УДК 519.85

ПОДХОД К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ БЕЗ ОБШИВКИ С УЧЕТОМ ЕЕ МАССЫ И ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКИ

Ковальчук Л.М., студент гр.ПС-71, 4 курс
Научный руководитель: Бурнышева Т.В., д.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск

Объектом исследования является цилиндрическая сетчатая оболочка без обшивки регулярной структуры, состоящая из композиционного материала углепластик. Под сетчатыми оболочками понимают оболочку, образованную пересечением кольцевых и спиральных ребер.

Большое применение сетчатые оболочки получили в космической отрасли и авиастроении (рис.1) [1]. Например, данные конструкции выступают в качестве силового каркаса спутников (рис.2) [2].

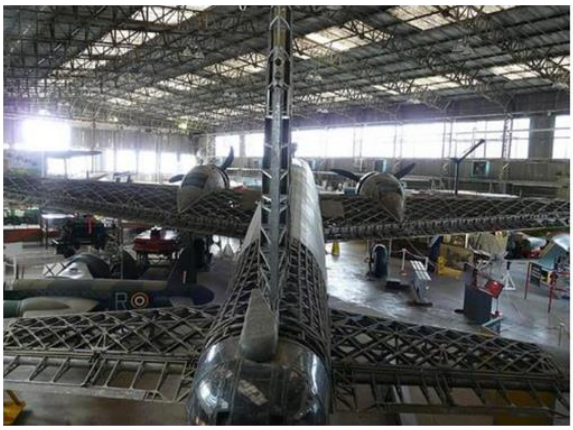


Рисунок 1. Конструкция фюзеляжа и крыльев бомбардировщика Виккерс

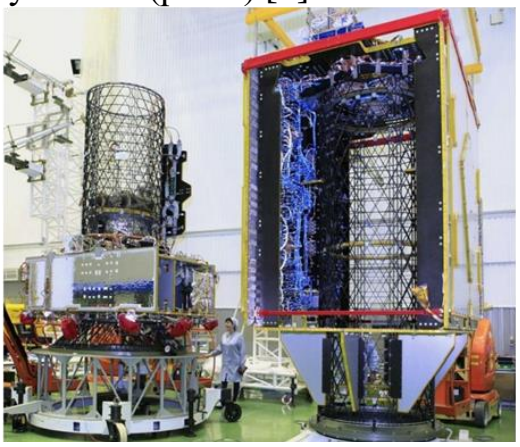


Рисунок 2. Силовые корпуса космических аппаратов

На начальном этапе разработки оболочки часто возникает задача о рациональном проектировании ее структуры, обусловленная ограничениями производственного процесса и возможностями оборудования. В целом постановка задачи заключается в том, что требуется подобрать более частую или редкую реберную структуру оболочки за счет изменения толщины ребер, при этом сохраняя массу конструкции.

Для каждого случая необходимо рассчитать напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочки, так как конструкция должна при заданных нагрузках выполнять роль силового элемента не теряя свои прочностные свойства. Решение поставленной задачи можно получить путем варьирования параметров сетчатой структуры с расчетом для каждого варианта НДС оболочки [3].

Будем проводить вычислительный эксперимент по изменению структуры сетчатой оболочки на ее дискретной модели, реализованной в программном комплексе Ansys Mechanical APDL [4].

Начинаем моделирование с построения конструкции, вес которой будем считать эталонным. Для этого выведем зависимость количества спиральных парных ребер от числа кольцевых (рис.3). Так как константами являются высота H и радиус конструкции R, а длина, ширина и высота ребер изменяются, то факторами варьирования выбираем изменение числа парных спиральных и кольцевых ребер (табл.1.)

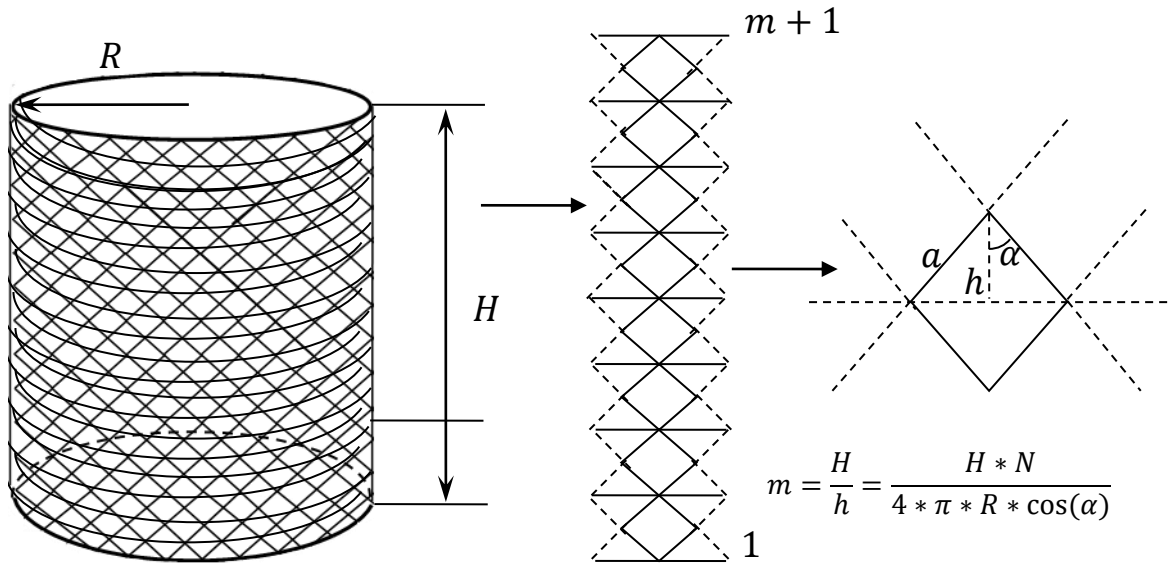


Рисунок 3. Вынесенные элементы модели для определения количества кольцевых ребер в зависимости от количества парных ребер: m-количество рядов; H-высота конструкции; N-количество спиральных ребер; R-радиус конструкции; α-угол между спиральным и кольцевым ребрами, h - половина высоты ромбической ячейки, m –количество рядов

Таблица зависимости числа спиральных парных ребер от числа кольцевых

Таблица 1.

Модель / Ребра, кол-во	1	2	3	4	5
Спиральные парные	80	120	160	240	320
Кольцевые	6	9	11	16	21

За эталонную модель примем конструкцию, имеющую наименьшее количество парных спиральных ребер – 80 пар. Для неё определяем массу, блок-схема расчета которой представлена рисунке 4.

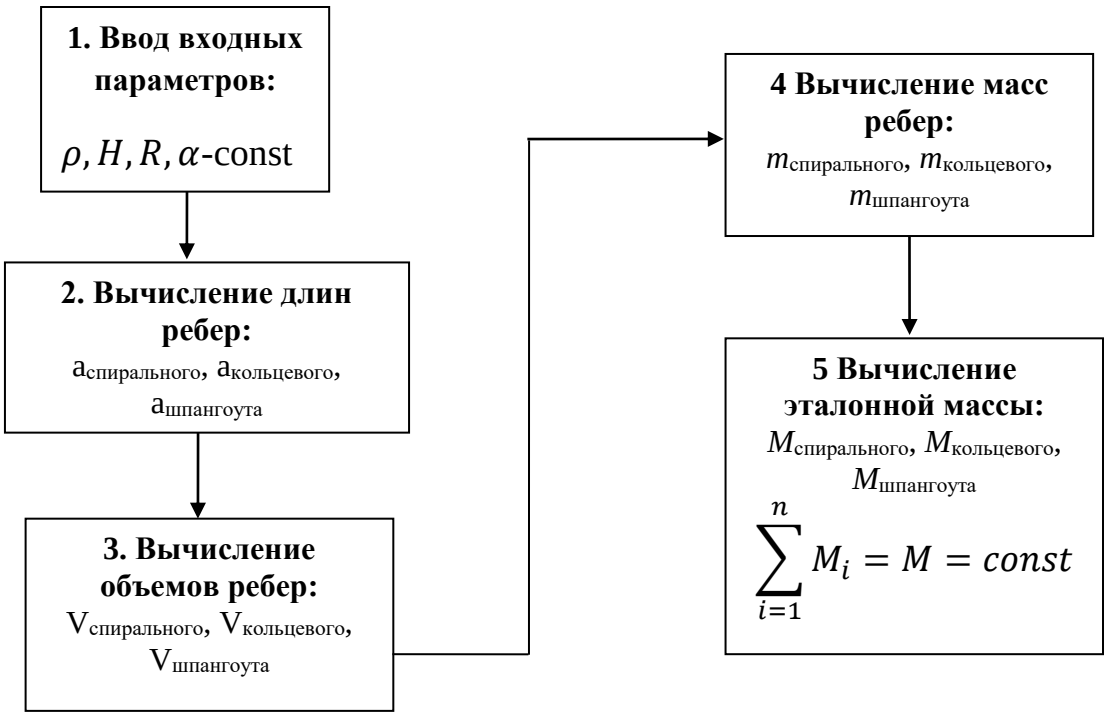


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма вычисления массы конструкции

На первом шаге задаем входные параметры, определяющие геометрию и свойства конструкции: плотность (ρ), высоту (H), радиус (R) и угол (α) между кольцевым и спиральным ребрами.

Находим длину окружности:

$$L = 2 * \pi * R \quad (1)$$

Для определения длин спиральных и кольцевого ребер, рассмотрим на втором шаге ромбическую ячейку реберной структуры (рис.5).

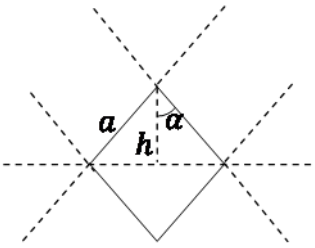


Рисунок 5. Ромбическая ячейка конструкции

В сетчатой оболочке ячейки стремятся к правильной форме, поэтому принимаем, образованный ребрами треугольник, равносторонним. Тогда длина кольцевого и спирального ребра будет рассчитываться по формуле:

$$a = \frac{L}{N/2} = \frac{4*\pi*R}{N}.$$

На третьем, четвертом шаге вычисляем объемы и массу каждого из типов структурных элементов:

$$V_i = a_i * b_i * h_i,$$

$$m_i = V_i * \rho,$$

где 1-спиральное ребро; 2-шпангоут; 3-кольцовое ребро, i=1, 2, 3.

На пятом шаге рассчитываем массы, приходящиеся на все типы структурных элементов. Суммируя их по числу элементов, получаем массу конструкции, на которую будем ориентироваться.

При задании дискретной модели оболочки для моделирования ребер использовался балочный двухузловой конечный элемент с шестью степенями свободы BEAM4 [5]. В качестве материала был выбран углепластик со следующими характеристиками: E_1=6440МПа; E_2=6470МПа; G=3800МПа; $\mu_1=\mu_2$=0,21 [6].

Отдельно определялись виды сечения ребер, задавались площади и моменты инерции. Отметим, что кольцевые, спиральные ребра и шпангоуты как структурные элементы оболочки имеют свои параметры.

Для расчета НДС конструкции зададим граничные условия. Распределенная нагрузка прикладывается к верхней кромке шпангоута. Рассматриваются два вида нагружения:

– осевая сжимающая нагрузка, которая представлена на рисунке 6 (нагрузку прикладываем по узлам);

– режим «полета» показан на рисунке 7 (узловая сила приложена под углом).

По нижней кромке оболочка жестко закреплена.

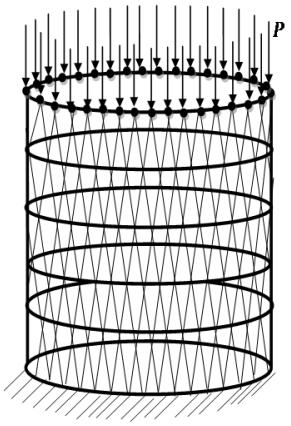


Рисунок 6.Приложенная осевая нагрузка к регулярной сетчатой оболочке

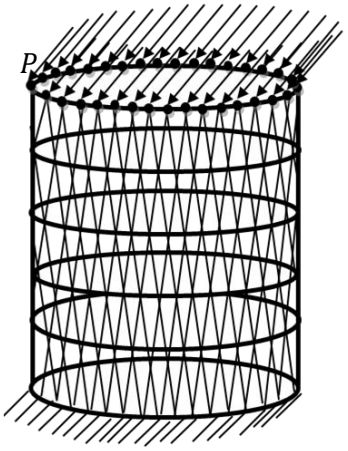


Рисунок 7.Режим «полета»

Определяем параметры ребер оболочек с разной частотой реберной структуры. Вычислив значения толщин, отметим, что учащенная реберная структура тоньше, чем оболочка с редкой структурой ребер (рис.8.).

Произведем расчет НДС оболочек с реберной структурой различной плотности при двух типах статического нагружения (рис. 6, рис.7). Поля напряжений в элементах оболочек представлены на рисунках 9 и 10.

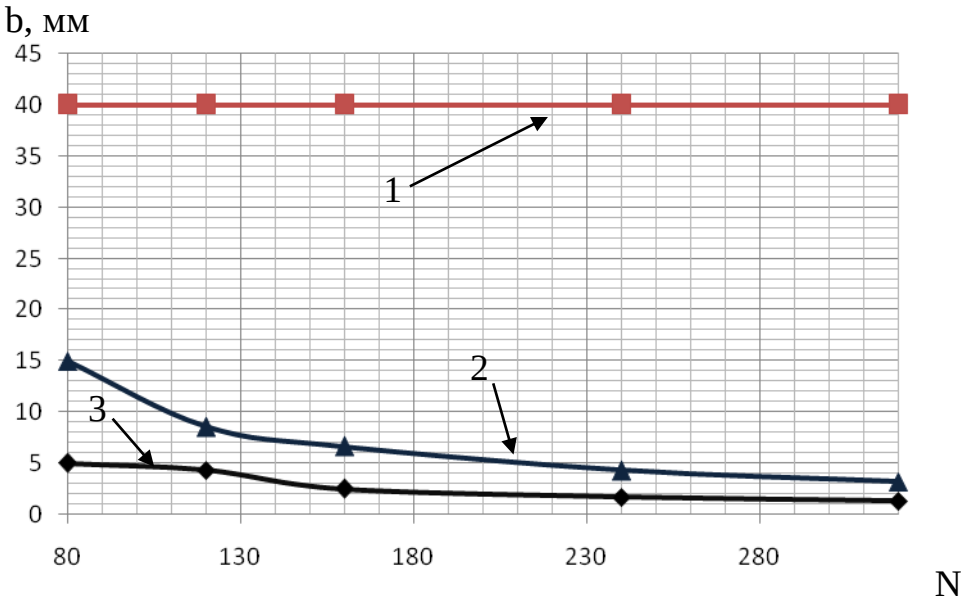
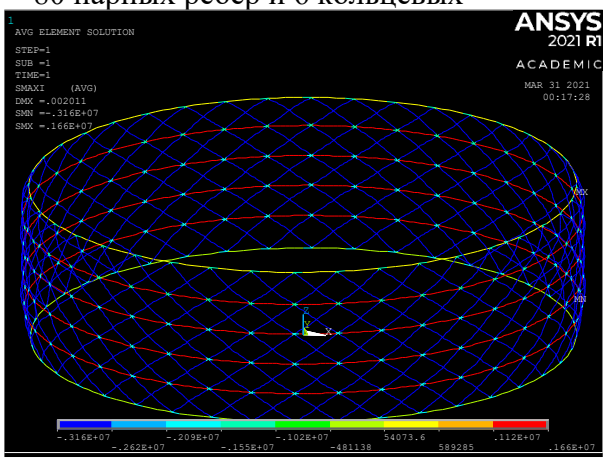
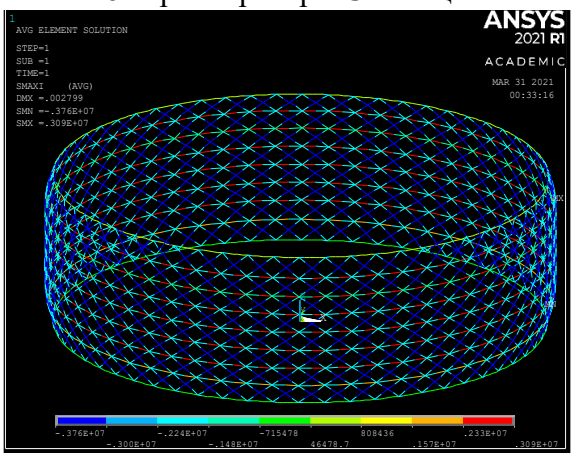


Рисунок 8. Зависимости толщин ребер b от числа пар спиральных ребер: 1-толщина шпангоутов; 2-толщина спиральных ребер; 3-толщина кольцевых ребер

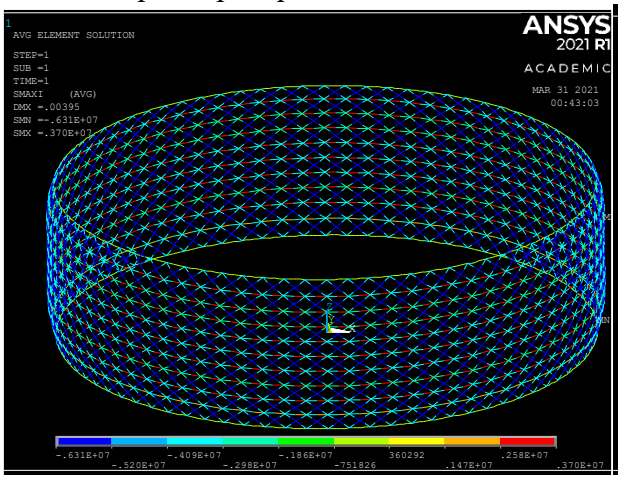
80 парных ребер и 6 кольцевых



120 парных ребер и 9 кольцевых



160 парных ребер и 11 кольцевых



320 парных ребер и 21 кольцевых

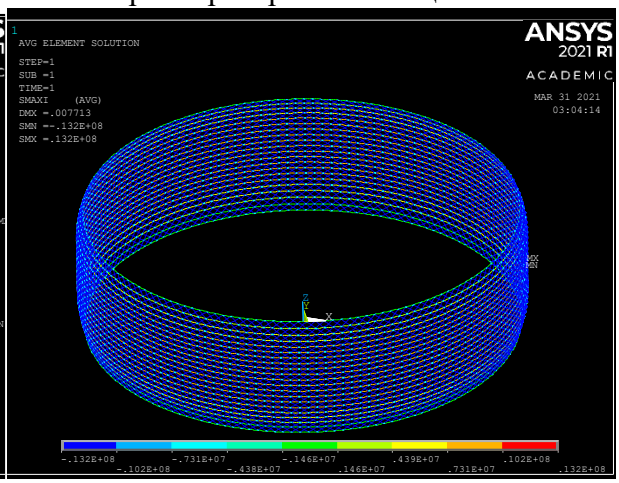
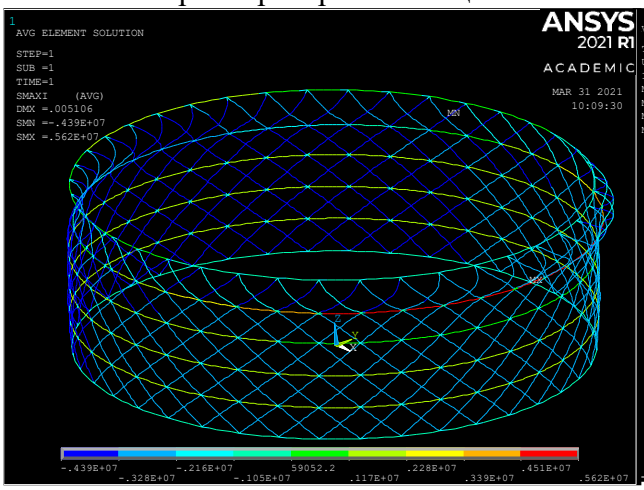
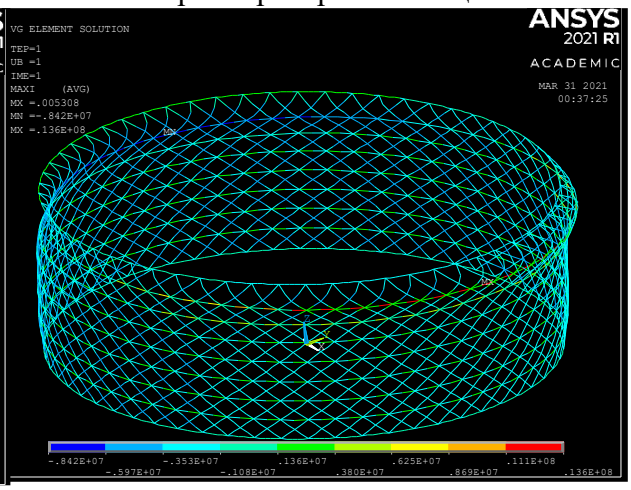


Рисунок 9. Поля напряжений конструкций с реберной структурой различной плотности при осевом сжатии

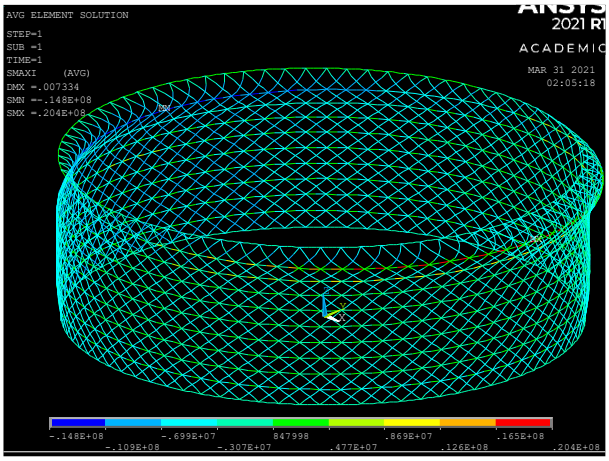
80 парных ребер и 6 кольцевых



120 парных ребер и 9 кольцевых



160 парных ребер и 11 кольцевых



320 парных ребер и 21 кольцевых

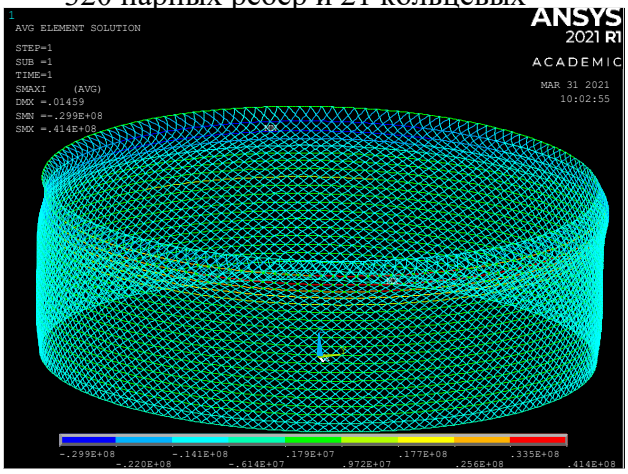


Рисунок 10. Поля напряжений конструкций с реберной структурой различной плотности при нагружении «полет»

При анализе рисунков рассчитанных численно полей напряжений видим, что спиральные ребра сжимаются, а кольцевые растягиваются и при первом и при втором типе нагружения конструкции. В случае нагрузки «полет» оболочка в зоне верхнего шпангоута подвержена большим деформациям, чем в серединной части. С ростом толщин реберной структуры напряжения в оболочке уменьшаются.

Полученные результаты могут служить основой для выбора плотности реберной структуры оболочки при наперед заданных геометрических, прочностных характеристиках конструкции и нагружении.

Список литературы.

1. Васильев В.В. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций / В.В. Васильев, А.Ф. Разин// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – 2006. – Вып. 1(142)-2(143). – С. 3-6.

2. Соломонов Ю.С Композитные материалы в ракетной и аэрокосмической технике / Ю.С. Соломонов, В.В. Васильев, В.П.

Георгиевский // Труды Моск. ин-та теплотехники. – 2006. – Т. 8. – Ч. 1 – С. 7-25.

3. Бурнышева Т.В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизогридных конструкций космических летательных аппаратов. Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 98-102. .

4. Скворцов Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс] : интерактив. мультимед. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков // Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2011.
on-line: http://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-izdaniya/Ispolzovanie-MKEpaketa-ANSYS-dlya-resheniya-zadach-mehaniki-deformiruemogo-tverdogo-tela-Elektronnyi-resurs-interaktiv-multimed-posobie-72697

5. Работа в CAE-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов: метод. указания / сост.: А.О. Шкловец, В.С. Мелентьев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 76 с.: ил.

6. Бурнышева Т.В. Особенности деформирования сетчатых композиционных оболочек при статическом осевом сжатии / Т.В. Бурнышева, В.О. Каледин, А.Б. Миткевич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 11. – С. 61-65.