

УДК 621.702: 338.45

А. В. Кондратьев,  
А. А. Царицынский,  
М. Д. Нестеренко

## **Прогнозирование экономической эффективности применения в воздушных судах транспортной категории панельных сотовых конструкций**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

Проведен анализ применения сотовых конструкций в авиационной и космической технике, позволивший синтезировать минимально необходимый комплект статистических данных, необходимый для формирования методики прогнозирования экономической эффективности применения сотовых конструкций в летательных аппаратах и в частности в воздушных судах транспортной категории. Методика дает возможность оценить основные составляющие (производственную и эксплуатационную) экономической эффективности внедрения сотовых конструкций и проследить последствия ее изменения (роста) при увеличении объема внедрения современных композитов.

**Ключевые слова:** экономическая эффективность, полимерные композиционные материалы, сотовые конструкции, воздушные суда транспортной категории.

Несмотря на то, что качественный эффект от применения трехслойных (сэндвичевых) конструкций в авиационной и ракетно-космической технике (АКТ) выявлен исследователями и реализуется конструкторами практически с первых лет их появления [1 – 4], методики количественного определения их экономической эффективности даже в первом приближении практически отсутствуют и в настоящее время [5 – 9]. Это, по-видимому, связано с целым рядом причин как технического, экономического и других аспектов, в том числе и существенного различия в материально-техническом обеспечении производств АКТ в разных странах и разных подходов к ее проектированию. Все это затрудняет формирование соответствующих статистических данных, их анализ и обобщение.

Тем не менее анализ немногочисленных и в ряде случаев противоречивых данных позволяет сформировать статистическую основу для разработки весьма приближенной методики прогнозирования экономической эффективности применения сотовых конструкций в частном сегменте АКТ – воздушных судах транспортной категории.

Прежде всего независимо от средств и способов снижения массы конструкций АКТ, в том числе и принятия эффективных конструктивно-технологических решений, интегральный эффект от этой миссии выражается в конечном счете в ее удельной стоимости дол./кг.

В авторитетной публикации [10] приведены следующие данные: стоимость снижения 1 кг полетной массы конструкции в эксплуатации составляет

- спутника – 10...100 тыс. дол./кг;
- самолета – 1...1,5 тыс. дол./кг.

Что же касается экономической эффективности конструктивно-технологических решений конструкций с заполнителем, то их применение сокращает трудоемкость выпуска технической документации, снижаются трудозатраты при изготовлении изделий [2]. Результаты исследований показали, что крыло пассажирского самолета клееной сотовой конструкции имеет на 40 % меньше деталей и на 70 % меньше крепежа. Полы пассажирского салона, выполненные из конструк-

ций с заполнителем, имеют в 20 раз меньше деталей, чем полы обычной стрингерной конструкции. Обшивка руля высоты самолета Боинг-727, изготовленная из углепластика с сотовым заполнителем из полимерного материала, обеспечила сокращение числа нервюр в два раза, а крепежных деталей – на 65 %.

Одним из показателей эффективности конструкций с заполнителем является их стоимость при изготовлении. Зарубежные данные показали, что стоимость изготовления конструкций с заполнителем по сравнению со стоимостью традиционной стрингерной конструкции относительно невелика (табл. 1).

Таблица 1

## Стоимость конструкций

Конструкция	Стоимость 1 кг конструкции, дол.		
	Дюраль	Сталь	Титановый сплав
Клепаная стрингерная панель $\bar{C}_{стр}$	50...70	85...155	165...330
Клееная трехслойная панель с сотовым заполнителем $\bar{C}_{ск}$	25...85	85...155	130...330

Исследования в авиационно-космической промышленности США показали, что применение трехслойных конструкций с сотовым заполнителем к середине 70-х годов дало выигрыш в массе от 9 до 30 % для самолетов и от 5 до 20 % для изделий ракетно-космической техники [6, 11, 12]. Для изделий авиационной промышленности указанные значения выигрыша отнесены к взлетной массе изделия, а для изделий ракетно-космической промышленности – к «сухой» массе конструкции. При этом минимальные значения соответствуют частичному, а максимальные – максимально возможному использованию трехслойных сотовых конструкций.

На диаграмме рис. 1 показаны данные о годовой прибыли от экономии массы в различных транспортных средствах (в ценах 1972 г.) [13].

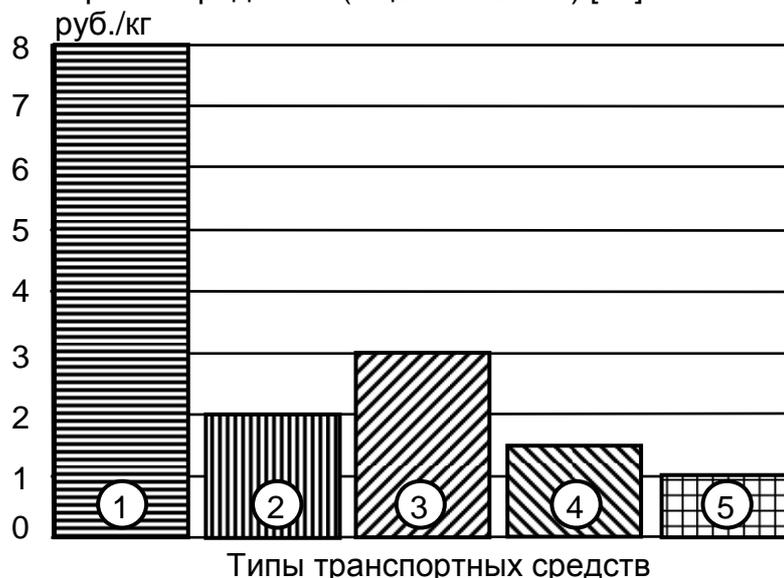


Рис. 1. Годовая прибыль при экономии массы в различных транспортных средствах: 1 – авиационная и космическая техника; 2 – суда на подводных крыльях; 3 – автомобили; 4 – железнодорожный транспорт; 5 – водоизмещающие суда

Как видно, данные рис. 1 удовлетворительно коррелируют с данными, приведенными в табл. 1 для трехслойных панелей из алюминиевых сплавов.

В [14] отмечается, что по массовой эффективности конструкции различного типа можно расположить в следующем порядке: трехслойные конструкции с сотовым наполнителем; конструкции из композиционных материалов на основе боролокна и алюминиевой матрицы; конструкции из эпоксидного графитопластика; конструкции из бериллиевых сплавов; подкрепленные конструкции из алюминиевых сплавов.

По экономической эффективности тонкостенные конструкции располагают в такой последовательности: трехслойные конструкции с несущими слоями и наполнителем из алюминиевых сплавов и стеклопластиков; подкрепленные конструкции; трехслойные конструкции с несущими слоями из эпоксидного боропластика и углепластика; трехслойные конструкции с несущими слоями из композиционных материалов на основе боролокна и алюминиевой матрицы.

В некоторых случаях созданию эффективных трехслойных конструкций препятствуют технологические возможности производства. Однако эти сведения в последние годы претерпели определенные изменения и могут считаться дискуссионными.

Основные преимущества сотовых конструкций отмечаются во многих источниках, в том числе [1 – 6]:

1. Малая масса по сравнению с традиционными типами подкрепленных панелей и оболочек при определенных размерах конструкции и типах материалов. Наибольший выигрыш в массе можно получить при использовании трехслойных плоских панелей.

2. Экономичность по сравнению с традиционными конструкциями. Однако при использовании некоторых новых высокопрочных композиционных материалов стоимость трехслойных сотовых конструкций может быть высокой, несмотря на малую массу.

3. Высокие теплоизолирующие свойства.

4. Повышенная звукоизолирующая способность.

5. Высокий коэффициент внутреннего поглощения энергии. Декремент затухания колебаний на 1 – 2 порядка выше, чем подкрепленных конструкций. Долговечность трехслойных панелей при воздействии переменных нагрузок выше, чем листового материала и сварных однослойных подкрепленных панелей. Предел выносливости повышается при уменьшении жесткости наполнителя на сдвиг.

6. Выносливость слоистых панелей, превышающая выносливость панелей стрингерных конструкций.

7. Большой срок службы вследствие равномерного подкрепления обшивок, отсутствия крепежа, вызывающего концентрацию напряжений.

8. Применение трехслойных сотовых конструкций (в том числе паяных и сварных), которое, как правило, позволяет ликвидировать операцию правки и устранить концентрацию напряжений.

9. Невысокая трудоемкость изготовления и сборки вследствие резкого уменьшения числа деталей по сравнению с традиционными стрингерными конструкциями.

Многочисленные исследования и проработки показывают, что расходы на изготовление, например, планера самолета полностью из композиционных материалов (трехслойная конструкция с сотовым наполнителем, изготовленным из алюминиевых сплавов) примерно на 2 % выше расходов на изготовление того же планера

полностью из алюминиевых сплавов в традиционной манере. Для вертолетов подобные затраты увеличиваются до 4 %. При этом стоимость конструкции из композиционных материалов оценивается в 22...66 дол./кг (по курсу доллара 1972 г.).

Изменение эффективности капиталовложений аналогично изменению прямых эксплуатационных расходов. При средней стоимости материала (55 дол./кг по курсу доллара 1972 г.) общая эффективность капиталовложений для варианта самолетов полностью из композиционных материалов – 16,7 %, для варианта с традиционной конструкцией из алюминиевых сплавов – 16,2 % [12]. При этом учитывались только капиталовложения в изготовление и эксплуатацию. Однако с учетом эксплуатации в течение 10 лет более легкой конструкции экономический эффект может составить 160...337 тыс. дол. на каждый летательный аппарат.

Если рассматривать элементы трехслойной конструкции с заполнителями, например, панели, то эффективность стоимости располагается в следующем порядке: алюминиевые сотовые конструкции, конструкции с продольно-поперечным силовым набором и алюминиевой обшивкой, сотовые конструкции из эпоксидного графитопластика, сотовые конструкции из эпоксидного боропластика, сотовые конструкции из композиционного материала на основе борного волокна и алюминиевой матрицы, бериллиевые сплавы в сотовой конструкции.

Данные о стоимости трехслойных конструкций с заполнителями имеют достаточно широкий диапазон для разных стран, даже для различных фирм одной страны, однако для оценки относительной стоимости можно принять данные, опубликованные фирмой «Стресскин продактс» (США) в начале 80-х годов. Стоимость силовых панелей с сотовым заполнителем из различных материалов показана на рис. 2 [4], откорректированные по данным табл. 1.

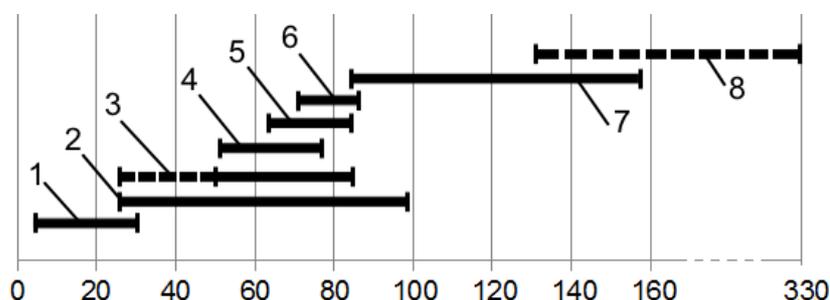


Рис. 2. Стоимость силовых панелей с сотовым заполнителем из различных материалов, дол./кг:

- 1 – крафт-бумага; 2 – пенопласт; 3 – алюминиевый сплав; 4 – бальза;  
 5 – армированная пластмасса; 6 – нейлон; 7 – нержавеющие и жаропрочные сплавы; 8 – титановый сплав  
 ■■■■■ – корректировка по данным табл. 1

В [1] приведена таблица применяемых в авиационной технике и других отраслях материалов сотовых заполнителей, а также их массы в условных единицах (табл. 2), данные которой могут быть использованы при сравнительных оценках их эффективности. Здесь же показана взаимосвязь конструктивных параметров и массы трехслойных сотовых панелей (рис. 3).

В последние годы во все больших масштабах сотовые конструкции изготавливают с обшивками из ПКМ [5 – 9], что требует учета этого фактора при использовании стоимостных показателей для панелей с алюминиевыми несущими слоями, приведенных выше. Некоторые стоимостные характеристики ПКМ представлены в монографии [15] (табл. 3).

Таблица 2  
Материалы сотовых заполнителей, применяемые в авиационной технике и других отраслях

Материал сотового заполнителя	Применение, %		Масса, условные единицы	Стоимость, условные единицы
	Авиационная техника	Другие отрасли народного хозяйства		
Крафт-бумага	20	80	1	2
Хлопчатобумажные ткани	40	60	3	4
Стеклоткань	60	40	4	3
Алюминиевые сплавы	85	15	2	1
Титановые сплавы	100	-	5	6
Нержавеющие стали	100	-	6	5

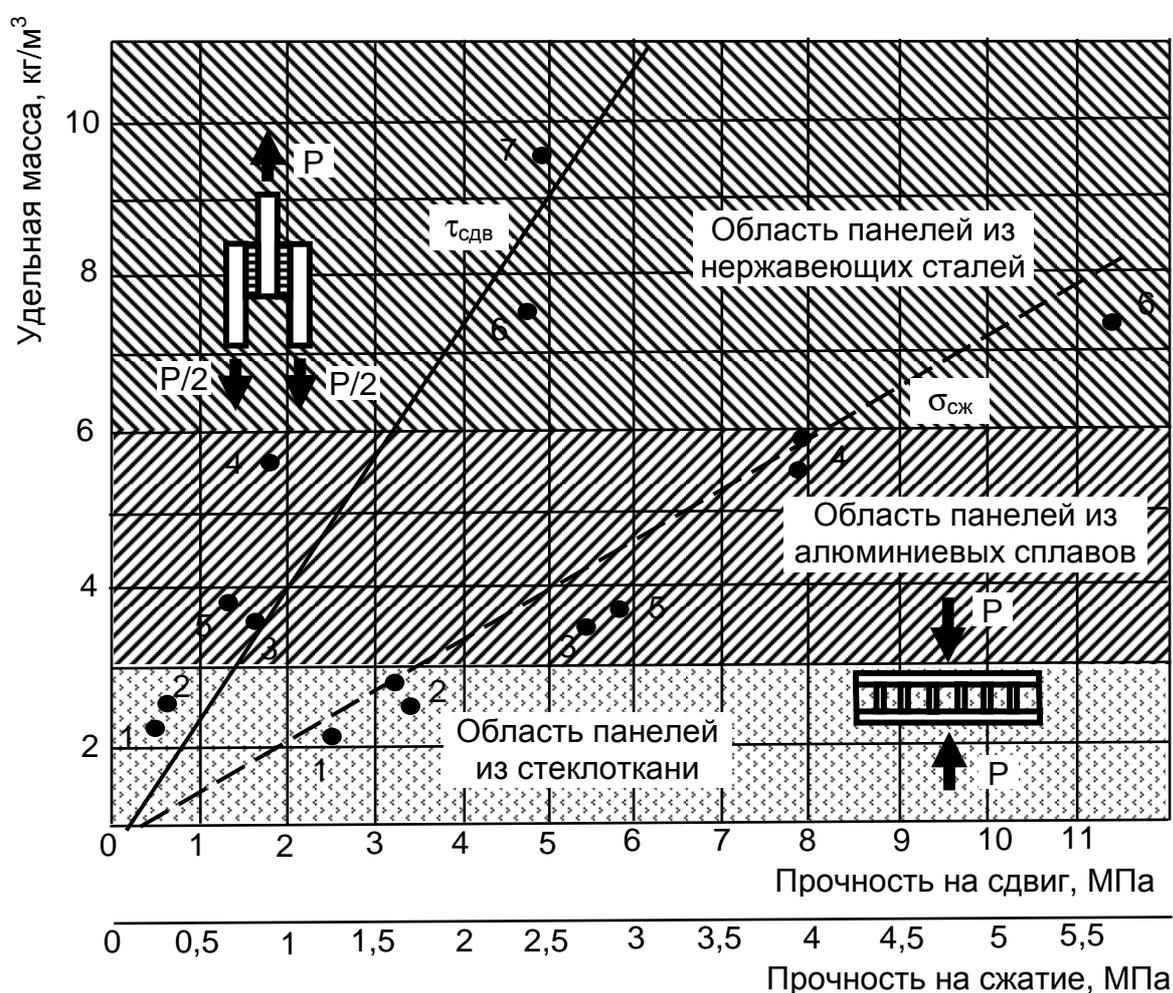


Рис.3. Взаимосвязь конструктивных параметров и массы слоистых панелей:  
 1 – обшивки из стеклотекстолита, соты из стеклоткани; 2 – обшивки из стеклотекстолита, соты из АМг2-Н; 3 – обшивки из Д16Т л 0,3, соты из А5Т; 4 – обшивки из Д19Т л 0,5, соты АМг2-Н л 0,03; 5 – обшивки из Д19Т л 0,8, соты АМг2-Н л 0,05; 6 – обшивки из СН-2 л 0,6, соты СН-2 л 0,05; 7 – сварные панели фирмы «Стресскин»

Таблица 3

Сравнительная удельная стоимость ПКМ и алюминиевого сплава

Материал	Стоимость материала, \$/кг	Стоимость препрега при выкладке
Стеклопластик	6,4...15,4	17,4...42
Кевлар19, СВМ, Русар	34,6	44
КМУ Т-300, УКН-500	46,2...90	100
КМУ высокомодульные, ИМТ, Кулон	91...155	200...345
Дюралюминий		4,6

При изготовлении сотовых конструкций с несущими слоями из ПКМ существенно изменяется их удельная стоимость дол./кг. Там же приведена таблица сравнительной стоимости металлических конструкций летательных аппаратов из ПКМ, заимствованная автором из технических информации ЦАГИ за 1985 г. (табл. 4).

Таблица 4

Сравнительная стоимость металлических и композитных конструкций летательных аппаратов

Тип материала	Стоимость деталей	Стоимость сборочных работ	Общая стоимость
Металлы	39	61	100
ПКМ	62	32	94

В [15] также отмечено, что для АКТ при использовании легких высокопрочных и высокомодульных ПКМ с наполнителями в виде непрерывных волокон различной химической природы (стеклянные, кварцевые, углеродные,  $SiC$ , полимерные на основе полиарамидов Kevlar, СВМ, Русар, СВМИЭ Spectra, полиариленов и полигетероариленов типа ВМИ 88, Vectra, Haydar, ИЭИ, в ВПКМ стекло-, угле-орган-,  $SiC$ -пластиках и гибридных поливолоконистых ВПКМ) эффект достигается уже при экономии 5% массы конструкции.

Облегчение массы самолета на 0,453 кг дает экономию горючего за время эксплуатации до 1800 л. Замена металла на ПКМ в современных конструкциях приводит к значительной экономии массы для модифицированной конструкции: самолеты AV-8V Harrier (26%, 590 кг), B-1 (32%), Raffaele (35%), B 757, 727 (25%, 760 кг), B767 (243 кг).

Использование термопластичных ПКМ на основе ПФС Fortron в А-340-500, А-380 дало снижение массы для оболочек передних частей крыльев 20%.

Удельная прочность стеклотекстолита ( $\sigma_g^+ = 3790$  МПа,  $\rho = 1,9$  г/см<sup>3</sup>) на 20% выше удельной прочности алюминия ( $\sigma_g^+ = 4690$  МПа,  $\rho = 2,8$  г/см<sup>3</sup>), что позволило при равной прочности конструкции сэкономить 4,3% массы. 1 кг сэкономленной массы в ценах конца 1999 года стоил для гражданского самолета – 1000 дол., военного самолета – 3000 дол., вертолета – 3000 дол., ракеты-носителя Ariane – 10000 дол., воздушно-космического судна – 50000 дол., спутника на геосинхронной орбите (35880 км) – 20000 дол., автомобиля – 3000 дол. (рис. 4, [16]).

В самолете в среднем приходится массы на планер – 30%, двигатель и оборудование – 20%, топливо – 30...35%, полезная нагрузка – 15...20%. Исполь-

зование ВПКМ в конструкции планера, фюзеляжа возможно только для высокопрочных ВПКМ из-за больших потоков касательных напряжений и больших сосредоточенных сил от крыла, оперения, шасси. Крупногабаритные отсеки фюзеляжа воспринимают общий изгиб, сосредоточенные перерезывающие силы и осевые нагрузки, в некоторых случаях – крутящие моменты. При напряжениях 1 ГПа в конструкциях летательных аппаратов может быть использовано до 20% ПКМ, при 2 ГПа – до 10% ПКМ. Около 40% конструкций военных самолетов в этом случае может быть выполнено из углепластиков со снижением массы на 12...15% [15].

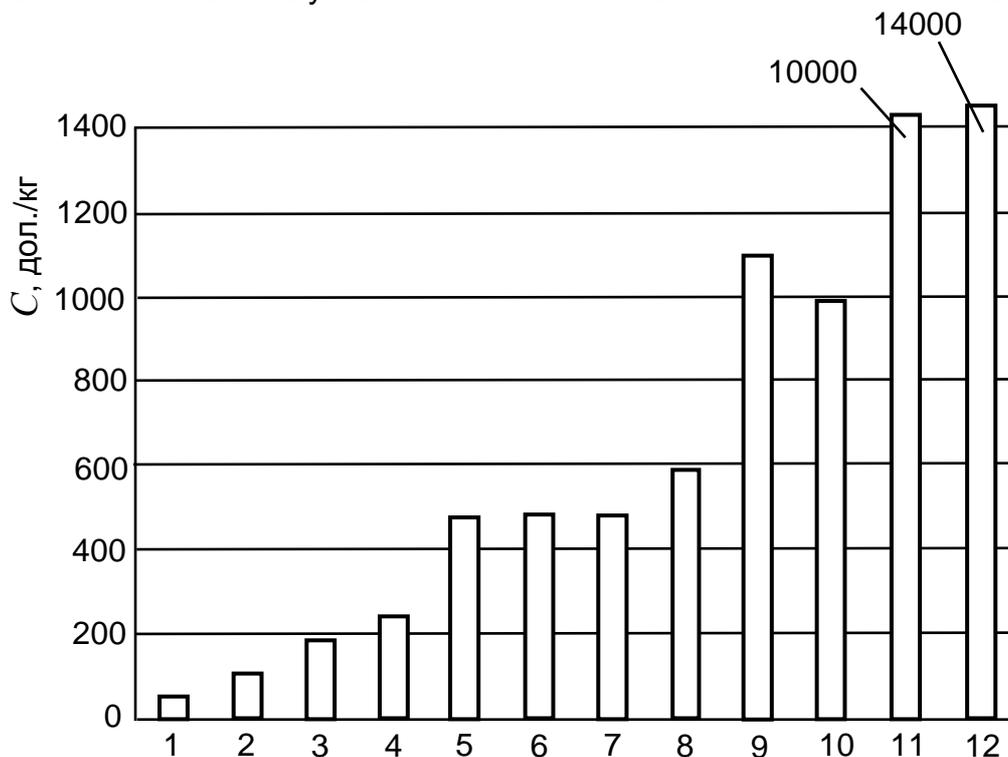


Рис. 4. Стоимость ( $C$ ) экономии массы для различных летательных аппаратов: 1 – малые гражданские самолеты; 2 – вертолеты; 3 – транспортные самолеты; 4 – гражданские коммерческие самолеты; 5 – двигатели летательных аппаратов; 6 – аэробусы типа Boeing 747, A-300-340; 7 – самолет-истребитель; 8 – самолет вертикального (короткого) взлета и посадки; 9 – сверхзвуковой транспортный самолет; 10 – спутник на околоземной ( $R=100...400$  км) орбите; 11 – спутник на геосинхронной ( $R=34000$  км) орбите; 12 – воздушно-космический самолет типа «Space Shuttle»

Планер – основная масса самолета, позволяющая повысить полезную нагрузку. Экономия массы при использовании ВПКМ для конструкций фюзеляжа составляет 12...28%, крыла – 15...20%, хвостового оперения – 15...29%, планера вертолета – 20...22%. Фюзеляж из углепластиков на 30% дешевле и на 40% легче, чем из алюминия. Еще больший эффект достигается при использовании ВПКМ с высокими упругопрочностными свойствами и при изменении конструкции. При изготовлении конструкции крыльев намоткой снижение массы может достичь 30%, фюзеляжа – 25. Снижение количества деталей планера достигает 50%.

Стоимость изготовления нервюры крыла из термопластичного ПКМ (ТПКМ) на 30% ниже стоимости изготовления из стандартного алюминиевого сплава (6–20 отдельных деталей соединяемых 500 крепежными элементами). Нервюры из ТКПМ формируют за одну операцию без применения крепежа [15].

Сотовые конструкции нашли достаточно широкое применение в воздушных судах транспортной категории ГП «Антонов». В [17 – 18] отмечается, что применение трехслойных сотовых панелей в конструкциях самолетов позволяет:

- снизить массу и трудоемкость по сравнению с клепаными конструкциями на 20...30%;
- сократить количество деталей в конструкциях в 2 – 4 раза;
- повысить теплоизолирующие свойства панелей;
- значительно повысить аэродинамическое качество обтекаемых поверхностей;
- повысить жесткость конструкций.

Широкое применение сотовые конструкции получили в самолете Ан-72, в котором масса конструкций из ПКМ составила 980 кг и площадь – 250 м<sup>2</sup>.

Максимальный объем сотовых конструкций был заложен при проектировании самолета «Руслан» Ан-124. Масса конструкций из ПКМ составила 5500 кг, а их площадь – 1500 м<sup>2</sup>. Площадь сотовых конструкций при этом 820 м<sup>2</sup> (54%). Из них – 620 м<sup>2</sup> клееных, из которых 200 м<sup>2</sup> – одновременного формования.

На самолетах Ан-70 относительная масса изделий из ПКМ была максимальной (около 25%) и составляла 6500 кг. Их площадь равнялась 1630 м<sup>2</sup>. Площадь сотовых конструкций – 732 м<sup>2</sup> (45%), из них 350 м<sup>2</sup> были изготовлены методом одновременного формования.

В гражданском самолете Ан-140 площадь деталей из ПКМ составляет 380 м<sup>2</sup>, их масса – 1340 кг. При этом основной объем приходится на трехслойные сотовые панели интерьера.

В гражданском самолете Ан-148 площадь деталей из ПКМ составляет 650 м<sup>2</sup>, их масса – 2050 кг. Масса сотовых конструкций – 37,3% от общей массы конструкций из ПКМ.

На основе приведенных выше достаточно скромных статистических данных, касающихся экономических аспектов применения сотовых конструкций ниже предложена весьма приближенная методика прогнозирования их экономической эффективности в воздушных судах транспортной категории (ВС ТК).

Будем исходить из наличия базового варианта ВС ТК каркасно-стрингерной конструкции. При этом учитываем две категории затрат – связанных с производством сотовых конструкций (их себестоимостью) и с эффективностью от их внедрения в ВС ТК во время его эксплуатации за счет снижения его массы.

Затраты на материалы и производство (себестоимость) стрингерных конструкций в базовом варианте

$$C_{стр}^{баз} = G_{стр}^{баз} \cdot \bar{C}_{стр}, \quad (1)$$

где  $G_{стр}^{баз}$  – масса стрингерно-каркасной конструкции;  $\bar{C}_{стр}$  – удельная стоимость стрингерной конструкции дол./кг.

При модификации базового варианта ВС применением в нем сотовой конструкции массой  $G_{ск}$  затраты на ее производство составят

$$C_{ск} = G_{ск} \cdot \bar{C}_{ск}, \quad (2)$$

где  $\bar{C}_{ск}$  – удельная стоимость СК, дол./кг.

Масса сотовой конструкции

$$G_{ск} = G_{стр} \cdot K. \quad (3)$$

Здесь  $K$  – доля сотовых конструкций, внедряемых в базовый вариант ВС ТК (в ВС ТК ГП «Антонов»  $K = 0,2 \dots 0,3$  [17]).

С учетом (3) выражение (2) будет иметь вид

$$C_{ск} = G_{стр} \cdot K \cdot \bar{C}_{ск}. \quad (4)$$

При этом себестоимость оставшейся стрингерно-каркасной конструкции ВС ТК после внедрения сотовых конструкций массой  $G_{ск}$  составит

$$C_{стр}^{расх} = (G_{стр}^{баз} - G_{ск}) \cdot \bar{C}_{стр}, \quad (5)$$

а на производство сотовых конструкций будут дополнительно израсходованы ресурсы, определяемые формулой (4).

Таким образом, экономическая эффективность от внедрения в базовый вариант сотовых конструкций в производстве (первая составляющая) будет определяться формулой

$$\mathcal{E}_{ск}^{произв} = G_{ск} \cdot \bar{C}_{стр} - G_{ск} \cdot \bar{C}_{ск} = G_{ск} (\bar{C}_{стр} - \bar{C}_{ск}). \quad (6)$$

Относительная экономическая эффективность внедрения сотовых конструкций в базовый вариант ВС ТК выражается отношением

$$\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{произв} = \frac{\mathcal{E}_{ск}^{произв}}{G_{стр}^{баз} \cdot \bar{C}_{стр}} = \frac{G_{ск}}{G_{стр}^{баз}} \left( 1 - \frac{\bar{C}_{ск}}{\bar{C}_{стр}} \right). \quad (7)$$

Как видно из зависимостей (6) и (7), себестоимость внедрения сотовых конструкций в производстве может оказаться отрицательной, если  $\bar{C}_{ск} > \bar{C}_{стр}$ , т.е. в производстве их применение может быть убыточным.

Обращаясь к табл. 1, видим, что при  $\bar{C}_{стр} = 50$  дол./кг и  $\bar{C}_{ск} = 85$  дол./кг убыточность в производстве составит  $0,7 G_{ск} / G_{стр}^{баз}$  и будет тем больше, чем большую массу в ВС ТК составят сотовые конструкции.

Теперь рассмотрим составляющую экономической эффективности внедрения сотовых конструкций в ВС ТК в эксплуатации, которая выражается простой зависимостью

$$\mathcal{E}_{ск}^{экспл} = G_{ск} \cdot m, \quad (8)$$

где  $m$  – стоимость снижения 1 кг полетной массы ВС в эксплуатации.

Как отмечалось выше  $m = (1 \dots 1,5) \cdot 10^3$  дол./кг. [17]. Согласно [15] экономичная масса в ценах 1999 г. составляет для гражданских самолетов 1000 дол./кг, что лежит в нижней границе данных [10].

Относительная экономическая эффективность сотовых конструкций в эксплуатации составляет

$$\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{экспл} = \frac{G_{ск} \cdot m}{G_{стр}^{баз} \cdot \bar{C}_{стр}} = \frac{G_{стр}^{баз} \cdot K \cdot m}{G_{стр}^{баз} \cdot \bar{C}_{стр}} = \frac{K \cdot m}{\bar{C}_{стр}}. \quad (9)$$

При  $K = 0,2$   $m = 1000$  дол./кг и  $\bar{C}_{стр} = (50 \dots 70)$  дол./кг  $\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{экспл} = 40 \dots 28$ .

В то же время относительная экономическая эффективность сотовых конструкций при самом благоприятном соотношении  $\frac{\bar{C}_{ск}}{\bar{C}_{стр}} = \frac{25}{70}$  составит

$$\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{произв} = \frac{0,2 \cdot G_{стр}^{баз}}{G_{стр}^{баз}} \left( 1 - \frac{25}{70} \right) = 0,13.$$

Таким образом, в пределах предлагаемой методики, максимально возможное соотношение производственной себестоимости внедрения сотовых конструкций в ВС ТК к эффекту от их эксплуатации составляет

$$A_{\max} = \frac{\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{произв}}{\bar{\mathcal{E}}_{ск}^{экспл}} \cdot 100\% = \frac{0,13}{28} 100\% = 0,5\%.$$

Это свидетельствует о целесообразности достаточно большого увеличения себестоимости (в том числе и трудоемкости) в производстве ВС ТК с сотовыми конструкциями прежде всего за счет применения высокопрочных, хотя и дорогих ПКМ в обшивках сотовых конструкций.

### Выводы

1. Проведен анализ применения сотовых конструкций в авиационной и космической технике, позволивший синтезировать минимально необходимый комплект статистических относительно непротиворечивых данных, необходимый для формирования методики прогнозирования экономической эффективности применения сотовых конструкций в летательных аппаратах и, в частности, в ВС ТК.

2. Несмотря на очевидно приближенный характер методики, она позволяет оценить основные составляющие – производственную и эксплуатационную – экономической эффективности внедрения сотовых конструкций в ВС ТК и дает возможность проследить последствия изменения (роста) экономической эффективности при увеличении объема внедрения современных ПКМ.

### Список литературы

1. Берсудский, В. Е. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций [Текст] / В. Е. Берсудский, В. Н. Крысин, С. И. Лесной. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
2. Панин, В. Ф. Конструкции с наполнителем: справочник [Текст] / В. Ф. Панин, Ю. А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
3. Ендогур, А. И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование [Текст] / А. И. Ендогур, М. В. Вайнберг, К. М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1988. – 200 с.
4. Иванов, А. А. Новое поколение сотовых наполнителей для авиационно-космической техники [Текст] / А. А. Иванов, С. Н. Кашин, В. И. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.
5. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст]: моногр. / В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. В. Кириченко, В. И. Сливинский. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.
6. Сотовые наполнители и панельные конструкции космического назначения [Текст]: моногр. в 2 т. – Т. 1. Технологические несовершенства сотовых наполнителей и конструкций / А. В. Гайдачук, О. А. Карпикова, А. В. Кондратьев,

М. В. Сливинский; под ред. А. В. Гайдачука – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 279 с.

7. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения [Текст]: моногр.: в 2 т. – Т. 2. Совершенствование сотовых заполнителей и конструкций технологическими методами / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, О. А. Карпикова и др.; под ред. А. В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2015. – 247 с.

8. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники [Текст]: моногр. в 2 т. – Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев и др.; под ред. А. В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с.

9. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники [Текст]: моногр. в 2 т. – Т. 2. Синтез параметров композитных агрегатов ракетно-космической техники при разнородном нагружении / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев и др.; под ред. А. В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 250 с.

10. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реструктуризация [Текст] / В. П. Горбулин, А. С. Довгопольный, О. И. Приходько и др. // Технологические системы. – 2001. – № 2(8). – К.: УкрНИАТ. – С. 5 – 20.

11. SAWE Paper, 1971. – N 884. – P. 1 – 22.

12. Logan T.R. Cost and benefits of composite material applications to a civil STOL aircraft // AIAA Paper, 1974. – N 884. – С. 1 – 8.

13. Прохоров, Б. Ф. Трехслойные конструкции в судостроении [Текст] / Б. Ф. Прохоров, В. Н. Кобелев. – Л.: Судостроение, 1972. – 110 с.

14. Кобелев, В. Н. Трехслойные конструкции: справочник [Текст] / В. Н. Кобелев, Л. М. Коварский, С. И. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1981. – 304 с.

15. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – С-Петербург: НОТ, 2008. – 822 с.

16. Углеродные волокна [Текст] / под ред. С. Симамури. – М.: Мир, 1994. – 128 с.

17. Сотовые конструкции в самолетах АНТК им. Антонова: Опыт применения и перспективы [Текст] / А. З. Двейрин, В. С. Петропольский, А. М. Баранников и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2009. – С. 98 – 104.

18. Опыт применения сотовых конструкций в изделиях «Ан» [Текст] / А.М. Баранников, О. В. Мирошников, Г. В. Неминский и др. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».– Х.: ХАИ, 2007. – Вып. 2 (49). – С. 9 – 16.

Поступила в редакцию 14.06.2016.

## **Прогнозування економічної ефективності застосування в повітряних судах транспортної категорії панельних стільникових конструкцій**

Проведено аналіз застосування стільникових конструкцій в авіаційній і космічній техніці, що дозволив синтезувати мінімально необхідний комплект статистичних даних, необхідних для формування методики прогнозування економічної ефективності застосування стільникових конструкцій у літальних апаратах і, зокрема, в повітряних судах транспортної категорії. Методика дає можливість оцінити основні складові (виробничу і експлуатаційну) економічної ефективності впровадження стільникових конструкцій і простежити наслідки її зміни (зростання) при збільшенні обсягу впровадження сучасних композитів.

**Ключові слова:** економічна ефективність, полімерні композиційні матеріали, стільникові конструкції, повітряні судна транспортної категорії.

## **Prediction of Economic Efficiency of Panel Honeycomb Structure Usage in Aircraft**

Analysis of honeycomb structure application in aviation and space technology is carried out which allowed to synthesize the minimum statistical data set needed for development of technique of forecasting the economic efficiency of honeycomb structure usage in aircraft and transport aircraft in particular. The technique gives an opportunity to estimate the basic components (production and maintenance) of honeycomb structure economic efficiency and to trace its change (growth) consequences by increasing the amount of modern composite material introduction.

**Key words:** economic efficiency, polymeric composite materials, honeycomb structures, transport aircraft.

### **Сведения об авторах:**

**Кондратьев Андрей Валерьевич** – д.т.н., доцент, зав. каф. проектирования и конструкций ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

**Царицынский Антон Анатольевич** – аспирант каф. проектирования и конструкций ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

**Нестеренко Максим Дмитриевич** – студент 446 гр. каф. проектирования и конструкций ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.