

Определение физико-механических характеристик композитной трубчатой структуры при помощи МКЭ-поддержки и сравнение их с аналитическими результатами

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

С помощью МКЭ-поддержки получены величины приведенных физико-механических характеристик ортотропного квазисплошного композиционного материала, состоящего из обшивок и трубчатого набора, которые образуют трехслойную конструкцию. Проанализирована точность определения упругих констант комбинированной трубчатой структуры по сравнению с ранее разработанными аналитическими моделями. Полученные результаты с помощью современных средств инженерного анализа, основанных на методе конечных элементов, позволят упростить проведение проектировочных и поверочных расчетов панельных трубчатых конструкций из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: ортотропный квазисплошной композиционный материал, трубчатый элемент, присоединенная обшивка, численный эксперимент, МКЭ-поддержка.

Создание авиационной техники нового поколения с повышенными требованиями к ее качеству, надежности и конкурентоспособности на мировом рынке требует применения новых эффективных конструктивно-технологических решений (КТР). В качестве таковых в практике зарубежного и отечественного авиастроения в последнее время все шире применяют композитные сэндвичевые структуры с трубчатым наполнителем (ТЗ), главное достоинство которых – возможность интегральной технологии сборки изделия за одну операцию, что обеспечивает высокую технологичность и ресурс [1 - 2].

Проведение проектировочных и поверочных расчетов таких панельных или оболочечных трубчатых конструкций как по существующим расчетным схемам, так и с помощью современных средств инженерного анализа, основанных на методе конечных элементов (МКЭ) [3], требует знания приведенных физико-механических характеристик (ФМХ) ТЗ.

Учитывая то, что жесткостные характеристики трубчатых элементов могут быть на одном уровне и даже превосходить аналогичные характеристики несущих слоев (НС), а проверить или откорректировать экспериментально теоретические значения ФМХ такой трубчатой системы без НС, за исключением продольного направления трубок, практически невозможно, целесообразно рассматривать трубчатую конструкцию как сплошной ортотропный композиционный материал, в котором и трубки, и НС «размазаны» по всему объему.

Ранее нами в работе [4] получены аналитические зависимости для определения приведенных ФМХ полученной комбинированной трубчатой структуры. Однако, как известно, в большинстве случаев в зависимости от степени ответственности конструкции заключение о величинах тех или иных ФМХ проводят только по результатам обработки натуральных испытаний, которые являются весьма дорогостоящими. Поэтому представляется обоснованным проведение серии численных экспериментов по нахождению упругих ФМХ рассматриваемой трубчатой структуры в программном комплексе метода

конечных элементов (МКЭ) аналогично [5, 6] с последующим сопоставлением их величин с результатами, полученными аналитическим путем.

В связи с тем, что в настоящее время стандартного образца для испытаний трубчатой комбинированной структуры нет, то в качестве исследуемой была принята конструкция, состоящая из полок и стенок, образец которой показан на рис. 1, а поперечное сечение – на рис. 2.

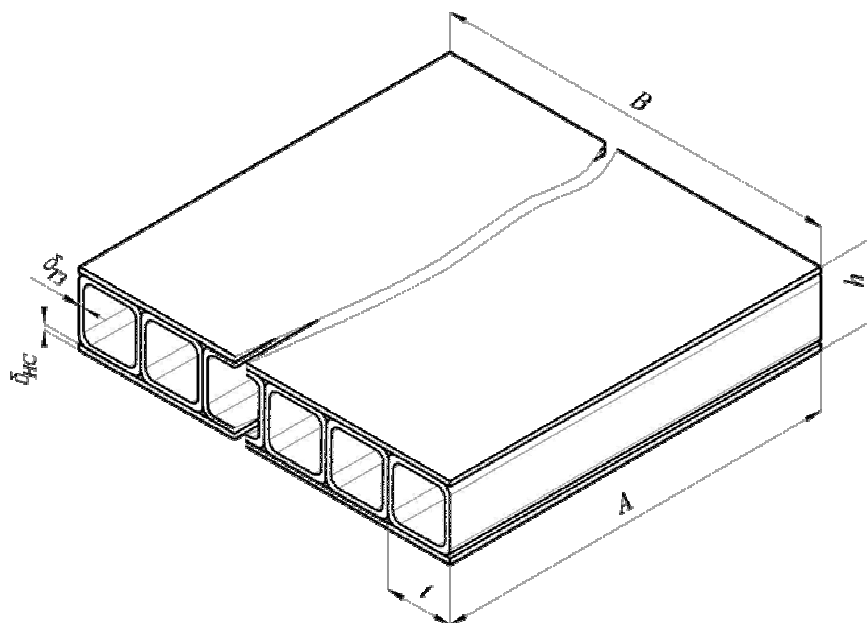


Рис.1. Образец панели с ТЗ:
 $A = 680$ мм – длина ТЗ; $t = 24$ мм – шаг ТЗ; $n = 26$ – количество трубок;
 $B = 624$ мм – ширина панели

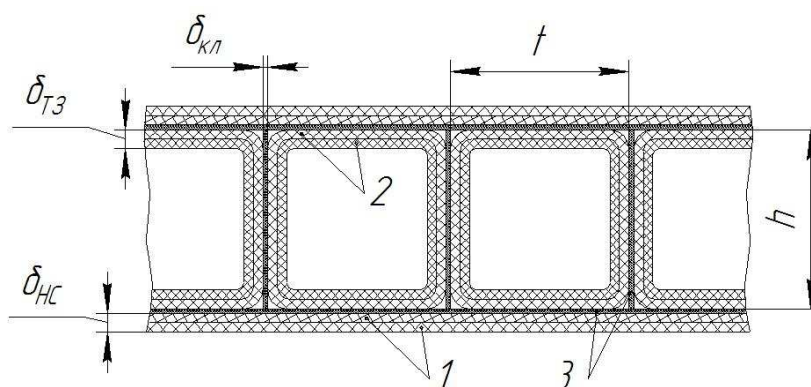


Рис. 2. Поперечное сечение образца панели с ТЗ:
 1 – монослой НС; 2 – монослой трубок; 3 – клеевой слой

Образец панели с ТЗ изготавливают из стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭДТ-69Н. Схема армирования НС – $[0^\circ, 90^\circ]$, ТЗ – $[\pm 45^\circ]$. Принятые для расчетов ФМХ представлены в табл. 1.

В ходе проведения численного эксперимента рассмотрим три варианта расчетных моделей комбинированной трубчатой структуры:

- без учета клеевого слоя в конструкции;
- с учетом клеевого слоя только между трубчатыми элементами;
- с учетом всех клеевых слоев.

ФМХ применяемых материалов

Характеристика	Угол укладки	Материал	
		Стекло-пластик	Клеевой слой
Модуль упругости E , ГПа	0°	32,4	10
	$\pm 45^\circ$	16,8	
	90°	26,3	
Модуль сдвига G , ГПа	$0^\circ - 90^\circ$	3,24	3,85
	$\pm 45^\circ$	8,95	
Коэффициент Пуассона ν	$0^\circ - 90^\circ$	0,07	0,3
	$\pm 45^\circ$	0,57	
Модуль упругости в трансверсальном направлении E_{TKM} , ГПа	90°	10	
Толщина δ , мм; η , мм		0,24	0,08

Для трех рассматриваемых вариантов расчетных моделей трубчатой структуры были построены соответствующие им виртуальные модели, которые представляли собою систему трубок, подкрепленную НС. При генерации конечно-элементной (КЭ) сетки на этих образцах использовали многослойный оболочечный тип конечного элемента для пространственного анализа [7] с соответствующим числом слоев и схемой армирования. Клеевой слой при этом был смоделирован одним из слоев для этого типа элемента.

Пример сгенерированной КЭ модели образца трубчатой системы с принятой глобальной системой координат показан на рис. 3.

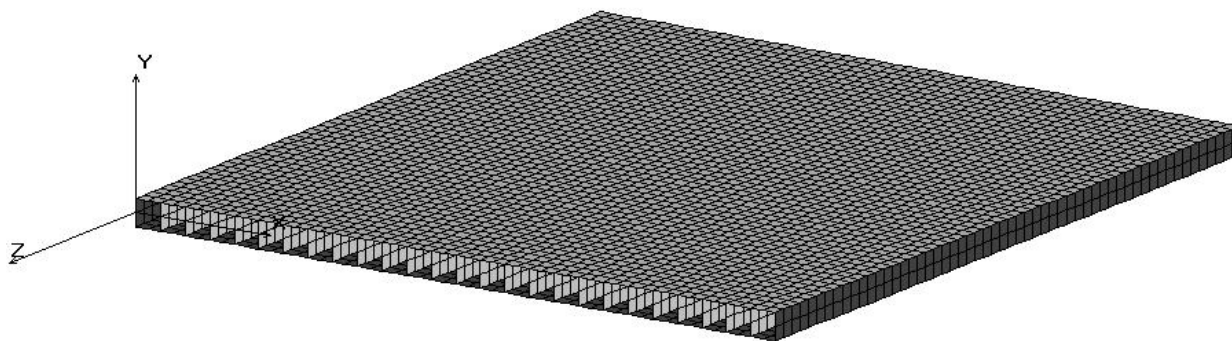


Рис.3. Пример сгенерированной КЭ модели образца трубчатой системы с принятой глобальной системой координат

Решение краевой задачи линейной теории упругости, как известно, возможно в постановке перемещений и напряжений [8]. При проведении серии численных экспериментов по нахождению приведенных упругих ФМХ трубчатой комбинированной структуры в качестве граничных условий были использованы перемещения. При этом осуществляли осреднение искомым перемещений узлов модели.

В качестве примера на рис. 4 показаны КЭ модель системы трубок с граничными условиями для определения модуля сдвига в плоскости XU с соответствующей им картиной распределения линейных перемещений.

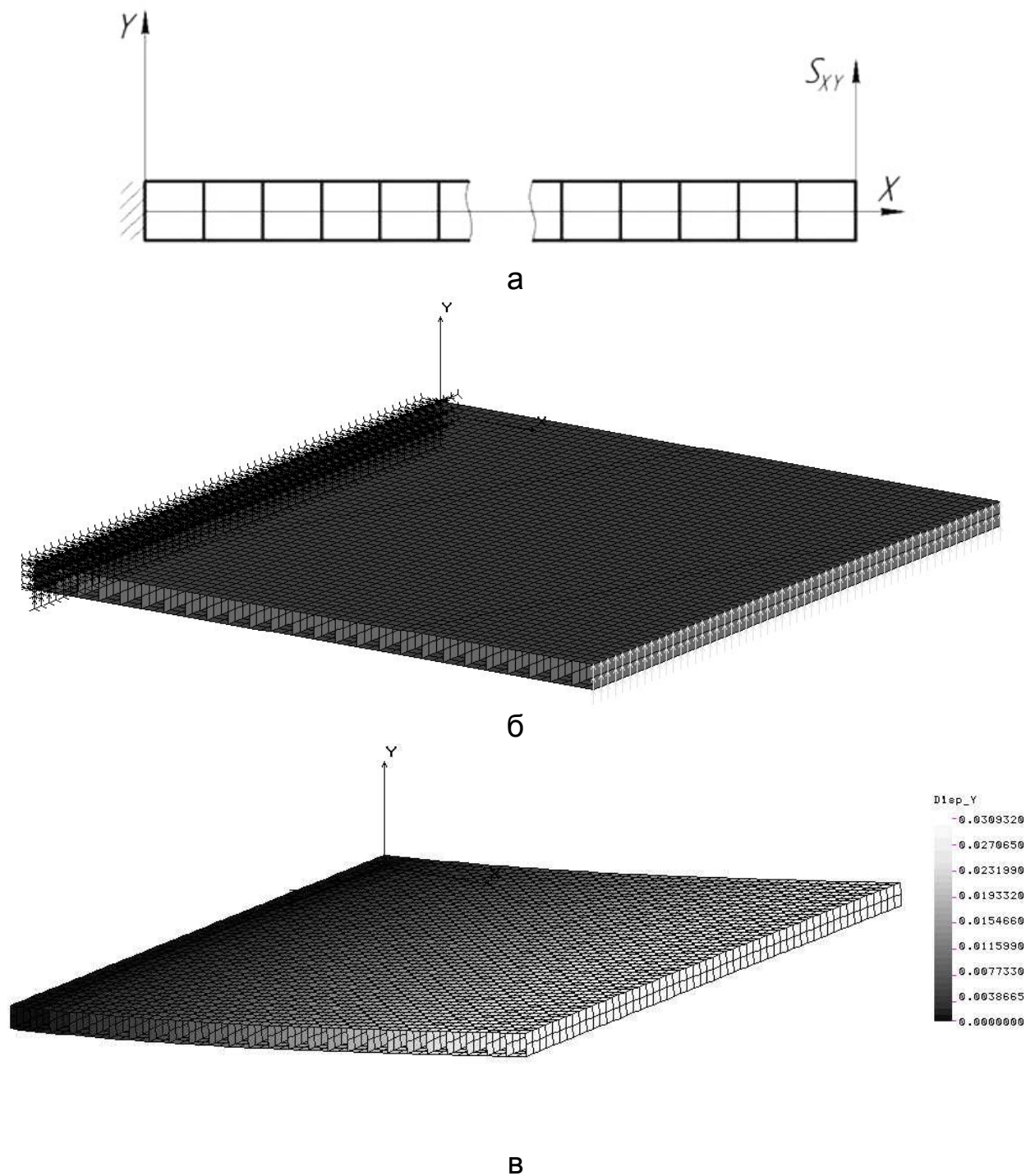


Рис. 4. Определение приведенного модуля сдвига комбинированной трубчатой структуры в плоскости XY :

- а – схема нагружения и закрепления системы трубок;
- б – граничные условия, заданные в программном комплексе МКЭ;
- в – полученная картина линейных перемещений вдоль оси Y

Как и в работе [5], модули сдвига определялись при допущении, что ТЗ с НС заменен сплошной однородной средой. Из допущения следуют равенства $G_{XY} = G_{YX}$, $G_{YZ} = G_{ZY}$, $G_{ZX} = G_{XZ}$.

Следуя подобно изложенному в [5] анализу соотношений ФМХ ТЗ, полученных на основе аналитической модели, КЭ модели и неизвестных истинных значений этих характеристик, а также вытекающего из этого анализа постулата об ограничении коэффициентов, определяющихся отношением

$$\frac{\Phi MX_{прив.i}^A}{\Phi MX_{прив.i}^{МКЭ}} \leq 1,$$

и распространяя этот постулат на случай композитной комбинированной трубчатой структуры, рассматриваемой выше, приведем результаты сравнения аналитического расчета и численного эксперимента для модулей упругости и сдвига трубчатой структуры, а также рекомендуемые корректирующие коэффициенты для аналитических значений приведенных ФМХ трубчатой структуры (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение аналитического расчета и численного эксперимента для модулей упругости и сдвига комбинированной трубчатой структуры и рекомендуемые корректирующие коэффициенты для аналитических зависимостей

Обозначение ФМХ, единица измерения	Аналитический результат			Результат численного эксперимента			$\frac{\Phi MX_{прив.i}^A}{\Phi MX_{прив.i}^{МКЭ}}$	Корректирующий коэффициент K_i^*
	без учета клеевого слоя	с учетом клеевого слоя только между ТЗ	с учетом всех клеевых слоев	без учета клеевого слоя	с учетом клеевого слоя только между ТЗ	С учетом всех клеевых слоев		
$E_{прив.X}$, МПа	1010	1070	1055	766	1006	962	1,32	1
$E_{прив.Y}$, МПа	620,3	616,4	612,5	338	356	579	1,83	1
$E_{прив.Z}$, МПа	2408	2432	2480	1227	1269	2416	1,96	1
$G_{прив.YZ}$, МПа	358			170,5	185,7	267	2,1	1
$G_{прив.YX}$, МПа	0,134			0,144	0,388	1,424	0,93	0,93
$G_{прив.XZ}$, МПа	491,3			186,81	191,18	467,02	2,63	1

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Все приведенные ФМХ комбинированной трубчатой структуры без учета клеевого слоя с частичным и полным учетом клея, полученные на основе аналитических зависимостей, в большей или меньшей степени превосходят свои аналоги, определенные при МКЭ-поддержке. Исключение составляет модуль сдвига $G_{прив.YX}$. Однако абсолютные значения этой характеристики, как и в случае, рассмотренном в [5], настолько малы как в аналитической, так и КЭ модели, что с полным основанием могут быть приняты равными нулю в проектировочных расчетах изделий из ПКМ трубчатой конструкции, как это имеет место и в случае модуля сдвига сотового заполнителя в этой плоскости.

2. Учет клеевого слоя практически не вызывает увеличения абсолютного значения модулей упругости трубчатой структуры в случае использования аналитической модели (табл. 2):

$$\frac{E_{прив.X}^A \eta=0}{E_{прив.X}^A \eta \neq 0} = 0,96; \quad \frac{E_{прив.Y}^A \eta=0}{E_{прив.Y}^A \eta \neq 0} = 1,01; \quad \frac{E_{прив.Z}^A \eta=0}{E_{прив.Z}^A \eta \neq 0} = 0,97.$$

В то же время для КЭ модели учет клеевого слоя вносит ощутимую поправку (табл. 2):

$$\frac{E_{прив.X}^{МКЭ} \eta=0}{E_{прив.X}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,8; \quad \frac{E_{прив.Y}^{МКЭ} \eta=0}{E_{прив.Y}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,58; \quad \frac{E_{прив.Z}^{МКЭ} \eta=0}{E_{прив.Z}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,51.$$

Учет клеевого слоя в модулях сдвига комбинированной трубчатой структуры, не отражаясь в аналитической модели, приводит к существенной поправке в КЭ модели (см. табл. 2):

$$\frac{G_{прив.YX}^{МКЭ} \eta=0}{G_{прив.YX}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,1; \quad \frac{G_{прив.XZ}^{МКЭ} \eta=0}{G_{прив.XZ}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,4; \quad \frac{G_{прив.YZ}^{МКЭ} \eta=0}{G_{прив.YZ}^{МКЭ} \eta \neq 0} = 0,64.$$

Этот факт свидетельствует о большей чувствительности КЭ модели к наличию клеевого слоя.

3. Сравнение ФМХ комбинированной трубчатой структуры (ТС), приведенных в табл. 2, с соответствующими ФМХ ТЗ из работы [5] показывает, как и следовало ожидать, их увеличение за редким исключением:

- в случае аналитической модели с учетом клеевого слоя

$$\frac{E_{прив.X}^A TC_\eta}{E_{прив.X}^A T3_\eta} = 1,5; \quad \frac{E_{прив.Y}^A TC_\eta}{E_{прив.Y}^A T3_\eta} = 0,92; \quad \frac{E_{прив.Z}^A TC_\eta}{E_{прив.Z}^A T3_\eta} = 1,79; \quad \frac{G_{прив.XZ}^A TC_\eta}{E_{прив.XZ}^A T3_\eta} = 1,37;$$

$$\frac{G_{прив.YX}^A TC_\eta}{G_{прив.YX}^A T3_\eta} = \frac{G_{прив.YZ}^A TC_\eta}{G_{прив.YZ}^A T3_\eta} = 1;$$

- в случае КЭ модели с учетом клеевого слоя

$$\frac{E_{прив.X TC\eta}^{МКЭ}}{E_{прив.X T3\eta}^{МКЭ}} = 1,64; \quad \frac{E_{прив.Y TC\eta}^{МКЭ}}{E_{прив.Y T3\eta}^{МКЭ}} = 0,71; \quad \frac{E_{прив.Z TC\eta}^{МКЭ}}{E_{прив.Z T3\eta}^{МКЭ}} = 2,53 \quad \frac{G_{прив.YX TC\eta}^{МКЭ}}{G_{прив.YX T3\eta}^{МКЭ}} = 6,53;$$

$$\frac{G_{прив.YZ TC\eta}^{МКЭ}}{G_{прив.YZ T3\eta}^{МКЭ}} = 0,45; \quad \frac{G_{прив.XZ TC\eta}^{МКЭ}}{E_{прив.XZ T3\eta}^{МКЭ}} = 3,59.$$

4. Степень роста ФМХ трубчатой структуры по сравнению с соответствующими им ФМХ ТЗ тем больше, чем выше ФМХ композитных НС.

5. Как и в работе [5], представляется оправданным при проектировочных расчетах конструкций из ПКМ трубчатой структуры использовать зависимости для определения их приведенных ФМХ, полученные на основе аналитических моделей, что обеспечит определенный запас прочности, необходимый для ответственных изделий авиационной и ракетно-космической техники.

6. Представляется предпочтительным использование приведенных ФМХ комбинированной трубчатой структуры для композитных сэндвичевых конструкций с трубчатыми элементами до появления более надежных рекомендаций, которые могут быть получены на основе дальнейших исследований.

Список литературы

1. Цариковский, В.И. АНТК «Антонов» – лидер в создании конструкций из композиционных материалов в авиастроении [Текст] / В.И. Цариковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 1 (27). – С. 25 – 31.

2. Двейрин, А.З. Анализ эффективности внедрения интегральных конструкций с трубчатыми элементами из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.З. Двейрин, Е.В. Майорова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (68). – Х., 2011. – С. 65 – 77.

3. Гайдачук, В.Е. Концепция оптимизации композитных корпусов летательных аппаратов с сотовым наполнителем на основе синтеза метода конечных элементов и аналитических моделей [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5 (56). – Х., 2008. – С. 7 – 14.

4. Приведенные физико-механические характеристики композиционного материала с трубчатыми элементами [Текст] // В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко, А.В. Губа // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 48. – Х., 2010. – С. 154 – 166.

5. Кондратьев, А.В. Численное определение приведенных упругих физико-механических характеристик трубчатого наполнителя [Текст] / А.В. Кондратьев, Е.В. Майорова, А.А. Чумак, // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – Вып.69 (1). – Х., 2012. (в печати).

6. Оценка физико-механических характеристик углесотопласта различной схемы армирования при помощи МКЭ-поддержки [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых

конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 54 – 59.

7. Статические и динамические расчеты транспортных и энергетических сооружений на базе программного комплекса COSMOS/M [Текст] / С.В. Елизаров, А.В. Бенин, В.А. Петров и др. – СПб.: Иван Федоров, 2004. – 260 с.

8. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов [Текст] / Б.Е. Победря. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 05.03.12.

Визначення фізико-механічних характеристик композитної трубчастої структури за допомогою МСЕ-підтримки і порівняння їх з аналітичними результатами

За допомогою МСЕ-підтримки отримано величини зведених фізико-механічних характеристик ортотропного квазісучільного композиційного матеріалу, що складається з обшивок і трубчастого набору, що утворюють тришарову конструкцію. Проведено аналіз точності визначення пружних констант комбінованої трубчастої структури порівняно з раніше розробленими аналітичними моделями. Отримані результати за допомогою сучасних засобів інженерного аналізу, оснований на методі скінченних елементів, дозволять спростити проведення проектувальних і перевірних розрахунків панельних трубчастих конструкцій із полімерних композиційних матеріалів.

Ключові слова: ортотропний квазісучільний композиційний матеріал, трубчастий елемент, приєднана обшивка, числовий експеримент, МСЕ-підтримка.

Physical and mechanical characteristics of composite tubular structure determination with FEM-support and comparison them with analytical results

Values of physical and mechanical characteristics of orthotropic quasi-uniform composite material, that consist of skins and tubular filler, which form a three-layer structure, were obtained using the FEM-support. The analysis was conducted of accuracy determine the elastic constants the combined tubular structure with compared with the previously developed the analytical models. The results obtained with the help of modern tools of engineering analysis, which is based on the finite element method, make it easier to conduct the design and verification calculations panel tubular structures made of polymer composite materials.

Keywords: quasi-uniform orthotropic composite material, a tubular filler that is connect with skin, numerical experiment, FEM-support.