

УДК 629.735.45

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

С.В. ЛЕВИЦКИЙ, Е.В. ЛЕВИЦКАЯ

В статье предложена методика оценки транспортной эффективности магистрального пассажирского самолета на основе математического моделирования всех типовых этапов полета для максимально точного определения затрат топлива с учетом влияния на них различных факторов.

**Ключевые слова:** магистральный пассажирский самолет, имитационная математическая модель, транспортная эффективность.

Для гражданской авиации основным требованием является обеспечение высокой экономической эффективности эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). Поэтому все эксплуатационные процессы, в том числе и полет, оцениваются экономическими критериями при соблюдении заданных требований безопасности. Задачи улучшения экономических показателей и повышения конкурентоспособности ЛА решаются при её разработке путем оптимизации аэродинамических характеристик, конструкторских решений, параметров силовой установки и в процессе использования путем оптимизации режимов полета при заданных ограничениях и условиях эксплуатации.

Если не рассматривать вопросы надежности ЛА и связанные с этим затраты на обслуживание, ремонт и задержки рейсов, экономическая эффективность транспортного ЛА прежде всего будет определяться располагаемой коммерческой нагрузкой и потребными затратами топлива. Коммерческая нагрузка определяет размеры возможного дохода авиакомпании за рейс, а затраты топлива являются одной из основных статей расходов.

В качестве показателя экономической эффективности ( $\mathcal{E}$ ) ЛА рассматривается некий функционал, зависящий от шести групп факторов

$$\mathcal{E} = F(X_{ЛА}, X_{РП}, X_{СУ}, X_{СЛА}, X_{\mathcal{E}}, X_{ТЭ}),$$

где  $X_{ЛА}$  – совокупность аэродинамических и массовых характеристик ЛА;  $X_{РП}$  – совокупность параметров, характеризующих режим полета;  $X_{СУ}$  – совокупность высотно-скоростных и дроссельных характеристик двигателей;  $X_{СЛА}$  – совокупность характеристик комфорта и безопасности пассажиров;  $X_{\mathcal{E}}$  – совокупность эксплуатационных факторов;  $X_{ТЭ}$  – совокупность технико-экономических параметров.

Основной задачей исследований по повышению экономичности полета является нахождение оптимального сочетания параметров, обеспечивающих экстремальное значение целевой функции  $\mathcal{E}$ . Прежде чем приступить к решению оптимизационных задач, необходимо создать инструмент решения прямой задачи, т.е. оценки транспортной эффективности ЛА при известных или заданных параметрах, определяющих указанные группы факторов.

Для получения достоверной оценки целевой функции необходимо создать модель полета как основного технологического процесса на воздушном транспорте. Структурная блок-схема такой математической модели представлена на рис. 1.

Блок динамики математической модели включает динамические и кинематические уравнения движения центра масс, а также кинематические уравнения движения вокруг центра масс ЛА с вычислением статических моментов и балансировочного отклонения рулей в канале тангажа для учета потерь аэродинамического качества на балансировку [1]. Управление формируется в соответствии с параметрами этапов полета с учетом полетных и эксплуатационных огра-

ничений по специальным алгоритмам задания степени дросселирования силовой установки  $\bar{U}_p$  и угловых скоростей изменения углов атаки  $\alpha$  и крена  $\gamma$ .

Задание на рейс предполагает указание количества пассажиров, коммерческой нагрузки, предварительного баланса топлива, центровки ЛА, протяженности маршрута и высотного эшелона. Это позволяет рассчитать взлетную массу ЛА, определяемую коммерческой нагрузкой и блоковым топливом.

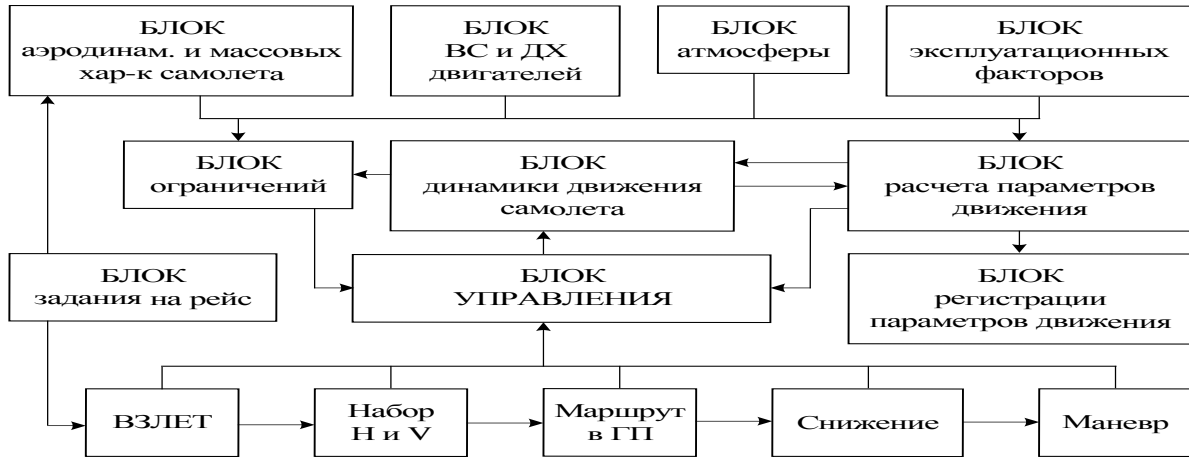


Рис. 1. Блок-схема математической модели полета

Выходными параметрами моделирования полета являются интегральные показатели затрат топлива, времени, пройденного пути за весь рейс и за отдельные его этапы от начала разбега по ВПП до захода на посадку. По полученным данным можно проводить технические и экономические оценки по любым критериям, устанавливая связь между совокупностями различных факторов и показателями эффективности ЛА.

В качестве оценки экономической эффективности ЛА может использоваться большой перечень количественных показателей [2]. В данной работе оценку эффективности ЛА как транспортного средства предлагается производить по четырем критериям. Два из них ( $k_{TЭ1}$  и  $k_{TЭ2}$ ) являются чисто техническими характеристиками, два ( $k_{КЭ}$  и  $R$ ) характеризуют ЛА как средство производства услуг по перевозке пассажиров и извлечения прибыли.

Показатели топливной эффективности  $k_{TЭ1}$  и  $k_{TЭ2}$  являются интегральными характеристиками совершенства системы «самолет – силовая установка». Первый критерий ( $k_{TЭ1}$ ) показывает потребный расход топлива для перевозки одного пассажира на расстояние, равное одному километру

$$k_{TЭ1} = \frac{m_T}{n_{П} L_{ПР}}, \left[ \frac{г}{П км} \right],$$

где  $m_T$  – масса блокового топлива, затрачиваемая на перелет из пункта "А" в пункт "Б", с учетом расхода топлива на земле;  $n_{П}$  – количество перевозимых пассажиров;  $L_{ПР}$  – практическая дальность полета из пункта "А" в пункт "Б".

Второй критерий ( $k_{TЭ2}$ ) показывает потребный расход топлива для перевозки одной тонны коммерческого груза на расстояние, равное одному километру

$$k_{TЭ2} = \frac{m_T}{m_K L_{ПР}}, \left[ \frac{г}{Т км} \right],$$

где  $m_K$  – масса коммерческого груза, включающая массу пассажиров, багажа, почты и других, оплачиваемых грузов.

Третий критерий – коэффициент коммерческой эффективности ( $k_{кЭ}$ ) показывает, какую прибыль получает авиакомпания от перевозки одного пассажира на расстояние, равное одному километру

$$k_{кЭ} = \frac{Pr}{n_{п}L_{пр}}, \left[ \frac{\text{руб}}{\text{п км}} \right],$$

где  $Pr$  – прибыль авиакомпании в одном рейсе по заданному маршруту.

Четвертый критерий характеризует рентабельность ( $R$ ) оказания транспортных услуг на заданном маршруте данным типом транспортного средства

$$R = \frac{D - C_T}{C_T} 100\%,$$

где  $D$  – доход, определяемый суммарной стоимостью проданных на рейс билетов, без учета стоимости перевозки почты и других попутных коммерческих грузов;  $C_T$  – стоимость топлива, расходуемого за рейс (расходы на зарплату экипажа, наземное и навигационное обслуживания рейса не учитывались).

Для примера демонстрации работоспособности методики оценки транспортной эффективности ЛА использованы характеристики гипотетического среднемагистрального пассажирского ЛА нормальной аэродинамической схемы с силовой установкой в составе двух ДТРД в стандартных атмосферных условиях. Исходные данные для расчета массы ЛА даны в табл. 1.

Топливо, используемое для расчета практической дальности полета, определяется массой блокового топлива  $m_{T \text{ расч.}} = m_T - m_{TЗ}$  и расходуется на следующие составляющие

$$m_{T \text{ расч.}} = m_{T \text{ ВЗ}} + m_{T \text{ НВ}} + m_{T \text{ Р}} + m_{T \text{ ГП}} + m_{T \text{ СН}} + m_{T \text{ ПМ}},$$

где  $m_T$  – масса блокового топлива;  $m_{TЗ}$  – масса топлива, расходуемого на земле;  $m_{T \text{ ВЗ}}$  – масса топлива, расходуемого на взлет;  $m_{T \text{ НВ}}$  – масса топлива, расходуемого на набор заданной высоты полета;  $m_{T \text{ Р}}$  – масса топлива, расходуемого на разгон до заданной скорости полета;  $m_{T \text{ ГП}}$  – масса топлива, расходуемого на участке горизонтального полета;  $m_{T \text{ СН}}$  – масса топлива, расходуемого на снижение для захода на посадку;  $m_{T \text{ ПМ}}$  – масса топлива, расходуемого на предпосадочное маневрирование;  $m_{T \text{ НЗ}}$  – масса резервного навигационного запаса топлива ( $0,05 m_{T \text{ расч.}}$ );  $m_{T \text{ ЗА}}$  – масса топлива, расходуемого для перелета на запасной аэродром;  $m_{T \text{ О}}$  – масса топлива, расходуемого в зоне ожидания запасного аэродрома;  $m_{T \text{ расч.}}$  – масса топлива для расчета дальности.

Таблица 1

Исходные данные для расчета массы ЛА

№ п/п	Расчетная масса	Значение, кг
1	Масса снаряженного самолета	44000
2	Масса топлива максимальная	20000
3	Масса коммерческой нагрузки максимальная	23000
4	Масса максимальная взлетная	80000

Взлетная масса самолета складывается из следующих составляющих

$$m_{\text{взл.}} = m_{\text{сн.}} + m_{\text{КН}} + m_{T \text{ ЗА}} + m_{T \text{ О}} + m_T - m_{TЗ},$$

где  $m_{\text{сн.}}$  – масса снаряженного самолета;  $m_{\text{КН}}$  – масса коммерческой нагрузки.

На первом этапе проведены оценочные моделирования по определению располагаемых транспортных возможностей самолета при средней коммерческой нагрузке (18000 кг – 120 пассажиров). Расчетные данные представлены в табл. 2 (здесь  $x_{\text{ц.т}}$  – центровка ЛА).

Таблица 2

## Исходные данные для моделирования полета

m <sub>взл.</sub> , кг	m <sub>кн.</sub> , кг	m <sub>т.</sub> , кг	x <sub>ц.т.</sub>	Режим крейсерского полета	
				H, м	M
78200	18000	14500	0,17	10500	0,78

На рис. 2 – 5 приведены результаты, иллюстрирующие способ получения оценки транспортной эффективности пассажирского ЛА, основанный на методе математического моделирования основных этапов полета путем интегрирования уравнений движения.

На рис. 2 показано изменение по времени взлета действующих на ЛА сил: подъемной силы –  $Y_a$ ; силы лобового сопротивления –  $X_a$ ; суммарной силы тяги на взлетном режиме –  $P_{взл.}$ ; силы трения колес шасси –  $F_{тр.}$ . На рис. 3 показаны параметры взлета: истинная скорость полета –  $V_{ист.}$  (км/ч); высота полета –  $H$  (м); масса затраченного топлива –  $m_{топл.}$  (кг).

На графиках (рис. 2, 3) в масштабе текущего времени отмечены этапы полного взлета:

- до 21 с ускоренное движение ЛА по ВПП на трех опорах шасси;
- на 21 с отрыв носовой стойки и плавное увеличение угла атаки до  $\alpha_{отр.} = 8^{\circ}$ ;
- на 30 с отрыв самолета от ВПП и переход в набор высоты с углом наклона  $\theta = 8^{\circ}$ ;
- при достижении высоты стандартного препятствия (дистанция взлета –  $L_{в.д.} = 1620$  м) начало уборки шасси;
- при достижении высоты 100 м начало перевода конфигурации из взлетной в крейсерскую;
- достижение высоты круга – 457 м (дистанция полного взлета –  $L_{в.д.} = 4900$  м).

На рис. 4 показаны параметры полета при разгоне и наборе высоты крейсерского полета: истинная скорость –  $V_{ист.}$  (км/ч); пройденный путь –  $L_{нв}$  (км); масса топлива –  $m_{топл.}$  (кг).

На рис. 5 показано изменение по времени текущей дальности горизонтального полета ( $L_{гп}$ , км) и остатка топлива ( $m_{т\ расч.}$ , кг), выделенного на крейсерский полет. Итоговые характеристики промоделированного полета представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Итоговые результаты полета

$V_{отр.}$ , км/ч	$L_p$ , м	$L_{пр}$ , км	$t_{п}$ , ч	$k_{тэ 1}$ , г/П*км	$k_{тэ 2}$ , г/Т*км
285	1290	4780	5,9	23,51	156,74

Здесь  $V_{отр.}$  – скорость отрыва при взлете;  $L_p$  – длина разбега при взлете;  $L_{пр}$  – практическая дальность полета;  $t_{п}$  – время полета от взлета до снижения на высоту круга при заходе на посадку.

На втором этапе исследований проводилась оценка коммерческой и транспортной эффективности ЛА при полете по заданным маршрутам. Были рассмотрены два типовых рейса ЛА. Характеристики рейсов приведены в табл. 4. Данные по ценам одной тонны авиационного керосина ТС-1 или РТ (31000 руб.) и на билеты соответствуют их средним значениям на конец 2012 г.

Полеты по заданным рейсам моделировались при двух вариантах коммерческой нагрузки: полной (150 пассажиров) и частичной загрузках (120 пассажиров).

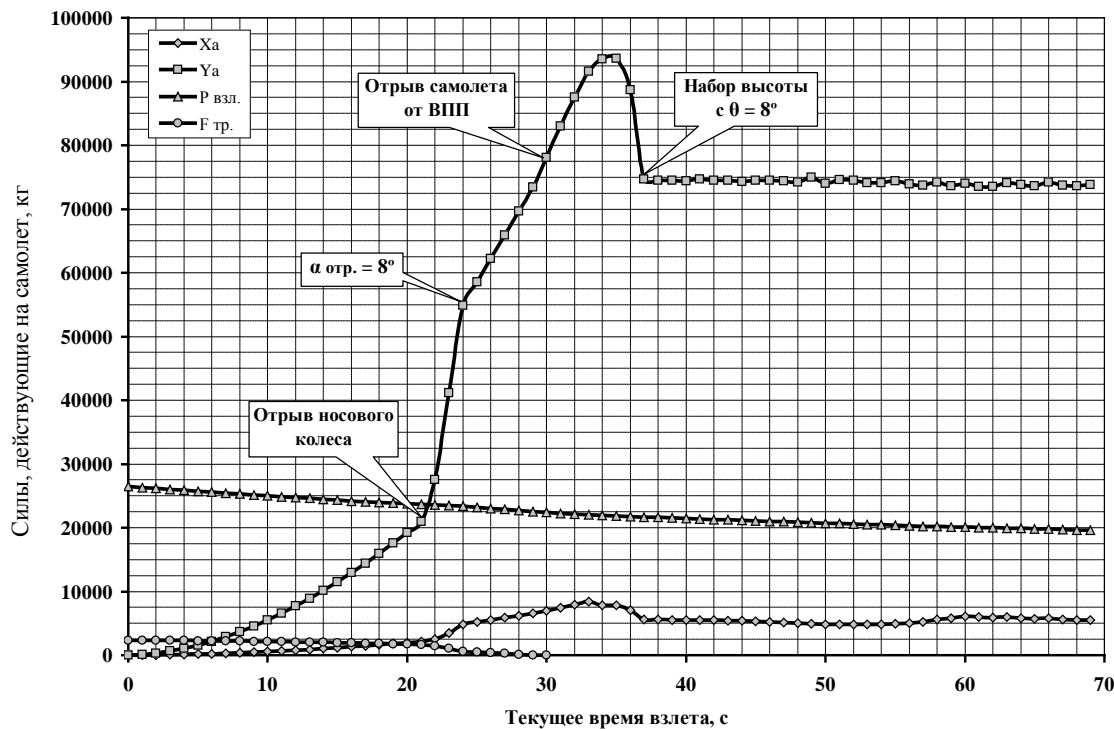


Рис. 2. Изменение по времени сил, действующих на ЛА в процессе взлета

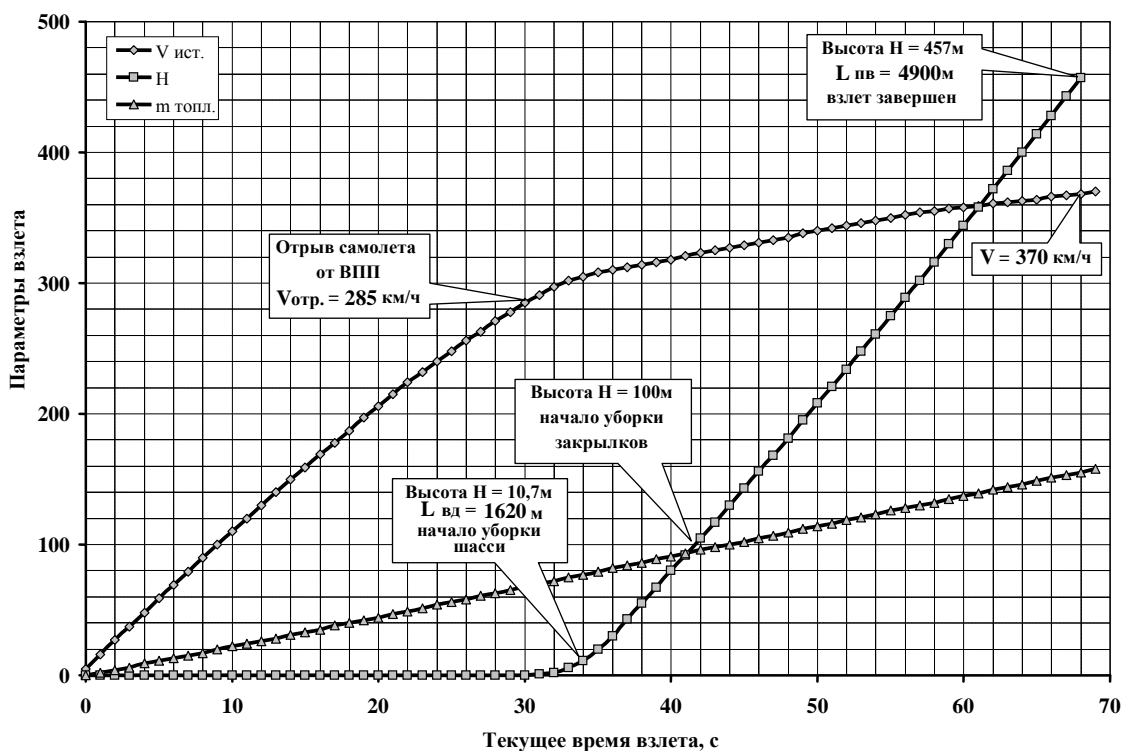


Рис. 3. Параметры движения ЛА в процессе взлета

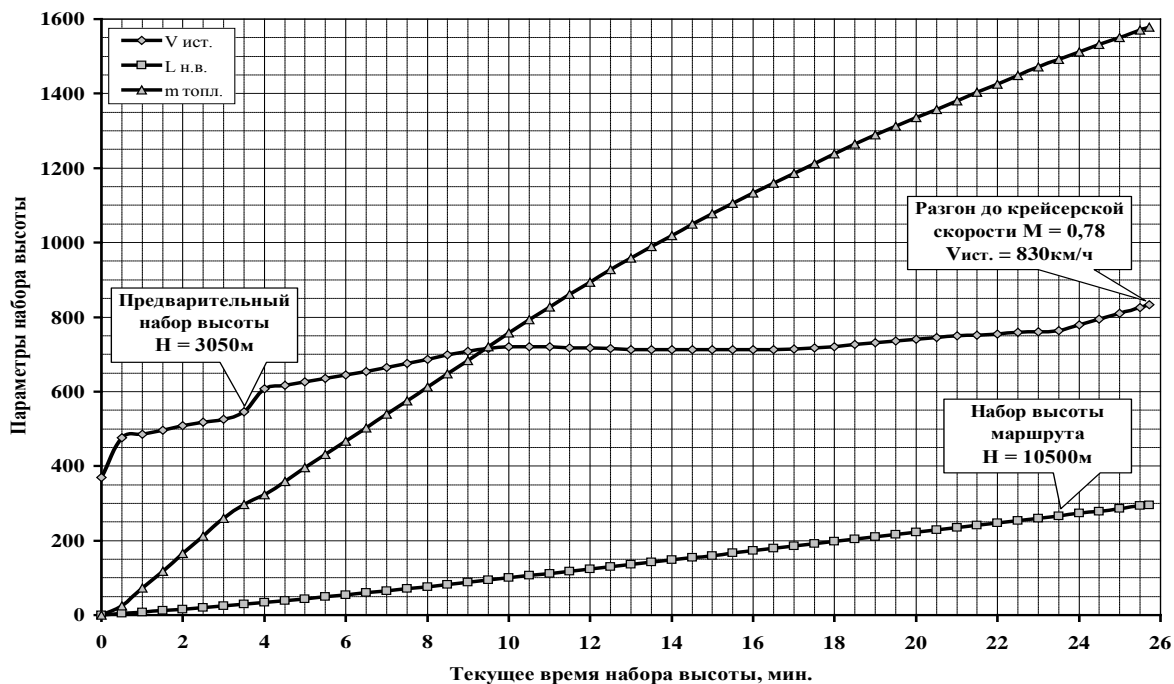


Рис. 4. Набор высоты и скорости крейсерского полета по маршруту

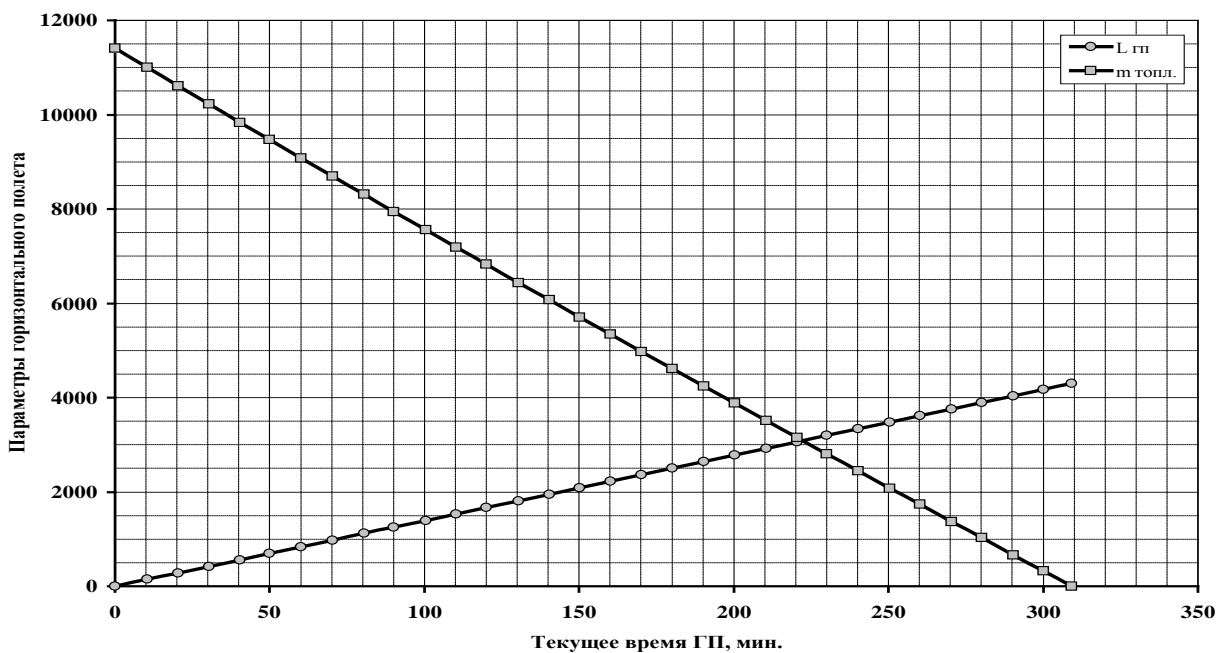


Рис. 5. Остаток топлива и дальность крейсерского полета

Таблица 4

Характеристики исследуемых рейсов

№ п/п	Маршрут полета	Дальность, км	Средняя цена билета, руб.
1	Москва – Сочи	1378	9700
2	Москва – Новосибирск	2795	11500

Результаты моделирования показывают, что для полета по маршруту Москва – Сочи требуется 5000 кг топлива при полной коммерческой нагрузке и 4300 кг при наличии на борту 120-и пассажиров. Взлетные характеристики самолета и показатели эффективности рейса приведены в табл. 5, 6.

При полной загрузке ЛА обеспечивается высокая топливная эффективность  $k_{ТЭ1} = 24,19$  г/П\*км и  $k_{ТЭ2} = 161,26$  г/Т\*км.

Таблица 5

## Взлетные характеристики ЛА

$m_{ВЗ}$ , кг	$n_{П}$ , чел.	$t_{ВЗ}$ , с	$L_{P}$ , м	$V_{ОТР}$ , км/ч	$m_{Т ВЗ}$ , кг
68000	120	56	900	260	128
73320	150	60	1090	270	137

Благодаря высокой стоимости билетов коммерческая эффективность является весьма высокой. Даже при 50%-й загрузке самолета рентабельность рейса значительно выше 100% ( $R = 773,2\%$ ). Каждый километр пройденного пути приносит авиакомпании от каждого пассажира 6 руб. 23 коп. прибыли ( $k_{КЭ} = 6,23$  руб./П\*км).

Таблица 6

## Показатели топливной и коммерческой эффективности рейса Москва – Сочи

Кол-во пассажиров	$m_{T}$ , кг	$q_{ср.}$ , кг/км	$D$ , тыс.руб.	$C_{топл.}$ , тыс.руб.	$P_{r}$ , тыс.руб.	$R$ , %	$k_{КЭ}$ , руб./П*км	$k_{ТЭ1}$ , г/П*км	$k_{ТЭ2}$ , г/Т*км
120	4300	2,80	1164,0	133,3	1030,7	773,2	6,23	26,00	173,36
150	5000	3,31	1455,0	155,0	1300,0	838,7	6,29	24,19	161,26

Для полета по маршруту Москва – Новосибирск требуется 9350 кг топлива при полной коммерческой нагрузке (150 пассажиров) и 8550 кг при наличии 120-и пассажиров. Характеристики ЛА и показатели эффективности рейса приведены в табл. 7, 8.

Таблица 7

## Взлетные характеристики ЛА

$m_{ВЗ}$ , кг	$n_{П}$ , чел.	$t_{P}$ , с	$L_{P}$ , м	$V_{ОТР}$ , км/ч	$m_{Т ВЗ}$ , кг
72200	120	64	1020	267	145
77670	150	68	1250	280	156

Таблица 8

## Показатели эффективности рейса Москва – Новосибирск

Кол-во пассажиров	$m_{T}$ , кг	$q_{ср.}$ , кг/км	$D$ , тыс.руб.	$C_{топл.}$ , тыс.руб.	$P_{r}$ , тыс.руб.	$R$ , %	$k_{КЭ}$ , руб./П*км	$k_{ТЭ1}$ , г/П*км	$k_{ТЭ2}$ , г/Т*км
120	8550	2,90	1380,0	265,05	1114,95	420,7	3,32	25,49	169,95
150	9350	3,19	1725,0	289,85	1435,15	495,1	3,42	22,30	148,68

## Выводы

1. Разработанная математическая модель движения ЛА на всех этапах полета ЛА позволяет с высокой степенью точности определять расход топлива, потребный для полета по заданному маршруту, и учитывать влияние на него эксплуатационных факторов.

2. Разработанная методика позволяет количественно оценивать влияние аэродинамических, массово-габаритных характеристик самолета, высотно-скоростных и дроссельных характери-

стик двигателя, режима полета на показатели топливной и коммерческой эффективности ЛА по критериям: топливной эффективности –  $k_{ТЭ1}$  и  $k_{ТЭ2}$ ; коммерческой эффективности –  $k_{КЭ}$ ; рентабельности –  $R$ ; практической дальности полета –  $L_{ДП}$ ; среднему километровому расходу топлива –  $q_{ср}$ .

3. Оптимальные дальности полета по объективным критериям топливной эффективности и субъективным критериям коммерческой эффективности не совпадают. По топливной эффективности рассмотренному ЛА целесообразно выполнять рейсы на дальность около 2500 км. По коммерческой эффективности наиболее прибыльными являются рейсы на дальность 1000 – 1500 км.

4. Доля стоимости топлива в цене на билет при полной загрузке ЛА составляет на рейсе Москва – Сочи - 10,7%, на рейсе Москва – Новосибирск - 16,8%.

5. Аэродинамическое качество и удельный расход топлива современных пассажирских лайнеров близки к совершенству. Повышение топливной и коммерческой эффективности воздушных перевозок возможно за счет увеличения относительной массы коммерческой нагрузки и снижения эксплуатационных затрат, а также иных расходов, не связанных с качеством АТ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левицкий С.В., Свиридов Н.А. Динамика полета. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
2. Скрипниченко С.Ю. Оптимизация режимов полета по экономическим критериям. - М.: Машиностроение, 1988.

#### THE METHODS OF ASSESSMENT OF TRANSPORTATION EFFICIENCY OF A PASSENGER AIRCRAFT

Levickiy S.V., Levickaya E.V.

The methods of assessment of the transportation efficiency of a passenger aircraft based on mathematical modeling of all stages of flight for an accurate estimation of the fuel quantity taking into account different factors influencing the expenditure of the fuel are given.

**Key words:** a passenger aircraft, simulating mathematical model, transportation efficiency.

#### Сведения об авторах

**Левицкий Сергей Владимирович**, 1955 г.р., окончил РВВАИУ им. Я. Алксниса (1977), академик Академии наук авиации и воздухоплавания, профессор, доктор технических наук, ведущий инженер-конструктор НПК «Иркут», автор 115 научных работ, область научных интересов – оптимизация технических характеристик и режимов полета летательных аппаратов на основе математического моделирования динамики движения.

**Левицкая Елена Валерьевна**, окончила МГАВТ (1994), ведущий инженер кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – динамика полета летательных аппаратов, организация и методическое обеспечение учебного процесса.