

Напряженно-деформированное состояние наноспутника POLYITAN-2 при квазистатических перегрузках на этапе выведения

А. С. Цыбенко, Б. М. Рассмакин, А. А. Рыбалка

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина

Проанализирована прочность наноспутника POLYITAN-2 при квазистатических перегрузках на этапе его выведения. Разработана эффективная твердотельная модель и соответствующая ей конечноэлементная модель наноспутника. С использованием программного комплекса ANSYS рассчитано напряженно-деформированное состояние наноспутника. Определены коэффициенты запаса прочности и максимальные перемещения конструктивных элементов. Установлено, что для рассматриваемого варианта исполнения наноспутника условия прочности и жесткости выполняются.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, наноспутник, прочность, жесткость, коэффициенты запаса прочности.

Введение. Создание космических аппаратов (КА) – весьма длительный, наукоемкий и дорогостоящий процесс, включающий научно-исследовательский, опытно-конструкторский и производственный этапы с обязательным их соответствием отраслевым стандартам [1–3]. В отличие от крупногабаритных КА, для наноспутников (НС) существуют ограничения по срокам проектирования и изготовления, а также по бюджету и штату сотрудников. В этой связи концепция применения стандартизированных платформ НС и метода сквозного проектирования [4], когда конструирование, расчеты и изготовление КА проводятся с использованием общей 3D модели в единой вычислительной среде, позволяет оперативно вносить изменения в конструкцию и, таким образом, в кратчайшие сроки осуществить разработку НС с необходимыми характеристиками.

Задача обеспечения прочности является одной из главных в процессе создания НС. Она включает в себя анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) при максимальных квазистатических перегрузках, гармонических и случайных вибрациях, импульсных и акустических нагрузках, а также при температуре транспортировки НС, выведения и работы его на орбите. Согласно [5] для анализа прочности НС при действии квазистатических перегрузок вводится коэффициент безопасности, учитывающий неточности теоретического и экспериментального определения, в том числе и динамический характер действующих нагрузок.

Как правило, НС является достаточно сложным техническим объектом, поэтому при его разработке используется итерационное уточнение принимаемых конструкторско-технологических решений. Вначале рассматривается упрощенная имитационная модель (ИМ) НС, на основе которой отрабатывается компоновка и осуществляется выбор конструкционных материалов элементов. Затем по данным анализа динамической прочности создается уточненная ИМ, более адекватно отражающая функциональные, инерционно-массовые и жесткостные характеристики НС.

Цель исследования – анализ НДС конструктивных элементов НС POLYITAN-2 на основе рациональной ИМ при квазистатических перегрузках, обусловленных выведением его на околоземную орбиту.

Постановка задачи. При создании НС POLYITAN-2 негерметичной схемы руководствовались унифицированным форматом CubeSat 2U [6], определяющим концепцию облика НС, его массогабаритные характеристики, тип несущей конструкции и т.п.

Разработанная и являющаяся базовой для метода сквозного проектирования 3D модель НС POLYITAN-2 (рис. 1) содержит несущий каркас в форме пространственной рамы, на которой размещены научный модуль, элемент обшивки, электронная платформа (ЭП), модуль системы ориентации и стабилизации (СОС), антенный блок (рис. 2). Модуль СОС состоит из массивного маховика с электроприводом, управляющей платы и двух кронштейнов, с помощью которых осуществляется крепление к несущему каркасу. Электронная платформа включает пять электронных плат, три аккумуляторные батареи и четыре наборные стойки для сочленения и крепления к несущему каркасу. Габаритные размеры 3D модели НС POLYITAN-2: $100 \times 100 \times 227$ мм, расчетная масса – 1,8 кг.

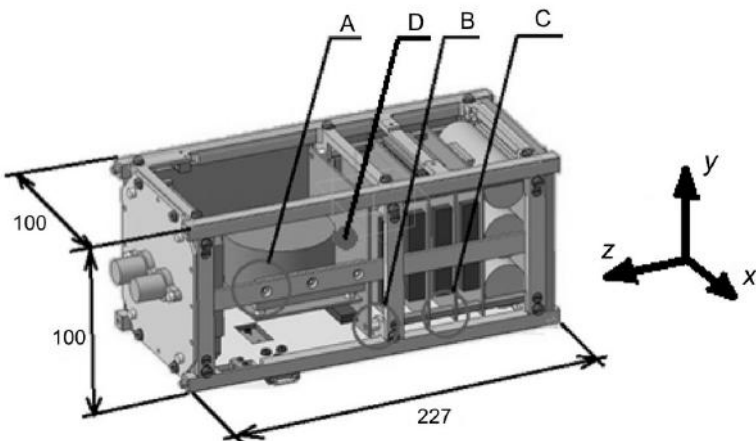


Рис. 1. Геометрическая модель НС POLYITAN-2 без боковых панелей: *A* – участок крепления кронштейна СОС к перемычкам несущего каркаса; *B* – участок крепления ЭП к несущему каркасу; *C* – несущая стойка ЭП; *D* – плата управления СОС.

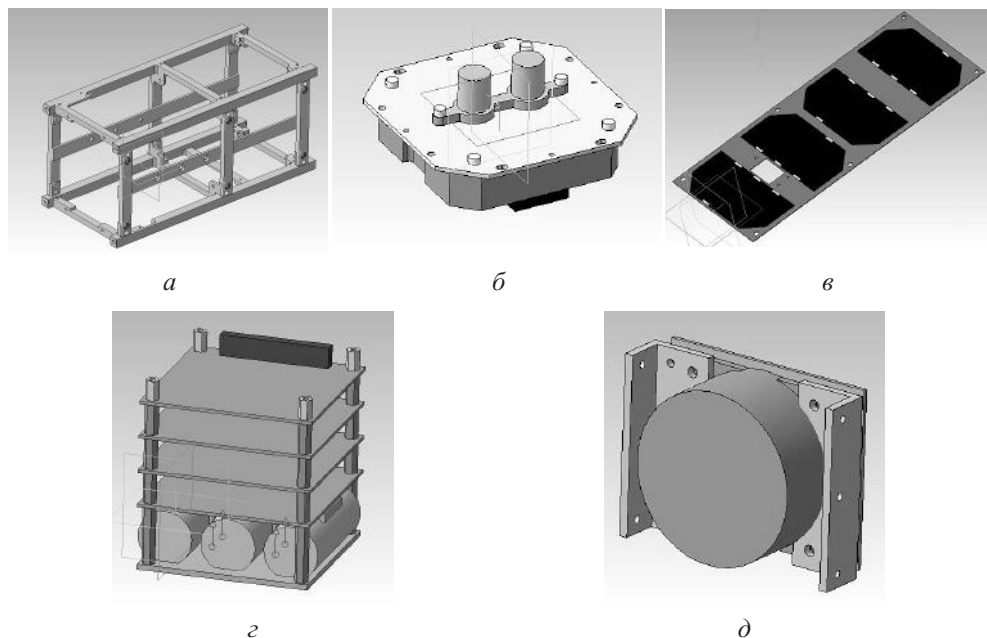


Рис. 2. Основные конструктивные элементы НС POLYITAN-2: *a* – несущий каркас; *б* – научный модуль; *в* – элемент обшивки; *г* – электронная платформа; *д* – модуль СОС.

В качестве материала несущего каркаса и элементов крепления модуля СОС используется алюминиевый сплав Д16, антенного модуля и элементов ЭП – алюминиевый сплав АМг6, наборных стоек ЭП – латунь Л63, электронных плат – стекло-текстолит КАСТ-В.

Некоторые физико-механические характеристики используемых материалов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические характеристики используемых изотропных конструкционных материалов

Материал	E , МПа	ν	ρ , кг/м ³	σ_B , МПа
АМг6	71000	0,30	2640	305
Д16	72000	0,30	2770	450
Л63	116000	0,35	8440	290

Примечание. E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; σ_B – предел прочности.

Физико-механические характеристики анизотропного материала плат ЭП (КАСТ-В) следующие: $E = 21000$ МПа; $\nu = 0,1$; $\rho = 1800$ кг/м³; предел прочности при растяжении $\sigma_B^p = 157$ МПа (по утку); предел прочности при сжатии $\sigma_B^c = 54$ МПа.

Размещение НС в системе выведения учитывали в ИМ посредством введения кинематических ограничений. Перемещения (u_x, u_y, u_z) опорных поверхностей несущего каркаса полагали нулевыми (рис. 3), за исключением продольных ($u_z \neq 0$) для боковых ребер.

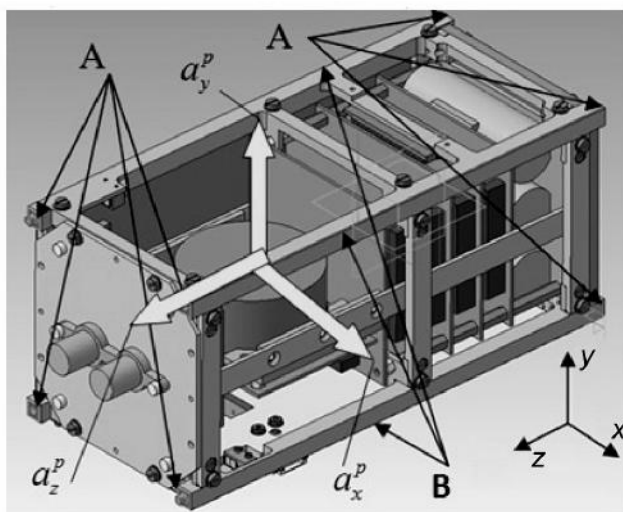


Рис. 3. Варианты нагружения POLYITAN-2 и опорные поверхности несущего каркаса: А – торцевые; В – боковые.

Согласно [6] прочность и жесткость НС на этапе выведения должны обеспечиваться при воздействии на него квазистатических перегрузок в направлении трех взаимно перпендикулярных продольной и поперечных осей x, y, z (рис. 3). В

соответствии с [7] расчетную величину нагрузки определяли умножением действующего ускорения $a_x = a_y = a_z = 13g$ на коэффициент безопасности f . Для рекомендованного $f = 1,25$ [5] величины расчетных ускорений будут $a_x^p = a_y^p = a_z^p = 16,3g$. Следует отметить, что при прочностном анализе электронных плат ЭП также учитывали коэффициент перегрузки $k = 1,25$ [5].

Имитационная модель НС POLYITAN-2. 3D модель НС POLYITAN-2 (рис. 1) содержит более 100 элементов, полный учет которых в конечноэлементном анализе приводит к неоправданному увеличению размерности задачи. Поэтому расчетную 3D модель НС рационализировали следующим образом (рис. 4,б): были исключены элементы, вкладом которых в обеспечение статической прочности и жесткости данной конструкции можно пренебречь (обшивка, элементы крепежа, датчики солнца, магнитометр и т.д.). Следует отметить, что массу обшивки, датчиков солнца и магнитометра учитывали при последующем динамическом анализе НС посредством равномерного “размазывания” по соответствующим поверхностям контакта с несущим каркасом. Распределенную массу крепежа добавили к плотности материала несущего каркаса.

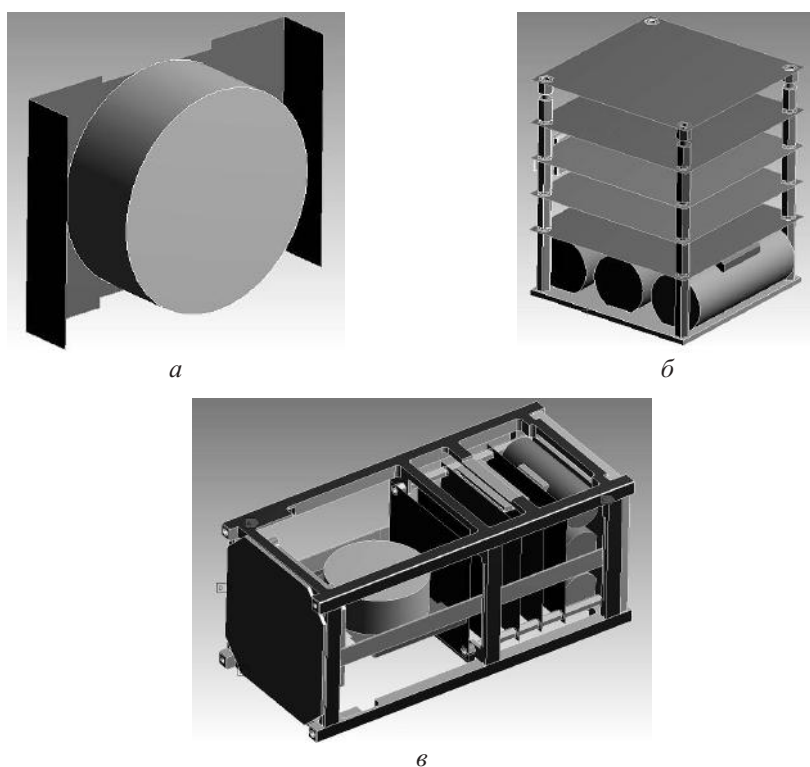


Рис. 4. Рациональные геометрические модели системы ориентации (а), электронной платформы (б) и НС POLYITAN-2 (в).

На основе 3D имитации НС была построена конечноэлементная модель (КЭМ) POLYITAN-2 в системе ANSYS [7]. При аппроксимации каркаса, научного модуля, наборных стоек ЭП, аккумуляторов и антенного модуля использовали 20-узловые гексагональные конечные элементы (КЭ) SOLID186. Для аппроксимации кронштейнов СОС и электронных плат ЭП применяли пластинчатые КЭ SHELL181 с четырьмя слоями по толщине. Сочленение пластинчатых и объемных КЭ осуществляли посредством безмассовых абсолютно жестких связей на основе двухузловых балочных элементов BEAM188. При сопряжении фрагментов дискретных моделей с различной

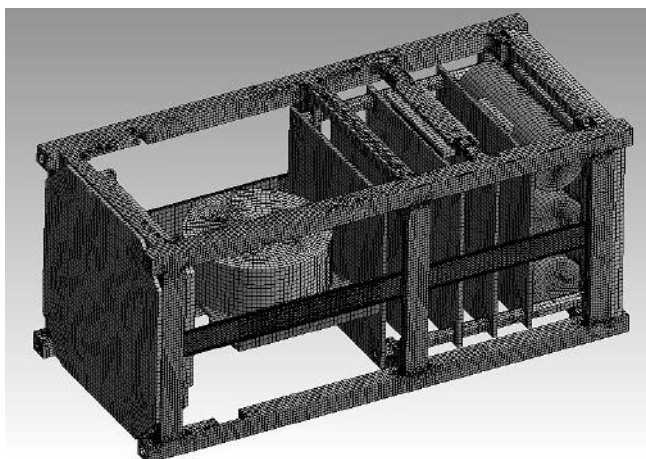


Рис. 5. Конечноэлементная модель НС POLYITAN-2.

плотностью разбиения однотипными КЭ использовали контактные элементы CONTA174. В результате была получена рациональная КЭМ НС, состоящая из 326300 элементов с 1221504 узлами (рис. 5).

Анализ прочности НС POLYITAN-2. При анализе прочности элементов НС, выполненных из изотропных сплавов Д16, АМг6 и Л63, использовали критерий Мизеса [8]. В частности, для определения прочности стеклотекстолитовых электронных плат применяли критерий Мора–Кулона [8], для которого эквивалентные напряжения будут:

$$\sigma_{\vartheta} = \sigma_1 - \frac{\sigma_B^p}{\sigma_C} \sigma_3, \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения.

Коэффициенты запаса прочности для металлических элементов и стеклотекстолита определяли соответственно как

$$\eta = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\vartheta}}; \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\sigma_B}{k\sigma_{\vartheta}}. \quad (3)$$

В результате расчета НДС определили наиболее нагруженные конструктивные элементы НС. Установлено, что наибольшие эквивалентные напряжения $\sigma_{\vartheta}^{\max} = 175,86$ МПа при ускорении a_x^p имеют место в перемычке несущего каркаса (материал – Д16) в точках крепления кронштейна СОС (рис. 6). В свою очередь, в наборной стойке ЭП (материал – Л63) напряжения $\sigma_{\vartheta}^{\max} = 11,92$ МПа реализуются при a_x^p в окрестности контакта с центральной платой (рис. 2,з). Для стеклотекстолитовых электронных плат ЭП наиболее нагруженной является нижняя плата (рис. 2,е), для которой $\sigma_{\vartheta}^{\max} = 9,23$ МПа при a_z^p в точках контакта с наборными стойками. В держателе аккумулятора (материал – АМг6) напряжения $\sigma_{\vartheta}^{\max} = 3,67$ МПа при a_y^p наблюдаются в точках примыкания к аккумулятору. Коэффициенты запаса прочности

Т а б л и ц а 2

Величины σ_3^{\max} и η_{\min} для наиболее нагруженных элементов НС

Элемент конструкции	a_x^p		a_y^p		a_z^p	
	σ_3^{\max} , МПа	η_{\min}	σ_3^{\max} , МПа	η_{\min}	σ_3^{\max} , МПа	η_{\min}
Перемычка несущего каркаса	175,86	2,56	34,46	13,06	8,83	50,96
Держатель аккумулятора	9,67	31,54	9,60	31,77	19,47	15,67
Наборная стойка ЭП	11,68	24,83	11,92	24,33	2,93	98,98
Плата ЭП	3,21	13,46	3,68	11,74	9,23	4,68

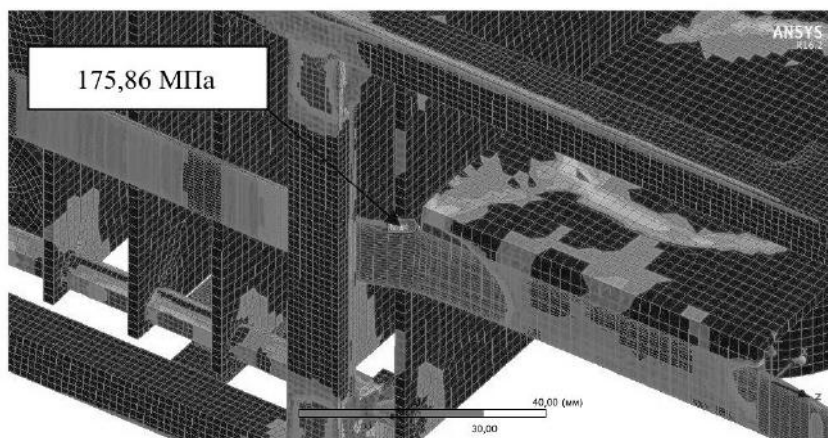


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в перемычке несущего каркаса на участке крепления кронштейна СОС для варианта нагружения a_x^p .

для вышеуказанных элементов при рассматриваемых вариантах нагружения НС (a_x^p , a_y^p , a_z^p) приведены в табл. 2.

Как видно, минимальный коэффициент запаса прочности элементов НС $\eta_{\min} = 2,56$. Таким образом, можно утверждать, что прочность ($\eta \geq 1$) рассматриваемой конструкции НС при квазистатических перегрузках на этапе выведения обеспечивается.

Анализ жесткости показывает, что максимальная величина перемещений имеет место для точек маховика модуля СОС ($\Delta_{\max} = 3,92 \cdot 10^{-2}$ мм при a_x^p), при этом маховик вместе с кронштейнами смещается как твердое тело ввиду относительно низкой жесткости перемычек несущего каркаса в поперечном направлении. Наибольшие перемещения $\Delta_{\max} = 3,79 \cdot 10^{-2}$ мм при a_x^p точек перемычек несущего каркаса (рис. 7) соответствуют зоне σ_3^{\max} (рис. 6). Для электронных плат наибольшие перемещения $\Delta_{\max} = 1,34 \cdot 10^{-2}$ мм при a_z^p отмечаются в центре нижней платы (рис. 2,з). Максимальные перемещения для наборной стойки $\Delta_{\max} = 6,22 \cdot 10^{-3}$ мм при a_y^p реализуются в точках контакта с центральной платой (рис. 2,е). Наибольшие перемещения в держателе аккумулятора $\Delta_{\max} = 6,0 \cdot 10^{-4}$ мм при a_z^p наблюдаются в точках контура у торцов среднего аккумулятора (рис. 2,е). Данные расчетов максимальных перемещений в указанных конструктивных элементах приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Максимальные перемещения в элементах НС для рассматриваемых вариантов нагружения

Элемент конструкции	Δ_{\max} , мм, при		
	a_x^p	a_y^p	a_z^p
Маховик	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$5,24 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$
Держатель аккумулятора	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$6,00 \cdot 10^{-4}$
Наборная стойка ЭП	$6,18 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-4}$
Плата ЭП	$6,17 \cdot 10^{-3}$	$6,21 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$

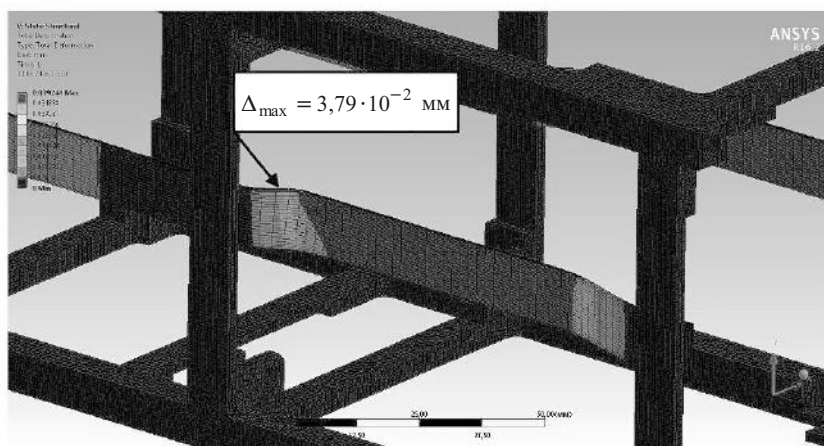


Рис. 7. Поле перемещений в перемычке несущего каркаса для варианта нагружения a_x^p .

Согласно [7] допускаемая величина перемещений точек элементов НС $[\Delta] = 0,1$ мм. Из данных табл. 3 видно, что необходимая жесткость конструкции POLYITAN-2 обеспечивается ($\Delta_{\max} \leq [\Delta]$).

Выводы

1. Для разработанной конструкции НС POLYITAN-2 построена рациональная комбинированная КЭМ, содержащая объемные, оболочечные, балочные и контактные КЭ.

2. Путем расчета определено НДС конструктивных элементов НС POLYITAN-2 при действии квазистатических перегрузок, отвечающих этапу выведения его на орбиту. Найдены величины максимальных эквивалентных напряжений, перемещений, а также минимальные коэффициенты запаса прочности.

3. Установлено, что в соответствии с предъявляемыми требованиями конструкция НС POLYITAN-2 является рациональной с точки зрения прочности и жесткости.

Резюме

Проаналізовано міцність наносупутника POLYITAN-2 за квазістатичних перевантажень на етапі його виведення. Розроблено ефективну твердотільну модель і відповідну їй скінченноелементу модель наносупутника. Із використанням програмного

комплексу ANSYS розраховано напружено-деформований стан наносупутника. Визначено коефіцієнти запасу міцності та максимальні переміщення конструктивних елементів. Установлено, що для даного варіанта виконання наносупутника умови міцності і жорсткості виконуються.

1. *ГОСТ Р 56514-2015*. Нормы прочности автоматических космических аппаратов. – Введ. 01.01.2016.
2. *ECSS-E-HB-32-26A*. Space Engineering: Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook. – Noordwijk: ESA Requirements & Standards Division, 2013. – 505 p.
3. *ECSS-E-ST-10-03C*. Space Engineering: Testing. – Noordwijk: ESA Requirements & Standards Division, 2012. – 128 p.
4. Каверин В. В., Пугач И. Ю. Применение современных методов при проектировании и отработке прочности малого космического аппарата // *Вопр. электромеханики*. Тр. ВНИИЭМ. – 2009. – **109**, № 2. – С. 21–26.
5. *ECSS-E-ST-32-10C*. Space Engineering: Structural Factors of Safety for Spaceflight Hardware. – Noordwijk: ESA Requirements & Standards Division, 2009. – 24 p.
6. *QB50*. System Requirements and Recommendations. – 2015. – Issue 7. – 58 p.
7. *ANSYS*. Structural Analysis Guide ANSYS Release 12.1. – Canonsburg: ANSYS, Inc., 2009.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. *Справочник по сопротивлению материалов*. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

Поступила 16. 06. 2016