

doi: 10.32620/oikit.2019.85.09

УДК 629.7.083

Ю.А. Улитенко

Относительный критерий эффективности высокоскоростного летательного аппарата

Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс»

Создание перспективных высокоскоростных летательных аппаратов неразрывно связано с уровнем развития авиадвигателестроения, так как характеристики двигателя определяют возможности летательного аппарата в целом. Основными требованиями к двигателям высокоскоростных летательных аппаратов является увеличение скорости и высоты полета. С каждым новым поколением турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажной камерой сгорания повышаются их удельная тяга и удельный импульс, однако применение наукоемких технологий приводит к значительному увеличению стоимости двигателя. В то же время конструкция существующих двигателей имеет большие резервы для модернизации. Для количественной оценки степени влияния нового технического решения на качество выполнения задачи авиационным комплексом используют критерии (показатели) эффективности. Однако найти прямую функциональную зависимость общего критерия эффективности авиационного комплекса от технических и эксплуатационных характеристик, условий применения высокоскоростного летательного аппарата, не представляется возможным. Цель выполнения данной работы заключается в разработке методики определения экономического критерия для оценивания степени влияния нового технического решения на качество выполнения задачи авиационным комплексом (величину комплексного критерия эффективности). В тексте работы приведен анализ последних исследований и публикаций. Разработанный относительный критерий эффективности высокоскоростного летательного аппарата позволяет осуществить поставленную цель, а также оценить затраты, ценой которых достигается конечный результат. Показано, что форсирование двигателей впрыском воды имеет некоторое преимущество по сравнению с другими вариантами увеличения тяги двигателей высокоскоростного летательного аппарата. Применение полученных результатов может быть использовано для обоснования новых технических решений и установления их влияния на качество выполнения задачи авиационным комплексом, а также сократить сроки создания конкурентоспособных высокоскоростных летательных аппаратов.

Ключевые слова: критерий эффективности; экономический критерий; затраты; стоимость; летательный аппарат; авиационный комплекс; силовая установка; турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания; форсирование двигателей; впрыск воды; характеристики двигателя; тяга.

Введение

Для того чтобы количественно оценить степень влияния нового технического решения на качество выполнения задачи авиационным комплексом (АК) используют критерии (показатели) эффективности. Выбор критерия эффективности является важным этапом при решении любой задачи, связанной с АК, а для того, чтобы правильно выбрать критерий, необходимо обязательно руководствоваться основными требованиями, предъявляемыми к ним. Только при соблюдении этих требований критерий будет выбран правильно, оценка эффективности будет объективна и будет являться надежной основой решения на выбор параметров летательного аппарата (ЛА) при его проектировании.

Критерии должны:

– непосредственно происходить из целевой направленности решаемой задачи;

- отражать и учитывать основное содержание выполняемой задачи;
- учитывать основные факторы, от которых зависит выполнение задачи;
- быть количественными и возможно простыми для вычисления и анализа;
- иметь физический смысл.

1. Постановка проблемы

Общие критерии эффективности характеризуют результат выполнения АК задачи в целом, позволяют оценить эффективность АК при выполнении им конкретной задачи, а также исследовать зависимость эффективности АК от технических характеристик и эксплуатационных свойств АК, условий применения ЛА при выполнении им задачи. Однако найти прямую функциональную зависимость общего критерия эффективности АК от технических и эксплуатационных характеристик, условий применения ЛА, не представляется возможным. Поэтому для выражения общего критерия эффективности через технические и эксплуатационные характеристики и условия применения используется следующий прием:

- выражается общий критерий эффективности через частные;
- частные критерии эффективности выражают через характеристики АК и условий применения.

Из анализа схемы функционирования любого АК следует, что весь процесс функционирования состоит из ряда последовательно выполняемых этапов. На каждом этапе функционирования АК решается частная задача, причем в ее решении участвуют не все, а только отдельные составные части АК. Каждая из этих задач может быть оценена своим критерием (показателем), который называется частным. Частные критерии АК являются критериями эффективности его составных частей. В качестве частных критериев эффективности АК обычно используются вероятности выполнения отдельных этапов.

2. Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день существующий уровень авиационных технологий и накопленный опыт при проектировании ЛА и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1-4] позволяет разрабатывать прототипы транспортно-космических систем (ТКС) [5-7] и применять их в качестве возвращаемой первой ступени, а в качестве второй ступени для вывода спутников на околоземную орбиту использовать ракеты космического назначения. Самолетный облик ТКС позволяет рассматривать возможность аэродромного базирования. Преимуществом аэродромного старта (АС) является использование энергетических ресурсов собственной силовой установки (СУ) при разбеге и наборе высоты [5]. АС также, теоретически, решает проблему наличия космодрома, так как практически в каждой стране мира существует сеть аэродромов, что позволит выполнять запуски спутников с собственной территории без создания дополнительной дорогостоящей инфраструктуры.

Оценка совершенства ЛА может быть получена на базе весьма ограниченного универсального набора критериев подобия и удельных показателей, характеризующих объект, как транспортное средство для доставки ПН, использующее энергию химических топлив [8-12]. Использование критериальных комплексов (безразмерных величин) позволяет получить сравнительные оценки

совершенства широкого множества аналогов, заданных массивом тактико-технических характеристик (ТТХ) [13, 14].

Как известно [15], стоимостной расчет является неотъемлемой частью проектирования, поскольку большая стоимость новых видов ЛА и БПЛА в особенности, значительных затрат сил и средств на их разработку, создание и эксплуатацию, вызывают необходимость предварительной оценки эффективности их использования, то есть решения вопроса о том, какой ценой может быть достигнут желаемый результат. Другими словами, стоят ли затраты того, что может быть достигнуто в результате применения проектируемого ЛА.

Однако ни общие ни частные критерии эффективности не учитывают тех затрат, ценой которых достигнут конечный результат, поэтому для полной оценки эффективности АК используют комплексный критерий эффективности, представляющий собой отношение эффективности к суммарным затратам для ее достижения:

$$A = \frac{E_1 \cdot n}{C_1}, \quad (1)$$

где A – комплексный критерий эффективности;

E_1 – эффективность АК в одном вылете;

n – возможное число вылетов за операцию;

C_1 – стоимость изготовления ЛА и содержание его в течение операции с учетом стоимости изготовления и содержания всех частей АК.

Критерий A позволяет, таким образом, оценить конечные результаты и то, ради чего, собственно и создается АК. Одновременно такой критерий позволяет оценить и рациональность материальных затрат на достижение этого суммарного ущерба.

В ряде случаев, для оценки рациональности предлагаемых технических решений, принимаемых при определении эффективности АК, целесообразно использовать относительные критерии, которые представляют собой отношение критериев эффективности создаваемого объекта к исходному или критериев эффективности объекта с техническим решением, выбранным в качестве эталонного. В общем виде относительный критерий:

$$\bar{E} = \frac{E_1}{E_{1\text{исх}}}, \quad (2)$$

или

$$\bar{A} = \frac{A_1}{A_{1\text{исх}}}, \quad (3)$$

где E_1 – критерий эффективности создаваемого ЛА;

$E_{1\text{исх}}$ – критерий эффективности ЛА, выбранный в качестве эталона;

A_1 – комплексный критерий эффективности создаваемого ЛА;

$A_{1\text{исх}}$ – комплексный критерий эффективности ЛА, выбранный в качестве эталона.

В случае, когда эффективность АК в одном вылете ЛА одинакова, что характерно для высокоскоростных ЛА (ВЛА), определение относительного критерия эффективности упрощается:

$$\bar{A} = \frac{C_{1ucx}}{C_1}. \quad (4)$$

Таким образом, наибольшей эффективностью при прочих равных условиях будет обладать АК с наименьшей величиной экономического критерия.

3. Цель работы

Целью данной работы является разработка методики определения экономического критерия для оценивания степени влияния нового технического решения на качество выполнения задачи АК (величину комплексного критерия эффективности).

4. Основной материал и результаты исследований

В качестве экономического критерия АК применяется величина полных затрат на него за время его жизненного цикла. Жизненным циклом АК называется время от замысла на создание до списания основной его части – ЛА. Продолжительность жизненного цикла зависит от типа ЛА и его технического потенциала (возможности модернизации и модификации). Исходными данными для расчета экономического критерия АК служат:

- технические характеристики ЛА, отражающие степень совершенства и сложность конструкции;
- производственные показатели, характеризующие условия изготовления изделия, а именно: размер партии, размер и состояние предприятия, форма организации и т.д.

На практике [15] используются два основных метода определения экономических затрат на создание, производство и эксплуатацию авиационных комплексов:

- оценка по приближенным статистическим формулам в зависимости от производственных и базовых технических факторов;
- подсчет расходов путем составления калькуляции.

Первый способ находит применение на этапе предэскизного и эскизного проектирования. Второй способ используется на этапах технического проектирования, производства и эксплуатации авиационных комплексов. В основу стоимостного расчета положена методика [15], при этом все величины итоговых зависимостей имеют размерность тысяч условных единиц. Жизненный цикл содержит ряд периодов, что вынуждает рассматривать затраты на АК по отдельным периодам:

$$C_{\Sigma LA} = C_{LA}^P + C_{LA}^И + C_{LA}^Э + C_{aep}, \quad (5)$$

- где C_{LA}^P – затраты на разработку АК;
 $C_{LA}^И$ – затраты на изготовление АК;
 $C_{LA}^Э$ – затраты на эксплуатацию АК;
 C_{aep} – аэродромные затраты.

Процесс разработки новых образцов авиационной техники обычно состоит из двух стадий:

- научно-исследовательских работ (НИР);

– опытно-конструкторских работ (ОКР).

НИР проводятся главным образом в специальных научных учреждениях и включают:

- разработку теоретических проблем;
- их экспериментальную проверку;
- изыскание новых материалов;
- исследования в области новых методов технологии и организации производства.

В процессе научных исследований на основании анализа технического уровня, экономических возможностей, концепции применения, транспортных возможностей и транспортной эффективности, а также текущих затрат на эксплуатацию АК, принимается решение на замену и разрабатывается техническое задание (ТЗ) на новый АК. В процессе ОКР в соответствии с ТЗ разрабатывается проектная документация на АК, изготавливаются и испытываются опытные образцы технических устройств. Основными факторами, влияющими на величину затрат на НИР и ОКР, являются:

- технические требования, предъявляемые к АК;
- сроки, за которые необходимо выполнить работы.

Затраты на ОКР являются совокупно прямыми, распределенными на каждое изделие в соответствии с программой их выпуска, а затраты на НИР относятся к косвенным, так как результаты НИР по исследованию одного типа АК могут быть использованы при разработке другого. Поэтому за основу стоимости разработки берутся затраты на ОКР, при этом затраты на разработку традиционно подсчитываются на один час полета ЛА:

$$C_{ЛА_{1ч}}^P = C_{нл_{1ч}}^P + C_{СУ_{1ч}}^P, \quad (6)$$

где $C_{нл_{1ч}}^P$ – затраты на НИР и ОКР при разработке и проектировании ЛА (планера, оборудования, систем управления и т.д., без силовой установки);

$C_{СУ_{1ч}}^P$ – затраты на НИР и ОКР при разработке и проектировании силовой установки ЛА, приходящиеся на один час полета.

Анализ статистики затрат на ОКР ЛА показывает, что они зависят от:

- технических параметров ЛА (отражающие степень совершенства и сложности конструкции, элементов, систем);
- производственных факторов (характеризующие условия изготовления изделия, а именно размер партии, размеры предприятия, формы организации и т.д.).

Главное значение имеют технические параметры, которые в основном, и определяют величину затрат на разработку опытной партии. Определение влияния любого параметра на себестоимость представляет трудно решаемую проблему вследствие наличия сложных связей между показателями. Анализ фактических затрат на ОКР показал, что из всей совокупности технических параметров обуславливающих величину этих затрат наибольшее влияние оказывает масса составных частей ЛА и количество опытных экземпляров.

Высокая степень влияния массы составных частей ЛА на затраты на ОКР объясняется тем, что наибольший удельный вес в общих расходах составляют затраты на рабочее проектирование ЛА (70-80 %). Объем работ при рабочем проектировании определяется количеством выпущенных рабочих чертежей.

При увеличении массы ЛА растет количество деталей, узлов и агрегатов, а следовательно, и количество разрабатываемых чертежей и, как следствие, рост затрат на ОКР. В общем случае затраты на ОКР различных составных частей ЛА могут быть определены по эмпирическим зависимостям, которые получены на основе анализа статистики затрат на ОКР различных АК и имеют вид:

$$C_{нлч}^P = 16 \cdot m_n^{0,62} \cdot V_{\max}^{0,25} \cdot n_{он}^{0,52} \cdot k_{\tau} \cdot \frac{1 + k_{НИР}}{N_{ЛА} \cdot H_{ЛА} \cdot T_{ЛА}}, \text{ тыс. усл. ед.} \quad (7)$$

$$C_{СУ1ч}^P = 160 \cdot n_{дв}^{-0,62} \cdot \left(\frac{m_{СУ}}{n_{дв}} \right)^{0,6} \cdot n_{он}^{0,45} \cdot k_{\tau} \cdot \frac{1 + k_{НИР}}{N_{ЛА} \cdot H_{ЛА} \cdot T_{ЛА}}, \text{ тыс. усл. ед.} \quad (8)$$

где m_n – масса пустого ЛА, кг;

V_{\max} – максимальная скорость полета, км/ч;

$n_{он}$ – количество опытных образцов ($n_{он} = 2 \dots 5$);

k_{τ} – коэффициент снижения себестоимости в результате роста производительности труда:

$$k_{\tau} = (1 + 0,01 \cdot \alpha)^{\tau_0}; \quad (9)$$

где α – среднегодовой процент снижения себестоимости ОКР вследствие совершенствования процесса производства ($\alpha = 2 \dots 5$ %);

τ_0 – календарное время исследований, лет;

$$k_{НИР} = 0,16 + 0,44 \cdot e^{0,13 \cdot \tau_0}, \quad (10)$$

$N_{ЛА}$ – число ЛА в партии;

$H_{ЛА}$ – среднегодовой налет одним ЛА, ч;

$T_{ЛА}$ – срок службы ЛА (технический ресурс), лет;

$n_{дв}$ – число двигателей на одном ЛА;

$m_{СУ}$ – масса силовой установки, кг.

Серийный характер производства обуславливается периодическим выпуском отдельных партий (серий) машин старой ограниченной номенклатуры. Затраты на серийное производство (себестоимость изготовления) занимают большой удельный вес в себестоимости ЛА (как и любого технического устройства других составных частей АК).

Различают, в основном два вида себестоимости изготовления:

- индивидуальную;
- среднесовокупную.

Индивидуальная себестоимость есть затраты живого и овеществленного труда в стоимостном исчислении на изготовление одного конкретного изделия. Иначе, себестоимость каждого изделия. Она получается различной для каждого порядкового номера выпускаемого изделия. Среднесовокупная себестоимость представляет собой среднюю величину затрат на изготовление одного изделия из партии, содержащей много изделий. Среднесовокупная себестоимость изготовления меньше всего подвержена действию случайных факторов и позволяет наиболее объективно оценить влияние основных факторов на себестоимость изготовления. Поэтому обычно исследуется себестоимость изготовления.

Высокая себестоимость в период головной серии объясняется большим числом конструктивных изменений, низкой технологической оснащённостью и малой технологичностью процесса производства, а также отсутствием необходимых навыков в работе у рабочих. Резкое снижение себестоимости на этапе освоения серийного производства обуславливается совершенствованием оснастки, технологии, выучки, работников, уменьшением конструктивных изменений. Развернутый серийный выпуск характеризуется малым снижением себестоимости. На этом этапе на динамику себестоимости основное влияние оказывают не внутривзаводские мероприятия, а развития науки и техники, совершенствование организации производства в отрасли и народном хозяйстве в целом.

Стоимость изготовления ЛА складывается из стоимости изготовления ЛА без силовой установки и стоимости изготовления силовой установки. Затраты на изготовление на один час полета ЛА:

$$C_{ЛА\Sigma 1ч}^{И} = C_{нл1ч}^{И} + C_{СУ1ч}^{И}, \quad (11)$$

где $C_{нл1ч}^{И}$ – затраты на изготовление ЛА (планера, оборудования, систем управления и т.д., без силовой установки) на один час полета ЛА;

$C_{СУ1ч}^{И}$ – затраты на изготовление силовой установки на один час полета ЛА.

Себестоимость изготовления ЛА без СУ в процессе серийного производства определяется как сумма расходов на одно изделие по следующим статьям:

- расходы на основные материалы;
- стоимость покупных готовых изделий;
- заработная плата;
- общезаводские расходы;
- цеховые расходы;
- специальную оснастку;

$$C_{нл1ч}^{И} = \frac{1}{N_{ЛА} \cdot T_{ЛА}} (C_M + C_{ПГИ} + C_{ОС} + C_{ЗП} + C_{ЗР} + C_{ЦР}), \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (12)$$

где C_M – затраты на материалы, сырье и полуфабрикаты, тыс. усл. ед.;

$C_{ПГИ}$ – стоимость покупных готовых изделий, тыс. усл. ед.;

$C_{ОС}$ – стоимость специальной оснастки, тыс. усл. ед.;

$C_{ЗП}$ – расходы на заработную плату, тыс. усл. ед.;

$C_{ЗР}$ – общезаводские расходы, тыс. усл. ед.;

$C_{ЦР}$ – цеховые расходы, тыс. усл. ед..

Основными факторами, влияющими на величину среднесовокупной себестоимости, являются:

- технические характеристики изделия;
- производственные показатели на этапе изготовления (время освоения, программа выпуска, масштаб производства):

$$C_M = \left(5,45 + 19,35 \cdot N_{ЛА}^{-0,08} \right) \cdot m_{нл}^{1,78} \cdot 10^{-6}, \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (13)$$

где $N_{ЛА}$ – число ЛА в партии;

$m_{нл}$ – масса планера, кг.

$$C_{ПИИ} = (-250 + 0,45 \cdot V_{\max} + 0,038 \cdot m_n) \cdot N_{ЛА}^{-0,03}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (14)$$

$$C_{OC} = (3300 + 0,3 \cdot m_n - 2,6 \cdot 10^{-7} \cdot m_n^2) \cdot 1,05^{n_{\text{дв}}} \cdot N_{ЛА}^{-1}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (15)$$

$$C_{ЗП} = (0,0278 + 0,156 \cdot N_{ЛА}^{-0,32}) \cdot m_n^{0,77}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (16)$$

$$C_{ЗР} + C_{ЦР} = 2,4 \cdot C_{ЗП}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (17)$$

$$C_{СУ_{1ч}}^{И} = 161 \cdot N_{\text{дв}}^{-0,33} \cdot m_{СУ}^{0,31} \cdot t_{\text{дв}}^{0,18} \cdot P_{\max}^{0,38} \cdot \frac{1}{k_{\text{дв}} \cdot T_{\text{дв}}}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (18)$$

где $N_{\text{дв}}$ – количество изготовленных двигателей;

$m_{СУ}$ – масса силовой установки, кг;

$t_{\text{дв}}$ – время освоения двигателя в производстве, квартал;

P_{\max} – максимальная тяга силовой установки, тс;

$k_{\text{дв}}$ – коэффициент, учитывающий продление срока службы двигателя за счет капитального ремонта;

$T_{\text{дв}}$ – назначенный ресурс нового двигателя, ч;

$$N_{\text{дв}} = a + b \cdot N_{ЛА}, \quad (19)$$

где $N_{ЛА}$ – число ЛА в партии;

a , b – эмпирические коэффициенты, учитывающие требуемое соотношение между выпуском ЛА и двигателями (таблица 1).

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты, учитывающие требуемое соотношение между выпуском ЛА и двигателями

Вид ЛА	a	b
ЛА с одним двигателем	10	2
ЛА с двумя двигателями	20	5
ЛА с тремя двигателями	30	10

Под эксплуатацией АК понимается деятельность, связанная с непосредственным использованием комплексов, а также поддержанием их в состоянии готовности в течение установленного времени. Затраты на эксплуатацию АК составляют большую долю в общих затратах за весь его жизненный цикл. Они могут быть подразделены на прямые и косвенные. Прямыми являются расходы, которые могут быть отнесены непосредственно к АК. Косвенные расходы связаны с общими издержками эксплуатации (аэродромные расходы).

Для ЛА многоразового применения в прямые расходы на эксплуатацию включаются:

- стоимость горюче-смазочных материалов (ГСМ);
- расходы на техническое обслуживание (текущее обслуживание; периодическое обслуживание; полевой (текущей) ремонт);
- расходы на капитальный и профилактические ремонты;
- содержание летного и инженерно-технического состава.

Таким образом, эксплуатационные расходы к одному часу полета ЛА:

$$C_{ЛАч}^Э = \frac{C_{ГСМ}}{H_{ЛА}} + \frac{C_{ТО} + C_{кан.р} + C_{пр.р}}{R_{ЛА}} + \frac{C_{ЛПС} + C_{ИТС}}{n_{ЛА} \cdot H_{ЛА}}, \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (20)$$

где $C_{ГСМ}$ – годовые затраты на ГСМ, приходящиеся на один ЛА, тыс. усл. ед.;

$C_{ТО}$, $C_{кан.р}$, $C_{пр.р}$ – затраты на техническое обслуживание, капитальный и профилактические ремонты за цикл эксплуатации ЛА, тыс. усл. ед.;

$R_{ЛА}$ – среднетехнический ресурс, ч.

Наибольший удельный вес по стоимости и натуральному расходу среди компонентов ГСМ составляет топливо (80...90 %):

$$C_{ГСМ} = 11,5 \cdot \mu^{0,95} + 33 \cdot 10^{-5} \cdot m_0, \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (21)$$

где μ – стартовая тяговооруженность;

m_0 – взлетная масса ЛА, кг.

Расходы на техническое обслуживание включают в себя расходы на:

– текущее обслуживание;

– периодическое обслуживание (регламентные работы, работы по замене и обслуживанию двигателей, полевой ремонт (устранение неисправностей и повреждений, выполнение доработок):

$$C_{ТО} = C_{ТЭч} \cdot (T_{ТЭ} + T_{ВР}) + C_{ЗЧ} + C_{И}, \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (22)$$

где $C_{ТЭч} = 0,163 \cdot 10^{-3} \cdot m_n^{0,62}$ – затраты, приходящиеся на 1 чел/ч работ по технической эксплуатации и полевому ремонту, тыс. усл. ед.;

$$T_{ТЭ} = \sum_{i=1}^m T_{n_i} \cdot n_{n_i} + \sum_{j=1}^n n_{pp_j} \cdot T_{pp_j} + T_{зд} \cdot n_{зд} - \text{трудозатраты на техниче-}$$

скую эксплуатацию за цикл эксплуатации ЛА, чел/ч.;

где T_{n_i} – трудозатраты выполнения одной подготовки i -го вида, чел/ч.;

T_{pp_j} , $T_{зд}$ – трудозатраты выполнения регламентных работ и замены двигателя, чел/ч.;

n_{n_i} – количество i -го вида подготовки ЛА к полетам, выполненных за цикл его эксплуатации;

n_{pp_j} – количество регламентных работ и замен двигателей, выполненных за цикл его эксплуатации;

$T_{вр} = T_{тр} + T_{дор}$ – трудозатраты на полевой ремонт ЛА за цикл его эксплуатации;

$C_{ЗЧ} = 0,1 \cdot C_{ЛА\Sigma_{1ч}}^И \cdot T_{ЛА}$ – затраты на закупку запасных частей и расходных материалов при техническом обслуживании за весь цикл эксплуатации ЛА, тыс. усл. ед.;

$C_{И} = 0,041 \cdot C_{ЛА\Sigma_{1ч}}^И \cdot T_{ЛА}$ – затраты на закупку контрольно-поверочной аппаратуры, инструмента и других средств наземного обслуживания и обеспечения, тыс. усл. ед..

Расходы на капитальный и профилактический ремонты складываются из затрат на эти виды ремонта планера, силовой установки и оборудования. На себестоимость капитального и профилактического ремонтов для дозвуковых ЛА из технических характеристик наибольшее влияние оказывает величина массы пустого ЛА, а сверхзвуковых – максимальная скорость полета, а из производственных факторов – программа выпуска и время освоения:

$$C_{кан.р} = 13 \cdot 10^{-7} \cdot t_p^{-0,11} \cdot N_p^{-0,88} \cdot m_n^{1,2} \cdot V_{max}^{1,85} \cdot n_{кр}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (23)$$

$$C_{пр.р} = 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot t_p^{-0,11} \cdot N_p^{-0,8} \cdot m_n^{1,1} \cdot V_{max}^{1,8} \cdot n_{пр}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (24)$$

где t_p – время освоения ЛА в ремонте, квартал;

N_p – программа ремонта, шт;

m_n – масса пустого ЛА, кг;

V_{max} – максимальная скорость полета ЛА, км/ч;

$n_{кр}$, $n_{пр}$ – количество капитальных и профилактических ремонтов, выполняемых на ЛА за период эксплуатации.

Затраты на содержание летного и инженерно-технического состава пропорциональны численности экипажа ЛА и количеству ЛА и могут быть оценены по формулам вида:

$$C_{ЛПС} = 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot r_{эк}^{2,15} \cdot n_{ЛА}^{2,8}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (25)$$

$$C_{ИТС} = 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot r_{эк}^{2,1} \cdot n_{ЛА}^{2,82}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (26)$$

где $r_{эк}$ – численность экипажа, чел.;

$n_{ЛА}$ – число ЛА.

Аэродромные расходы определяются классом ЛА, системой организации и управления основными и вспомогательными процессами эксплуатации и др. Аэродромные расходы включают в себя затраты на:

– разработку, изготовление и эксплуатацию наземного комплекса средств (инженерно-аэродромного обеспечения; аэродромно-технического обеспечения; наземной системы управления);

– денежно-вещевое содержание технических служб.

Величина аэродромных расходов:

$$C_{аэр} = (C_{ИАО} + C_{АТО} + C_{НСУ} + C_{ТС}) \cdot \frac{1}{n_{ЛА} \cdot H_{ЛА}}, \text{ тыс. усл. ед.}, \quad (27)$$

где $C_{ИАО}$, $C_{АТО}$, $C_{НСУ}$ – годовые затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию средств инженерно-авиационного, аэродромно-технического обеспечения, наземных средств управления;

$C_{ТС}$ – годовые затраты на содержание технических служб.

Величина затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию наземного комплекса обычно выражается через требуемую для ЛА длины ВПП:

$$C_{ИАО} + C_{АТО} + C_{НСУ} = 1,4 \cdot L_{ВПП}^{0,88}, \text{ тыс. усл. ед.}; \quad (28)$$

$$C_{ТС} = C_{ЛПС} \cdot (1 + 0,01 \cdot j_{ИТС}), \quad (29)$$

где $L_{ВПП}$ – длина ВПП, м;

$J_{ИТС}$ – процент годовых затрат на содержание инженерно-технического состава по отношению к летному составу, %.

На рис. 1-2 представлены полученные по разработанной методике значения затраты на НИР и ОКР при разработке и проектировании ЛА и затраты на изготовление ЛА. В расчетах фиксировались максимальная скорость полета ЛА, количество опытных образцов, количество ЛА в серии, срок службы, среднегодовой налет и т.д., при этом варьировались масса силовой установки, планера самолета и его систем.



Рис. 1. Затраты на НИР и ОКР при разработке и проектировании ЛА, тыс. усл. ед на час налета

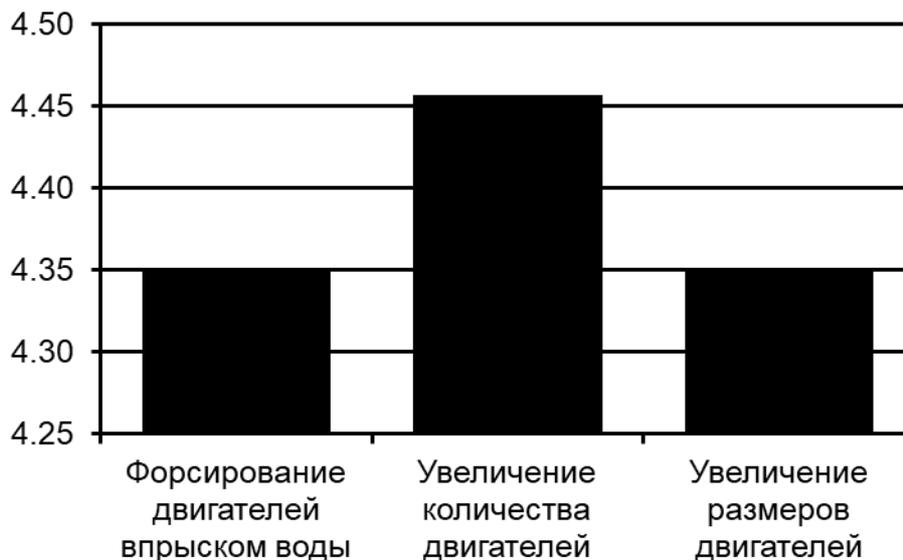


Рис. 2. Затраты на изготовление ЛА, тыс. усл. ед на час налета

Анализ представленных на рис. 1-2 результатов позволяет сделать вывод о некотором преимуществе форсирования двигателей впрыском воды, по-

сколько значения относительного критерия эффективности (рис. 3) в этом случае выше на 1...2 % по сравнению с другими вариантами увеличения тяги двигателей ВЛА. Следует отметить, что эксплуатационные затраты существенно превосходят все остальные виды затрат, зависят в наибольшей степени от максимальной скорости полета ЛА, взлетной массы и количества выпущенных ЛА, поэтому в данном исследовании вместо величины суммарных затрат были использованы затраты на разработку и изготовление ЛА.

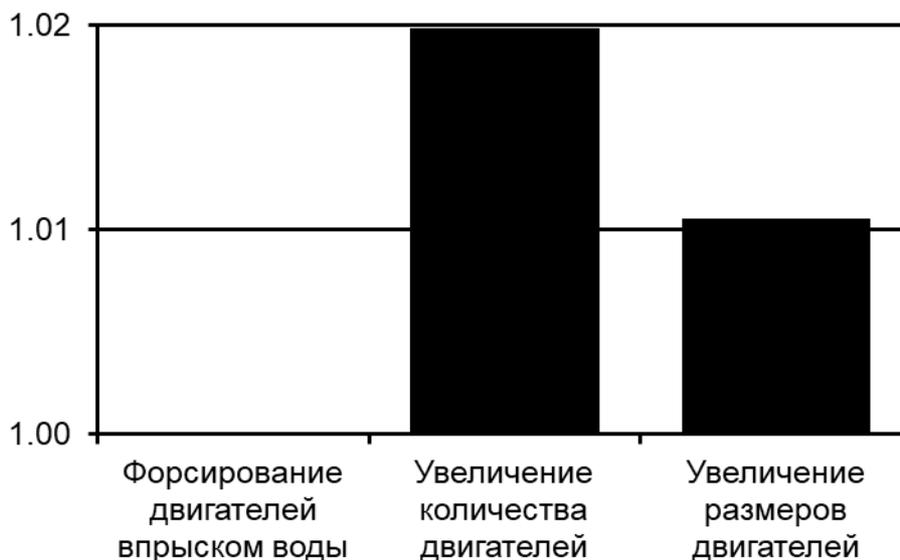


Рис. 3. Значения относительного критерия эффективности

Выводы

Разработанный относительный критерий эффективности высокоскоростного летательного аппарата позволяет оценить степень влияния нового технического решения на качество выполнения задачи авиационным комплексом и затраты, ценой которых достигнут конечный результат. Показано, что форсирование двигателей впрыском воды имеют некоторое преимущество по сравнению с другими вариантами увеличения тяги двигателей высокоскоростного ЛА.

Список литературы

1. Warwick Graham. Unmanned Combat Air Vehicles [Text] / Graham Warwick // Aviation Week & Space Technology, 29 December 2014 – 14 January 2015. – New York, 2015. – no. 47. – pp. 95.
2. Norris Guy. Sonic QueSST [Text] / Guy Norris // Aviation Week & Space Technology, 20 June – 3 July 2016. – New York, 2016. – no. 13. – pp. 38-39.
3. Svitak Amy. A Turning Point in U.K. Space [Text] / Amy Svitak // Aviation Week & Space Technology, 4-17 July 2016. – New York, 2016. – no. 14. – pp. 88-89.
4. McIntosh David. The Sky is not the limit [Text] / David McIntosh // Farnborough Airshow News, Wednesday, 2016. – London, 2016. – pp. 8.
5. Калиниченко Д.С. Методический подход к проектированию транспортно-космической системы [Текст] / Д.С. Калиниченко, А.В. Аксёненко, А.Э. Кашанов и др. // Авіаційно-космічна техніка і технологія – Х.: НАКУ «ХАИ», 2012. – Вып. 4(91). – с. 27–33.

6. Hadhazy Adam. Recycled Military Jets Serve as Satellite Launchers [Electronic resource] / Adam Hadhazy – Access mode: <http://www.space.com/9380-recycled-military-jets-serve-satellite-launchers.html> – 2010.

7. Макеич Г.С. Проект «Молот» гиперзвукового беспилотного самолета-разгонщика с комбинированной экранной турбопрямоточной силовой установкой [Электронный ресурс] / Г.С. Макеич, М.Ю. Тюкаев, Я.Н. Чибисов – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29075> – 2012 г.

8. Амброжевич М.В. Критериальные оценки транспортного совершенства летательных аппаратов с баллистическими и орбитальными траекториями полета [Текст] / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 4. – с. 25–30.

9. Амброжевич М.В. Критериальные оценки энергетического совершенства атмосферных ракетных летательных аппаратов [Текст] / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 5. – с. 21–29.

10. Амброжевич М.В. Критериальные оценки транспортного и скоростного совершенства аэродинамических летательных аппаратов [Текст] / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, С.А. Яшин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 6. – с. 19–23.

11. Амброжевич М.В. Критериальные оценки энергетического совершенства двухступенчатых беспилотных летательных аппаратов [Текст] / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, В.А. Середа и др. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2008. – Вып. 3. – с. 51–55.

12. Амброжевич М.В. Критериальные оценки энергетического совершенства процесса выведения беспилотных летательных аппаратов аэродромного старта [Текст] / М.В. Амброжевич, А.С. Карташев, В.А. Середа и др. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2009. – Вып. 1. – с. 5–9.

13. Сланський О.В. Оцінка досконалості авіаційного навчально-бойового комплексу на попередніх етапах його проектування або подальшої модернізації [Текст] / О.В. Сланський // *Системи озброєння і військова техніка*. – Х.: ХУВС, 2014. – Вип. 3. – с. 33–36.

14. Логинов В.В. Методологические основы формирования параметрического облика силовой установки перспективного учебно-боевого самолета [Текст]: монография / В.В. Логинов, А.В. Еланский, И.Ф. Кравченко. – Х.: ХУВС, 2016. – 294 с.

15. Корочкин А.А. Взаимозависимость тактико-технических и экономических характеристик БАК / Корочкин А.А., Суханов И.М. – Харьков: ХВВАИУ, 1984. – 40 с.

References

1. Warwick Graham. Unmanned Combat Air Vehicles. *Aviation Week & Space Technology*, 29 December 2014 – 14 January 2015, New York, 2015, no. 47, pp. 95.

2. Norris Guy. Sonic QueSST. *Aviation Week & Space Technology*, 20 June – 3 July 2016, New York, 2016, no. 13, pp. 38-39.

3. Svitak Amy. A Turning Point in U.K. Space. *Aviation Week & Space Technology*, 4-17 July 2016, New York, 2016, no. 14, pp. 88-89.

4. McIntosh David. The Sky is not the limit. *Farnborough Airshow News*, Wednesday, 2016, London, 2016, pp. 8.

5 Kalinichenko, D. S., Aksjonenko, A. V., Kashanov, A. Je. Metodicheskiy podhod k proektirovaniyu transportno-kosmicheskoy sistemy [Methodical approach to the design of transport and space systems]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2012, vol. 4(91), pp. 27–33.

6. Hadhazy Adam. *Recycled Military Jets Serve as Satellite Launchers*. Available at: <http://www.space.com/9380-recycled-military-jets-serve-satellite-launchers> (accessed 01.10.2010).

7 Makeich, G. S., Tjukaev, M. Ju., Chibisov, Ja. N. *Proekt «Molot» giperzvukovogo bespilotnogo samoleta-razgonshhika s kombinirovannoj jekrannoj turboprjamochnoj silovoj ustanovkoj* [Project «Hammer» hypersonic pilotless aircraft response combined display Turboremont power plant]. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29075> (Accessed 2012).

8. Ambrozhevich M.V., Kartashev A.S., Jashin S.A. Kriterial'nye ocenki transportnogo sovershenstva letatel'nyh apparatov s ballisticheskimi i orbital'nymi traektorijami poleta [Criteria estimations of the transport perfection of flying vehicles with ballistic and orbital flight paths]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2006, vol. 4, pp. 25–30.

9. Ambrozhevich M.V., Kartashev A.S., Jashin S.A. Kriterial'nye ocenki jenergeticheskogo sovershenstva atmosferynyh raketnyh letatel'nyh apparatov [Criteria for assessing the energy perfection of atmospheric rocket aircraft]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2006, vol. 5, pp. 21–29.

10. Ambrozhevich M.V., Kartashev A.S., Jashin S.A. Kriterial'nye ocenki transportnogo i skorostnogo sovershenstva ajerodinamicheskikh letatel'nyh apparatov [Criteria evaluation of the transport and speed perfection of aerodynamic aircraft]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2006, vol. 6, pp. 19–23.

11. Ambrozhevich M.V., Kartashev A.S., Sereda V.A. Kriterial'nye ocenki jenergeticheskogo sovershenstva dvuhstupenchatyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Criteria for assessing the energy perfection of two-stage unmanned aerial vehicles]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2008, vol. 3, pp. 51–55.

12. Ambrozhevich M.V., Kartashev A.S., Sereda V.A. Kriterial'nye ocenki jenergeticheskogo sovershenstva processa vyvedenija bespilotnyh letatel'nyh apparatov aerodromnogo starta [Criteria assessments of the energy perfection of the launching process of unmanned aerial vehicles of the aero-homing launch]. *NAKU «KhAY» «Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya»* [Proc. of the Zhukovsky National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» «Aviation and space technique and technology»], 2009, vol. 1, pp. 5–9.

13. Yelans'kyj O.V. Ocinka doskonalosti aviacijnogo navchal'no-bojovogo kompleksu na poperednix etapax jogo proektuvannya abo podal'shoi modernizaciyi [Assessment of the perfection of the aviation training complex at previous stages of

its design or further modernization]. *KhUPS «Systemy ozbroynyya i viys'kova tekhnika»* [of the Kozhedub Kharkiv University of Air Force «Weapons systems and military equipment»], 2014, vol. 3, pp. 33–36.

14. Loginov V.V., Elanskij A.V., Kravchenko I.F. *Metodologicheskie osnovy formirovaniya parametricheskogo oblika silovoj ustanovki perspektivnogo uchebno-boevogo samoleta* [Methodological basis for the formation of the parametric appearance of the power plant promising combat training aircraft]. Kharkiv, of the Kozhedub Kharkiv University of Air Force Publ., 2016. 294 p.

15. Korochkin A.A., Suhanov I.M. *Vzaimozavisimost' taktiko-tehnicheskikh i jekonomicheskikh ha-rakteristik BAK* [Interdependence of technical and economic characteristics of the LHC]. Kharkiv, HVVAIU Publ., 1984. 40 p.

Поступила в редакцию 05.06.2019, рассмотрена на редколлегии 07.06.2019

Відносний критерій ефективності високошвидкісного літального апарата

Створення перспективних високошвидкісних літальних апаратів нерозривно пов'язане з рівнем розвитку авіадвигунобудування, так як характеристики двигуна визначають можливості літального апарата в цілому. Основними вимогами до двигунів високошвидкісних літальних апаратів є збільшення швидкості та висоти польоту. З кожним новим поколінням турбореактивних двоконтурних двигунів з форсажною камерою згорання збільшуються їх питома тяга та питомий імпульс, однак застосування наукоємних технологій призводить до значного збільшення вартості двигуна. В той же час конструкція існуючих двигунів має великі резерви для модернізації. Для кількісної оцінки степені впливу нового технічного рішення на якість виконання задачі авіаційним комплексом використовують критерії (показники) ефективності. Однак знайти пряму функціональну залежність загального критерія ефективності авіаційного комплексу від технічних та експлуатаційних характеристик, умов застосування високошвидкісного літального апарата, не представляється можливим. Ціль виконання даної роботи полягає у розробці методики визначення економічного критерію для оцінювання степені впливу нового технічного рішення на якість виконання задачі авіаційним комплексом (величину комплексного критерію ефективності). В тексті роботи наведено аналіз останніх досліджень та публікацій. Розроблений відносний критерій ефективності високошвидкісного літального апарата дозволяє здійснити поставлену ціль, а також оцінити витрати, ціною яких досягається кінцевий результат. Показано, що форсування двигунів впорскуванням води має деяку перевагу в порівнянні з іншими варіантами збільшення тяги двигунів високошвидкісного літального апарата. Застосування отриманих результатів може бути використане для обґрунтування нових технічних рішень та встановлення їх впливу на якість виконання задачі авіаційним комплексом, а також скоротити термін створення конкурентоздатних високошвидкісних літальних апаратів.

Ключові слова: критерій ефективності; економічний критерій; витрати; вартість; літальний апарат; авіаційний комплекс; силова установка; турбореактивний двоконтурний двигун з форсажною камерою згорання; форсування двигунів; впорскування води; характеристики двигуна; тяга.

Relative performance criterion for a high-speed aircraft

Development of perspective high-speed aircrafts inseparably linked with level of aircraft propulsion engineering as engine performances to determine aircraft capabilities as a whole. The basic requirements to engines of high-speed aircrafts are increase speed and flight height. With each new generation of turbojet bypass engine with afterburner their specific thrust and a specific impulse are increase, also application of high technologies raises leads to substantial growth of the engine cost too. At the same time existing engines design has the big reserves for modernization. For a quantitative assessment of the degree of influence of the new technical solution on the quality of the task performance by the aviation complex, criteria (indicators) of efficiency are used. However, it is not possible to find a direct functional dependence of the overall criterion of the effectiveness of the aviation complex on the technical and operational characteristics, conditions of use of a high-speed aircraft. The purpose of this work is to develop a methodology for determining the economic criterion for assessing the degree of influence of a new technical solution on the quality of the task performance by the aviation complex (the value of the integrated performance criterion). The text of the paper provides an analysis of recent research and publications. The developed relative criterion of the efficiency of a high-speed aircraft makes it possible to accomplish the goal set, as well as to estimate the costs at the cost of which the final result is achieved. It is shown that boosting engines with water injection has some advantage over other options for increasing the thrust of high-speed aircraft engines. The application of the obtained results can be used to substantiate new technical solutions and establish their impact on the quality of the task performance by the aviation complex, as well as reduce the time to create competitive high-speed aircraft.

Keywords: efficiency criterion, economic criterion, cost, worth, aircraft, aviation complex, power plant, turbojet bypass engine with afterburner, engine boost, water injection, engine performance, thrust.

Відомості про авторів

Улитенко Юрий Александрович – инженер-конструктор 1 категории, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: y.ulitenko@gmail.com.

About the Authors:

Ulitenko Yurii Aleksandrovich – first category designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: y.ulitenko@gmail.com.
Orcid Author ID: 0000-0001-7540-2264.