

## РЕАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АНАЛИЗУ КОНСТРУКЦИЙ АГРЕГАТОВ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В нашей работе [1], посвященной анализу основных видов эффективности, показано, что в современных условиях жестко ограниченных ресурсов в отечественном самолетостроении предпочтительным является использование критерия технической эффективности [2] при планировании объемов внедрения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в воздушных судах транспортной категории (ВС ТК) [3].

Ниже исследованы основные случаи, когда целью функционирования системы проектирования агрегата ВС является снижение его массы за счет применения ПКМ [4 – 10].

Случай 1. Пусть выбран базовый агрегат ВС массой  $G_б$  (из металла), эксплуатируемый при заданных условиях. Реализуются два проекта с разными конструктивно-силовыми схемами (КСС) с применением ПКМ, в которых использованы два одинаковых конструктивно-технологических решения (КТР):

$$(KCC)_1 \in (KTP)_1 \vee (KTP)_2 \rightarrow (KCC)_{1opt}; \quad (1)$$

$$(KCC)_2 \in (KTP)_1 \vee (KTP)_2 \rightarrow (KCC)_{2opt}. \quad (2)$$

Из  $(KCC)_{1opt}$  и  $(KCC)_{2opt}$  выбирается  $(KCC)_{opt}$ . При этом при

анализе каждой КСС устанавливается реализуемый объем ПКМ, обеспечивающий несущую способность агрегата, а следовательно, и его массу  $G$ .

В рамках каждой КСС масса  $G$  будет не обязательно одна и та же при  $(KTP)_1$  и  $(KTP)_2$ , а вероятности  $P\{KCC_1(KTP)_1\}$  и  $P\{KCC_1(KTP)_2\}$  будут всегда разными, так как КТР предполагает погрешности, связанные с изготовлением агрегата и с точностью реализации самой  $(KCC)_1$ . В результате может быть определена  $P_1\{KCC_1(KTP)\}_{max}$  при  $G_{1min}$ . Аналогично можно определить  $P_2\{KCC_2(KTP)\}_{max}$ , но при  $G_{2min}$ .

Если  $P_1\{KCC_1(KTP)\}_{max} > P_2\{KCC_2(KTP)\}_{max}$  и  $G_{1min} \leq G_{2min}$ , то оптимальной признается однозначно  $KCC_1$ , реализую-

щая массу  $G_{1min}$ .

Если  $P_1 \{KCC_1(KTP)\}_{max} < P_2 \{KCC_2(KTP)\}_{max}$ , но

$G_{1min} \leq G_{2min}$ , необходимо принятие управляющего решения, которое потребует дополнительной объективной информации (исследований возможностей снижения погрешностей реализации  $(KTP)_1$  и  $(KTP)_2$  во времени и затратах).

Случай 2. Для выбранного базового агрегата ВС массой  $G_6$ , эксплуатируемого при заданных внешних воздействиях, реализуется проект с предварительно обоснованно выбранной КСС с применением ПКМ.

Целью является снижение массы агрегата  $G_{ПКМ} < G_6$  до  $G_{ПКМmin}$ , определяемой возможностями реализуемой КСС при  $KTP_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). При этом наилучшим КТР будет то, которое обеспечивается меньшей трудоемкостью (производительностью процессов производства) изготовления агрегата из ПКМ.

Конечный результат  $G_{ПКМmin}$  является случайной величиной, полной характеристикой которой является функция распределения в виде

$$F(G) = P \left\{ G_{ПКМmin} < G_{ПКМ} \right\}, \quad (3)$$

где  $G_{ПКМ}$  – текущее значение случайной величины  $G_{ПКМmin}$ .

В качестве основного показателя технической эффективности проекта принято математическое ожидание массы агрегата из ПКМ  $G_{ПКМ}$   $M[G_{ПКМ}]$ , зависящей от технологии реализации проекта, т.е. от  $i$ -го КТР, которых всегда ограниченное число  $n$ .

Тогда для дискретных случайных значений  $G_{ПКМ}$  (как результатов реализации проекта) запишем

$$M \left[ G_{ПКМmin} \right] = \sum_{i=1}^n G_{ПКМi} P(G_{ПКМi}), \quad (4)$$

где  $G_{ПКМi}$  – возможные значения массы агрегата при реализации  $KTP_i$ ;  $P(G_{ПКМi})$  – вероятность получения величины  $G_{ПКМi}$ , определяемая с учетом погрешностей трудоемкости реализации  $KTP_i$ .

В качестве дополнительного (уточняющего) показателя технической эффективности проекта, как и в случае 1, может быть использована

дисперсия конечного результата

$$D[G_{ПКМ}] = M\left[\left(G_{ПКМ} - M[G_{ПКМ}]\right)^2\right]. \quad (5)$$

Случай 3. Рассматривается проект агрегата ВС, целью которого является снижение его массы на конкретную величину  $G_{ПКМ}$  независимо

мо от того, сколько затрат потребует его реализация.

В этом случае конечный результат проекта должен представлять достоверное событие – массу агрегата  $G_{ПКМ}$ , а затраты будут случай-

ной величиной  $C$ , полной характеристикой которой является функция распределения

$$F(C_i) = P\{C_{КСС} < C_i\}, \quad (6)$$

где  $C_i$  – текущее значение расхода ресурсов (затрат) при реализации проекта предварительно обоснованной КСС при различных вариантах  $КТР_i$ , предопределяющих различные затраты  $C_i = C(КТР_i)$ .

В качестве основного показателя технической эффективности реализации проекта принимается, как и в предыдущих случаях, математическое ожидание  $M[KСС]$  при дискретных значениях  $C(КТР_i)$  в виде

$$M[KСС] = \sum_{i=1}^n C(КТР_i) P\{C(КТР_i)\}. \quad (7)$$

Как и в случае 2, в качестве дополнительного показателя (критерия) технической эффективности реализации можно использовать дисперсию необходимых затрат

$$D[C_{КСС}] = M\left[\left(C_{КСС} - M[C_{КСС}]\right)^2\right], \quad (8)$$

если предварительно проведены расчеты затрат на реализацию всех анализируемых  $n$   $КТР_i$ , позволяющих с достаточной точностью определить параметры правой части формулы  $D[C_{КСС}]$ .

В соответствии с изложенным выше общим подходом определения технической эффективности системы применительно к обсуждаемой частной задаче определения эффективности внедрения ПКМ в ВС ТК рассматриваются три показателя:

– вероятность реализации проекта (в первом случае оптимальной КСС; во втором – вероятность реализации наименьшей массы агрегата из ПКМ  $G_{ПКМ min}$  выбранной КСС при различных  $КТР_i$ , связанных с разными трудоемкостями (или суммарной производительностью изготовления); в третьем – вероятность реализации затрат при различных  $КТР_i$

при обеспечении заданной массы  $G_{ГПКМ}^{зад}$ );

– математическое ожидание получения необходимого результата (в первом случае – минимальной массы  $G_{ГПКМ}^{min}$  при различных КТР двух КСС; во втором –  $G_{ГПКМ}^{min}$  в рамках предварительно выбранной КСС при различных затратах на реализацию разных  $КТР_i$ ; в третьем –  $G_{ГПКМ}^{зад}$  при различных (нефиксированных) затратах на реализацию разных  $КТР_i$ );

– математическое ожидание затрат на реализацию проекта агрегата с фиксированной массой  $G_{ГПКМ}^{зад}$  при различных  $КТР_i$ , приводящих к разным затратам.

Эти три показателя позволяют дать практически полную оценку технической эффективности проекта агрегата ВС из ПКМ.

Первый показатель – вероятность  $P$  – характеризует целевую надежность реализации проекта, второй –  $M[G_{ГПКМ}]$  – целевую производительность техпроцессов изготовления агрегата, а третий – целевую экономичность проекта.

Тогда модель обобщенного показателя эффективности  $W$  может быть представлена в виде функции трех этих комплексных показателей.

В случае детерминированной модели показатель технической эффективности применения ПКМ в агрегатах ВС ТК  $W$  описывается формулой  $W = W_{ц} \cdot W_{э}$ , в которой показатель целевой эффективности реализации проекта  $W_{ц}$  равен отношению достигнутого конечного результата  $G_{ГПКМ}^{реал}$  к желаемому (нормативному)  $G_{ГПКМ}^{проект}$ , а показатель целевой экономичности реализации проекта  $W_{э}$  равен отношению затрат, которыми располагает изготовитель (завод) на реализацию агрегата из ПКМ (имеющимися ресурсами)  $C_{расп}$ , к необходимым для изготовления агрегата массой  $G_{ГПКМ} C_{реал}$ .

При этом

$$W_{ц} = \frac{G_{ГПКМ}^{реал}}{G_{ГПКМ}^{проект}}; \quad W_{э} = \frac{C_{распол}}{C_{реал}}. \quad (9)$$

В случае реализации стохастической модели показателя технической эффективности проекта внедрения ПКМ в агрегат ВС ТК в виде

$W = \{W_H, W_P, W_3\}$  показатель  $W_H$  характеризует вероятность получения необходимого (потребного) конечного результата – достижения относительной массы агрегата из ПКМ  $\bar{G}_{ПКМ}$ , которая не меньше, чем

достигнутая (реализованная)  $\bar{G}_{ПКМ}$   $\left( \bar{G}_{ПКМ} \geq \bar{G}_{ПКМ} \right)$ , а затраты на достигнутый результат  $\bar{C}_{ПКМ}$  меньше, чем нормативные (потребные)

$\bar{C}_{ПКМ}$ .

Показатель  $W_H$  запишется в виде

$$W_H = P \left\{ \bar{G}_{ПКМ} \geq \bar{G}_{ПКМ}, \bar{C}_{ПКМ} < \bar{C}_{ПКМ} \right\}. \quad (10)$$

$W_P$  – математическое ожидание  $\bar{G}_{ПКМ}$  при условии, что эта относительная масса агрегата потребует относительных затрат (реализованных)  $\bar{C}_{ПКМ}$  меньше, чем нормативно необходимые  $\bar{C}_{ПКМ}$ :

$$W_P = M \left\{ \bar{G}_{ПКМ}, \bar{C}_{ПКМ} < \bar{C}_{ПКМ} \right\}. \quad (11)$$

$W_3$  – математическое ожидание относительных затрат  $\bar{C}_{ПКМ}$  при условии, что  $\bar{G}_{ПКМ} \geq \bar{G}_{ПКМ}$ :

$$W_3 = M \left\{ \bar{C}_{ПКМ}, \bar{G}_{ПКМ} \geq \bar{G}_{ПКМ} \right\}. \quad (12)$$

Здесь в целях обеспечения сопоставимости комплексных показателей эффективности  $W_H, W_P$  и  $W_3$  массы  $G_{ПКМ}$  и  $G_{ПКМ}$  и затраты

$C_{ПКМ}, C_{ПКМ}$  отнесены к соответствующим им показателям базового варианта ВС ТК, выполненного из металла.

При выполнении указанных условий могут быть рекомендованы модели:

– пересечения эффектов:

$$W = W_H W_\Pi W_\Xi; \quad (13)$$

– взвешивания эффектов:

$$W = \alpha_H W_H + \alpha_\Pi W_\Pi + \alpha_\Xi W_\Xi; \quad (14)$$

– комбинации эффектов:

$$W = W_H (\alpha_\Pi W_\Pi + \alpha_\Xi W_\Xi) \quad (15)$$

или

$$W = W_\Pi (\alpha_H W_H + \alpha_\Xi W_\Xi); \quad (16)$$

$$W = W_\Xi (\alpha_\Pi W_\Pi + \alpha_H W_H), \quad (17)$$

где  $\alpha_H, \alpha_\Pi$  и  $\alpha_\Xi$  – весовые коэффициенты комплексных показателей, сумма которых в каждой модели должна равняться единице.

Области применения приведенных выше моделей определяют при постановке задачи исследования эффективности.

Предпочтение в реализации той или иной модели отдается на основе принятия управленческих решений, общий подход к анализу которых, а также их классификация приведены в [11].

В плане частных показателей технической эффективности применительно к задачам использования ПКМ в ВС ТК интерпретация задачи надежности необслуживаемых технических систем в отличие от изложенных выше может рассматриваться в рамках механики разрушения композитов, получившей интенсивное развитие в последние 25 – 30 лет.

## Выводы

Исследованы основные случаи реализации критерия технической эффективности при проектировании агрегатов гражданских воздушных судов транспортной категории из ПКМ:

– для анализа оптимального из двух проектов с одинаковыми конструктивно-силовыми схемами реализованными разными конструктивно-технологическими решениями агрегата с минимальной массой;

– при предварительно выбранной конструктивно-силовой схеме композитного агрегата с минимальной относительно массы базового (металлического) варианта;

– для агрегата из ПКМ предварительно регламентированной массы при различных вариантах конструктивно-технологических решений, реализуемых разными затратами.

## Список использованных источников

1. Коцюба, А.А. Сущность и содержание понятий эффективности в анализе перспективных объемов внедрения полимерных композиционных материалов в конструкции отечественных гражданских самолетов

[Текст] / А.А. Коцюба, А.В.Кондратьев // Технологические системы: науч.-техн. журнал. – Киев.: УкрНИИАТ, № 4 (77). – 2016. – С. 22 – 28.

2. Голубев, И.С. Соизмерение технического уровня и эффективности при проектировании конструкций летательных аппаратов [Текст] / И.С. Голубев. – М.: МАИ, 1985. – 90 с.

3. Фролов, К.В. Проблемы и успехи современного машиностроения [Текст] / К.В. Фролов // Машиностроение. Международный центр научно-технической информации. – М.: МЦНТИ, 1984. – № 2. – С. 13 – 20.

3. Гвоздев, М.А. Прогнозирование технически возможного объема внедрения полимерных композиционных материалов в конструкциях самолетов [Текст] / М.А. Гвоздев, А.В. Кондратьев // Технологические системы: науч.-техн. журнал. – Киев.: УкрНИИАТ, № 1 (74). – 2016. – С. 7 – 13.

4. Baker, A. Composite Materials for Aircraft Structures [Текст] / A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. – Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. Reston, 2004. – 599 p.

5. Аверичкин, П.А. Методология применения и оценка эффективности использования композиционных материалов в авиационной технике [Текст] / П.А. Аверичкин. – Ярославль: ЯГСХА, 1999. – 306 с.

6. Коцюба, А.А. Анализ эффективности конструктивно-технологических решений агрегатов воздушных судов из полимерных композиционных материалов ГП «Антонов» и реализующих их технологий [Текст] / А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (86). – Харьков, 2016. – С. 7 – 14.

7. Андреев, А.В. Современные конструктивно-технологические решения агрегатов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов и их реализация на предприятии Stelia Aerospace [Текст] / А.В. Андреев, Я.О. Головченко, А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (84). – Харьков, 2015. – С. 95 – 104.

8. Коцюба, А.А. Формирование критерия эффективности проектирования конструкций гражданских самолетов из полимерных композитов на этапе выбора их состава [Текст] / А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (87). – Харьков, 2016. – С. 19 – 31.

9. Коцюба, А.А. Формирование составляющих комплексного критерия эффективности проектирования агрегатов гражданских самолетов из полимерных композитов основных на этапах их создания [Текст] / А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций ле-

тательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (88). – Харьков, 2016. – С. 22 – 36.

10. Коцюба, А.А. Формирование эффективности этапа технологической подготовки производства агрегатов гражданских самолетов [Текст] / А.А. Коцюба // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 2(137). – С. 60 – 70.

11. Король, В.Н. Общий подход к классификации управленческих решений в производственной сфере и некоторые аспекты его организации [Текст] / В.Н. Король // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 18. – Харьков, 2003. – С. 19 – 20.

*Поступила в редакцию 01.09.2017.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,  
ГП «Антонов», г. Киев.*