

УДК 629.764: 539.3/4

Д. В. Акимов, канд. техн. наук И. Ф. Ларионов, канд. техн. наук Д. В. Клименко,
д-р техн. наук В. З. Гришак, д-р техн. наук С. И. Гоменюк

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТСЕКОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Представлен обзор особенностей исследования напряженно-деформированного состояния многослойных оболочечных конструкций, широко применяемых при проектировании отсеков ракет космического назначения. В результате анализа современного состояния проблемы исследования напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций сложной конфигурации и математического обеспечения расчета несущей способности конструкций ракетно-космической техники можно выделить следующие актуальные направления исследования: 1) совершенствование методов аналитической оценки прочности и устойчивости тонкостенных конструкций; 2) совершенствование численных методов анализа механических характеристик композиционных материалов; 3) разработка либо использование существующих инженерных программных комплексов, автоматизирующих анализ напряженно-деформированного состояния с визуализацией исследуемых процессов. Одним из наиболее важных этапов в третьем направлении исследования является разработка способов ввода исходной информации (задания параметров модели) и представления результатов расчетов с учетом наглядности интерфейса пользователя. Приведено описание математического моделирования и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния межступенного отсека трехслойной конструкции из углепластика и краткое описание состояния конструкции после испытаний. На основании анализа можно сделать вывод о том, что разработка методов геометрического моделирования конструкций с учетом отклонений, допущенных при изготовлении, является самостоятельной проблемой с точки зрения практических приложений в ракетно-космической технике.

Ключевые слова: трехслойная конструкция, межступенной отсек, конечно-элементная модель, отклонения при изготовлении, испытательные нагрузки.

Наведено огляд особливостей дослідження напружено-деформованого стану багат шарових оболочкових конструкцій, які широко застосовують під час проектування відсіків ракет космічного призначення. У результаті аналізу сучасного стану проблеми дослідження напружено-деформованого стану оболочкових конструкцій складної конфігурації та математичного забезпечення розрахунку несучої здатності конструкцій ракетно-космічної техніки можна виділити такі актуальні напрями дослідження: 1) удосконалення методів аналітичної оцінки міцності і стійкості тонкостінних конструкцій; 2) удосконалення числових методів аналізу механічних характеристик композиційних матеріалів; 3) розроблення або використання існуючих інженерних програмних комплексів, що автоматизують аналіз напружено-деформованого стану з візуалізацією досліджуваних процесів. Одним з найважливіших етапів третього напряму досліджень є розроблення способів введення вихідної інформації (задання параметрів моделі) і подання результатів розрахунків з урахуванням наочності інтерфейсу користувача. Наведено опис математичного моделювання й експериментального дослідження напружено-деформованого стану міжступеневого відсіку тришарової конструкції з углепластику та короткий опис стану конструкції після випробувань. На підставі аналізу можна зробити висновок про те, що розроблення методів геометричного моделювання конструкцій з урахуванням відхилень, допущених під час виготовлення, є самостійною проблемою з точки зору практичних застосувань у галузі ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: тришарова конструкція, міжступеневий відсік, скінченно-елементна модель, відхилення під час виготовлення, випробувальні навантаження.

This paper presents the overview and features of the stress-strain state analysis of the multilayer shell structures widely used in the design of the missile compartments. As a result of analysis of the current situation with the stress-strain state studies of the complex configuration shell structures and mathematical support of the load-bearing capacity calculation of the aerospace structures, the following actual research trends can be singled out: 1) improvement of the methods of analytical estimation of the thin-walled structures' strength and resistance; 2) improvement of the numerical methods of composite materials mechanical properties analysis; 3) development or application of the existing software packages and ADE-systems, automating stress-strain state analysis with visualization of the processes under study. One of the most important steps of the third research trend is development of the initial data input media (setting the model parameters) and presentation of analysis results with account of the user interface visualization. The description of the

mathematical simulation and experimental studies of the stress-strain state of the interstage bay made of carbon fiber sandwich structure is presented and short description of the structure condition after the tests is provided. Based on the analysis it can be concluded that development of the geometric simulation methods, taking into account the manufacturing deviations, is an independent problem from the point of view of practical applications in the aerospace technology.

Keywords: sandwich structure, interstage bay, finite-element model, manufacturing deviations, test loads.

Введение

Одним из основополагающих звеньев в проектировании конкретного вида ракетно-космической техники является расчет на прочность с выбором конструкционных материалов и определением основных расчетных случаев. Необходимость специализированного математического обеспечения возникает при использовании композиционных материалов, в частности углепластиков, которые создаются в процессе изготовления конструкции. Так, проектирование опытного межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из полимерных композиционных материалов сопровождалось исследованием напряженно-деформированного состояния (НДС) его конструктивных элементов и осуществлялось с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа MSC Nastran.

Анализ современного состояния проблемы исследования напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций

Одной из основных проблем теории трехслойных пластин и оболочек, как и однослойных, является переход от трехмерных соотношений теории упругости к двумерным разрешающим уравнениям [1]. Вопросам разработки классических и уточняющих математических моделей слоистых элементов конструкций и методов их решения посвящено большое количество монографий и обзорных работ, например [2-5].

Особенность расчета трехслойных пластин и оболочек заключается в необходимости учета влияния деформации сдвига заполнителя на работу несущих слоев. Кроме того, в трехслойной конструкции имеют место поперечные деформации заполнителя, которыми не всегда можно пренебречь.

Приведем некоторые основные подходы к построению математических моделей трехслойных конструкций.

Одним из методов моделирования таких конструкций являются исследования, выполненные в трехмерной постановке. В таких моделях заполнитель и (или) внешние слои могут быть представлены как трехмерные тела [6, 7].

Обзор исследований трехмерных конечно-элементных и аналитических моделей с учетом клеевого слоя приведен в [7].

Один из часто применяемых подходов к трехмерной задаче заключается в том, что перемещения в слоях пластины представляются в виде произведения трех функций относительно координат трехслойной оболочки. При этом одна из функций является неизвестной, а остальные задаются, например, тригонометрическими функциями. Далее проводится интегрирование уравнений равновесия с учетом граничных условий.

Описанный подход использовался для решения как задач определения НДС трехслойных конструкций, так и задач устойчивости.

Исследования, выполненные в трехмерной постановке, сыграли роль в обосновании приближенных методов расчета трехслойных пластин и оболочек.

Для снижения вычислительной сложности задачи используют различные упрощающие методы. Одним из них является метод гипотез [8]. Можно выделить два направления в применении данного метода. В первом для вывода уравнений слоистых систем применяются кинематические гипотезы для каждого слоя. В этом случае порядок системы уравнений зависит от числа слоев. Согласно [9] такие модели называют дискретно-континуальными. Второе направление в применении метода гипотез связано с привлечением гипотез для всего пакета слоев в целом (непрерывно-континуальные модели). Порядок уравнений, получающихся при этом, не зависит от числа слоев.

Если конструкция такова, что для пакета в целом обеспечивается гипотеза Кирхгофа-Лява, то расчет принципиально не отличается от расчета соответствующей однослойной конструкции [6, 7, 10].

Широкое применение получили технические теории, в рамках которых для внешних слоев принимается гипотеза Кирхгофа-Лява, а для заполнителя – линейный [11] или нелинейный [12] закон распределения тангенциальных напряжений по толщине заполнителя (или всего пакета в случае использования непрерывно-континуальной модели). Большое количество работ по анализу НДС трехслойных пластин и оболочек выполнено в соответствии с подходом Э. И. Григолюка, при котором внешние слои считаются изотропными, а для заполнителя предполагается линейное или константное распределение сдвиговых деформаций ε_{zx} , ε_{zy} по толщине.

В [13] приведены исторический обзор и анализ теорий многослойных конструкций, основанных на применении метода гипотез к каждому слою отдельно.

Детальный анализ существующих моделей расчета трехслойных и многослойных конструкций проводится в обзорных статьях [3-8, 10].

В работах [7, 10, 14-16] описаны уточненные теории однослойных и многослойных пластин и оболочек, приведен обзор соответствующих публикаций. В частности, уточненные теории трехслойных пластин и цилиндрических оболочек приводятся в работах [17-19].

В статье [20] исследуется вопрос о точности и пределах применимости гипотезы прямой нормали для всего пакета и гипотезы ломаной линии. Также пределам применимости различных гипотез в теории трехслойных конструкций посвящены работы [4, 21, 22]. Рассматривается этот вопрос и в обзорах [7, 10, 13].

Обзор современных достижений в области постановки и методов решения задач статики и динамики слоистых элементов конструкций при комплексных силовых, тепловых и радиационных воздействиях на примере трехслойных конструкций приведен в монографии [23].

Описывая современное состояние математического обеспечения расчетов прочности, следует отметить, что наряду с вышеизложенными положениями наиболее успешно идет внедрение расчетных решений Siemens PLM Software. К продуктам глобального масштаба следует отнести NX Advanced Simulation [24]. Что касается возможностей систем CAD/CAE, в ряде случаев рекомендуется [25] конфигурация MSC Nastran + FEMAP.

Методика математического моделирования и описание экспериментального исследования конструкции

Для определения НДС межступенного отсека трехслойной конструкции из углепластика были построены следующие конечно-элементные модели:

1. Корпус межступенного отсека изготовлен без отклонений от требований КД, модель имитирует нагружение при испытаниях.

2. Корпус межступенного отсека изготовлен без отклонений от требований КД, модель имитирует нагружение при штатной эксплуатации ракеты космического назначения (РКН).

3. Корпус межступенного отсека изготовлен с отклонениями от требований КД, модель имитирует нагружение при испытаниях.

В модели корпуса межступенного отсека были учтены следующие отклонения от КД:

- несимметричность трехслойного пакета корпуса;
- смещение отверстий по нижнему торцу корпуса;
- смещение усиления наружной обшивки корпуса.

В качестве граничных условий принята система осевых и тангенциальных связей на нижнем шпангоуте межступенного отсека, соответствующая схеме расположения крепежа. Расчет НДС выполнен с помощью программного комплекса MSC Nastran. Растягивающие усилия (от момента затяжки) в болтах стыков с технологической оснасткой не учитывались.

При построении конечно-элементной модели межступенного отсека были использованы следующие типы конечных элементов:

– для моделирования технологических обечаек – оболочечный конечный элемент с упругими свойствами, соответствующими материалу обечаек;

– для моделирования оболочки межступенного отсека – слоистый конечный элемент с соответствующими упругими свойствами каждого слоя;

– для моделирования нижнего и верхнего шпангоутов межступенного отсека – балочный конечный элемент с упругими свойствами.

Конечно-элементная модель межступенного отсека, имитирующая нагружение при эксплуатации РКН, представлена на рис. 1. Конечно-элементная модель межступенного отсека, имитирующая нагружение при испытаниях, представлена на рис. 2.

По верхнему сечению модель нагружали соответствующими силовыми факторами. В качестве граничных условий принята система осевых и тангенциальных связей на нижней технологической обечайке.

Характер распределения касательных напряжений в обшивках приведен:

– для модели, учитывающей отклонения от требований КД при нагружении испытательными нагрузками (рис. 3);

– для модели без учета отклонений от требований КД при нагружении испытательными нагрузками (рис. 4);

– для модели без учета отклонений от требований КД при нагружении расчетными нагрузками (рис. 5).

Сравнение максимальных расчетных сдвиговых напряжений в углепластиковых обшивках межступенного отсека для приведенных выше вариантов нагружения, расчетных случаев и вида конечно-элементной модели представлено в таблице.

Сравнение максимальных расчетных сдвиговых напряжений для модели (с учетом отклонений от требований КД) с оценочными предельными значениями напряжений при сдвиге в полете РКН показало, что при максимальном испытательном нагружении возможно разрушение обшивки (таблица). Поэтому с учетом отклонений от КД дополнительно для межступенного отсека был проведен расчет нагрузок предшествующего максимальным испыта-

тельным нагрузкам этапа на случай полета РКН. После этого расчета при проведении испытаний на случай полета РКН конструкцию нагружали до предшествующего максимальным испытательным нагрузкам этапа, а потом на основании показаний тензодатчиков было принято решение нагружать сборку до максимальных значений.

Значения нагрузок и результаты расчета приведены в таблице и на рис. 6.

Состояние конструкции корпуса межступенного отсека после испытания

Корпус межступенного отсека выдержал максимальные испытательные нагрузки на случай полета РКН. После внешнего осмотра было установлено, что на внутренней поверхности корпуса в районе верхнего шпангоута по плоскости на окантовке есть трещины и выкрошивание гелькоута треугольной формы размерами $\sim 35 \times 25$ мм (рис. 7). Обнаружены отдельные раковины в связующем с оголением углепластика на радиусе перехода законцовки верхнего шпангоута на внутреннюю поверхность оболочки (рис. 8). Остальные элементы конструкции корпуса видимых изменений не имели.

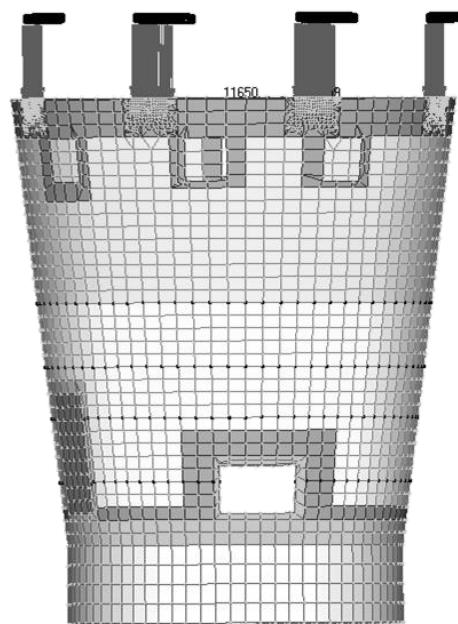


Рис. 1. Конечно-элементная модель межступенного отсека, имитирующая нагружение при эксплуатации РКН

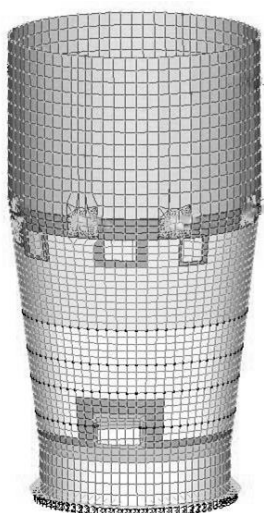
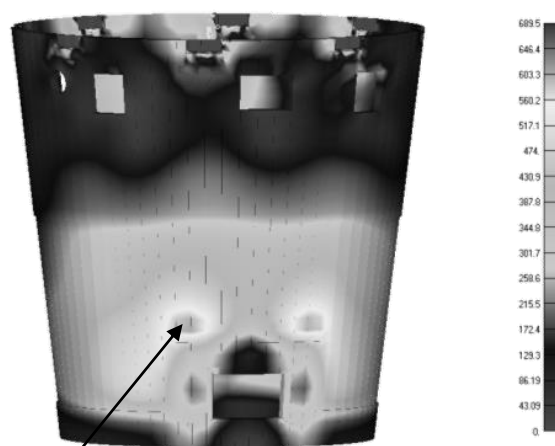
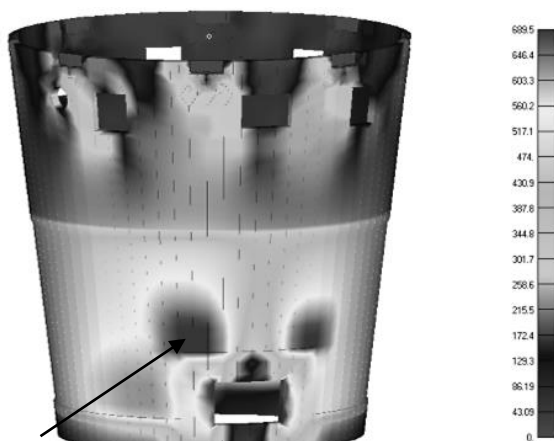


Рис. 2. Конечно-элементная модель межступенного отсека, имитирующая нагружение при испытаниях



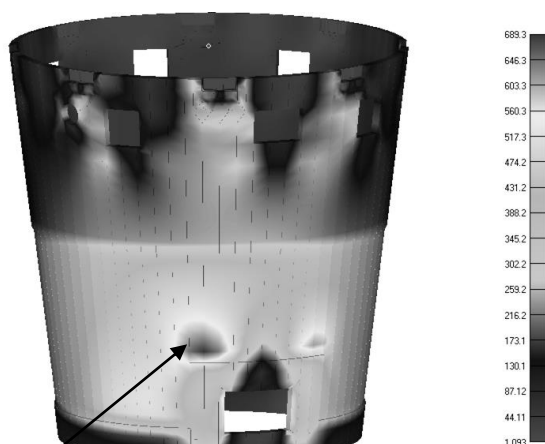
$\tau^p_{\max}=624\dots633 \text{ кг/см}^2$

Рис. 5. Распределение максимальных расчетных сдвиговых напряжений в обшивках межступенного отсека (модель без учета отклонений от КД, нагружение расчетными нагрузками)



$\tau^p_{\max}=806\dots837 \text{ кг/см}^2$

Рис. 3. Распределение максимальных расчетных сдвиговых напряжений в обшивках межступенного отсека (модель учитывает отклонения от КД, нагружение испытательными нагрузками)



$\tau^p_{\max}=687\dots700 \text{ кг/см}^2$

Рис. 4. Распределение максимальных расчетных сдвиговых напряжений в обшивках межступенного отсека (модель без учета отклонений от КД, нагружение испытательными нагрузками)

Результаты расчетной оценки прочности обшивок межступенного отсека при действии максимальных расчетных и испытательных полетных нагрузок

Вид модели	Вариант расчета	M , тс·м	T , тс	Q , тс	τ^p_{\max} , кг/см ²	$\tau_{\text{пред}}$	η
Модель учитывает отклонения от КД	Испытательные значения нагрузок	92,6	80,0	11,7	837	700	0,83
	Нагрузки, предшествующие максимальным	82,9	70,7	10,3	651		1,07
Модель без учета отклонений от КД	Испытательные значения нагрузок	92,6	80,0	11,7	700		1,0
	Расчетные значения нагрузок	92,5	77,1	11,6	633		1,10

В таблице использованы следующие условные обозначения:

M , T , Q – расчетные и испытательные значения изгибающего момента, осевой и перерезывающей сил в верхнем сечении межступенного отсека;

τ^p_{\max} – максимальные расчетные сдвиговые напряжения в элементе;

$\tau_{\text{пред}}$ – оценочные предельные значения напряжений при сдвиге (точные значения $\tau_{\text{пред}}$ ($\tau_{\text{кр}}$) будут определены исходя из механических свойств образцов (конструктивных элементов);

η – коэффициент запаса прочности.

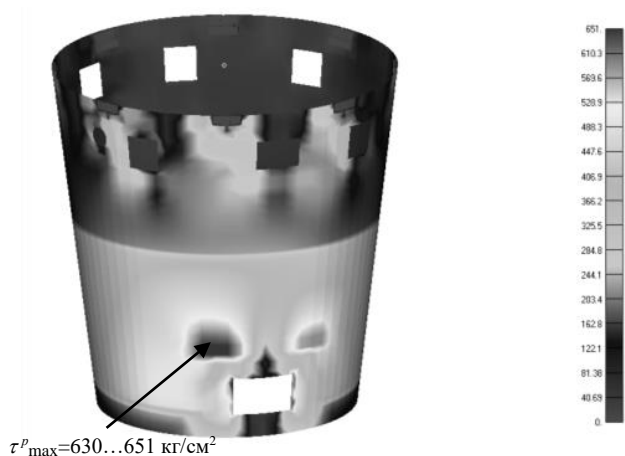


Рис. 6. Распределение максимальных расчетных сдвиговых напряжений в обшивках межступенного отсека (модель учитывает отклонения от КД, нагружение испытательными нагрузками, предшествующими максимальным)

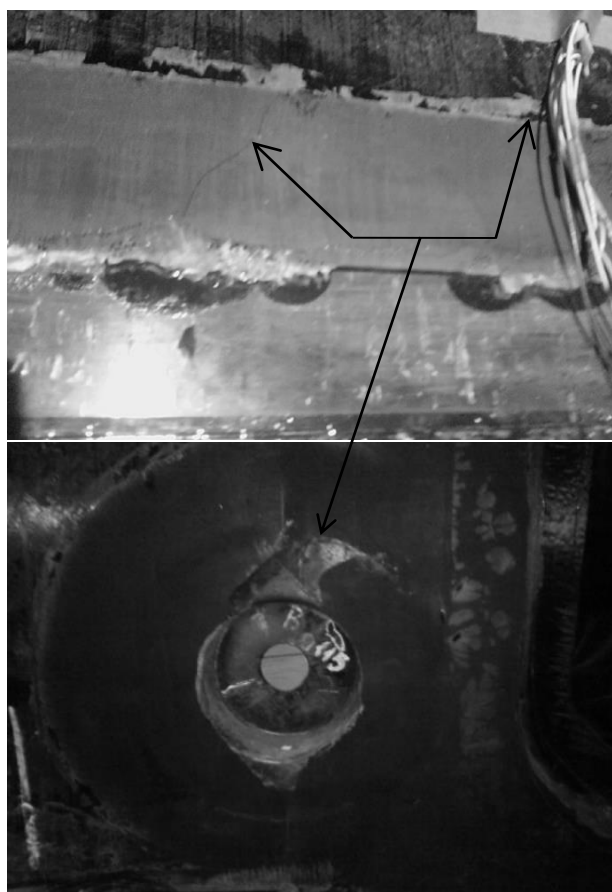


Рис. 7. Трещины и выкрошивание гелькоута (показано стрелками)



Рис. 8. Раковины в связующем с оголением углепластика (показано стрелкой)

Выводы

Приведено описание математического моделирования напряженно-деформированного состояния межступенного отсека трехслойной конструкции из углепластика. При проведении математического моделирования в модели были учтены отклонения от КД. Сравнение максимальных расчетных сдвиговых напряжений с их оценочными предельными значениями показало, что при максимальном испытательном нагружении возможно разрушение обшивки межступенного отсека. Поэтому в ходе испытаний проводили нагружение конструкции до предшествующего максимальным нагрузкам этапу, а после этого, основываясь на показаниях тензодатчиков, увеличивали его до максимального значения, так как данные по деформациям на предшествующем этапе нагружения не превышали оценочных предельных. Корпус межступенного отсека выдержал максимальные испытательные нагрузки. На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что разработка методов геометрического моделирования конструкций с учетом отклонений, допущенных при изготовлении, является самостоятельной проблемой с точки зрения практических приложений в ракетно-космической технике.

Список использованной литературы

4. Ворович И. И., Шленев М. А. Пластины и оболочки // Итоги науки. Механика: Сб. обзоров. – М.: Наука, 1963. – С. 91–176.
5. Григолюк Э. И., Коган Ф. А. Современное состояние теории многослойных оболочек // Прикладная механика. – 1972. – Т. 8, № 6. – С. 3–17.
6. Григолюк Э. И., Куликов Г. М. Развитие общего направления в теории много-

слоистых оболочек // *Механика композитных материалов*. – 1972. – Т. 8, № 6. – С. 3–17.

7. Григоренко Я. М., Василенко А. Т., Панкратова Н. Д. К оценке допущений теории трехслойных оболочек с заполнителем // *Прикладная механика*. – 1984. – Т. 20, № 5. – С. 19–25.

8. Дудченко А. А., Лурье С. А., Образцов И. Ф. Анизотропные многослойные пластины и оболочки // *Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела*. – Т. 15. – М.: ВИНТИ, 1983. – С. 3–68.

9. Куршин Л. М. Обзор работ по расчету трехслойных пластин и оболочек / Расчет пространственных конструкций. – Вып. 1. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 163–192.

10. Noor A. K., Burton W. S., Bert C. W. Computational Models for Sandwich Panels and Shells // *Applied Mechanics Reviews*. – 1996. – Vol. 49, No 3. – P. 155–199.

11. Пискунов В. Г., Рассказов А. О. Развитие теории слоистых пластин и оболочек // *Прикладная механика*. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 22–56.

12. Григоренко Я. М., Будак В. Д., Григоренко О. Я. Розв'язання задач теорії оболонок на основі дискретно-континуальних методів: Навч. посіб. – Миколаїв: Іліон, 2010. – 294 с.

13. Carrera E., Brischetto S. A Survey With Numerical Assessment of Classical and Refined Theories for the Analysis of Sandwich Plates // *Applied Mechanics Reviews*. – 2009. – Vol. 62, No 1. – P. 1–17.

14. Григолюк Э. И. Уравнения трехслойных оболочек с легким заполнителем // *Изв. АН СССР. Отделение техн. наук*. – 1957. – № 1. – С. 77–84.

15. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин: Прочность, устойчивость и колебания. – М.: Наука, 1987. – 360 с.

16. Carrera E. Historical review of Zig-Zag theories for multilayered plates and shells // *Applied Mechanics Reviews*. – 2003. – Vol. 56, No 3. – P. 287–308.

17. Teichman F. K., Wang C.-T. Finite deflections of Curved Sandwich Cylinders. Sherman M. Fairchild Publ. Fund. Inst. Aero. Sci. Paper FF-4. – Institute of the Astronautical Sciences, 1951. – P. 14.

18. Teichman F. K., Wang C.-T., Gerard G. Buckling of Sandwich Cylinders under Axial Compression // *Journal of the Aeronautical Sciences*. – 1951. – Vol. 18, No 6. – P. 398–406.

19. Vinson J. R. Sandwich Structures // *Applied Mechanics Reviews*. – 2001. – Vol. 54, No 4. – P. 201–214.

20. Lin J., Fei Y., Zhihua W., Longmao Z. A numerical simulation of metallic cylindrical sandwich shells subjected to air blast loading // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2013. – Vol. 10. – P. 631–645.

21. Wu J., Pan L. Nonlinear theory of multilayer sandwich shells and its application (I) – general theory // *Applied Mathematics and Mechanics*. – 1997. – Vol. 18, No 1. – P. 19–27.

22. Xu J., Wang C., Liu R. Nonlinear stability of truncated shallow conical sandwich shell with variable thickness // *Applied Mathematics and Mechanics*. – 2000. – Vol. 21, No 9. – P. 977–986.

23. Комиссарова Г. Л., Ключникова В. Г., Никитенко В. Н. К оценке пределов применимости приближенных теорий слоистых пластин // *Прикладная механика*. – 1979. – Т. 15, № 6. – С. 131–134.

24. Khalili S. M. R., Kheirikhah M. M., Malekzadeh Fard K. Buckling analysis of composite sandwich plates with flexible core using improved high-order theory // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 22, No 4. – P. 233–247.

25. Kien T. N., Tai H. T., Thuc P. V. A refined higher-order shear deformation theory for bending, vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich plates // *Steel and Composite Structures*. – 2015. – Vol. 18, No 1. – P. 91–120.

26. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. – М.: Физматлит, 2005. – 576 с.

27. Чумаченко Е. Н., Полякова Т. В., Аксенов А. С. и др. Математическое моделирование в нелинейной механике: Обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем, Пр-2155. – М.: Институт космических исследований РАН, 2009. – 44 с.

28. Опыт и новые технологии инженерного анализа в интересах космоса: пресс-релиз / И. Новиков // ГНКЦ им. М. В. Хруничева. – Режим доступа: www.khrunichev.ru/main.php?id=18mid=2132.

Статья поступила 23.01.2019