

УДК 539.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-94-106

Для цитирования: Нестеров В. А., Никишев А. А. Анализ устойчивости и жесткости композитной сетчатой конической оболочки с закрепленным малым основанием // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 1. С. 94–106. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-94-106.

For citation: Nesterov V. A., Nikishev A. A. [Buckling and stiffness analysis of a composite anisogrid conical shell with a fixed small base]. *Siberian Aerospace Journal*. 2025, Vol. 26, No. 1, P. 94–106. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-94-106.

Анализ устойчивости и жесткости композитной сетчатой конической оболочки с закрепленным малым основанием

В. А. Нестеров^{*}, А. А. Никишев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^{*}E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru

Аннотация. Силовые элементы конструкций в виде конструктивных анизогридных оболочек вращения часто используются в производстве ракетно-космической техники (РКТ). Это обусловлено, прежде всего, высокими удельными механическими свойствами композитов, позволяющими изготавливать конструкции с высокой степенью весового совершенства. Кроме того, они достаточно технологичны, так как применяемый при их производстве метод непрерывной намотки композитных волокон широко распространен и хорошо отработан. Вопросам проектирования композитных сетчатых конструкций в последние годы уделяется пристальное внимание.

Актуальным примером анизогридных цилиндрических и конических оболочек является адаптер космических аппаратов для вывода на орбиту спутников системы ГЛОНАСС, различные варианты которых до сих пор производятся в цехах АО «Решетнёв». Оболочки однотипны, но отличаются по размерам (диаметрам и длинам цилиндрических и конических частей) и несущей способности. Для композитных элементов РКТ характерно наличие большого перечня варьируемых параметров, определение оптимального сочетания которых выливается каждый раз в комплексную задачу научного поиска.

Разработаны алгоритм и программа построения конечно-элементной (КЭ) модели анизогридных конических оболочек, изготавливаемых методом непрерывной намотки композитного волокна. Малое основание закреплено, а большое усилено шпангоутом и нагружено сосредоточенными усилиями и моментами. С помощью КЭ модели выполнено численное исследование устойчивости, жесткости и напряженно-деформированного состояния конструкции при варьировании параметров формирования ее сетчатой структуры.

Ключевые слова: сетчатая коническая оболочка, композиционные материалы, МКЭ.

Buckling and stiffness analysis of a composite anisogrid conical shell with a fixed small base

V. A. Nesterov^{*}, A. A. Nikishev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^{*}E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru

Abstract. Power elements of structures in the form of structural anisogrid shells of rotation are often used in the production of rocket and space technology. This is due, first of all, to high specific mechanical properties of composites, which allow to manufacture structures with a high degree of weight perfection. In addition, they are quite technological, as the method of continuous winding of composite fibers used in their production is widespread and well developed. In recent years, close attention has been paid to the design of composite mesh structures.

An actual example of anisogrid cylindrical and conical shells is a spacecraft adapter for GLONASS satellites orbit launching, different variants of which are still produced in the workshops of Reshetnev JSC. The shells are of the same type, but differ in dimensions (diameters and lengths of cylindrical and conical parts) and bearing capacity. For composite elements of rocket-space technology it is characterized by the presence of a large list of variable parameters, the determination of the optimal combination of which every time results in a complex problem of scientific search.

An algorithm and a program for building a finite element model of anisogrid conical shells made by continuous winding of composite fiber have been developed. The small base is fixed and the large base is reinforced by a spandrel and loaded by concentrated forces and moments. Numerical investigation of stability, stiffness and stress-strain state of the structure under varying parameters of its mesh structure formation is carried out with the help of FE model.

Keywords: anisogrid conical shell, composite materials, FEM.

Введение

Вопросам проектирования композитных сетчатых конструкций в последние годы уделяется пристальное внимание [1–11]. В ряде предыдущих работ [12–14] представлены результаты обширного исследования о влиянии базовых проектных параметров анизогридных цилиндрических и конических оболочек на их жесткость и несущую способность при торцевом нагружении разнообразными силовыми факторами. В частности, в работе [13] рассматривалась сетчатая коническая оболочка, являющаяся нижним силовым элементом адаптера (рис. 1). Нижним основанием коническая оболочка прикрепляется к шпангоуту ракетносителя. Инерционная нагрузка от верхней цилиндрической части адаптера со спутниками имитируется комплексом силовых усилий на малом основании конуса. В работе показано, что для конкретного вида торцевого нагружения (или комбинации силовых факторов) имеются оптимальные значения проектных параметров, таких как количество и углы намотки спиральных ребер, которые, будучи согласованы с размерами поперечного сечения ребер и механическими свойствами композиционного материала, позволяют минимизировать массу конструкции адаптера при сохранении функциональной работоспособности.

В некоторых космических аппаратах применяются рамные или ферменные силовые элементы конического вида (рис. 2), в которых закреплено малое основание, а силовое воздействие, которое также можно имитировать системой торцевых усилий, приложено к большему основанию. Альтернативой для такого вида конструкций могут выступать анизогридные конические оболочки обратной конусности.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния основных проектных параметров сетчатой конической оболочки с закрепленным малым основанием на жесткость и несущую способность при торцевом нагружении усилиями и моментами, сосредоточенными на большем основании.

Моделирование сетчатой конической оболочки и алгоритмизация численного исследования

Коническая анизогридная оболочка (рис. 3) образуется двумя семействами спиральных рёбер, выкладываемых под углами $\pm\varphi$ по геодезическим линиям поверхности, и семейством кольцевых рёбер, повышающих окружную жёсткость и улучшающих совместность работы. Характерной особенностью конических оболочек является переменность угла φ (ориентации

спиральных рёбер) вдоль образующей. Это обязательно должно учитываться, хотя немного усложняет алгоритм геометрического моделирования. Процедура построения основывается на использовании типовых элементов (рис. 4), ряд которых формируется вдоль образующей конуса, а затем копируется вращением вокруг продольной оси.

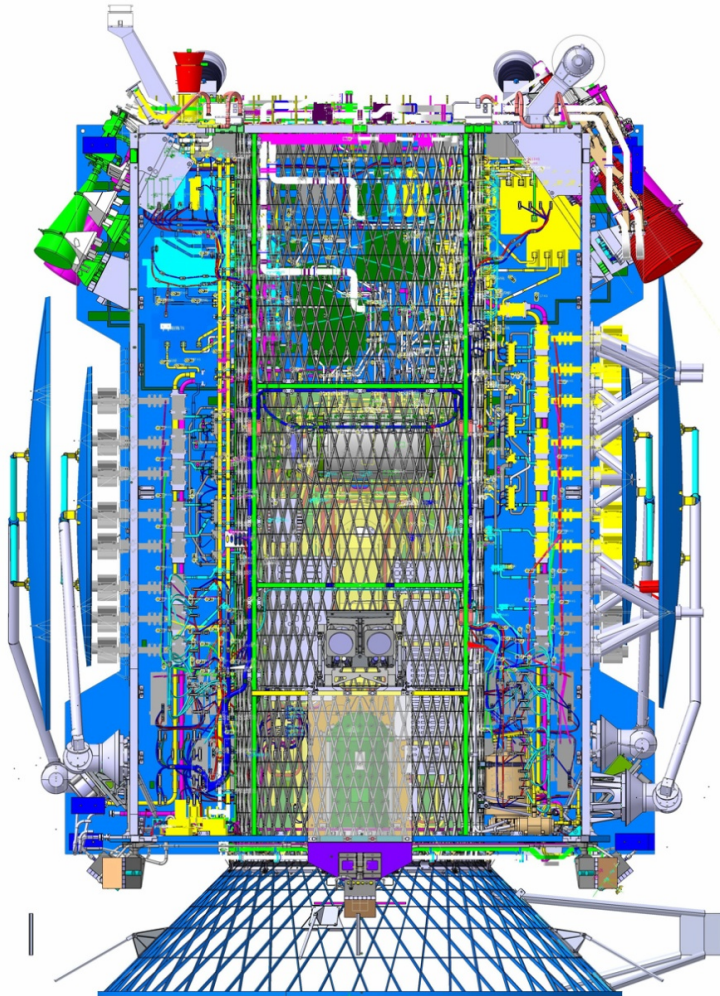


Рис. 1. Адаптер для вывода спутников системы ГЛОНАСС

Fig. 1. Adapter for displaying satellites of the GLONASS system



Рис. 2. Ферменная конструкция разгонного блока типа «ФРЕГАТ»

Fig. 2. Truss structure of the FREGAT type upper stage

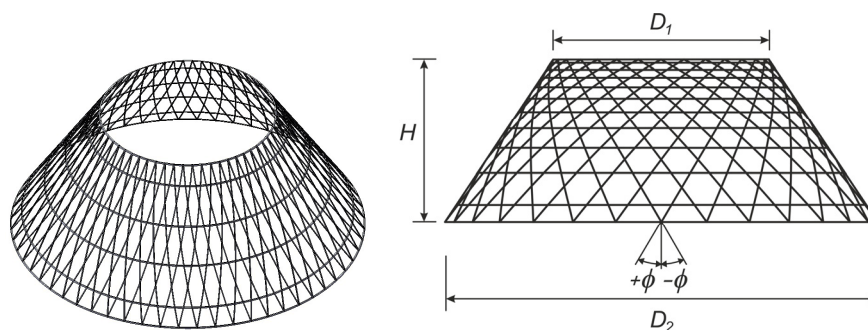


Рис. 3. Геометрическая модель сетчатой конической оболочки

Fig. 3. Geometric model of anisogrid conical shell

Определение оптимальных проектных параметров осуществляется по результатам комплексного численного эксперимента. Он предполагает выполнение серии типовых расчётов с различным сочетанием проектных параметров. Поэтому, прежде всего, в среде интегрированного пакета (COSMOS/M) разрабатываются алгоритм и программа построения в автоматическом режиме геометрической и конечно-элементной моделей.

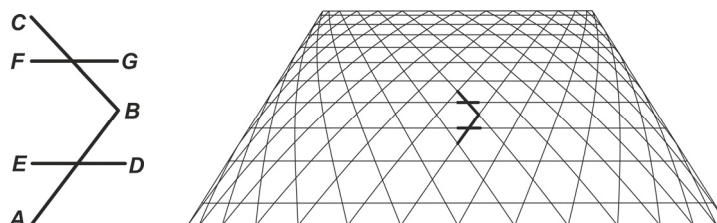


Рис. 4. Типовой элемент сетчатой структуры конической оболочки

Fig. 4. Typical element of the anisogrid conical shell structure

К числу базовых проектных параметров анизогридных конических оболочек относятся:

- диаметры оснований и высота оболочки;
- число спиральных рёбер;
- угол ориентации спиральных рёбер на большом основании;
- размеры сечения рёбер;
- свойства материала.

Для определённого вида расчёта можно автоматизировать задание нагрузок и граничных условий (рис. 5).

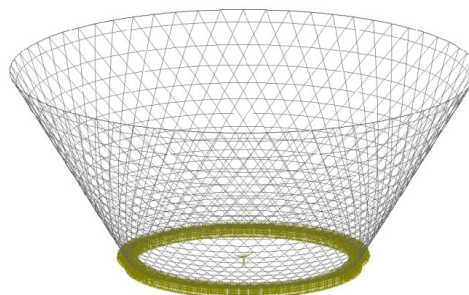


Рис. 5. Модель сетчатой конической оболочки с закрепленным малым основанием

Fig. 5. Model of anisogrid conical shell with a fixed small base

При фиксированных габаритных размерах сетчатой конической оболочки важнейшими параметрами, влияющими на несущую способность, являются углы намотки, число и размер сечения спиральных рёбер.

Изменение углов намотки рёбер существенно влияет на несущую способность оболочек. Это, в частности, хорошо заметно по результатам численного эксперимента, выполненного при анализе устойчивости при осевом сжатии сетчатых цилиндрических оболочек различного удлинения (рис. 6). По представленным графикам видно, что для моделей различных габаритов имеются свои оптимальные значения углов намотки спиральных ребер, незначительные отклонения от которых приводят к значительному снижению несущей способности оболочек.

Большое исследование устойчивости сетчатых конических оболочек с торцевой нагрузкой на малом основании и закрепленным большим основанием выполнено авторами работы [13]. В нем выявлено влияние разнообразных факторов (углы намотки, число и ориентация сечения спиральных рёбер) на несущую способность оболочек при различных вариантах нагружения малого основания (рис. 7).

В рассматриваемом случае модели конической сетчатой оболочки, когда малое основание закреплено, а большое усилено шпангоутом и нагружено сосредоточенными усилиями и моментами, следует ожидать некоторой аналогичности влияния варьирования определенных проектных параметров (например, величины углов намотки, числа спиральных рёбер и ориентации их сечения) на жесткость и несущую способность конструкции. Однако для точного описания тенденций, основанных на действительных значениях критической нагрузки и частот собственных колебаний (жесткостной анализ), и нового вида расчетной схемы (см. рис. 5) требуется отдельное комплексное численное исследование.

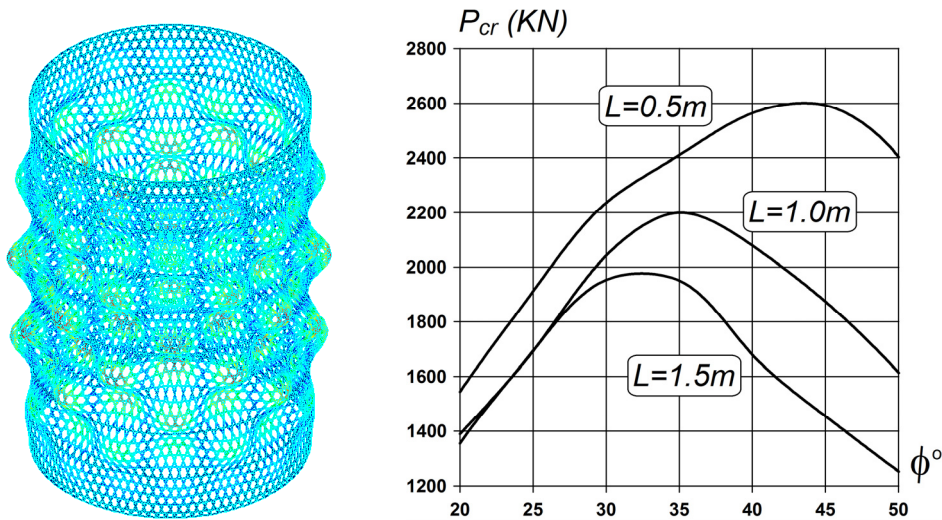


Рис. 6. Форма потери устойчивости цилиндрической сетчатой оболочки при осевом сжатии и графики зависимости критического усилия (P_{cr}) от величины углов намотки спиральных ребер (ϕ°) для моделей различной длины (L)

Fig. 6. The form of buckling of a cylindrical mesh shell under axial compression and graphs of the dependence of the critical force (P_{cr}) on the magnitude of the winding angles of the spiral ribs (ϕ°) for models of various lengths (L)

Численное исследование

Различные модели отличаются углами намотки спиральных рёбер. В каждом отдельном случае задается значение угла ориентации спирального ребра по отношению к образующей конической поверхности. Этот угол будем называть углом захода. Спиральные ребра укладываются по геодезическим линиям конической поверхности. При этом по мере приближения к малому основанию угол ориентации ребер увеличивается (по закону Клеро). В предельном случае

угол ориентации на малом основании равен 90° . Угол захода при этом имеет предельно возможное значение. При выбранном соотношении диаметров оснований конуса ($D1/D2 = 2$) предельное значение угла захода (φ) равно 30° .

По мере увеличения углов захода увеличивается густота сетки у малого основания (рис. 8). Соответственно растет и масса конструкции.

Первое исследование связано с анализом жёсткости конструкции, которая оценивается по величине наименьших частот собственных колебаний. Рассматривались моды изгибных, продольных, оболочечных (рис. 9) и крутильных колебаний (вокруг продольной оси конуса).

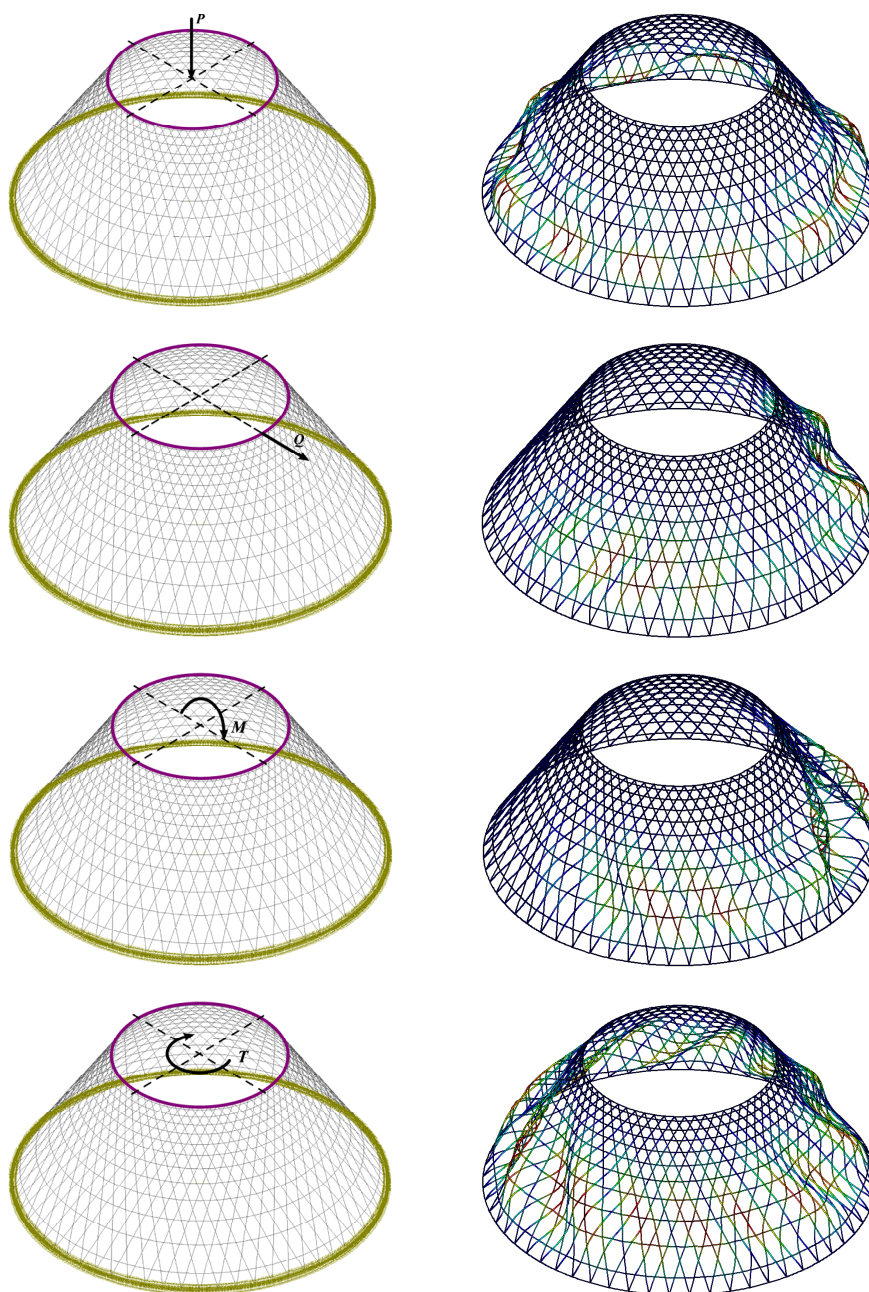


Рис. 7. Расчетные схемы (слева) и формы потери устойчивости (справа) в анализе устойчивости сетчатой конической оболочки с вариантами торцевой нагрузки на малом основании и закрепленным большим основанием

Fig. 7. Design diagrams (left) and buckling modes (right) in the stability analysis of a mesh conical shell with end load cases on a small base and a fixed large base

Проанализируем модели с пятью фиксированными значениями угла захода ($\varphi = 11^\circ, 14^\circ, 17^\circ, 20^\circ$ и 23°). Этого достаточно, чтобы отследить тенденции.

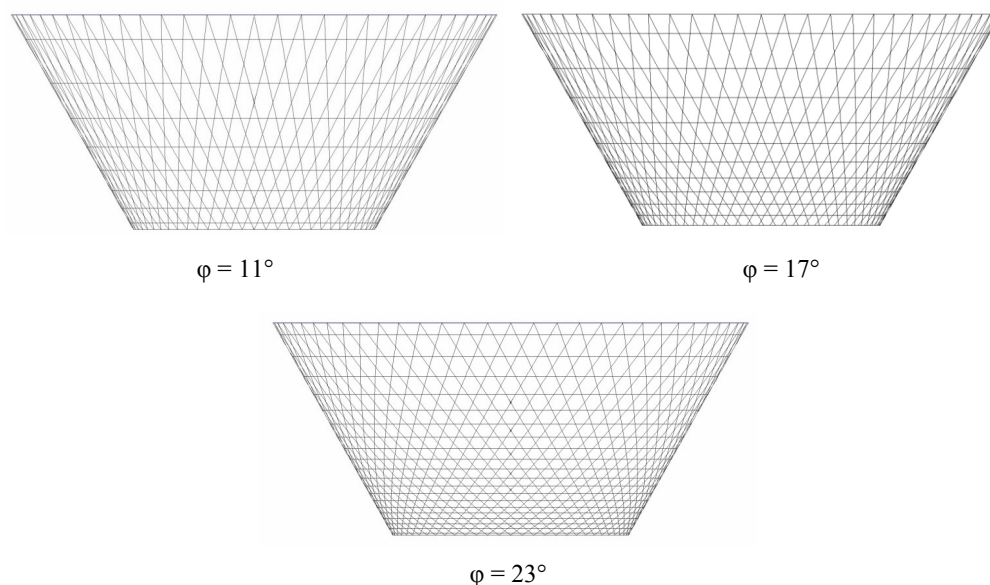


Рис. 8. Модели с различными значениями углов намотки спиральных ребер

Fig. 8. Models with different winding angles of spiral fins

Выявлено (табл. 1), что жёсткость конструкции по двум видам колебаний (изгибных и крутильных) растёт по мере сгущения сетки, оболочечная жёсткость почти неизменна, а продольная жёсткость падает. Это объясняется большими значениями продольной жёсткости оболочки в модели с малыми углами ориентации спиральных рёбер.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний и коэффициенты запаса устойчивости сетчатых конических оболочек с различными углами намотки спиральных ребер

φ, град	m, кг	Частоты собственных колебаний, Гц				Запас устойчивости, K, P = Kmg
		изгибные	крутильные	оболочечные	продольные	
11	39,02	22,24	34,86	58,56	146,81	316,6
14	41,95	27,02	43,53	59,04	139,90	418,1
17	45,22	31,20	51,88	59,40	131,83	525,8
20	49,58	33,77	59,21	59,43	120,66	632,2
23	56,01	34,55	65,72	59,14	107,52	735,2

Параллельно исследовалась устойчивость оболочки при продольном сжатии осевой инерционной нагрузкой. Форма потери устойчивости (рис. 10) показывает, что потеря устойчивости происходит по балочному типу с деформацией отрезков рёбер в зоне с малой густотой сетки у большого основания. Повышению критического усилия способствовало бы увеличение числа и мощности рёбер, чтобы выпучивание происходило по оболочечной форме, как в моделях на рис. 7.

При увеличении угла захода $\varphi = 11^\circ$ до $\varphi = 23^\circ$ в нашей модели критическая осевая нагрузка возрастает почти в 2,5 раза (см. табл. 1, последний столбец). Это происходит за счёт укорочения отрезков рёбер в опасной зоне.

Влияние сгущения сетки (за счёт увеличения угла захода φ) и перехода балочной локальной формы потери устойчивости в оболочечную хорошо заметно в исследовании устойчивости

оболочки при нагружении поперечным усилием на большом основании (рис. 11). Критические величины усилия (табл. 2) в моделях с углами захода $\varphi = 11^\circ$ и $\varphi = 23^\circ$ отличаются более, чем в 5 раз.

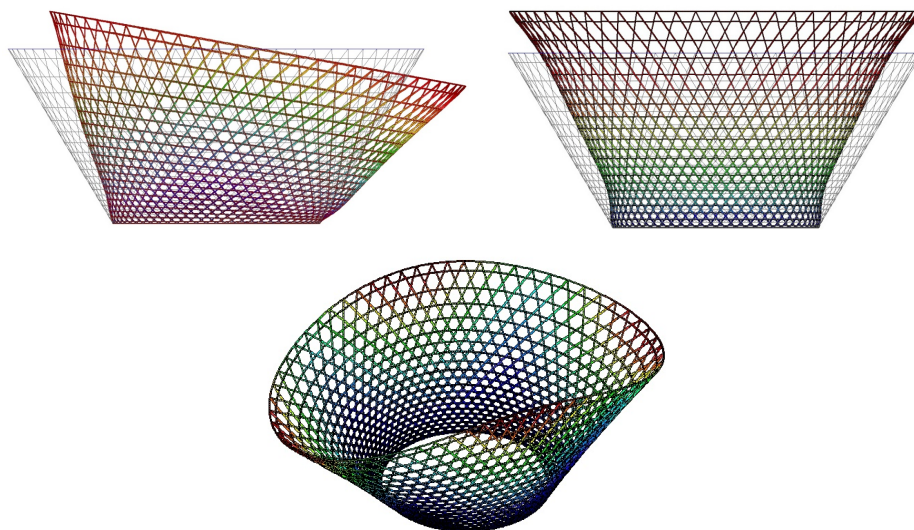


Рис. 9. Моды колебаний: изгибных, продольных и оболочечных

Fig. 9. Vibration modes: bending, longitudinal and shell

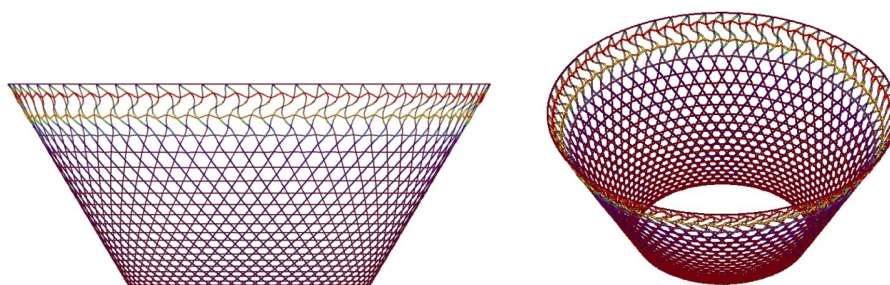


Рис. 10. Форма потери устойчивости при воздействии осевой перегрузки

Fig. 10. Form of buckling under axial overload

Таблица 2

**Коэффициент запаса устойчивости при нагружении поперечным торцевым усилием
в моделях с различным углом намотки спиральных ребер**

φ, град	m, кг	K 10 ³
11	39,02	284
14	41,95	528
17	45,22	864
20	49,58	1289
23	56,01	1519

Такие же тенденции (табл. 3) обнаружены в задачах по устойчивости при торцевом нагружении на большом основании изгибающим моментом (рис. 12). Здесь более густая сетка, как и при осевом нагружении, предпочтительнее. Формы потери устойчивости сетчатых конических оболочек с различными углами захода спиральных ребер подобны той, что представлена на рис. 12 для модели с $\varphi = 11^\circ$. Перехода на оболочечную форму потери устойчивости и, следовательно, увеличения критической нагрузки можно добиться увеличением числа спиральных ребер и их мощности.

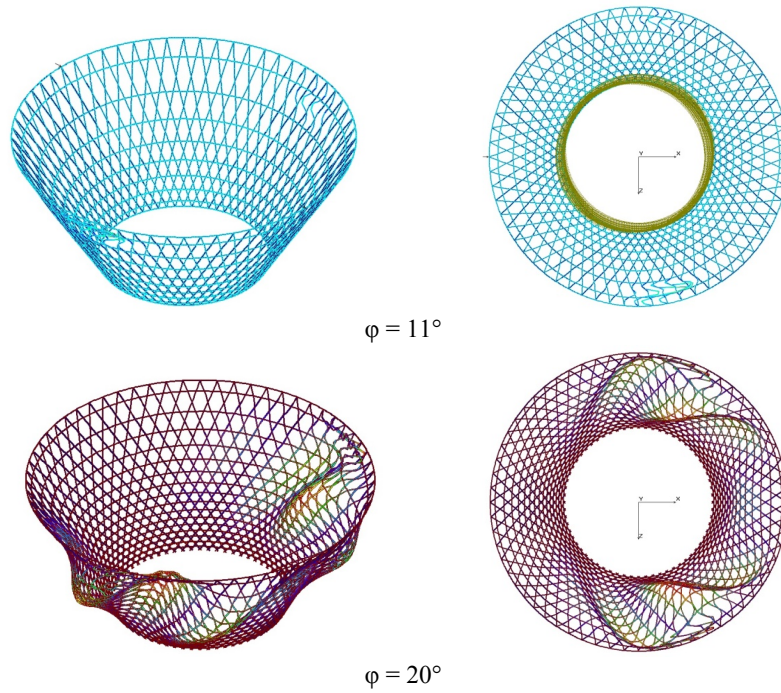


Рис. 11. Формы потери устойчивости моделей с углами захода $\varphi = 11^\circ$ и $\varphi = 20^\circ$ при нагружении поперечной силой на большом основании

Fig. 11. Forms of buckling of models with approach angles $\varphi = 11^\circ$ and $\varphi = 20^\circ$ when loaded with lateral force on a large base

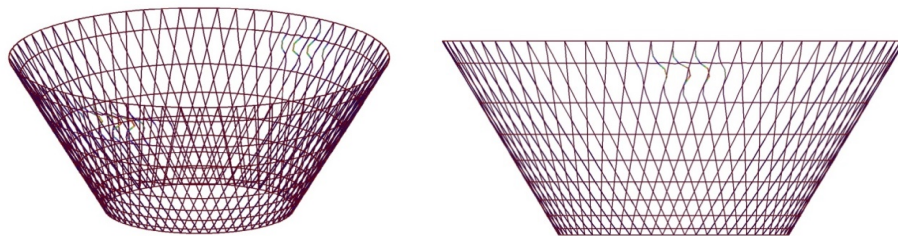


Рис. 12. Форма потери устойчивости модели с углом захода $\varphi = 11^\circ$ при нагружении изгибающим моментом на большом основании

Fig. 12. Buckling mode of a model with an approach angle $\varphi = 11^\circ$ when loaded with a bending moment on a large base

Таблица 3

**Коэффициент запаса устойчивости при нагружении изгибающим моментом
в моделях с различным углом намотки спиральных ребер**

φ , град	m , кг	$K \cdot 10^3$
11	39,02	449
14	41,95	771
17	45,22	1030
20	49,58	1290
23	56,01	1555

Схожие закономерности (табл. 4) имеют место в исследовании устойчивости при торцевом нагружении крутящим моментом (рис. 13).

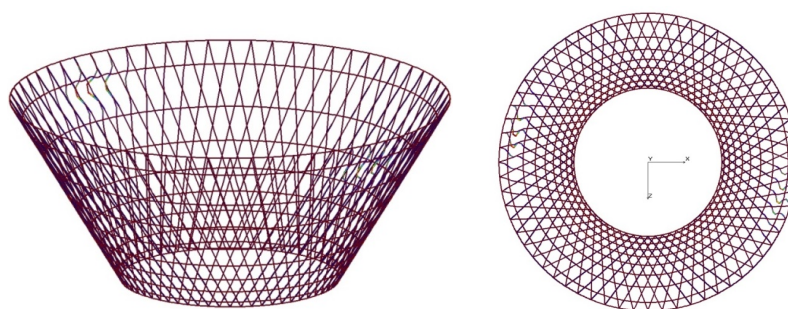


Рис. 13. Форма потери устойчивости модели с углом захода $\varphi = 11^\circ$ при нагружении крутящим моментом на большом основании

Fig. 13. Buckling shape of a model with an approach angle $\varphi = 11^\circ$ when loaded with torque on a large base

Формы потери устойчивости оболочек с различными углами захода спиральных ребер соответствуют той, что показана на рис. 13 для модели с $\varphi = 11^\circ$. Эта форма локальной потери устойчивости. Варьированием числа спиральных ребер, высотой и шириной их сечения, а также углом захода можно привести ее к оболочечной форме, повышая таким образом удельные величины критического усилия.

Таблица 4

Коэффициент запаса устойчивости при нагружении крутящим моментом в моделях с различным углом намотки спиральных ребер

φ , град	m , кг	$K \cdot 10^3$
11	39,02	471
14	41,95	837
17	45,22	1318
20	49,58	1927
23	56,01	2405

Следующее модальное исследование проведено для сетчатой конической оболочки с закрепленным малым основанием и заданным грузом 5225 кг на свободном (большом) основании. Как и ранее, исследовались жесткости оболочки и несущая способность при осевой перегрузке. На характер поведения полученных параметров: частот собственных колебаний различного вида (см. рис. 9) и критических величин осевой перегрузки (табл. 5) оказывают влияние взаимно-обратные тенденции изменения продольной и изгибной жесткости: по мере увеличения угла захода φ изгибная жёсткость растёт, а продольная – падает. В общем случае увеличение угла захода φ целесообразно и для повышения критического усилия от осевой перегрузки, которое для двух вариантов модели ($\varphi = 11^\circ$ и $\varphi = 23^\circ$) различаются в 4 раза.

Анализ полученных в численном эксперименте результатов (табл. 1–5) показывает, что несущая способность сетчатых конических оболочек, малое основание которых закреплено, а на большем приложены сосредоточенные усилия и моменты, зависит от угла намотки спиральных ребер. При этом наибольшие критические величины нагрузок соответствуют моделям с наибольшим углом захода, при которых формируется более мелкая сетчатая структура, и реализуются оболочечные формы потери устойчивости. Однако вывод о том, что анизогридные конические оболочки с большими углами намотки всегда предпочтительны, в общем случае не верен. Данные табл. 1 и 5 свидетельствуют о том, что продольная жесткость выше у моделей с малыми углами намотки спиральных ребер, и, если этот параметр регламентируется, следует выбирать именно такие модели, которые к тому же существенно легче, чем оболочки с большими значениями углов намотки.

Таблица 5

Частоты собственных колебаний и коэффициенты запаса устойчивости сетчатых конических оболочек с грузом на большом основании и различными углами намотки спиральных ребер

φ , град	m , кг	Частоты собственных колебаний, Гц			Коэффициент запаса устойчивости
		изгибные	крутильные	продольные	
11	39,02	9,76	15,25	65,14	1,44
14	41,95	11,89	19,05	62,12	2,43
17	45,22	13,71	22,71	58,55	3,60
20	49,58	14,84	25,93	53,60	4,86
23	56,01	15,19	28,79	47,79	5,61

Кроме того, как показали расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) (рис. 14) сетчатых конических оболочек, нагруженных изгибающим моментом на свободном (большом) торце, максимальные эквивалентные напряжения реализовались в модели с более густой сеткой ($\varphi = 23^\circ$), а минимальные – в модели с углом захода $\varphi = 14^\circ$, причём разница в этих напряжениях превысила 50 % (табл. 6).

Таблица 6

Величины максимальных напряжений по Мизесу в моделях с различным углом намотки спиральных ребер при нагружении изгибающим торцевым моментом

φ , град	m , кг	Напряжения по Мизесу, МПа
11	39,02	432,28
14	41,95	382,94
17	45,22	402,55
20	49,58	479,44
23	56,01	612,72

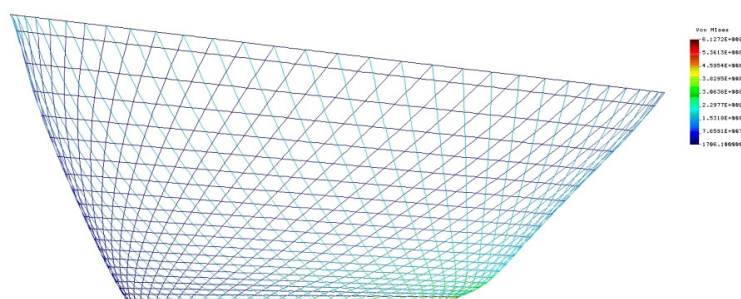


Рис. 14. Распределение эквивалентных напряжений в модели с углом захода $\varphi = 23^\circ$ при нагружении изгибающим моментом на большом основании

Fig. 14. Distribution of equivalent stresses in a model with an approach angle $\varphi = 23^\circ$ when loaded with a bending moment on a large base

Заключение

В результате работы определены зависимости величин критических усилий, параметров жесткости и НДС сетчатых конических оболочек, закрепленных малым основанием и нагруженных силовыми факторами на большом основании. Исследование продемонстрировало необходимость проведения комплексного численного эксперимента на этапе проектирования анизотропных композитных силовых конструкций для определения оптимального сочетания многочисленных проектных параметров. Поскольку это сочетание почти всегда уникально (соответствует определенным, каждый раз разным ТТХ), традиционная задача проектирования элементов конструкции РКТ возрастает до масштабов научного поиска.

Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid lattice structures – survey of development and application // *Composite Structures*. 2001. Vol. 54, Iss. 2–3. P. 361–370.
2. Vasiliev V. V., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications // *Composite Structures*. 2006. Vol. 76, Iss. 1–2. P. 182–189.
3. Азаров А. В., Разин А. Ф. Континуальная модель сетчатой композитной структуры // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2020. Т. 26, № 2. С. 269–280.
4. Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике / В. В. Васильев, В. А. Барынин, А. Ф. Разин и др. // *Композиты и наноструктуры*. 2009. № 3. С. 38–50.
5. Азаров А. В. К теории сетчатых композитных оболочек // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. 2013. № 1. С. 71–83.
6. Азаров А. В. Континуальная модель композитных сетчатых оболочек, образованных системой спиральных ребер // *Композиты и наноструктуры*. 2015. Т. 7, № 3(27). С. 151–161.
7. Азаров А. В. Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых композитных конструкций // *Механика твердого тела*. 2018. № 4. С. 85–93.
8. Васильев В. В. Оптимальное проектирование композитной сетчатой цилиндрической оболочки, нагруженной внешним давлением // *Механика твердого тела*. 2020. № 3. С. 5–11.
9. Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композитные сетчатые конструкции – проектирование, расчет и изготовление. М. : Инновационное машиностроение, 2023. 488 с.
10. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94, Iss. 3, P. 1117–1127.
11. Хахленкова А. А., Лопатин А. В. Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2018. Т. 2, № 3. С. 134–146. DOI: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146.
12. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Finite-element modelling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93, Iss. 2. P. 308–323.
13. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Buckling analysis and design of anisogrid composite lattice conical shells // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93, Iss. 12. P. 3150–3162.
14. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Finite-element modeling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells // *IV European Conference on Computational Mechanics*. Palais des Congres. Paris, France, May 16–21, 2010.

References

1. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid lattice structures – survey of development and application. *Composite Structures*. 2001, Vol. 54, Iss. 2–3, P. 361–370.
2. Vasiliev V. V., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications. *Composite Structures*. 2006, Vol. 76, Iss. 1–2, P. 182–189.
3. Azarov A. V., Razin A. F. [Continuum model of a mesh composite structure]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov I konstruktsiy*. 2020, Vol. 26, No. 2, P. 269–280 (In Russ.).
4. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. et al. [Anisogrid composite mesh structures – development and application to space technology]. *Kompozity I nanostruktury*. 2009, No. 2, P. 38–50 (In Russ.).
5. Azarov A. V. [On the theory of mesh composite shells]. *Mekhanika tverdogo tela*. 2013, No. 1, P. 71–83 (In Russ.).
6. Azarov A. V. [Continuum model of composite mesh shells formed by a system of spiral ribs]. *Kompozity I nanostruktury*. 2015, Vol. 7, No. 3 (27), P. 151–161 (In Russ.).
7. Azarov A. V. [The problem of designing aerospace mesh composite structures]. *Mekhanika tverdogo tela*. 2018, No. 4, P. 85–93 (In Russ.).

8. Vasiliev V. V. [Optimal design of a composite mesh cylindrical shell loaded with external pressure]. *Mekhanika tverdogo tela*. 2020, No. 3, P. 5–11 (In Russ.).
9. Vasiliev V. V., Razin A. F., Azarov A. V. *Kompozitnye setchatye konstruksii – proektirovanie, raschet i izgotovlenie* [Composite mesh structures – design, calculation and manufacturing]. Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publ., 2023, 448 p. (In Russ.).
10. Vasiliev V. V., Barynin V. A., Rasin A. F. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012, Vol. 94, Iss. 3, P. 1117–1127.
11. Khakhlenkova A. A., Lopatin A. V. [Review of adapter designs for modern spacecraft]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2018, Vol. 2, No. 3, P. 134–146 (In Russ.). DOI: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146.
12. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Finite-element modelling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells. *Composite Structures*. 2011, Vol. 93, Iss. 2, P. 308–323.
13. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Buckling analysis and design of anisogrid composite lattice conical shells. *Composite Structures*. 2011, Vol. 93, Iss. 12, P. 3150–3162.
14. Morozov E. V., Lopatin A. V., Nesterov V. A. Finite-element modeling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells. *IV European Conference on Computational Mechanics*. Palais des Congres. Paris, France, May 16–21, 2010.

© Нестеров В. А., Никишев А. А., 2025

Нестеров Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6384-3849>.

Никишев Андрей Александрович – доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: anikandrey26@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-3507-8420>.

Nesterov Vladimir Anatolievich – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-6384-3849>.

Nikishev Andrey Aleksandrovich – Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: anikandrey26@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-3507-8420>.

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; принята к публикации 20.11.2024; опубликована 11.04.2025
The article was submitted 14.11.2024; accepted for publication 20.11.2024; published 11.04.2025

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License