

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН УСИЛЕНИЯ СОТОВЫХ КАРКАСОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ ПОДДЕРЖКИ

Введение

Сотовые конструкции [1–3] широко используются для создания каркасов солнечных батарей (СБ), являющихся основным источником энергии космических аппаратов (КА) освоения ближнего космоса [4, 5]. Важным моментом при разработке подобных каркасов является проектирование локальных зон, передающих значительные сосредоточенные нагрузки (рис. 1).

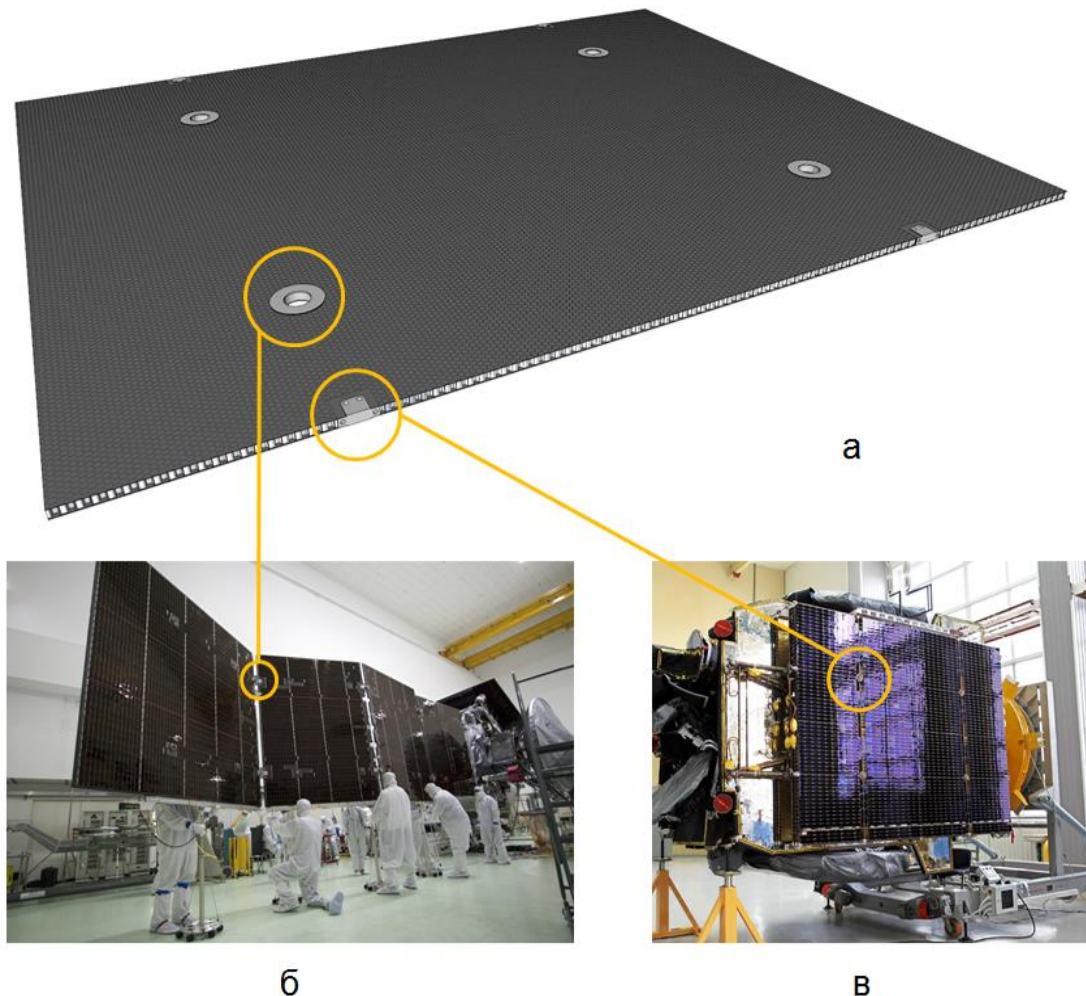


Рисунок 1 – Примеры локальных зон каркасов СБ:
 а – трехмерная модель композитного сотового каркаса;
 б – шарнирные узлы, соединяющие смежные панели СБ КА «Juno» [6];
 в – замки зачеховки, фиксирующие панели СБ КА «Ямал-300К»
 в сложенном положении [7]

Напряженно-деформированное состояние (НДС) сотового каркаса СБ в регулярной зоне хорошо описывается приближенными моделями (например, балочной моделью, моделью многослойной пластины [8–13]).

Для определения НДС в нерегулярных зонах такой подход является неприемлемым, поскольку для получения адекватных результатов необходим учет реальной геометрии и характеристик сотового заполнителя (СЗ) и усилений несущих обшивок (НС). В силу дискретности СЗ описание математической модели каркаса СБ является ресурсоемкой задачей как с точки зрения временных затрат, так и с точки зрения требований к используемому программно-аппаратному обеспечению. В связи с этим представляется обоснованным использовать модель локальной зоны, изолированной от остальной части каркаса СБ, с приложенными граничными условиями [14–18], что позволит сконцентрировать вычислительные ресурсы на исследуемой части каркаса и получить в ней детальную картину распределения компонент НДС.

Методика моделирования локальных зон

Предлагаемая методика моделирования локальных зон основана на использовании двух конечно-элементных (КЭ) моделей: локальной и общей (рис. 2).

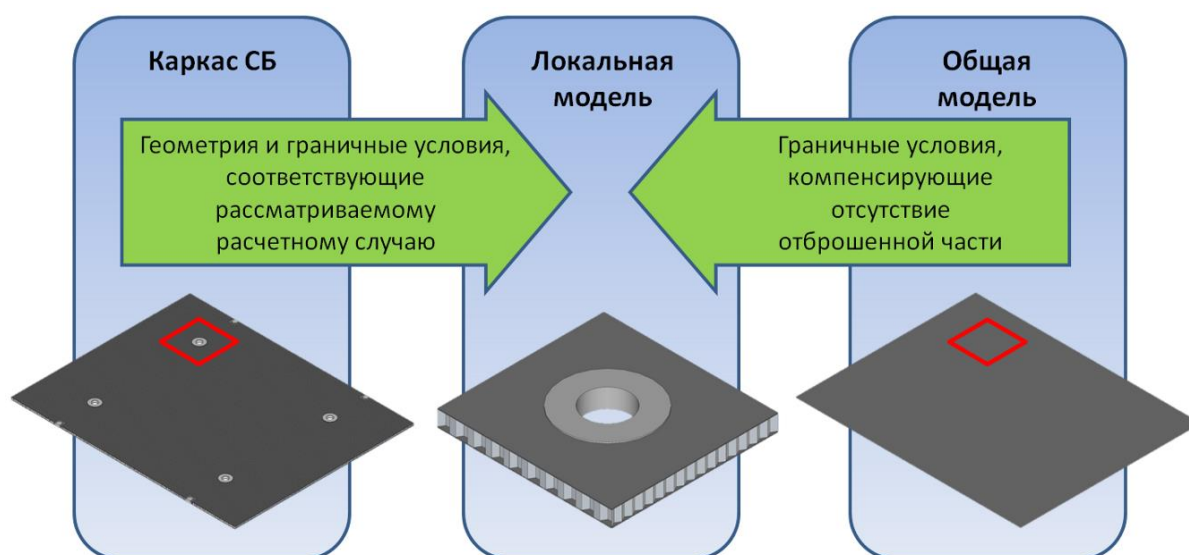


Рисунок 2 – Общая схема методики моделирования локальных зон каркаса СБ

Общая модель воспроизводит каркас СБ целиком без акцентирования внимания на локальных зонах с заменой дискретного СЗ на приведенный сплошной ортотропный материал. Целью

использования общей КЭ-модели является получение информации о распределении компонент деформированного состояния каркаса СБ.

Локальная модель точно воспроизводит часть каркаса СБ с исследуемой локальной зоной с учетом реальной геометрии СЗ и усиления НС.

Для того чтобы модель была адекватной, необходимо компенсировать отсутствие отброшенной части приложением соответствующих условий на границе локальной модели, которые можно получить из анализа общей модели. В качестве таких граничных условий были использованы перемещения и повороты в узлах КЭ-модели.

Поскольку в общем случае КЭ-сетки общей и локальной моделей являются несовместными, то недостающие граничные условия для локальной модели (рис. 3, в) можно перенести с использованием интерполяции [19, 20] (рис. 3, б) перемещений и поворотов в узлах общей модели, принадлежащих контуру исследуемой локальной зоны (рис. 3, а).

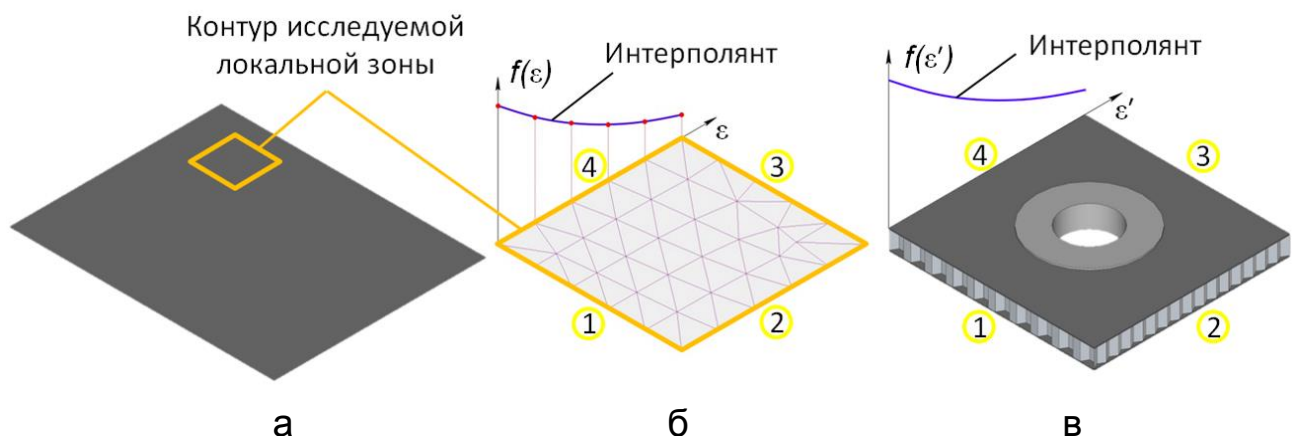


Рисунок 3 – Задание граничных условий локальной модели:

- а – общая модель каркаса СБ с контуром локальной зоны;
- б – интерполяция перемещений и поворотов в узлах общей модели;
- в – пересчет граничных условий для локальной модели

Для каждой из сторон прямоугольной локальной зоны введены координаты ε (общая модель) и ε' (локальная модель) для составления и интерполяционных полиномов и пересчета граничных условий соответственно.

Очевидно, что потребуется составить 24 интерполянта $f(\varepsilon)$: три интерполянта перемещений $U_x(\varepsilon)$, $U_y(\varepsilon)$, $U_z(\varepsilon)$ и три интерполянта поворотов $R_x(\varepsilon)$, $R_y(\varepsilon)$, $R_z(\varepsilon)$ для каждой из четырех сторон.

Полагая идентичность распределений условий на границе локальной зоны в общей $f(\varepsilon)$ и локальной $f(\varepsilon')$ моделях можно пересчитать их по формулам

$$\begin{aligned}
 U'_x(\varepsilon') &= U_x(\varepsilon') + R_y(\varepsilon') \cdot \Delta z; \\
 U'_y(\varepsilon') &= U_y(\varepsilon') - R_x(\varepsilon') \cdot \Delta z; \\
 U'_z(\varepsilon') &= U_z(\varepsilon'); \\
 R'_x(\varepsilon') &= R_x(\varepsilon'); \\
 R'_y(\varepsilon') &= R_y(\varepsilon'); \\
 R'_z(\varepsilon') &= R_z(\varepsilon'),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $U_x(\varepsilon')$, $U_y(\varepsilon')$, $U_z(\varepsilon')$, $R_x(\varepsilon')$, $R_y(\varepsilon')$, $R_z(\varepsilon')$ – интерполяционные полиномы перемещений и поворотов в узлах общей модели, принадлежащих контуру локальной зоны; $U'_x(\varepsilon')$, $U'_y(\varepsilon')$, $U'_z(\varepsilon')$, $R'_x(\varepsilon')$, $R'_y(\varepsilon')$, $R'_z(\varepsilon')$ – величины перемещений и поворотов в узле с координатой ε' локальной модели; Δz – расстояние от срединной поверхности локальной модели до рассматриваемого узла.

На основе вышеизложенного был составлен соответствующий алгоритм, который реализован в виде отдельного программного модуля (рис. 4).

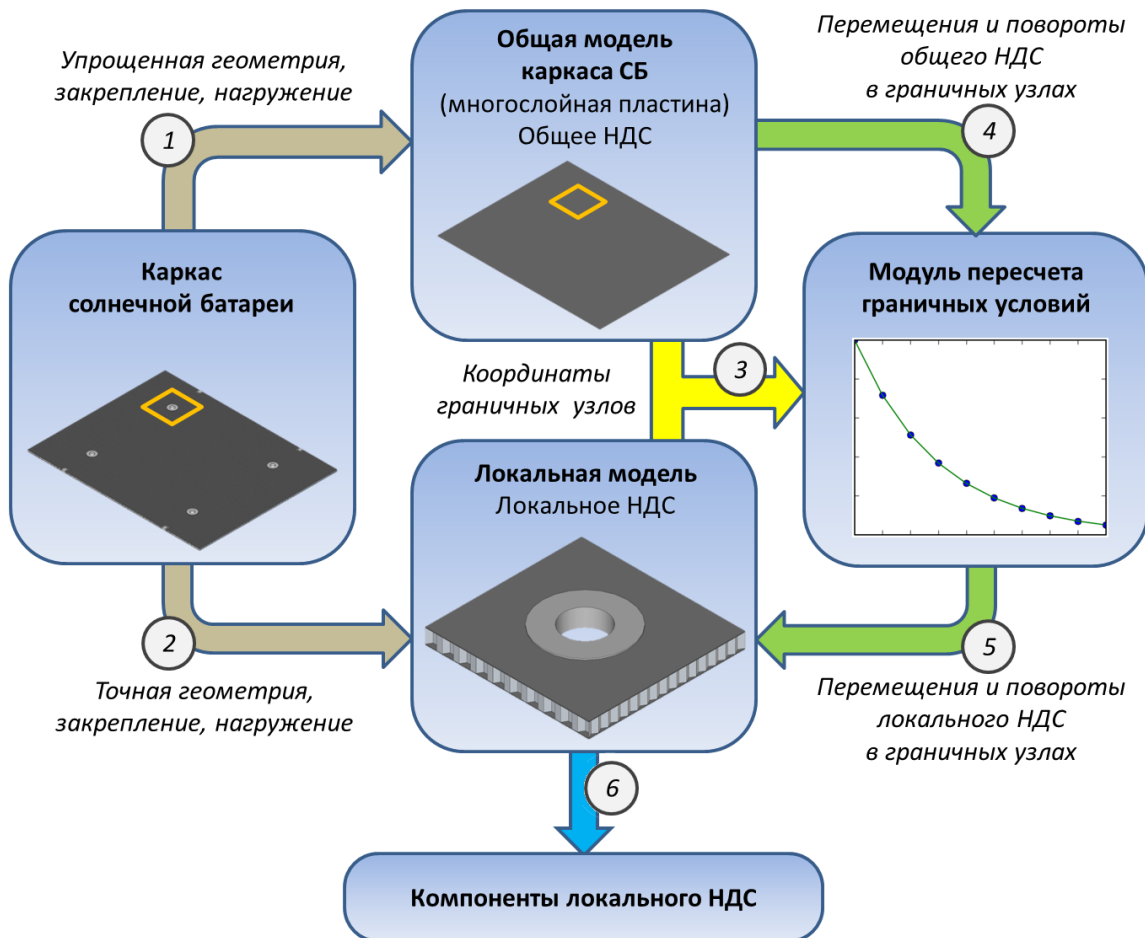


Рисунок 4 – Схема определения НДС в локальной зоне с применением программного модуля пересчета граничных условий

Определение НДС в локальной зоне происходит следующим образом:

- 1) построение упрощенной общей КЭ-модели каркаса СБ;
- 2) построение подробной локальной КЭ-модели исследуемой зоны;
- 3) передача координат граничных узлов локальной зоны моделей в разработанный программный модуль;
- 4) расчет компонент деформированного состояния общей модели и передача величин компонент, соответствующих граничным узлам локальной зоны, в программный модуль;
- 5) вычисление интерполяционных зависимостей, пересчет величин компонент деформированного состояния с учетом (1) и их приложение к узлам на границе локальной модели;
- 6) расчет и анализ НДС локальной модели.

Апробация методики моделирования локальных зон

Методика была проверена на тестовой задаче по определению НДС во фрагменте регулярной зоны сотопанели, закрепленной по контуру и нагруженной внешним давлением (рис. 5).

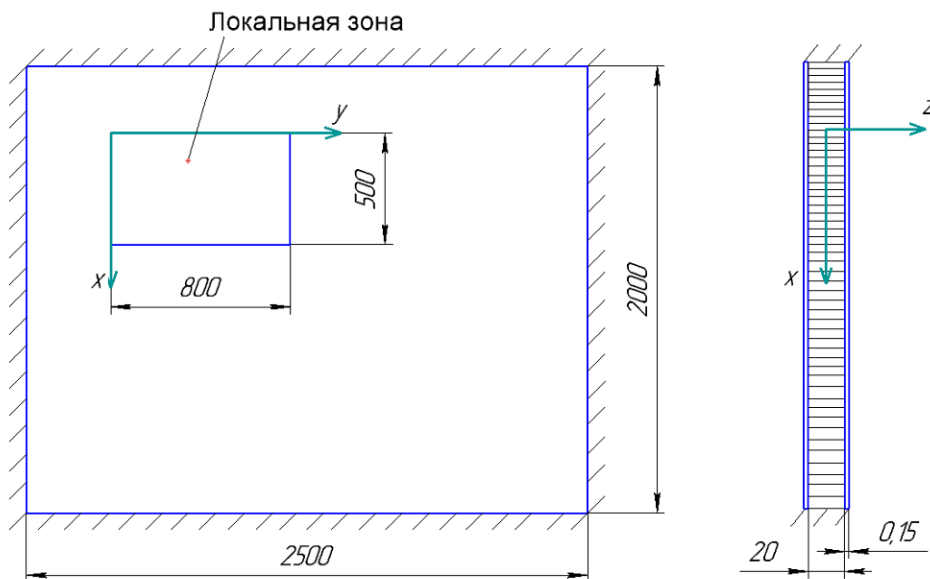


Рисунок 5 – Сотопанель, используемая в тестовой задаче

Сотопанель представляет собой сэндвичевую конструкцию длиной 2500 мм и шириной 2000 мм с углепластиковыми обшивками (три монослоя толщиной 0,05 мм каждый, схема армирования – $[0^\circ, \pm 60^\circ]$ относительно оси x панели) и алюминиевым СЗ с правильной шестигранной ячейкой (размер стороны – 5 мм, высота – 20 мм, ориентация двойных граней вдоль оси x панели).

Геометрическая и КЭ-модель целого сотопласта с контуром локальной зоны приведены на рис. 6, 7 соответственно.

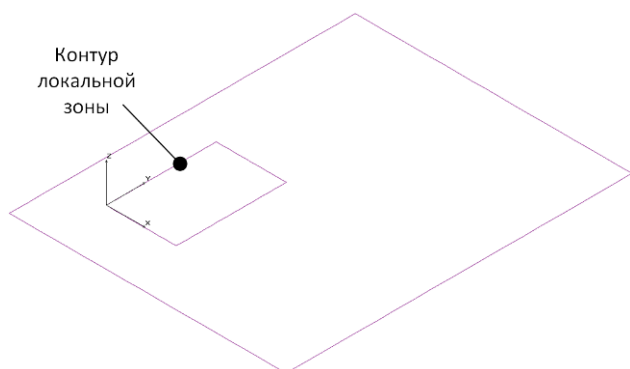


Рисунок 6 – Геометрическая модель сотопласта

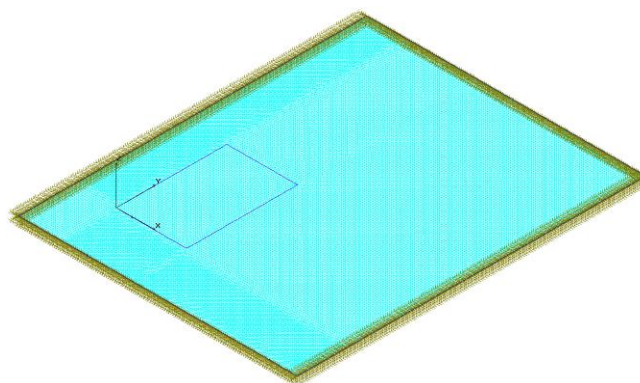


Рисунок 7 – КЭ-модель сотопласта

Локальная модель фрагмента регулярной зоны сотопанели (рис. 8, 9) состояла из 280 тыс. узлов и 430 тыс. элементов. На рис. 10–13 показаны основные результаты расчета.

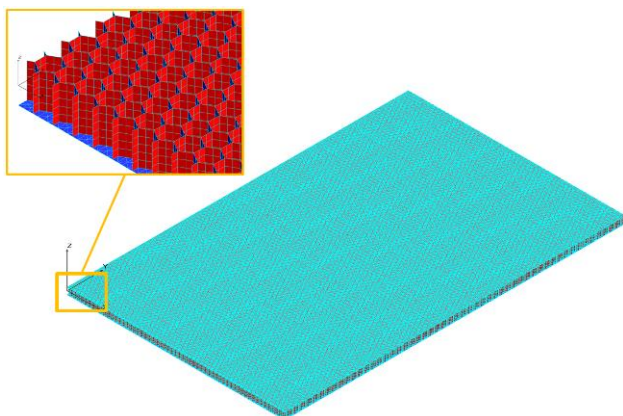


Рисунок 8 – Локальная модель фрагмента регулярной зоны сотопанели

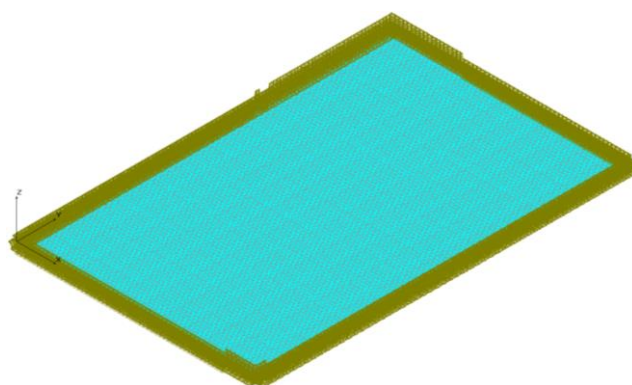
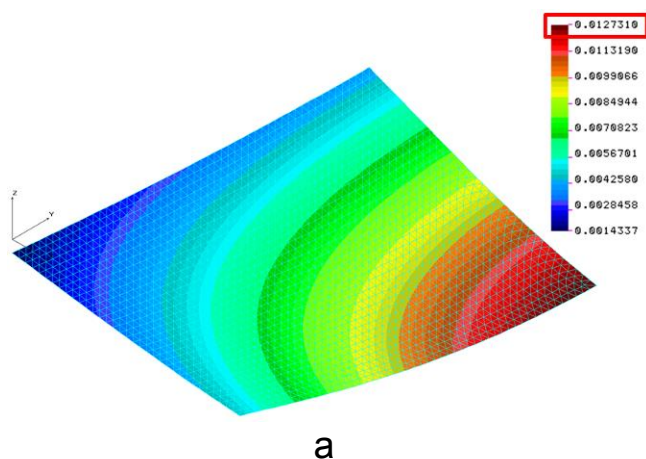
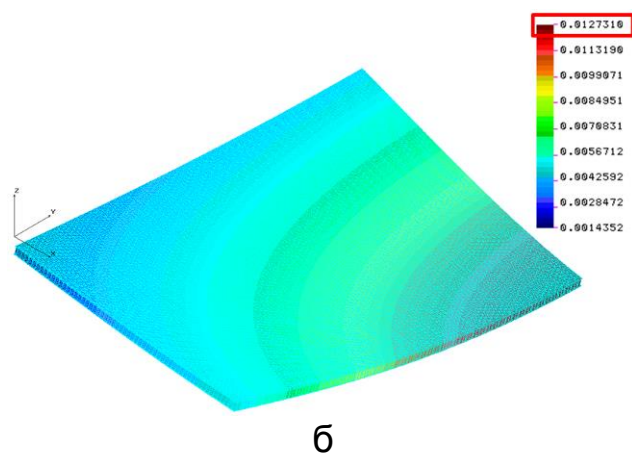


Рисунок 9 – Локальная модель регулярной зоны каркаса СБ с граничными условиями



а



б

Рисунок 10 – Результирующие перемещения во фрагменте, м:
а – общая модель; б – локальная модель

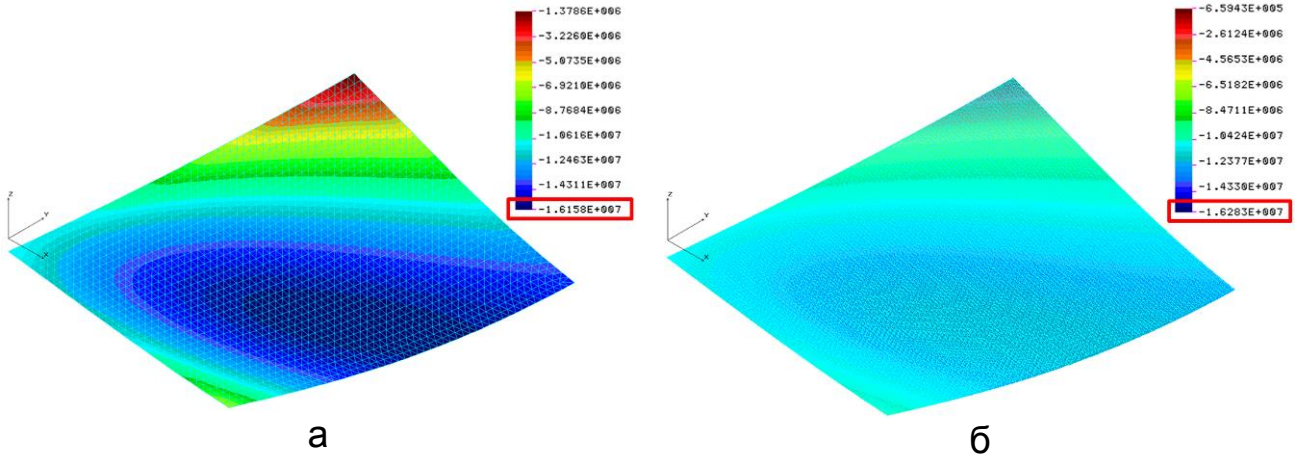


Рисунок 11 – Касательные напряжения τ_{xy} в одном из монослоев обшивки (-60°), Па:
а – общая модель; б – локальная модель

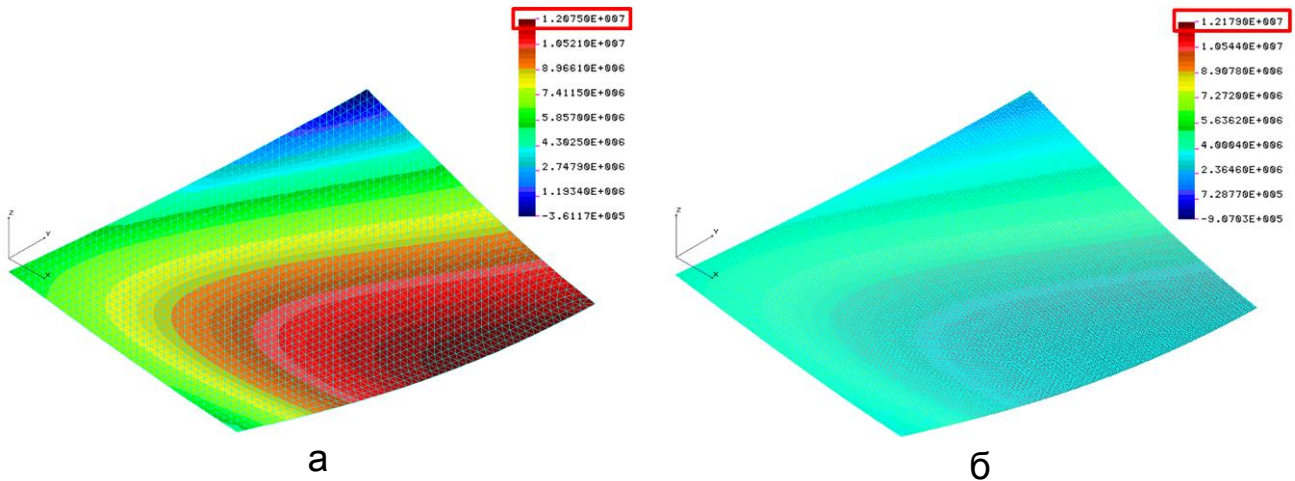


Рисунок 12 – Нормальные напряжения σ_x в одном из монослоев обшивки (-60°), Па:
а – общая модель; б – локальная модель

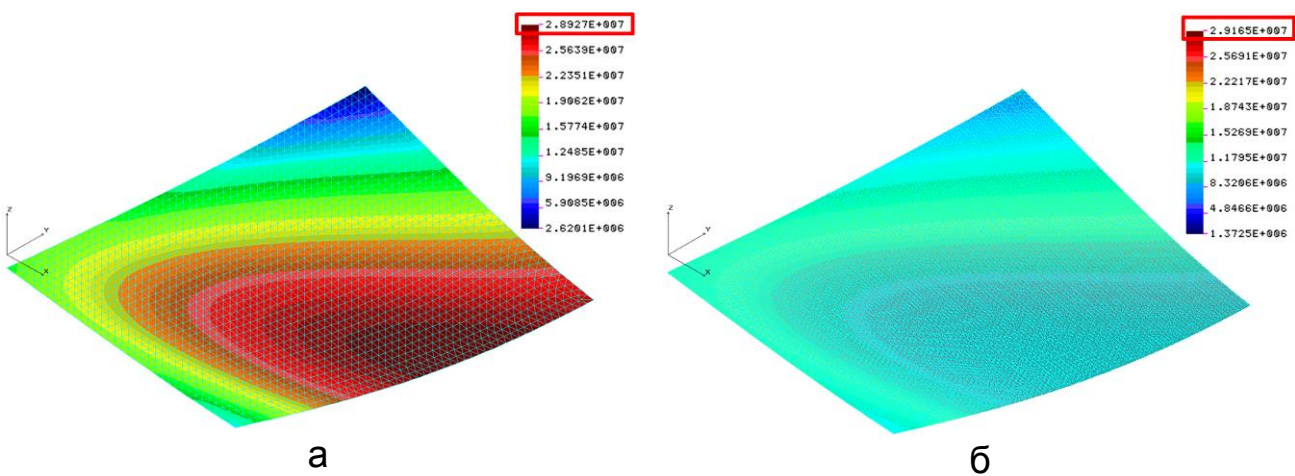


Рисунок 13 – Нормальные напряжения σ_y в одном из монослоев обшивки (-60°), Па:
а – общая модель; б – локальная модель

Анализ полученных картин распределения соответствующих компонент НДС в общей и локальной моделях показал, что они идентичны, а уровни максимальных перемещений и напряжений совпадают, что подтверждает работоспособность методики.

Анализ НДС нерегулярной зоны каркаса СБ

Исследование НДС нерегулярной зоны с использованием приведенной методики проводилось для каркаса СБ, показанного на рис. 14. Структура регулярной зоны каркаса повторяет структуру сотопанели из тестовой задачи (рис. 5). Рассмотрен расчетный случай выведения КА в космос, когда панели СБ находятся в сложном положении и испытывают значительные инерционные нагрузки.

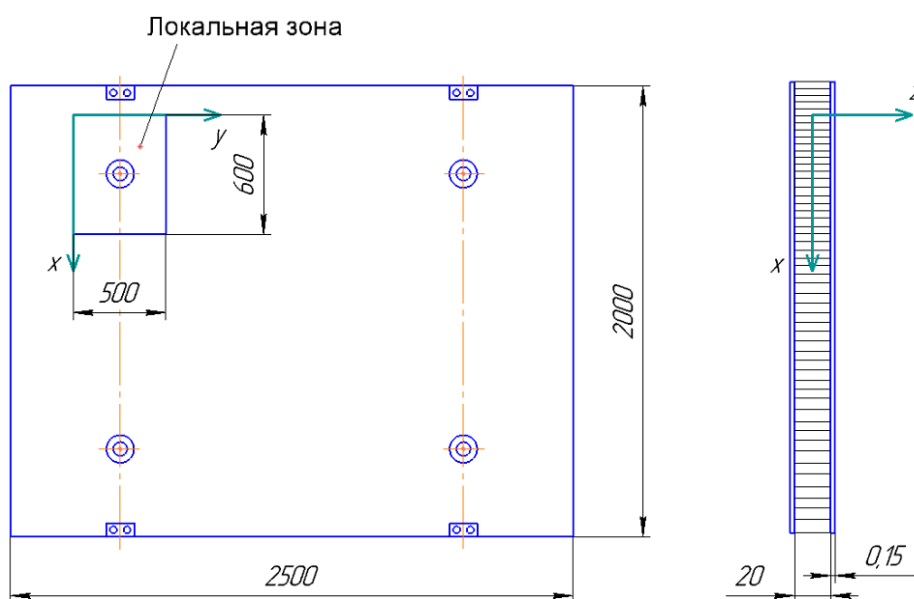


Рисунок 14 – Рассматриваемый каркас СБ

Исследуемый фрагмент каркаса СБ с закладным элементом (рис. 15) включает в себя часть регулярной зоны (сотопласта) с композитными обшивками 1 и алюминиевым СЗ 2, а также титановый закладной элемент 3 под установку замка зачековки и отвержденную заливочную композицию 4 для усиления СЗ под закладным элементом.

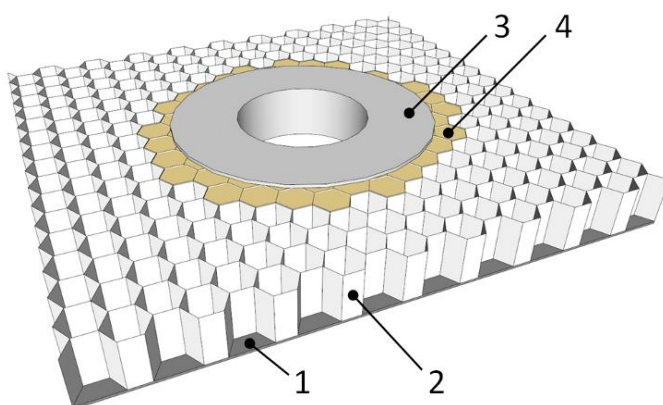


Рисунок 15 – Локальная зона каркаса СБ с закладным элементом под установку замка зачековки:
1 – нижняя обшивка; 2 – СЗ;
3 – закладной элемент; 4 – заливка

Геометрическая и КЭ-модель каркаса СБ с контуром локальной зоны показаны на рис. 16 и 17 соответственно.

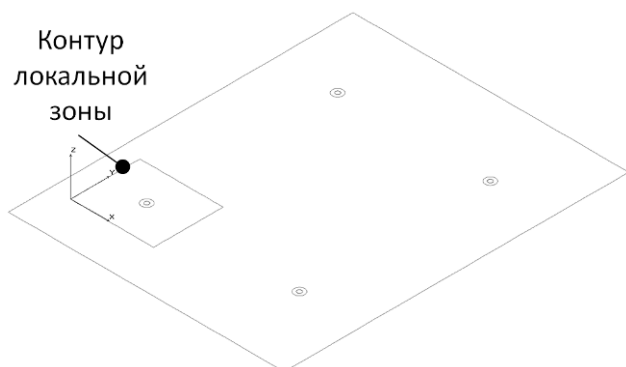


Рисунок 16 – Геометрическая модель каркаса СБ

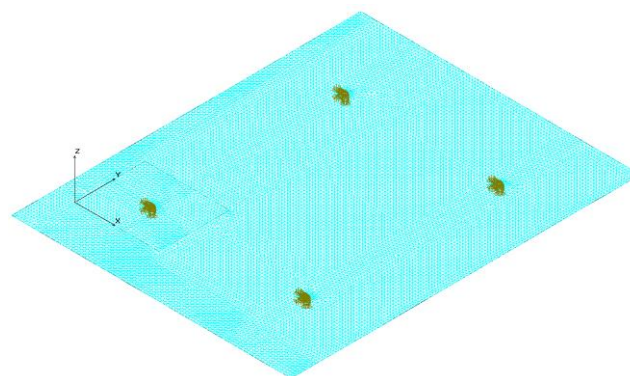


Рисунок 17 – КЭ-модель каркаса СБ

Локальная модель фрагмента каркаса СБ (рис. 18) состояла из 165 тыс. узлов и 270 тыс. элементов.

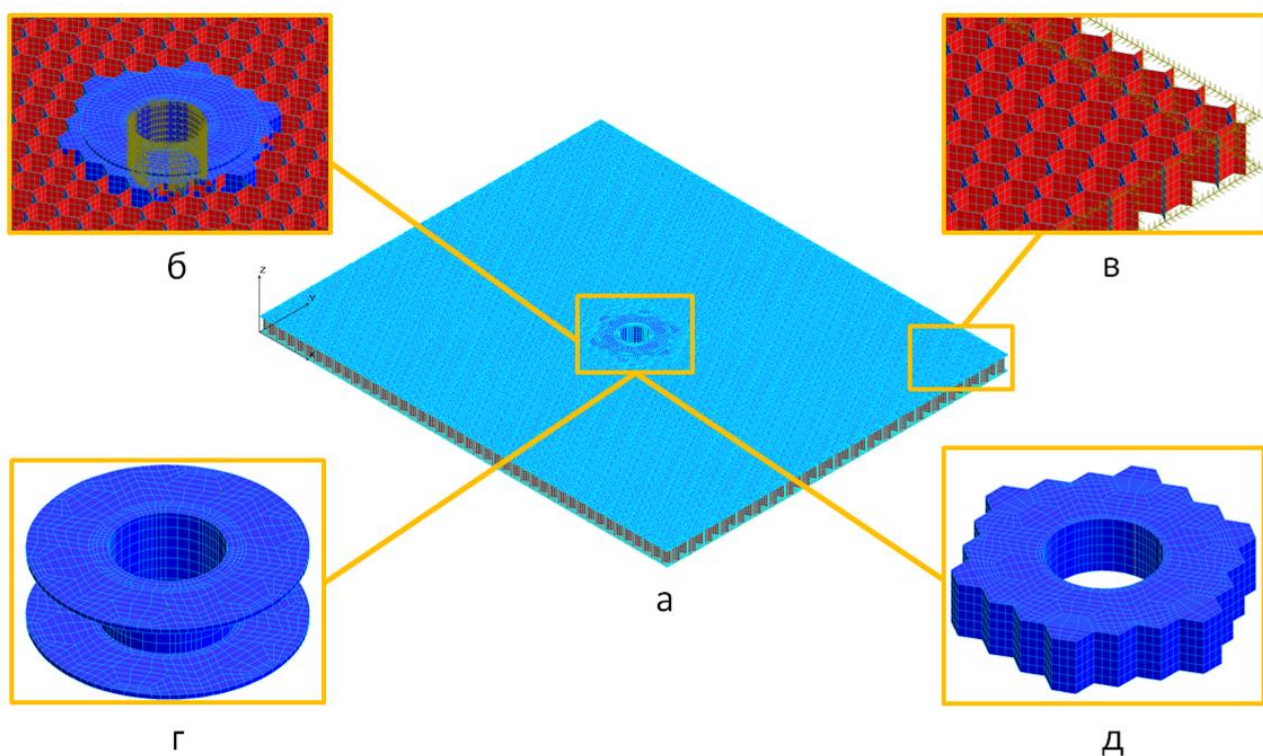


Рисунок 18 – Локальная КЭ-модель зоны каркаса СБ с закладным элементом:

- а – общий вид модели;
- б – граничные условия имитации наличия штыря, фиксирующего панели СБ (верхняя обшивка не показана);
- в – пересчитанные граничные условия (верхняя обшивка не показана);
- г – КЭ-сетка закладного элемента;
- д – КЭ-сетка заливки

Основные результаты расчета НДС фрагмента каркаса СБ показаны на рис. 19–25.

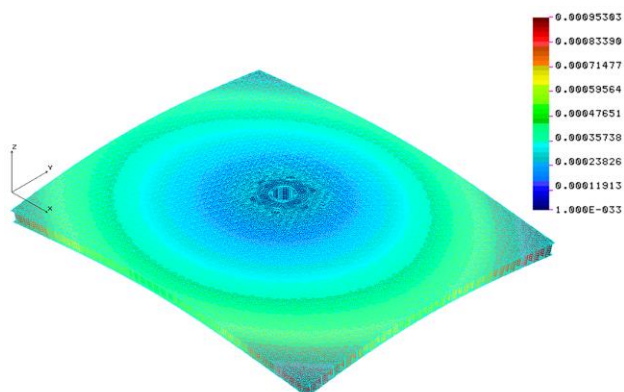


Рисунок 19 – Результирующие перемещения локальной модели, м

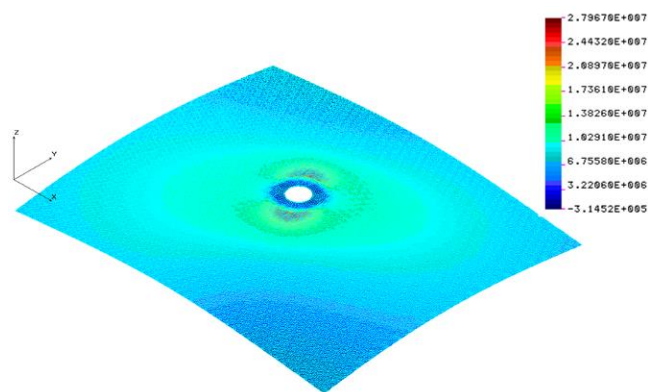


Рисунок 20 – Касательные напряжения τ_{xy} в одном из монослоев (-60°) локальной модели, Па

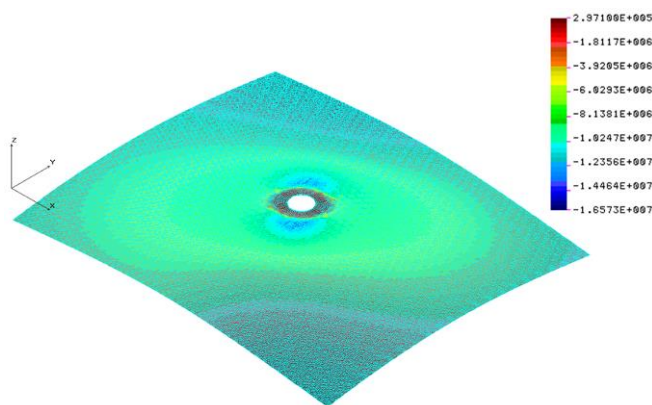


Рисунок 21 – Нормальные напряжения σ_x в одном из монослоев (-60°) локальной модели, Па

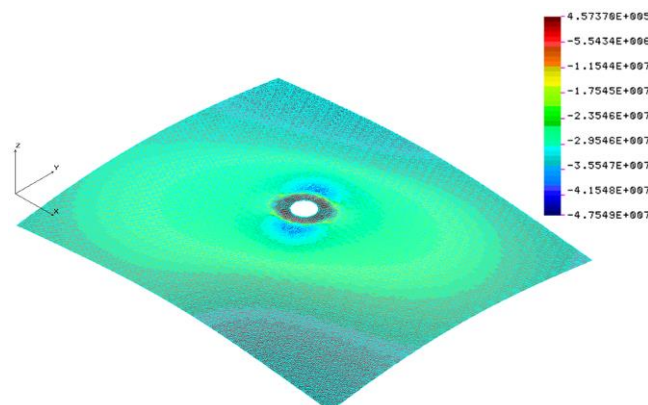


Рисунок 22 – Касательные напряжения σ_y в одном из монослоев (-60°) локальной модели, Па

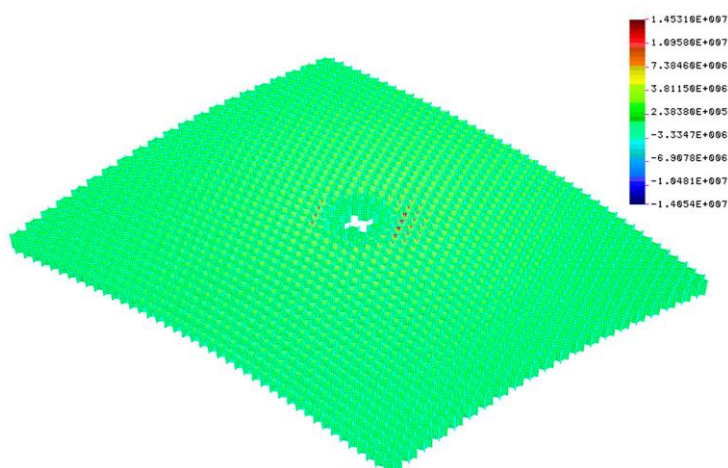


Рисунок 23 – Касательные напряжения в С3, Па

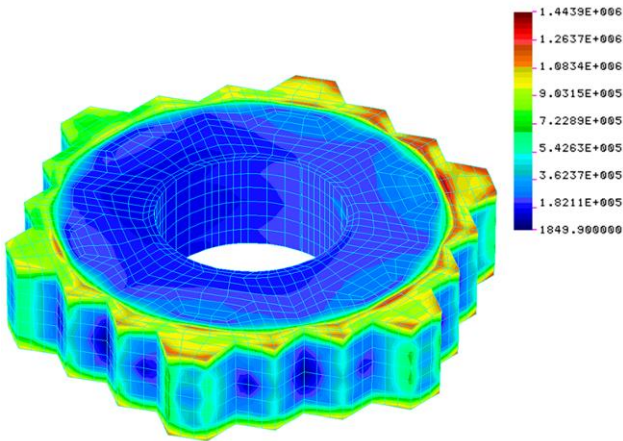


Рисунок 24 – Приведенные напряжения в заливке, Па

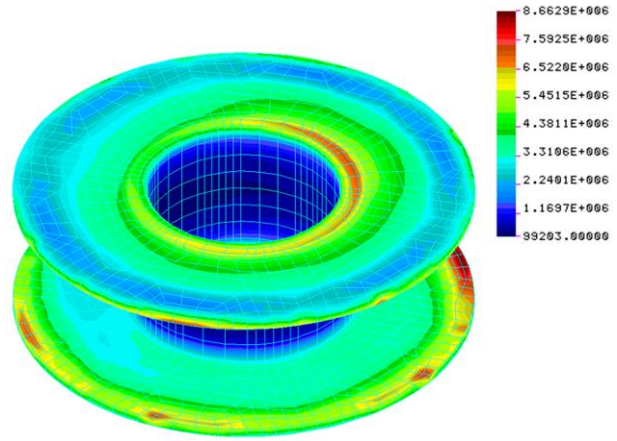


Рисунок 25 – Приведенные напряжения в закладном элементе, Па

Заключение

Приведенная в работе методика моделирования локальных зон композитных каркасов СБ позволяет сконцентрировать имеющиеся вычислительные ресурсы на интересующей части каркаса, учитывая при этом особенности работы конструкции в целом.

В дальнейшем методика будет положена в основу комплекса оптимизации композитных каркасов СБ космического назначения, что позволит определять рациональные значения параметров элементов усиления их конструкции в местах действия сосредоточенных нагрузок.

Список использованных источников

1. Ендогур, А.И. Сотовые конструкции: выбор параметров и проектирование / А.И. Ендогур. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
2. Панин, В.Ф. Конструкции с наполнителем / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
3. Сотовые наполнители и панельные конструкции космического назначения: моногр.: в 2 т. / 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.
4. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: пер. с англ. / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
5. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов / К.В. Безручко, В.Ф. Гайдуков, С.В. Губин и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2001. – 276 с.

6. Juno Spacecraft and Instruments [Электронный ресурс]: NASA. – Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/juno/spacecraft/index.html. – Назв. с экрана.

7. Ямал-300К [Электронный ресурс]: АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». – Режим доступа: <http://www.iss-reshetnev.ru/spacecraft/spacecraft-communications/yamal-300k>. – Назв. с экрана.

8. Новая концепция оптимизации по массе сотовых конструкций каркасов панелей солнечных батарей и негерметичных панелей космических аппаратов / В.И. Сливинский, Г.В. Ткаченко, М.В. Сливинский и др. // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2008. – № 1. – С. 136–141.

9. Царицынский, А.А. Оптимизация параметров композитного каркаса солнечной батареи космического аппарата при инерционном и тепловом воздействии / А. А. Царицынский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т". – Х., 2014. – Вып. 3(79). – С. 74–85.

10. Ventsel, E. Thin Plates and Shells. Theory, Analysis, and Applications / E. Ventsel, T. Krauthammer. – New York – Basel: Marcel Dekker, Inc. – 2001. – 658 p.

11. Auricchio, F. Enhanced modeling approach for multilayer anisotropic plates based on dimension reduction method and Hellinger–Reissner principle / F. Auricchio, G. Balduzzi, M. J. Khoshgoftar et al. // Composite Structures, 118. – 2014. – P. 622–633.

12. Butyrin, V.I. Strength calculations and optimal weight design of multilayer shell-shaped composite products under a set of loads / V.I. Butyrin, V.N. Maksimenko, L.V. Pavshok, B.S. Reznikov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – Vol. 55, Issue 1. – 2014, P. 44–51.

13. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

14. Бойко, Т.С. Методика перехода между моделями расчета общего и локального напряженного состояния металлической конструкции / Т.С. Бойко, А.В. Заруцкий, С.Ф. Мандзюк // Зб. тез всеукр. наук.-техн. конф. «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2015». – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авиац. ін-т», 2015. – Т. 1. – С. 5.

15. Короткая, О.В. Методика расчета и проектирования сверхсложных конструкций с помощью метода конечных элементов и метода подмоделей на примере камеры сгорания ЖРД / О.В. Короткая, С.С. Гаврюшин // Сб. мат. конф. «Проблемы прочности, пластичности и

устойчивости в механике деформируемого твердого тела». – Тверь: Твер. гос. техн. ун-т, 2015. – С. 152–155.

16. Looman, D. Submodeling in ANSYS Workbench / D. Looman // ANSYS Advantage. – Vol. 1, Issue 2. – 2007. – P. 34–36.

17. Методика поверочных расчетов прочности конструкций из композиционных материалов / В.Д. Григорьев, А.С. Дзюба, А.А. Ионов и др. // Ученые записки ЦАГИ. – Т. XXII, № 3. – 1991. – С. 81–91.

18. Курбатов, А.С. Расчетно-экспериментальный метод исследования механических свойств и напряженно-деформированного состояния несущих конструкций из углерод-углеродных композитов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.С. Курбатов; Москва; Фед. гос. бюджет. образовательное учреждение высш. образования «Моск. авиац. ин-т (Нац. исслед. ун-т)». – М., 2011. – 24 с.

19. Бахвалов, Н.С. Численные методы: учеб. пособие / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 600 с.

20. Рыжиков, Ю.И. Вычислительные методы / Ю.И. Рыжиков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 400 с.

Поступила в редакцию 04.04.2016.

*Рецензент: д-р. техн. наук., доц. А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*