.5	0.0345795	206785

Таблица 23

**Затраты на покупку топлива при транспортировке 460 пассажиров за один рейс по маршруту Мельбурн – Лос-Анджелес различными самолётами**

Самолёт	$Q_{\text{тп}}$ [л]	Цена топлива [долларов США/л]	Стоимость топлива [долларов США]
А380-800	222047	0.45	99921
747-8I	206785	0.45	93053



А380-800, 747-400 и 787-9 на этом маршруте указывает на стремление авиакомпаний получить большую прибыль путём введения в эксплуатацию новых более экономичных самолётов, что приводит к уменьшению затрат на топливо, и в то же время к удовлетворению спроса на пассажирские перевозки на заданном маршруте. Следует также отметить, что авиакомпании покупают самолёты А380-800 в основном для замены самолётов 747-400 и 747-400ER с худшими по сравнению с А380-800 показателями топливной эффективности.

Повышению топливной эффективности самолётов способствует также установка новых, более экономичных двигателей. Аэробус заявил, что новая модификация А330neo (neo – new engine option) с более экономичными двигателями будут доступны для клиентов в 2017 году [13]. В этом случае возможны два пути развития: увеличение дальности полёта самолёта с неизменным количеством пассажиров на борту или увеличение, если это возможно, пассажироместимости с сохранением неизменной дальности полёта. Возможность разработки самолёта А380neo в настоящее время обсуждается [11].

С точки зрения экономии топлива и с учетом реальной дальности полёта каждого самолёта маршруты до 11000 км с пассажиропотоком около 300 пассажиров за рейс целесообразно обслуживать

самолётами Аэробус А330-300. Маршруты дальностью до 15000 км с пассажиропотоком 280 пассажиров лучше обслуживать самолётами Боинг 787-9. Маршруты дальностью до 15000 км с пассажиропотоком 350 пассажиров целесообразно обслуживать самолётами Аэробус А350-1000. Маршруты дальностью до 15000 км с пассажиропотоком 400...450 пассажиров лучше обслуживать самолётами Боинг 747-8I. Наконец, маршруты дальностью до 15500 км с пассажиропотоком 500...550 пассажиров целесообразно обслуживать самолётами А380-800. Новые самолёты, такие как 777-8X и 777-9X, должны иметь более высокую топливную эффективность, и в этом случае они будут более предпочтительными при эксплуатации на рейсах протяжённостью 14000...15000 км и с пассажиропотоком 400...450 пассажиров за один рейс [14]. Также с целью удовлетворения спроса на пассажирские перевозки по заданному маршруту возможно использование самолётов как класса А380-800 и 747-8I, так и дальнемагистральных самолётов меньшей вместимости класса 777-300ER и А350-1000.

Прогнозируемые характеристики перспективных широкофюзеляжных пассажирских самолётов представлены в таблице 24.

Данные (см. таблицу 25) показывают на то, что самыми популярными широкофюзеляжными самолётами в настоящее время являются Боинг 777-300ER с

Таблица 24

#### Характеристики перспективных широкофюзеляжных пассажирских самолётов

Самолёт	Дальность [км]	$n_{\text{пасс}}$ [пасс]	$k_{\text{то}}$ [л/(пасс·км)]
—	11000...12000	280...300	0.027...0.028
—	15000...17000	301...400	0.028...0.029
—	15000...16000	401...600	0.032...0.033

Таблица 25

#### Поставки и заказы широкофюзеляжных самолётов (январь 2015)

Самолёт	Количество шт.	Самолёт	Количество шт.
А330-200	622	787-8	465
А330-300	692	787-9	467
А350-900	595	787-10	139*
А350-1000	169*	777-200LR	59
А380-800	470	777-300ER	768
		777-8X	43*
		777-9X	243*
		747-400	440
		747-8I	51

\* – только заказы самолётов.

768 поставленными и заказанными самолётами [2] и Аэробус А330-300 с 692 поставленными и заказанными машинами [11]. Принимая во внимание пассажировместимость этих самолётов, их дальность и топливную эффективность, а также тенденции развития современного самолётостроения, можно сказать, что наиболее востребованными в ближайшее время будут широкофюзеляжные самолёты вместимостью 300...450 пассажиров, с дальностью беспосадочного полёта 15000...17000 км и показателями коэффициента топливной эффективности 0,027...0,029 л/ (пасс·км). Соответственно, целесообразно выстраивать транспортную инфраструктуру, принимая во внимание эти показатели.

#### 4. Выводы

Проведён анализ современных пассажирских самолётов с точки зрения их топливной эффективности. Определены наиболее экономичные модели узкофюзеляжных самолётов вместимостью 100...149 (Боинг 737-700WL), 150...199 (Аэробус А321-200SL) и 200...250 (Боинг 757-300WL) пассажиров в двухклассной компоновке пассажирского салона, а также наиболее экономичный узкофюзеляжный самолёт во всём диапазоне вместимости от 100 до 250 пассажиров (Боинг 757-300WL). Определены наиболее экономичные модели широкофюзеляжных самолётов вместимостью 180...299 (Аэробус А330-300), 300...399 (Аэробус А350-1000) и 400...600 пассажиров (Боинг 747-8I) в трёхклассной компоновке пассажирского салона, а также наиболее экономичный широкофюзеляжный самолёт в диапазоне вместимости 180...600 пассажиров (Аэробус А330-300).

Даны рекомендации по проектированию узкофюзеляжных пассажирских самолётов вместимостью 100...250 пассажиров и по построению транспортной инфраструктуры с использованием

таких самолётов. Также даны рекомендации по проектированию широкофюзеляжных пассажирских самолётов вместимостью 180...600 пассажиров и по построению транспортной инфраструктуры с их использованием.

#### Литература

- [1] P.M.Peeters, J.Middel, A.Hoolhorst "Fuel efficiency of commercial aircraft", National Aerospace University NLR of the Netherlands, 2005.
- [2] Интернет сайт [www.boeing.com](http://www.boeing.com).
- [3] Интернет сайт <http://www.travelmath.com>.
- [4] E.Russell "Delta orders 40 A330s and A321s", Flightglobal, September 2013.
- [5] Интернет сайт <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel>
- [6] D.Kaminski-Morrow "Ryanair orders up to 200 197-seat 737 Max jets", Flightglobal, September 2014.
- [7] D.Kaminski-Morrow "Airbus offers 200-plus seats in long-range A321neo", Flightglobal, January 2015.
- [8] Интернет сайт <http://www.newairplane.com/customers/southwest-airlines/southwest-airlines-launches-the-737-max-7>.
- [9] J.Ostrower "Airbus points sharklet A321 at 757 replacement market", Flightglobal, May 2010.
- [10] D.Kaminski-Morrow "Airbus tackles 757 range with higher-weight A321neo", Flightglobal, October 2014.
- [11] Интернет сайт [www.airbus.com](http://www.airbus.com).
- [12] C.Tetaz "New outlook on worldwide air passenger demand", интернет сайт [www.amadeus.com](http://www.amadeus.com), May 2012.
- [13] Интернет сайт <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/spotlight-on>.
- [14] Интернет сайт <http://www.newairplane.com/777x>.
- [15] Интернет сайт <http://www.klm.com>.
- [16] Интернет сайт <http://www.qantas.com.au>.
- [17] Интернет сайт <http://www.united.com>.

*Shalamov A.N.*

GECI GmbH. Germany, Hamburg

#### FUEL EFFICIENCY ANALYSIS OF MODERN PASSENGER AIRPLANES

*The fuel efficiency analysis of modern airplanes is performed. The most fuel efficient narrow-body airplanes are defined in the capacity range of 100...149, 150...199 and 200...250 seats in two class cabin configuration as well as the most fuel efficient narrow-body airplane of the entire 100...250 seats capacity range.*

*The most fuel efficient wide-body airplanes are defined in the capacity range of 180...299, 300...399 and 400...600 seats in three class cabin configuration as well as the most fuel efficient wide-body airplane of the entire 180...600 seats capacity range.*



*Recommendations of the narrow-body and wide-body passenger airplanes utilization and transportation infrastructure creating are formulated.*

*Keywords:* airplane fuel efficiency; narrow-body airplane; wide-body airplane; transport infrastructure; airplanes designing.

### References

- [1] P.M.Peeters, J.Middel, A.Hoolhorst "Fuel efficiency of commercial aircraft", National Aerospace University NLR of the Netherlands, 2005.
- [2] Web site [www.boeing.com](http://www.boeing.com).
- [3] Web site <http://www.travelmath.com>.
- [4] E.Russell "Delta orders 40 A330s and A321s", Flightglobal, September 2013.
- [5] Web site <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel>
- [6] D.Kaminski-Morrow "Ryanair orders up to 200 197-seat 737 Max jets", Flightglobal, September 2014.
- [7] D.Kaminski-Morrow "Airbus offers 200-plus seats in long-range A321neo", Flightglobal, January 2015.
- [8] Web site <http://www.newairplane.com/customers/southwest-airlines/southwest-airlines-launches-the-737-max-7>.
- [9] J.Ostrower "Airbus points sharklet A321 at 757 replacement market", Flightglobal, May 2010.
- [10] D.Kaminski-Morrow "Airbus tackles 757 range with higher-weight A321neo", Flightglobal, October 2014.
- [11] Web site [www.airbus.com](http://www.airbus.com).
- [12] C.Tetaz "New outlook on worldwide air passenger demand", интернет сайт [www.amadeus.com](http://www.amadeus.com), May 2012.
- [13] Web site <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/spotlight-on>.
- [14] Web site <http://www.newairplane.com/777x>.
- [15] Web site <http://www.klm.com>.
- [16] Web site <http://www.qantas.com.au>.
- [17] Web site <http://www.united.com>.