

УДК 629.73.036.3

И.Ф. Кравченко

ГП “Ивченко-Прогресс”, Запорожье

## АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКТА ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЕГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОБЛИКА НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В статье проанализирован этап жизненного цикла авиационного двигателя, включающий научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Проведен анализ взаимосвязи технических и экономических характеристик проекта двигателя при формировании его параметрического облика на предварительных этапах проектирования. Показано, что улучшение качества авиационных двигателей связано с увеличением их стоимости и сроков создания. В связи с этим обоснована актуальность разработки единого показателя оценки стоимости создания авиационного двигателя на предварительных этапах проектирования. Сформированы основные требования к качеству показателей и критериев применительно к оценке технико-экономических характеристик авиационной силовой установки.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат, критерий, показатель стоимости, авиационный двигатель, силовая установка, стоимость жизненного цикла двигателя, технико-экономическая эффективность, предварительный этап проектирования, семейство двигателей.

### Введение

Современный летательный аппарат (ЛА) военного назначения представляет собой сложную организационно-техническую структуру, и принимаемые относительно его проекта решения связаны с расходом огромных материальных и финансовых ресурсов и в течение десятилетий оказывают воздействие на экономику и социально-политическую жизнь государства.

Одной из важных задач системного анализа и проектирования сложных комплексов является обеспечение принятия наиболее рациональных решений с учетом обширной разнокачественной информации, а также множественности задач и возможных условий функционирования объекта анализа и проектирования.

**Постановка задачи.** Учитывая экономические аспекты самолетостроения и авиационного двигателестроения Украины в условиях жесткой конкуренции на мировом авиационном рынке, необходимо осознавать, что возможности Украины как потребителя соответствующей продукции не очень большие

и стабильные. Поэтому в таких условиях разработчики авиационной техники должны думать о мировом масштабе применения своей продукции.

На основе анализа развития авиации Америки, Европы и Азии можно сделать вывод о финансовой привлекательности самолетов военного назначения, которые интенсивно развиваются в США, России, Италии, Китае и других странах. В связи с перераспределением соотношения политических сил в мире и реальной экономической ситуацией возросла потенциальная потребность в многофункциональных летательных аппаратах, например, учебно-тренировочных и учебно-боевых самолетах (УБС).

Как правило, наиболее ответственные решения по созданию ЛА и его подсистем принимаются на этапах НИОКР [1 – 5]. Поэтому целесообразно проанализировать этот этап жизненного цикла при создании авиационного двигателя силовой установки в системе УБС.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Основные этапы развития авиационных газотурбинных двигателей военной авиации можно укрупненно характеризовать сменой поколений этих

двигателей [2, 5, 6]. Двигатели 5-го поколения для высокоманевренных истребителей и многоцелевых ударных самолетов военной авиации, имеют температуру газа перед турбиной 1850...2000 К, отношение тяги к массе  $P_{дв}/M_{дв}=9...10,5$ , высокую лобовую тягу, минимальное число деталей, существенное улучшение уровня эксплуатационных характеристик (ресурс составляет 50...100 % ресурса планера, надежность на 60...80 % выше, трудоемкость технического обслуживания в 2...3 раза меньше, стоимость жизненного цикла примерно в 1,3 раза меньше по сравнению с теми же параметрами двигателей 4-го поколения, находящихся в эксплуатации [2, 4, 7]. Они обеспечивают крейсерский полет со сверхзвуковой скоростью на нефорсированном режиме, высокую маневренность и высокие взлетно- посадочные характеристики, а также низкий уровень заметности и высокую боевую живучесть.

Высокосовершенные лопаточные машины (компрессоры и турбины) 5-го поколения спроектированы на основе трехмерного моделирования с учетом вязкости потоков. В конструкции широко используются высокопрочные сплавы, монокристаллические турбинные лопатки с высокоэффективной системой охлаждения, облегченные (полые или углепластиковые) рабочие лопатки вентилятора, высоконапорные ступени компрессора типа "блиск" (диск, выполненный за одно целое с рабочими лопатками), соединенными сваркой трением, корпуса и другие статорные детали из композиционных материалов на основе органических, металлических и интерметаллидных матриц и другие наукоемкие конструктивные и технологические решения. Все эти факторы прямым и косвенным

образом отразились на росте затрат на создание ТРДДФ 5-го поколения.

Поэтому **целью статьи** является анализ затрат на разработку авиационных двигателей последних поколений и выявление взаимосвязи технических и экономических характеристик проекта двигателя при формировании его параметрического облика на предварительных этапах проектирования.

### Основная часть исследований

Анализ источников [2, 5, 7–14] показал, что стоимость создания авиационных ГТД 5-ого поколения (рис. 1) по сравнению с 4-м поколением существенно увеличилась. Кроме того, изменились и сроки создания авиационного двигателя (рис. 2), что усиливает важность принимаемых на ранних стадиях проектирования концептуальных решений.

Из рисунков видно, что сроки создания для двигателей 5-го поколения по сравнению с 4-м поколением увеличились в 1,5 раза и превысили 15 лет, а стоимость возросла в 2,5 раза. При этом в стоимости разработки значительно (приблизительно в 4,4 раза) увеличилась доля научно-исследовательских и экспериментальных работ (НИЭР), включающих разработку и экспериментальную отработку новых материалов, технологий, узлов, газогенераторов и демонстрационных двигателей. Так, если при разработке двигателей 4-го поколения стоимость НИЭР составила 14 % стоимости создания двигателя, то в 5-м она увеличилась до 61 %. На базе информации о двигателях 5-го поколения можно построить зависимость стоимости инженерно-конструкторских и проектных работ от тяги двигателя (рис. 3).

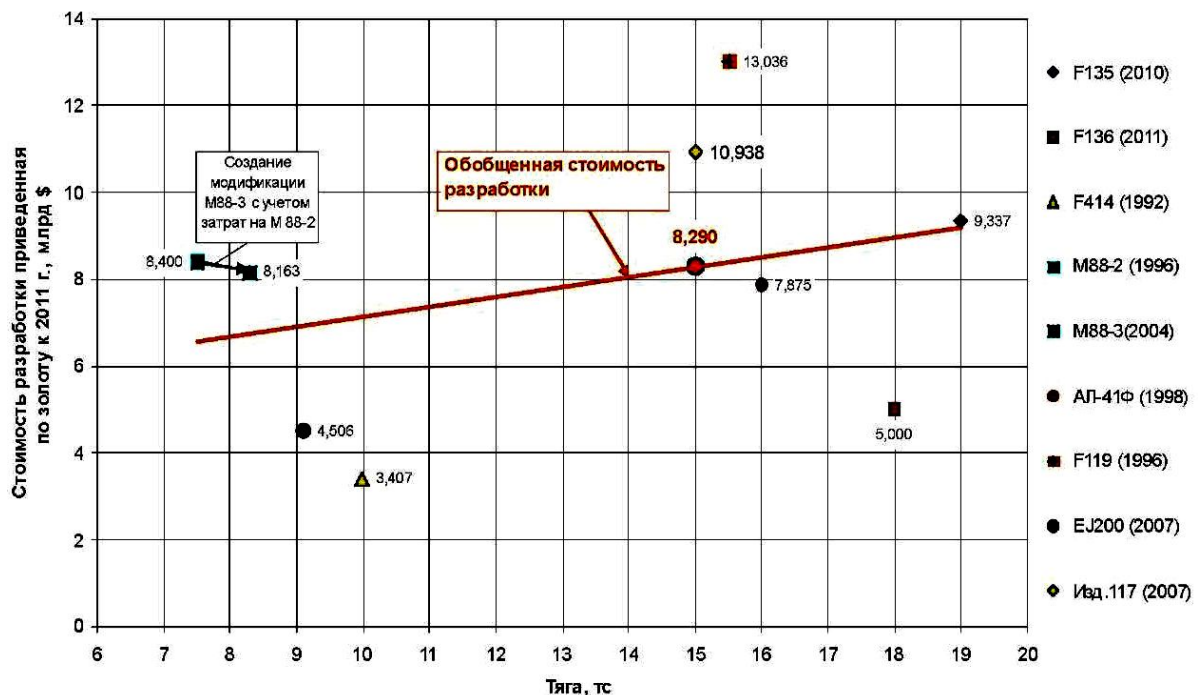


Рис. 1. Стоимость разработки ТРДДФ 5-го поколения, приведенная к цене золота в 2011 году

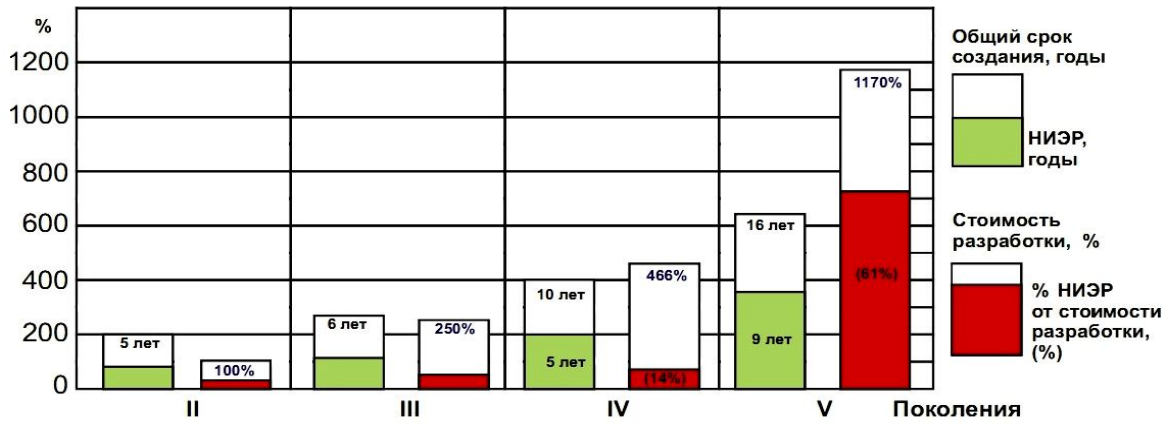


Рис. 2. Сроки и относительная стоимость создания авиационных ГТД

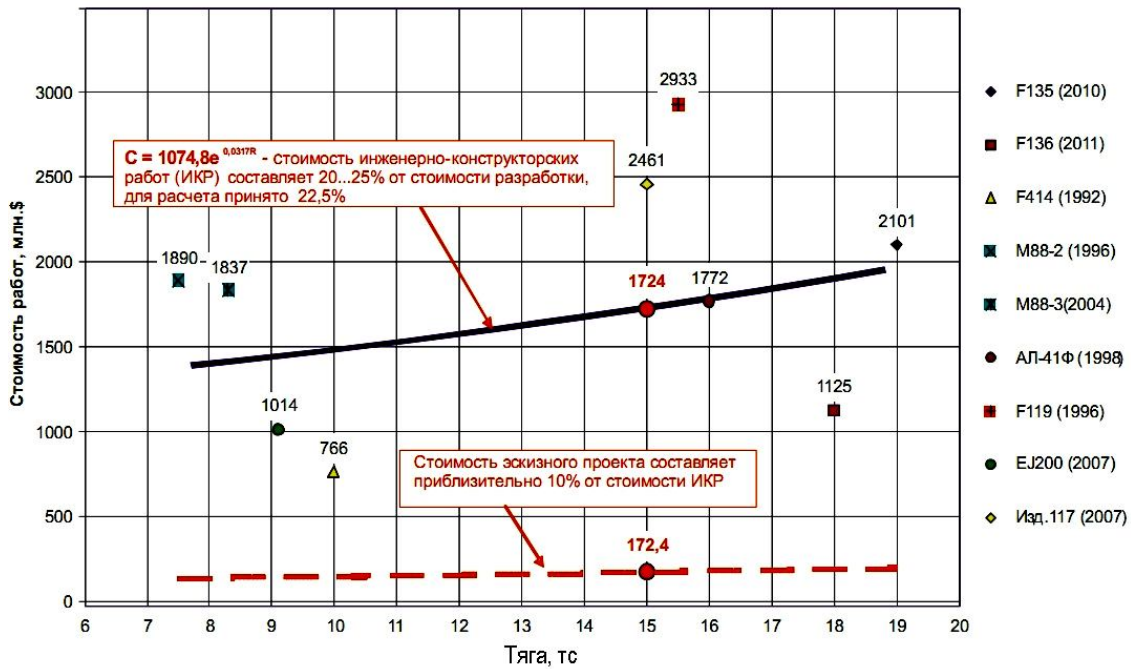


Рис. 3. Стоимость инженерно-конструкторских работ

Создание современного авиационного двигателя – комплексный процесс, базирующийся на современных достижениях многих отраслей науки и техники (газовая динамика, теплопередача, прочность, материалы, технологии, автоматическое управление, электроника и др.). Вместе с тем, это дорогостоящий процесс, который в настоящее время проходит в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке авиационной техники.

Как известно, улучшение качества авиационных двигателей связано с увеличением их стоимости. Так, стоимость 1 кгс тяги авиационного двигателя 5-го поколения для военных самолетов в настоящее время находится на уровне 550 тыс. долл. США. Стоимость разработки 1 кгс тяги ТРДДФ 5-го поколения показана на рис. 4, где стоимость тяги приведена к стоимости золота в 2011 году.

Исходя из анализа стоимости разработки ТРДДФ разных поколений, а также обзора существующей современной литературы по созданию лета-

тельных аппаратов военного назначения, можно привести условную структурно-логическую схему использования бюджетных средств, выделенных для создания силовой установки ЛА (рис. 5).

Опыт показывает, что из общего финансового бюджета разработки и создания ЛА на силовую установку, как правило, выделяется около 20 % средств. Когда известная сумма выделенных денежных средств, то можно прогнозировать степень разработки силовой установки для перспективного самолета путем обоснования параметрического облика двигателя в системе этого ЛА. С целью определения стоимости разработки 1 кгс тяги ГТД проводятся маркетинговые исследования и анализ существующих разработок в области двигателестроения. На основе современных подходов к проектированию двигателей формируется технический облик маршевого двигателя силовой установки. Однако в зависимости от бюджета выделенных средств создание двигателя может выполняться несколькими способами:

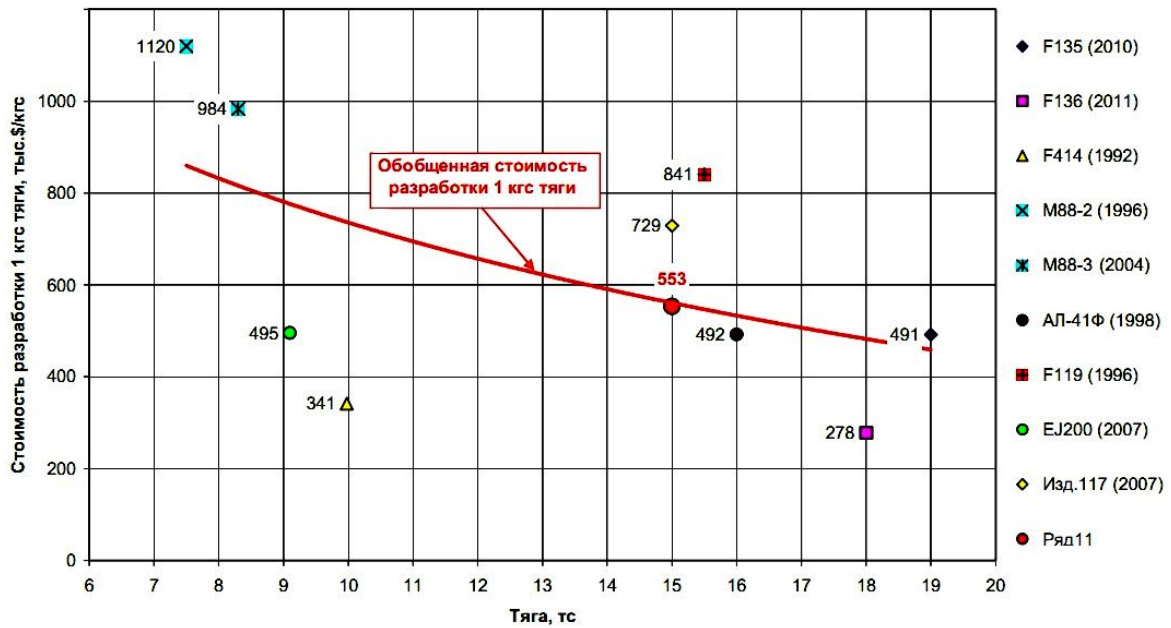


Рис. 4. Стоимость разработки 1 кгс тяги ГТД

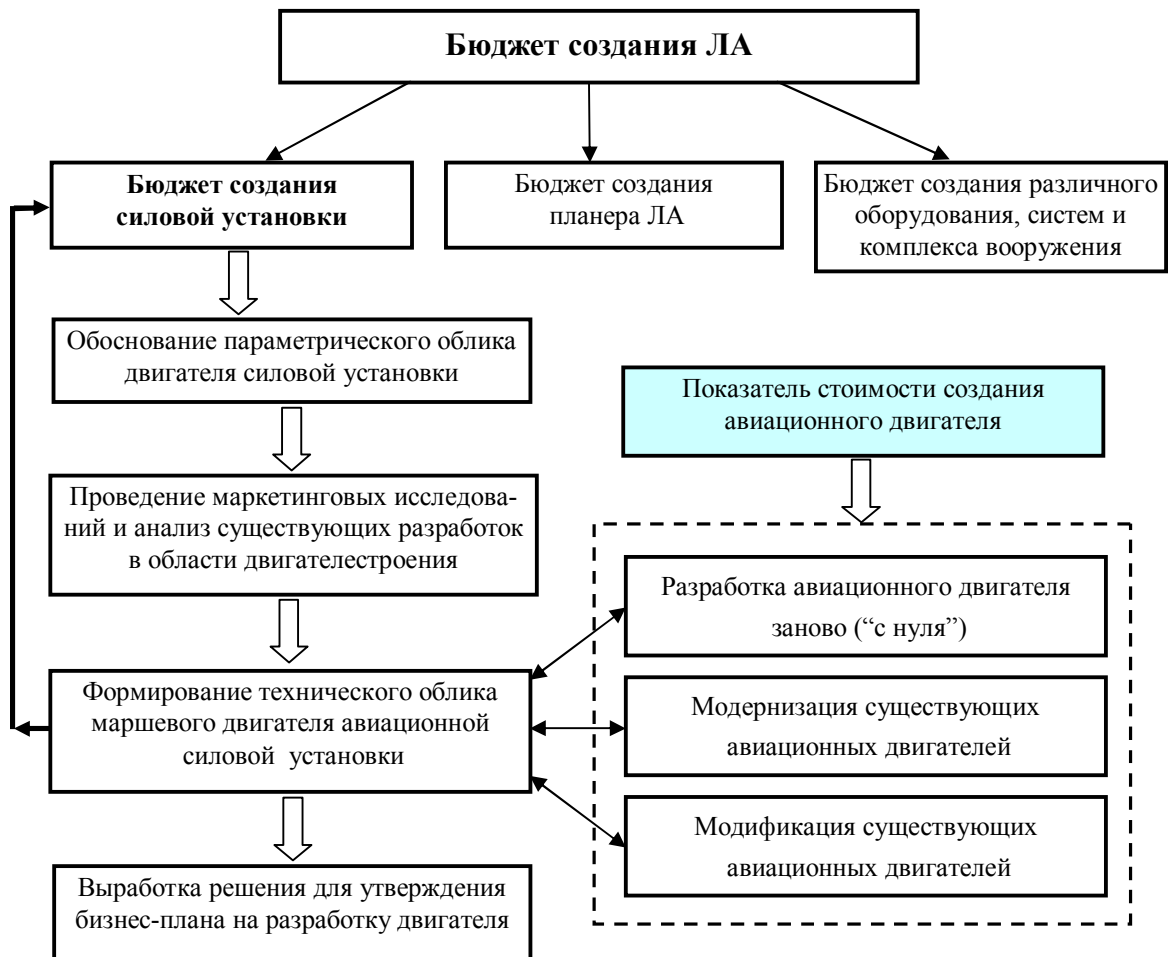


Рис. 5. Схема формирования путей разработки двигателя

- разработка двигателя “с нуля”;
- модернизация существующего образца двигателя;
- модификация существующего двигателя.

Очевидно, что выбор того или иного способа построен на основе максимального удовлетворения тактико-технических требований к ЛА с минимальными затратами на создание двигателя и силовой

установки. Следует подчеркнуть, что разработка силовой установки не всегда происходит совместно с этапом разработки других элементов учебно-боевого самолета. Как правило, в этом случае на этапе предварительного проектирования при формировании проекта появляется основной вопрос: как оценить стоимость создания проекта с учетом выделенных финансовых средств и обеспечения наилучших технико-экономических характеристик. Для двигателестроительной организации всегда остаются актуальными вопросы минимизации стоимости создания силовой установки при наилучших летно-технических и эксплуатационных характеристиках ЛА. Следовательно, такая задача является многокритериальной и требует оценки влияния проекта на эффективность всех подсистем ЛА.

Выбор основного показателя (критерия) согласования технических и экономических данных создаваемого проекта является сложной задачей, так как не всегда удается все многообразие параметров и характеристик СУ и планера самолета свести к одному или хотя бы нескольким показателям (критериям).

С методологической точки зрения, специфика оценки оптимальной эффективности учебно-боевого комплекса заключается в принципиальной математической неоднозначности [15-18]. Она определяется тем, что цели принятия решений проектировщиком и, соответственно, показатели и критерии его рациональности, могут носить многообразный, зачастую противоречивый и даже расплывчатый характер. Исходя из того, что критерий оптимальности – признак, на основании которого производится сравнительная оценка возможных решений (альтернатив) и выбор наилучшего, возникает задача многокритериальной оптимизации [19]. Кроме того, необходимо учитывать наличие существенных неопределенностей в прогнозировании технико-экономических и социально-политических ситуаций, а также неточности в используемых математических моделях, что требует применения некоторого формализма в многоцелевых системах [20–22].

В связи с этим сформируем основные требования к качеству показателей и критериев:

1. Оценка ЛА дается по результатам сопоставления комплекса боевых качеств или летно-технических данных с двигателями, которые сравниваются в составе СУ.
2. Сравнимые двигатели должны находиться в равных условиях в системе ЛА.
3. Представление особенностей рассматриваемой области применения.
4. Устойчивость к погрешностям в исходных данных, поскольку исходная информация, входящая в показатель, не всегда может быть получена с достаточно высокой достоверностью.

5. Совместимость по свойствам с представлениями экспертов: допускать интерпретации, которые может оценить и сознательно с ними согласиться квалифицированный в этой области деятельности человек, не являющийся в то же время специалистом в теории принятия решений и системном анализе.

6. Малая трудоемкость, т.е. при выполнении предыдущих условий для формирования критерия или показателя должен быть использован минимальный объем исходных данных с участием в их подготовке минимального количества специалистов.

Примерами основных показателей и критериев, которые применяются в настоящее время в военной авиации, могут быть: вероятность выполнения боевой задачи с учетом стоимости операции, максимальная скорость полета ЛА, тяговооруженность ЛА, длина разбега, тактический радиус действия ЛА [12, 23, 24]. Однако выбор (или разработка) основных показателей, критериев и закономерностей, по которым можно было бы судить об оценке стоимости создания проекта на предварительных этапах проектирования с учетом выделенных финансовых средств и обеспечения наилучших технико-экономических характеристик СУ в системе учебно-боевого самолета, остается актуальной задачей.

## Выводы по исследованию

Таким образом, анализ представленных результатов исследований показывает, что сроки создания двигателей 5-го поколения по сравнению с 4-м поколением увеличились в 1,5 раза и превысили 15 лет.

Общая стоимость создания двигателей 5-го поколения в 2,5 раза превышает общую стоимость создания двигателей 4-го поколения.

Доля НИЭР 5-го поколения возросла в 4,4 раза по сравнению с долей НИЭР 4-го поколения, и составляет приблизительно 60 % от общей стоимости создания двигателей 5-го поколения.

В связи с этим актуальной задачей является прогнозирование затрат и стоимости подсистем УТС или УБС на ранних этапах их создания. В этом случае наибольшую заинтересованность представляет разработка показателей и критериев для оценки технического и экономического совершенства новых или модифицированных изделий.

## Перспективы дальнейших исследований

В дальнейших исследованиях предполагается разработка единого показателя стоимости создания авиационного двигателя и критерия его модифицируемости на этапе научно-исследовательских и экспериментальных работ.

## Список літератури

1. Проектирование самолетов / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Луисейцев и др. Под ред. С.М. Егера. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
2. Работы ведущих авиационных двигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей / Под общ. ред. В.А. Скибина. – М.: ЦИАМ, 2004. – 254 с.
3. Разработка аванпроекта самолета: учебное пособие / А.К. Мяслица, Л.А. Малащенко, А.Г. Гребенников, Е.Т. Василевский, В.Н. Клименко, А.А. Сердюков. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2010. – 233 с.
4. Mattingly, Jack D. Aircraft engine design / Jack D. Mattingly, William H. Heiser, David T. Pratt. 2nd ed. AIAA education series, 2002. – P.691.
5. Иностранные авиационные двигатели / Под ред. Л.И. Соркина. – М.: ЦИАМ, 13 издание. – 2000. – 203 с.
6. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Под ред. С.М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 568 с.
7. Абулафия Р. Зарубежное двигателестроение: готовность к росту // Авиатранспортное обозрение. – № 8. – 1999.
8. Aircraft Engine and Engine Parts Manufacturing: 2002 / in: 2002 Economic Census. Manufacturing. Industry series. U.S. Census Bureau, 2004 – 47 p.
9. Day M.J., Stahr R.S. A technique for engine maintenance cost forecasting // AIAA Paper, 79-7007.
10. Sininger W.B. Engine life cycle cost // AIAA Paper, 76-754.
11. Военная авиация. Оружие и технологии России. Энциклопедия 21 век. Т. 4 / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Изд. дом “Оружие и технологии”, 2002. – 783 с.
12. Дональд Д. Энциклопедия военной авиации / Дэвид Дональд, Йон Лейк. – Перевод с англ. А. Бердов, И. Мальцев, А. Алексеев. – Изд-во “Омега”, 2003. – 443 с.
13. Иностранные авиационные двигатели. /Под ред. Л.И. Соркина. – М.: ЦИАМ, 13 издание. – 2000. – 203 с.
14. Jane's. Aero-Engines // Edited by Bill Gunston OBE, FRAeS, March, 2005. – 750 p.
15. Маслов В.Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД / В.Г. Маслов. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
16. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 1. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
17. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, расчет и приложения / Р. Штойер. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
18. Павлов П.П. Методика выбора рационального варианта многофункциональной авиационной системы. // П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко, М.Н. Мубаракиин. / Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – №2. – С. 62-65.
19. Ларичев О.И. Теория и методы поддержки принятия решений. Учебник. Изд. 2-е. перераб. и доп. / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2003. – 392 с.
20. Пивяский С.А. Оптимизация параметров многоцелевых летательных аппаратов. // С.А. Пивяский, В.С. Брусов, Е.А. Хвилон. – М.: Машиностроение, 1974. – 106 с.
21. Смирнов О.Л. САПР: формирование и функционирование проектных модулей. // О.Л. Смирнов, С.А. Падалко, С.А. Пивяский. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
22. Zha X.F. Evaluation and selection in product design for mass customization: A knowledge decision support approach. / X.F. Zha, R.D. Sriram, W.F. Lu // Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. – 2004. – № 18. – P. 87-109.
23. Флоров И.Ф. Методы оценки эффективности применения двигателей в авиации / И.Ф. Флоров // Труды ЦИАМ № 1099. – 1985. – 260 с.
24. Ray Whitford. Design for air combat / Janes publishing inc., New York, 1987. – P. 234.

Поступила в редколлегию 25.02.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук ст. научн. сотр. В.В. Логинов, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ТЕХНІЧНИХ І ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКТУ ДВИГУНА ПРИ ФОРМУВАННІ ЙОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО ОБРИСУ НА ПОПЕРЕДНІХ ЕТАПАХ ПРОЕКТУВАННЯ

І.Ф. Кравченко

У статті проаналізований етап науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт із життєвого циклу авіаційного двигуна. Проведений аналіз взаємозв'язку технічних і економічних характеристик проекту двигуна при формуванні його параметричного обриса на попередніх етапах проектування. Показано, що поліпшення якості авіаційних двигунів пов'язане із збільшенням їх вартості і термінів створення. У зв'язку з цим обґрунтована актуальність розробки єдиного показника оцінки вартості створення авіаційного двигуна на попередніх етапах проектування. Сформовані основні вимоги до якості показників і критеріїв стосовно оцінки техніко-економічних характеристик авіаційної силової установки.

**Ключові слова:** літальний апарат, критерій, показник вартості, авіаційний двигун, силова установка, вартість життєвого циклу двигуна, техніко-економічна ефективність, попередній етап проектування, сімейство двигунів.

### ANALYSIS OF INTERCOMMUNICATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC DESCRIPTIONS OF PROJECT OF ENGINE AT FORMING OF HIS SELF-REACTANCE LOOK ON THE PRELIMINARY STAGES OF PLANNING

I.F. Kravchenko

In the article the stage of research and development projects is analysed from the life cycle of aviation engine. The analysis of intercommunication of technical and economic descriptions of project of engine is conducted at forming of his self-reactance look on the preliminary stages of planning. It is rotined that the improvement of quality of aviation engines is related to the increase of their cost and terms of creation. In this connection actuality of development of single index of estimation of cost of creation of aviation engine is grounded on the preliminary stages of planning. The basic requirements are formed to quality of indexes and criteria as it applies to the estimation of technical and economic descriptions of aviation power-plant.

**Keywords:** aircraft, criterion, index of cost, aviation engine, power-plant, cost of life cycle of engine, technical and economic efficiency, preliminary stage of planning, family of engines.