

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОГРИДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ПРОЧНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПРИ КРУЧЕНИИ

Л. М. Ковальчук✉, Т. В. Бурнышева

Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Российская Федерация

В статье рассматриваются анизогридные сетчатые оболочечные конструкции из композиционных материалов. Цель работы – исследовать анизогридные оболочки на прочность, устойчивость и жесткость при кручении. На основе разработанной параметрической конечно-элементной модели исходной конструкции проводился многофакторный вычислительный эксперимент. Построение моделей проводилось в программном комплексе ANSYS. Рассматривались два подхода к моделированию: построение оболочки последовательным заданием семейств ребер и выделение структурного элемента оболочки с последующим копированием его по окружности. Выбран наименее трудоемкий и ресурсоемкий подход для персонального компьютера. Анализ напряженного состояния исходной сетчатой конструкции при кручении показал: спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются, кольцевые ребра работают на растяжение и сжатие. По результатам вычислительного эксперимента были определены зависимости максимальных продольных напряжений в ребрах от изменения угла наклона спирального ребра к образующей, количество пар спиральных ребер и толщина реберной конструкции. Исследовались прочность, устойчивость и жесткость конструкций при кручении с учетом изменения параметров реберной структуры. По итогу исследования выбирались две самые жесткие, прочные и устойчивые конструкции, в которых исключались по два вертикальных структурных элемента. Таким образом, на прочность, устойчивость и жесткость исследовался новый тип анизогридной цилиндрической конструкции, содержащий вертикальные разрезы.

Ключевые слова: анизогридные конструкции, прочность, устойчивость и жесткость, ANSYS, многофакторный вычислительный эксперимент.

Введение

В космической, авиационной и строительной отраслях используются сетчатые оболочки различной конфигурации и назначения [1, 2]. Их применение обусловлено сочетанием высоких прочностных характеристик, малого веса и связности систем [3–5].

Такая конструкция позволяет изменять параметры сетчатой структуры при постоянной массе оболочки.

Композитная сетчатая цилиндрическая оболочка состоит из спиральных ребер с наклоном влево и вправо, кольцевых ребер (рисунок 1), которые изготовлены из высокомодульных однонаправленных композитных материалов с высокой удельной жесткостью и прочностью.

1. Описание исходной конструкции и постановка задачи

Приведена исходная цилиндрическая сетчатая оболочка без обшивки с 72 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 19° . Параметры конструкции указаны в таблице 1.

В таблице 2 представлены геометрические параметры сетчатой структуры исходной конструкции.

Анизогридная оболочка изготовлена из композитного материала из углеродного волокна с характеристиками материала, указанными в таблице 3.

В рабочем состоянии в безвоздушном пространстве кромка нижнего шпангоута жестко крепится к другим силовым элементам изделия, а верхняя испытывает кручение. Примем, что

✉ kovalchuk.2017@stud.nstu.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

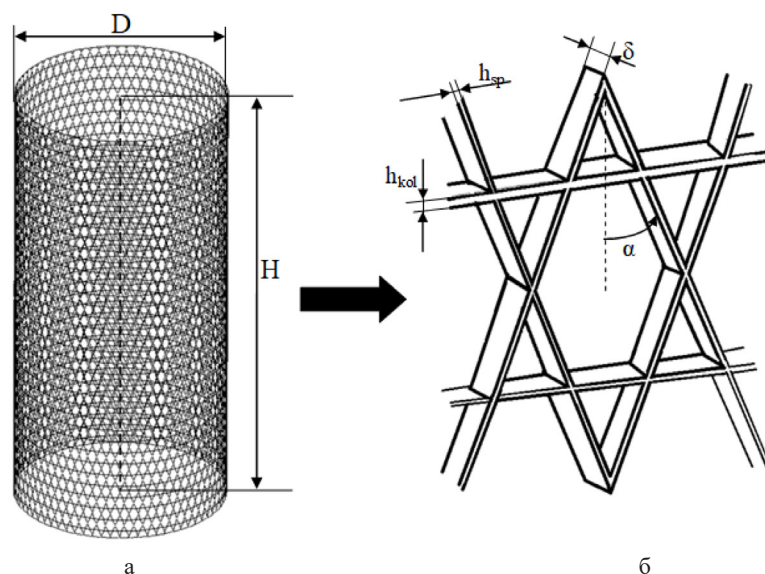


Рисунок 1. Геометрические параметры реберной структуры (H – высота конструкции; D – диаметр; h_{kol} – высота кольцевых ребер; h_{sp} – высота спиральных ребер; b – толщина реберной структуры; α – угол наклона спирального ребра к образующей: а – исходная конструкция; б – вынесенная ромбическая ячейка)

Таблица 1

Параметры исходной конструкции

Высота конструкции, H , м	Диаметр конструкции, D , м	Угол наклона спирального ребра к образующей, α , °	Масса конструкции, M , кг
5.585	2.560	19	165

Таблица 2

Значения геометрических параметров реберной структуры
исходной сетчатой цилиндрической оболочки

	Высота реберной структуры, $h \cdot 10^{-3}$ м	Толщина реберной структуры, $\delta \cdot 10^{-3}$ м
Шпангоуты	30	18
Спиральные ребра	6	14
Кольцевые ребра	3	14

Таблица 3

Параметры исходной конструкции

E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
190	0.3	1781

масса сетчатой оболочки постоянна, при этом реберная структура должна удовлетворять требованиям по прочности, устойчивости и жесткости. Изменение значений геометрических и структурных параметров сетки позволяет сгенерировать семейство анизотридных оболочек с фиксированной массой, но различного механизма отклика на прикладываемую нагрузку. В связи с чем целесообразно провести исследование влияния параметров реберной структуры оболочки на прочность, устойчивость и жест-

кость при крутящем моменте, равном 1 тонна-сила на метр.

2. Моделирование анизотридной конструкции в ANSYS Mechanical APDL

Моделирование в программном модуле ANSYS Mechanical APDL проводилось с учетом выбора наименее затратных по времени и памяти ресурсов ПК. Исследовались два подхода к по-

строению дискретных моделей [6]. Рассмотрим эти подходы более подробно.

Первый подход

Первый подход к построению цилиндрической реберной структуры называется последовательным, поскольку заключается в последовательном написании циклов для каждого семейства ребер. Этот подход состоит из трех этапов (рисунок 2).

На первом шаге задаются точки, образованные пересечением спиральных и кольцевых ребер. На втором шаге задаются линии, соединяющие точки первого шага, и для каждого семейства ребер формируется цикл. На рисунке 2 показана блок-схема формирования трех семейств ребер.

Второй подход

Второй подход к моделированию оболочки основан на выделении структурного элемента (рисунок 3а), который впоследствии копируется, образуя сетчатую структуру (рисунок 3б).

Дополнительно вводится понятие плотности реберной структуры. Под плотностью реберной структуры понимается отношение площади поверхности анизотридной оболочки к площади поверхности сплошной цилиндрической оболочки.

Для определения эффективности приведенных выше подходов построения анизотридных сеток был проведен анализ времени, затрачиваемого персональной ЭВМ на построение конечно-элементных сетчатых оболочечных конструкций различной плотности. На рисунке 4 приведе-

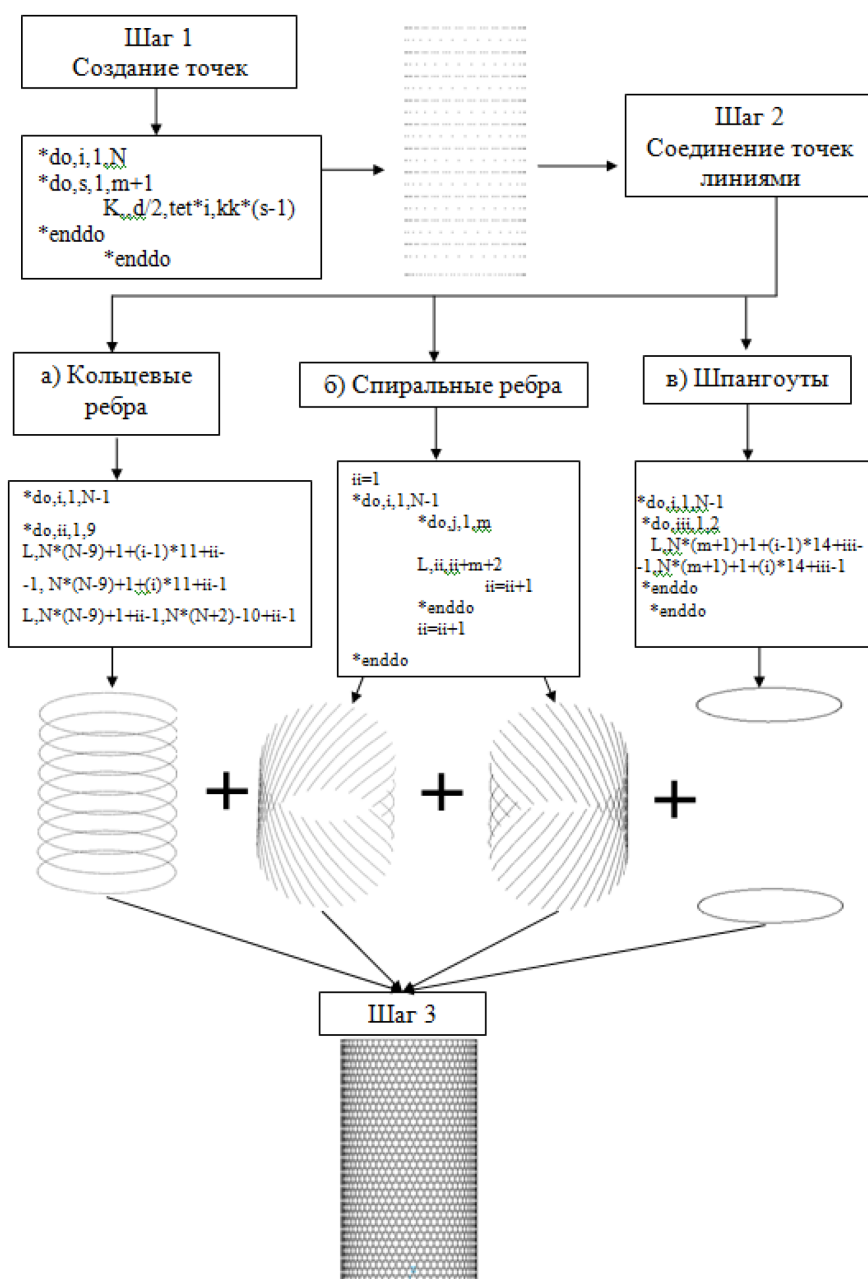
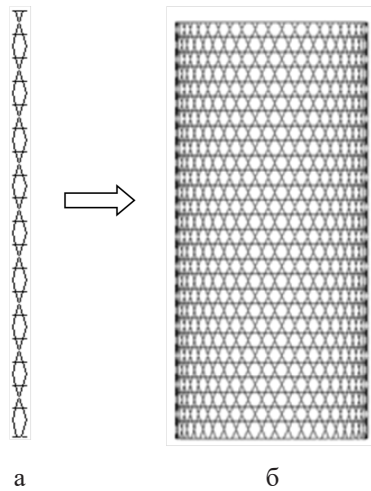


Рисунок 2. Блок-схема построения сетчатой оболочки последовательным заданием семейств ребер



Функции из макроса

```
*do,i,1,2
*do,s,1,m+1
K,,d/2,tet*(i-1),kk*(s-1)
*enddo
*enddo

*do,i,1,m
L,i,i+m+2
L,i+1,i+m+1
*enddo

LGEN,N,all,,,tet,,,1,0
```

Рисунок 3. Схема построения сетчатой оболочки с помощью структурного элемента

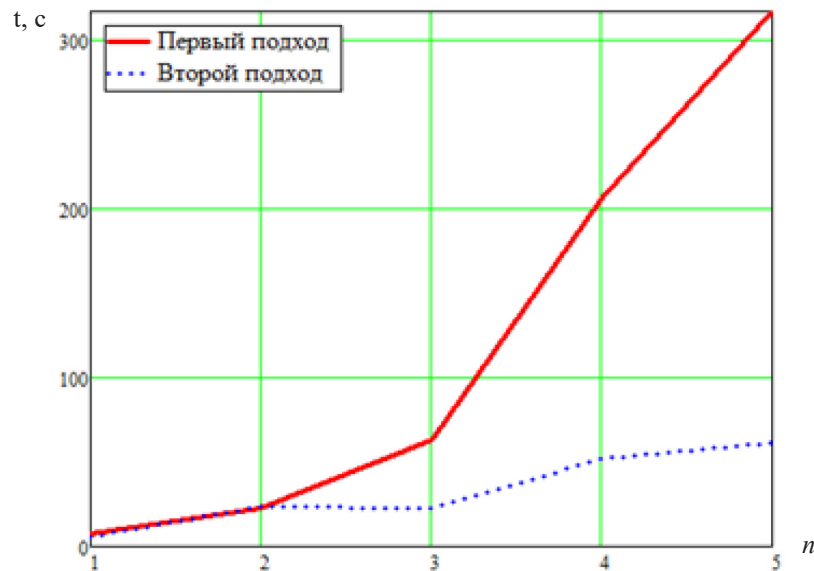


Рисунок 4. Зависимость времени построения t и расчета НДС сетчатых конструкций от плотности реберной структуры оболочек: n – номер конструкции 1–30 пар спиральных ребер; 2–45 пар спиральных ребер; 3–60 пар спиральных ребер; 4–75 пар спиральных ребер; 5–90 пар спиральных ребер

ны зависимости времени построения и расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки в ANSYS Mechanical APDL от плотности реберной конструкции.

Анализ рисунка 4 позволяет нам сделать следующий вывод: второй подход к построению дискретной модели оболочки является более затратным, чем первый. Время увеличивается со сгущением структуры ребер.

В дальнейшем в исследовании применялся подход с тиражированием структурного элемента при моделировании сетчатых оболочек.

При моделировании конструкции было использовано два типа конечных элементов [7–11].

В реберную структуру анизотридной конструкции закладывался балочный двухузловой элемент с шестью степенями свободы на каждый из узлов BEAM4. Нагрузка прикладывалась к конструкции через мнимый узел, расположенный в центре верхнего шпангоута. После построения параметрической конечно-элементной модели оболочки и определения значений геометрических параметров реберной структуры задаются граничные условия и нагрузки (рисунок 5). К мнимому узлу прикладывается крутящий момент, равный 1 тонна-сила на метр. На нижнем шпангоуте в узлах дискретной модели располагаются сферические шарниры.

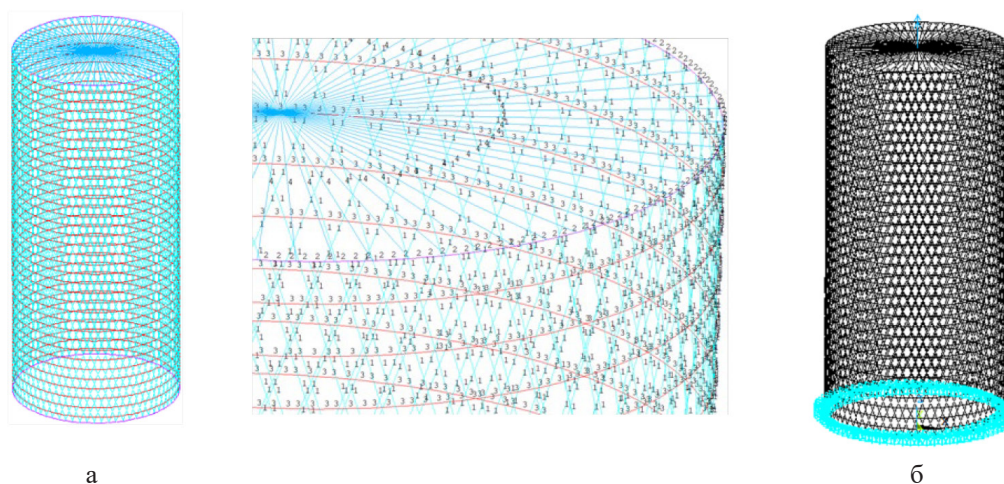


Рисунок 5. Конечно-элементная модель анизотридной оболочки и граничные условия, приложенные к конструкции

3. Исследование исходной конструкции на прочность, устойчивость и жесткость

Прочность исходной конструкции.

Исследовалось НДС [12] цилиндрической сетчатой оболочки при кручении, равному усилию в 1 тонну-силу на метр. Полученные численно поля максимальных продольных напряжений приведены на рисунке 6.

При кручении исходной конструкции в кольцевых ребрах наблюдаются как зоны растяжения, так и зоны сжатия (рисунок 6в); спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются (рисунок 6б).

Устойчивость исходной конструкции. На рисунке 7 приведены пять форм потери устойчивости исходной сетчатой цилиндрической оболочки при кручении [13], рассчитанные в программном комплексе ANSYS.

Приведенные формы потери устойчивости являются волнообразными, изломы ребер не наблюдаются, деформация ребер происходит симметрично. Таким образом, можно предположить, что исходная конструкция способна выдерживать приложенную к ней нагрузку.

Жесткость исходной конструкции

Для исследования жесткости исходной анизотридной конструкции использовались три подхода.

Первый подход. Общеструктурный коэффициент жесткости

Общеструктурный подход основан на положениях теории упругости, механики твердого деформируемого тела и тонкостенных конструкций. Представим конструкцию в виде тонкостенного цилиндра.

Пусть на часть оболочки действует изгибающий момент M . Тогда уравнение равновесия мо-

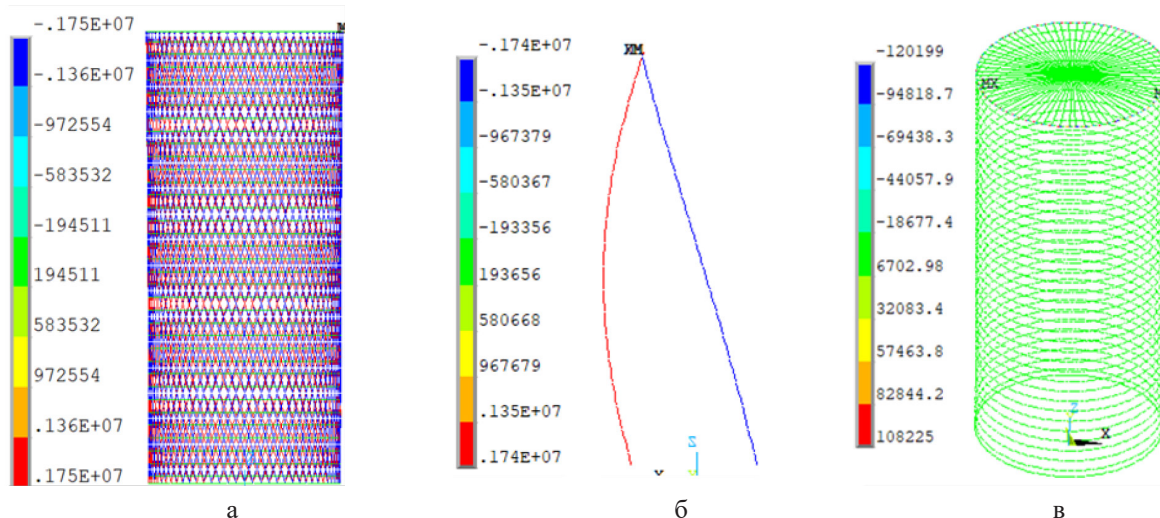


Рисунок 6. НДС исходной конструкции при кручении: а – всей оболочки; б – спиральных ребер; в – кольцевого центрального ребра

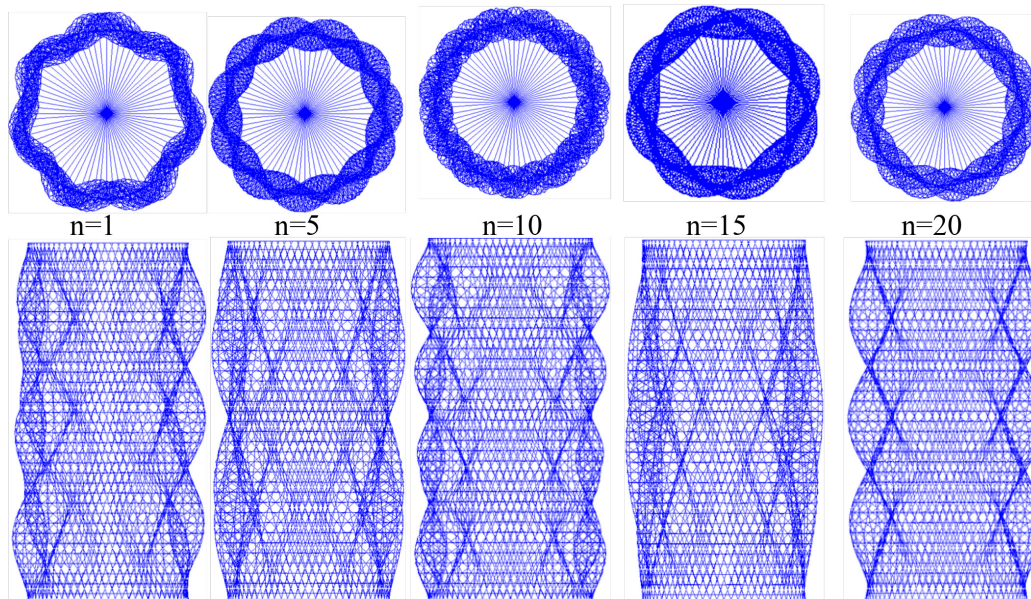


Рисунок 7. Формы потери устойчивости исходной конструкции при кручении:
р – номер формы потери устойчивости

ментов следует из уравнения для функции радиальных напряжений:

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{h}{r} \right) \frac{d^2 w}{dx^2}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала; w – вертикальное отклонение оболочки в направлении оси z , h – толщина стенки цилиндра, r – внешний радиус цилиндра. Определяем значение момента:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int \frac{h^2}{r} \frac{d^2 w}{dx^2} dA. \quad (2)$$

Запишем дифференциальный элемент площади поверхности цилиндра $dA = 2\pi r h d\varphi$. Учет формулы для нахождения радиуса кривизны $\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{1}{r} = \kappa$ позволяет записать формулу (2)

в виде:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int \frac{h^2}{r} \frac{d^2 w}{dx^2} 2\pi r h d\varphi. \quad (3)$$

Запишем выражения зависимости коэффициента жесткости от момента:

$$M = - \frac{E}{1-\nu^2} \int h^3 \frac{1}{r} 2\pi d\varphi. \quad (4)$$

Запишем формулу, описывающую угол поворота φ , который возникает, когда точка перемещается по радиусу R от внутреннего радиуса R_1 к внешнему радиусу R_2 вокруг центра окружности. Формула получается путем определения длины дуги окружности. Если точка перемещается с R_1 на R_2 , то длина дуги будет равна разнице длин дуг, пройденных точкой на радиусах R_2 и R_1 . Угол φ , на который поворачивается точка

при перемещении по дуге длиной L , можно определить, используя соотношение между длиной дуги и углом поворота. Подставляя выражение для длины дуги в это соотношение, разделив обе части на R , мы получаем окончательную формулу (5) для φ . Функцию угла можно записать в виде:

$$\varphi = \frac{MR}{EJ}. \quad (5)$$

Рассмотрим радиус как функцию, зависящую от угла. Подставляем значение момента в формулу и, выполняя преобразования, получаем:

$$k = \frac{Eh^3}{1-\nu^2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right). \quad (6)$$

Запишем формулу для нахождения модуля сдвига и выразим модуль упругости, с учетом модуля упругости запишем:

$$k = \frac{2Gh^3}{1-\nu} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7)$$

Второй подход. Оценка жесткости по семействам ребер

Рассмотрим задачу о кручении оболочки, которое осуществляется вокруг оси z . Перейдем от кручения всей оболочки к кручению элементов по семействам жесткости. Каждое ребро как структурный элемент сетки можно представить в виде набора балок с прямоугольным сечением. Для определения коэффициента жесткости балки используются соотношения из первого подхода.

$$\varphi = \frac{M_z l}{GJ_p}. \quad (8)$$

Поскольку коэффициент жесткости имеет вид $k = M_z/\varphi$, то коэффициент жесткости для каждого семейства ребер может быть рассчитан по следующей формуле:

$$k_i = \frac{GJ_p}{l_i}, \quad (9)$$

где G – модуль сдвига материала; J_p – полярный момент инерции поперечного сечения балки; l_i – длина одной балки семейства ребер.

Третий подход. Оценка жесткости по направлению деформирования

Представляем каждое семейство ребер анизотропной конструкции в виде набора балок. Когда оболочка испытывает крутящий момент, в балках возникает момент сил. Вводим предположение, что структура ребер взаимосвязана, поэтому когда деформируется одно ребро, деформируются и связанные с ним соседние ребра.

Чтобы произвести аналитическую оценку коэффициента жесткости оболочки, запишем формулу момента сил вокруг оси z , используя формулировку закона Гука при кручении $\tau = G\gamma = \rho G \frac{d\varphi}{dt}$:

$$M_z = G \frac{d\varphi}{dt} \int \rho^2 dA. \quad (10)$$

Учтем J_p – полярный момент инерции поперечного сечения балки:

$$M_z = G\theta J_p. \quad (11)$$

Затем вычисляется угол поворота по формуле:

$$\varphi = \int_0^l \frac{M_z}{GJ_p} dz, \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{M_z l}{GJ_p}. \quad (13)$$

Поскольку единицей измерения коэффициента жесткости на кручение является Н·м/рад, получаем:

$$k_i = \frac{M_{zi}}{\varphi_i}, i = x, y, z. \quad (14)$$

Коэффициент жесткости ребра может быть рассчитан по другой формуле с учетом перемещений:

$$k_i = \frac{M_{zi}}{u_i}, i = x, y, z. \quad (15)$$

4. Исследование прочности, устойчивости и жесткости конструкций с учетом плотности реберной структуры

Проведем многофакторный вычислительный эксперимент. Первым фактором вычислительного эксперимента выступает количество пар спиральных ребер (N), значения которых изменяются от 30 до 90 пар ребер с шагом в 15 пар. Вторым фактором является изменение угла наклона спирального ребра к образующей (α), значение фактора изменяется с 14° до 24° с шагом в 2° . Матрица вычислительного эксперимента приведена на рисунке 8.

Для проведения вычислительного эксперимента необходимо рассчитать толщины реберных структур с учетом значений вариационных параметров и постоянной массы конструкций. Для этого разработан алгоритм расчета толщины сетчатой структуры, который был реализован в математической среде Mathcad 14.

Следующим шагом выступало моделирование сетчатых конструкций с различной плотностью ребер. Результаты моделирования показаны на рисунке 9.

Прочность конструкций

Численно рассчитывалось НДС анизотропных структур [14–17] при кручении. Зависимости максимальных продольных напряжений в ребрах конструкций от факторов приведены на рисунке 10.

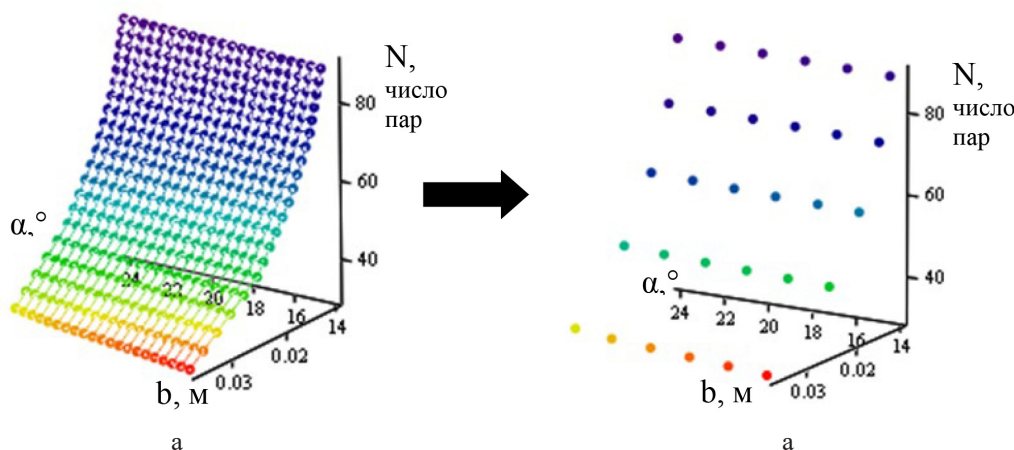


Рисунок 8. Матрица вычислительного эксперимента: а – полная матрица всех возможных вариантов расчета; б – выбранные варианты для вычислительных расчетов

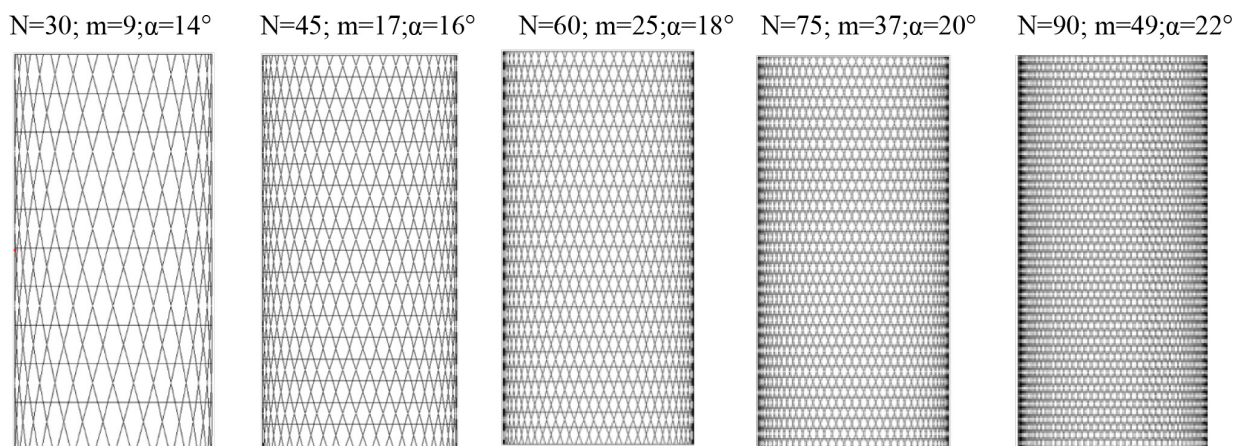


Рисунок 9. Анизотридные структуры многофакторного вычислительного эксперимента:
m – число кольцевых ребер

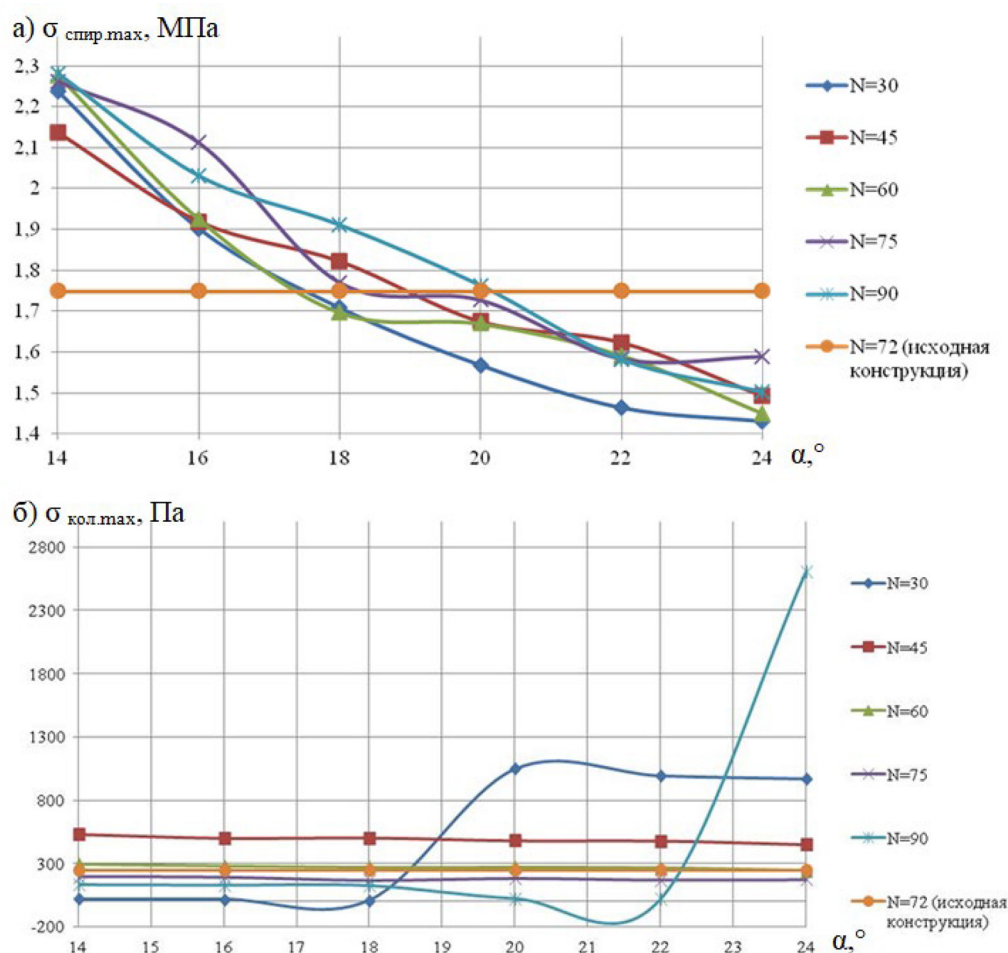


Рисунок 10. Максимальные напряжения ($\sigma_{\max}$) в ребрах конструкций:
а – в спиральных ребрах; б – в кольцевых ребрах

Анализ максимальных напряжений $\sigma_{\max}$ показал, что предел прочности в 750 МПа при кручении конструкции не достигнут. А в спиральных ребрах наблюдается тенденция к снижению значений максимальных напряжений (рисунок 10а). Максимальные продольные напряжения в ребрах нелинейно зависят от угла наклона α . С увеличением плотности сетчатой структуры поверхность

отклика максимальных продольных напряжений в спиральных ребрах оболочек становится гладкой, а в кольцевых ребрах – криволинейной поверхностью [18–20].

Устойчивость конструкций

В конечно-элементном комплексе ANSYS проведены расчеты на устойчивость анизотридных

оболочек различной плотности. К конструкциям была приложена нагрузка в виде крутящего момента, равного 1 Н·м.

По результатам расчета определены значения критических моментов и форма потери устойчивости оболочек. На рисунке 11 представлены формы потери устойчивости оболочек различной плотности.

Следует отметить, что анизотридные структуры с номерами от 3 до 18 и 21, 23, 24 более устойчивы, чем исходная оболочка.

Жесткость конструкций

Исследование жесткости проводилось для анизотридных конструкций различной плотности реберной структуры с использованием трех

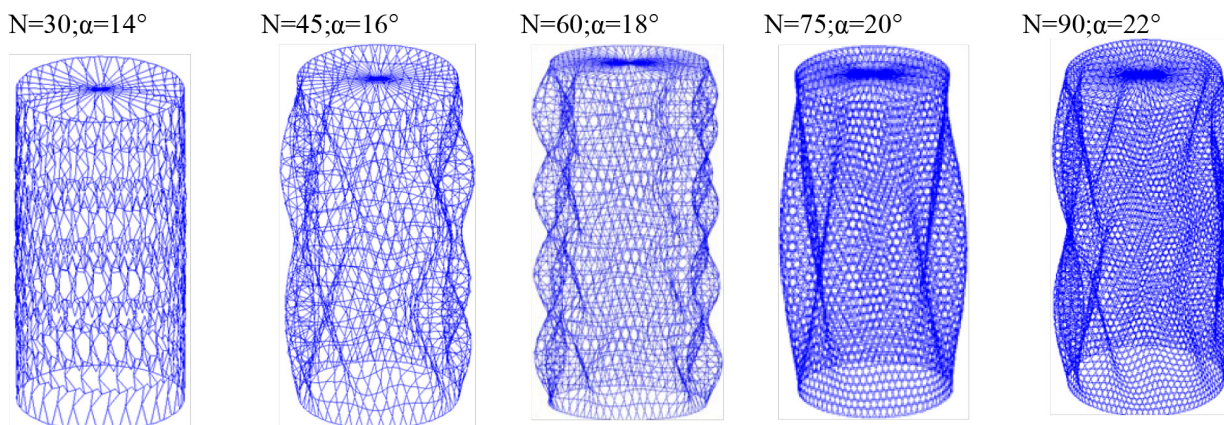


Рисунок 11. Первые формы потери устойчивости анизотридных структур с различной плотностью ребер

Анализ форм потери устойчивости (рисунок 11) позволяет сделать вывод, что конструкции с 30 парами спиральных ребер не выдерживают приложенной к ним нагрузки. С увеличением плотности реберной структуры зоны потери устойчивости оболочек локализуются, становясь более выпуклыми. Это связано с тем, что пересечения спиральных ребер с наклонами влево и вправо симметричны. Учитывая, что масса оболочек фиксирована, толщина реберных структур конструкций уменьшается с увеличением плотности.

На рисунке 12 представлена зависимость значений критических моментов ($M_{кр}$) от номера модели сетчатой конструкции. Параметры реберных структур приведены в таблице 4.

На рисунке 12 сплошной линией показано критическое значение исходной конструкции.

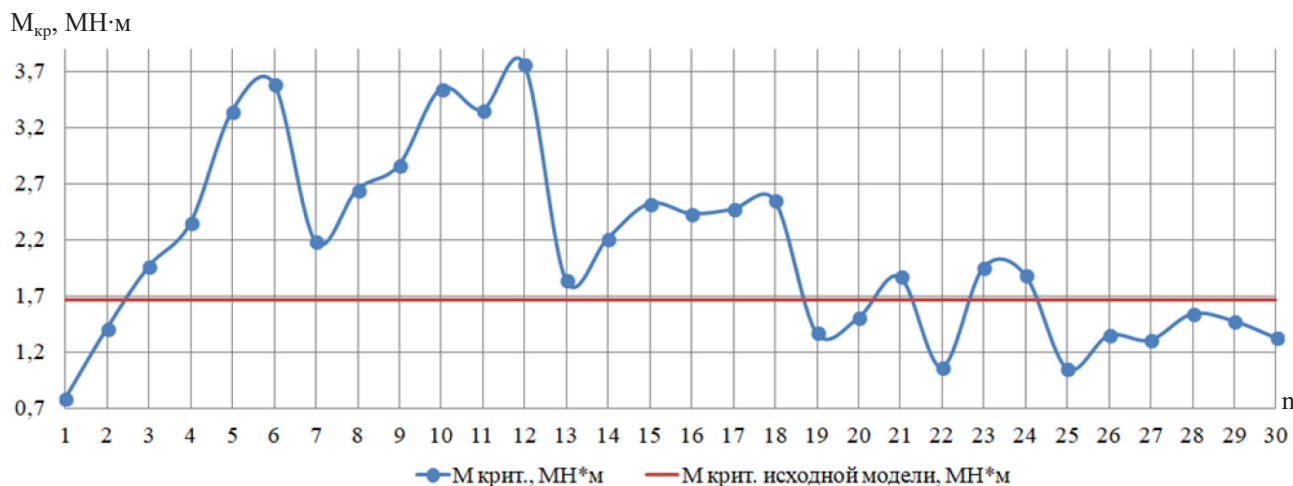


Рисунок 12. Значения критических моментов в зависимости от плотности реберной конструкции

Таблица 4

Изменяемые параметры конструкций в зависимости от номера

№ конструкции	Число спиральных ребер N, пар	Угол спирального ребра к образующей α , °	Толщина реберной структуры b, м
1	30	14	0.0366
2		16	0.0356
3		18	0.0346
4		20	0.0335
5		22	0.0325
6		24	0.0310
7	45	14	0.0242
8		16	0.0237
9		18	0.0231
10		20	0.0226
11		22	0.220
12		24	0.0210
13	60	14	0.0183
14		16	0.0177
15		18	0.0174
16		20	0.0168
17		22	0.0164
18		24	0.0159
19	75	14	0.0143
20		16	0.0139
21		18	0.0135
22		20	0.0132
23		22	0.0127
24		24	0.0124
25	90	14	0.0122
26		16	0.0119
27		18	0.0115
28		20	0.0113
29		22	0.0109
30		24	0.0107

можно говорить об идентичности первого и второго подходов к расчету коэффициента жесткости сетчатых цилиндрических оболочек.

По результатам исследования полученных конструкций с различной плотностью реберной структуры выделяются самые прочные, жесткие и устойчивые конструкции относительно исходной анизотридной оболочки.

Сведем полученные результаты численного расчета в таблицы 5–7, где 0 обозначает сетчатую структуру, у которой значения ниже, чем у исходной конструкции, за 1 приняты значения, которые выше, чем у исходной конструкции. В случае с таблицей 5 за 1 отмечены конструкции, которые не превышают предел прочности.

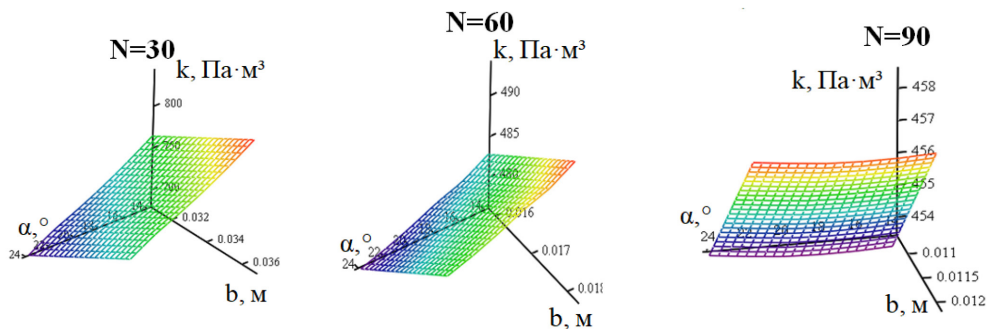
Таблица 5

Оценка напряженного состояния

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1

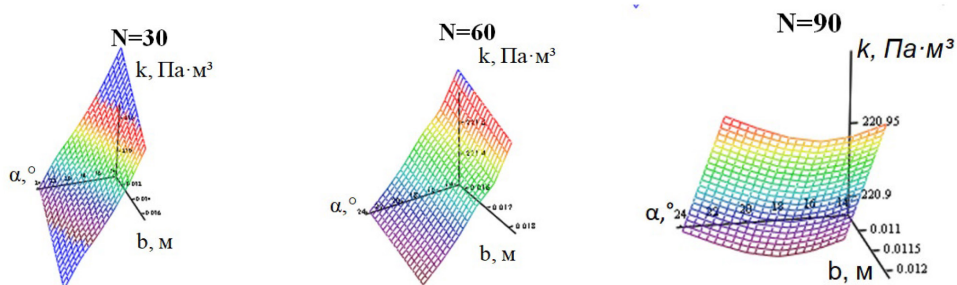
Первый подход

Общеструктурный коэффициент жесткости



Второй подход

Оценка жесткости по семействам ребер



Третий подход

Оценка жесткости по направлению деформирования

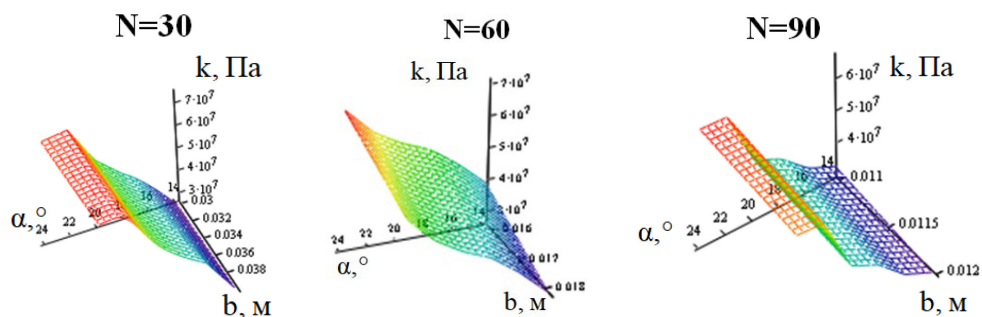


Рисунок 13. Поверхности коэффициента жесткости от угла наклона спиральных ребер (α_i) и толщины реберной структуры (b_i)

Таблица 6

Оценка устойчивости

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	0	1	1	0	0
16	0	1	1	0	0
18	1	1	1	1	0
20	1	1	1	0	0
22	1	1	1	1	0
24	1	1	1	1	0

Таблица 7

Оценка жесткости

$\alpha \backslash N$	30	45	60	75	90
14	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
20	0	0	1	0	0
22	0	0	1	0	0
24	0	0	0	0	0

Прочными, устойчивыми и жесткими относительно исходной конструкции оказались оболочки с 60 парами спиральных ребер и углами наклона спирального ребра к образующей в 20 и 22°. Внесем в их конструктив изменения, добавив вертикальный вырез.

5. Анизогридная конструкция с вертикальными вырезами

На рисунке 14 изображена конструкция с вертикальными вырезами.

Для конструкции с вертикальными вырезами вводится ограничение по массе. Масса конструкции с вертикальными вырезами должна быть равна 165 кг. Две части сетчатой структуры связаны между собой замками, на нижнем шпангоуте рас-

полагаются сферические шарниры, а к верхнему шпангоуту прикладывается крутящий момент (рисунок 156).

Моделирование проводилось в ANSYS Mechanical APDL с использованием выделения структурного элемента и последующего его тиражирования подхода.

Исследование на прочность

Напряженно-деформированное состояние конструкции при кручении, равном 1 тонна-сила на метр, показано на рисунке 16.

Определим прочность конструкции:

$$\sigma^{max} \leq [\sigma_{\text{кручение}}],$$

$$5.1 \text{ МПа} < 750 \text{ МПа}.$$

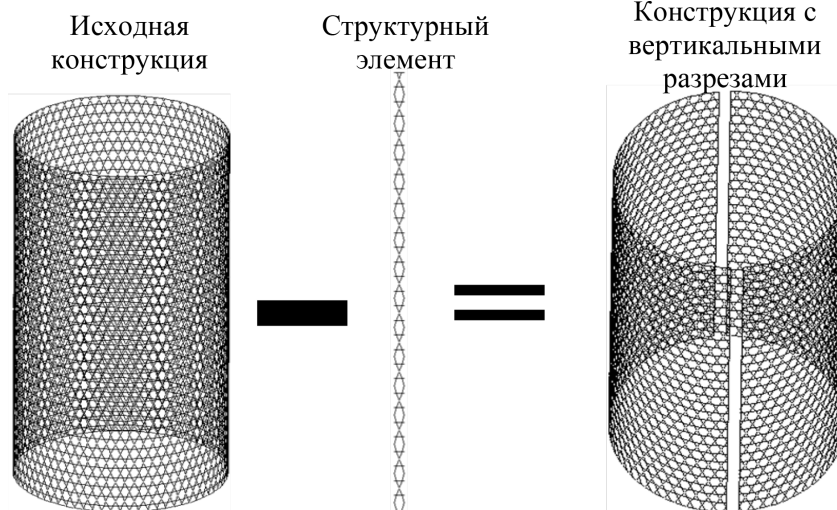


Рисунок 14. Сетчатая конструкция с вертикальными вырезами

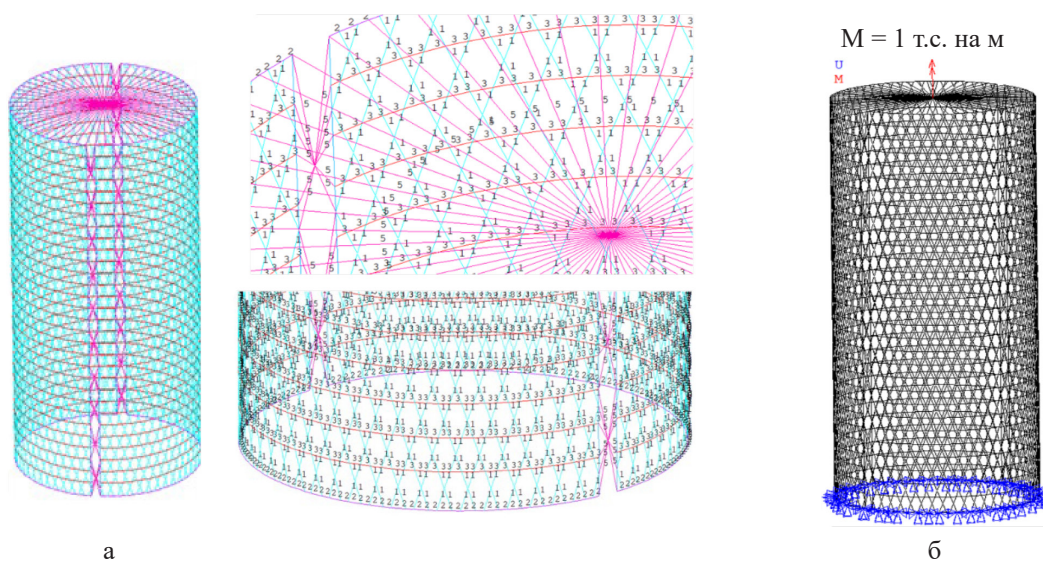


Рисунок 15. Конечно-элементная модель анизогридной оболочки и граничные условия, примененные к конструкции: 1 – спиральные ребра (BEAM4); 2 – шпангоуты (BEAM4); 3 – кольцевые ребра (BEAM4); 4 – продольные ребра (BEAM4); 5 – жесткие связи (MPC 184)

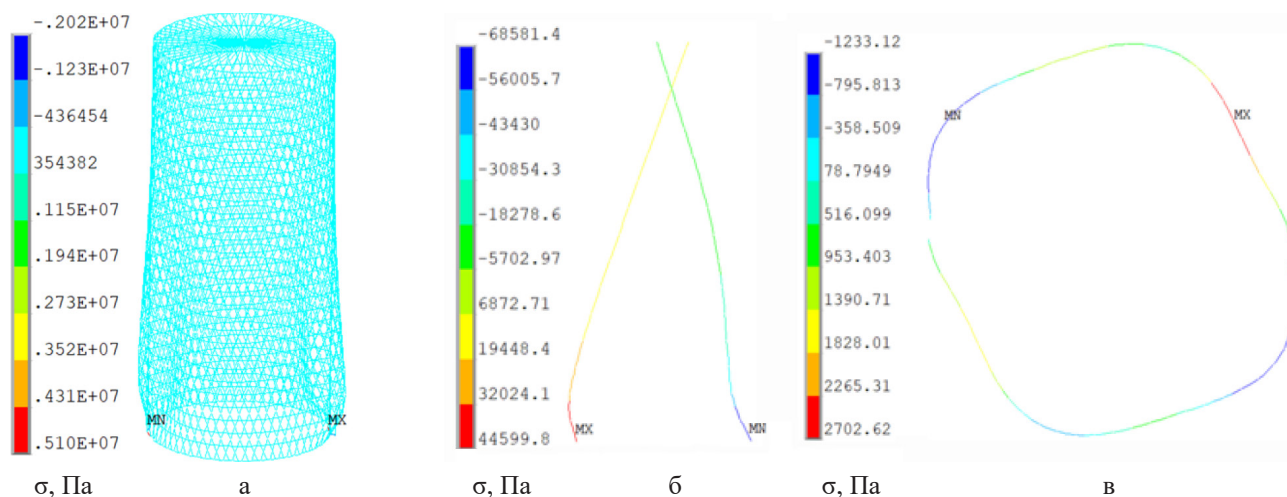


Рисунок 16. Поля напряжений конструкции с вертикальными 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 20° при кручении: а – поля напряжений всей конструкции; б – спиральные ребра; в – центральное кольцевое ребро

Исследуем конструкцию с углом наклона 22° на прочность при кручении.

$$\sigma^{max} \leq [\sigma_{\text{кручение}}],$$

$$4.35 \text{ МПа} < 750 \text{ МПа}.$$

Напряжения конструкции не превышают предельных значений, следовательно, она не ломается под крутящим моментом 1 тонна-сила на метр.

Исследование на устойчивость

Исследуем устойчивость конструкций данного типа (рисунки 17, 18) при кручении.

Все критические значения силы и моментов при кручении представим в таблице 8.

Локальные зоны потери устойчивости в конструкции с вертикальными вырезами располагаются вдоль продольных ребер в нижней части

конструкции. Слом продольных ребер наблюдается на первых формах потери устойчивости при кручении, разрушение элементов реберной структуры происходит на высших формах потери устойчивости.

Выводы

В ходе исследования можно сделать следующие выводы.

1. Для анизотридных структур с регулярной сеткой в Ansys Mechanical APDL может быть реализован подход к построению дискретной модели структуры, как с использованием циклов для семейств структурных элементов, так и с выделением структурного элемента при дальнейшем копировании. Второй подход является более эффективным при построении расчетных моделей сетчатых оболочек с большим количеством кон-

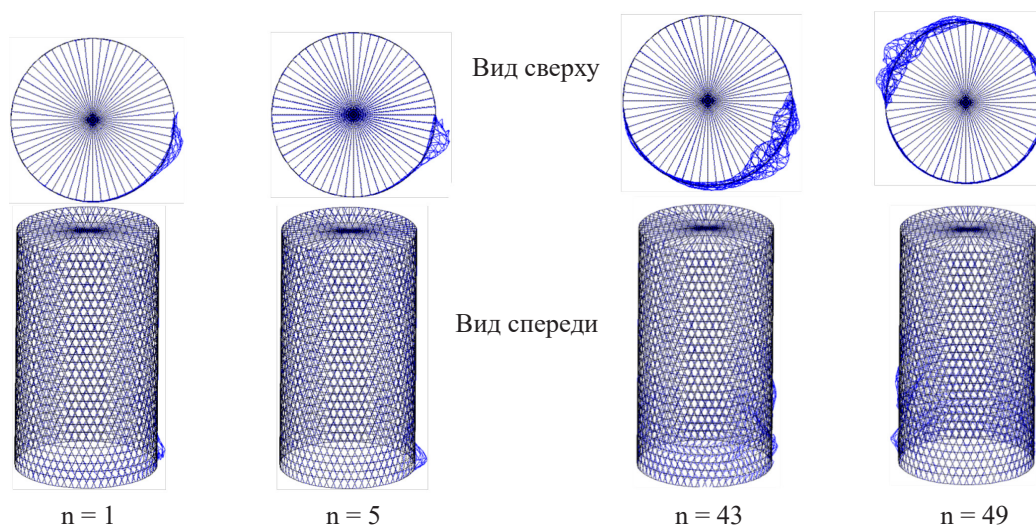


Рисунок 17. Формы потери устойчивости при кручении конструкции с вертикальными разрезами, 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 20° (n – номер формы потери устойчивости)

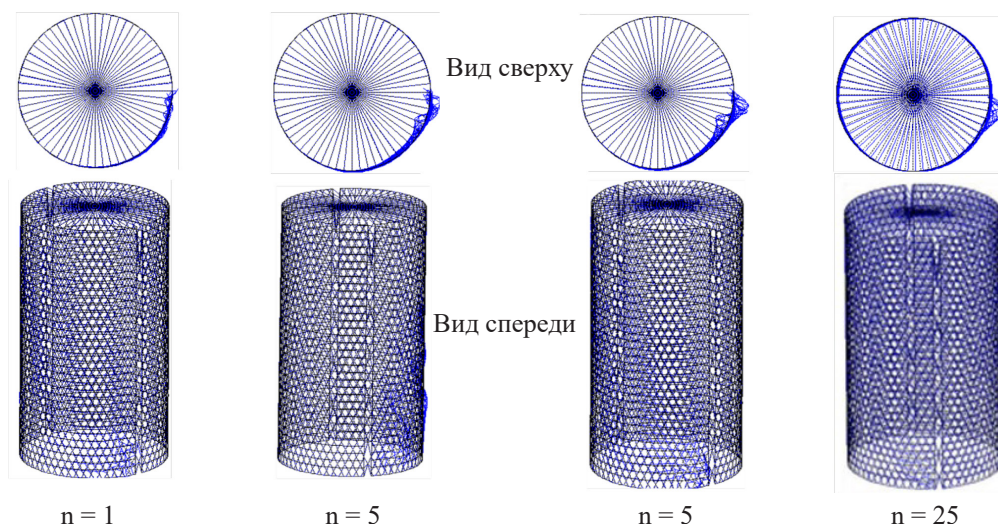


Рисунок 18. Формы потери устойчивости при кручении конструкции с вертикальными разрезами, 60 парами спиральных ребер и углом наклона спирального ребра к образующей 22° (n – номер формы потери устойчивости)

Таблица 8

Таблица критических моментов при кручении конструкции

М _{крит.} , Н·м		
№ формы	N=60; $\alpha=20^\circ$	N=60; $\alpha=22^\circ$
1	-209828770	-327297870

структивных элементов и плотностью реберной структуры.

2. При кручении исходной конструкции в кольцевых ребрах наблюдаются как зоны растяжения, так и зоны сжатия; спиральные ребра с наклоном влево сжимаются, с наклоном вправо растягиваются.

Исследование устойчивости исходной конструкции позволяет предположить, что сетчатая структура способна выдерживать приложенную к ней нагрузку. По приведенным формам потери устойчивости изломы ребер не наблюдаются, деформация ребер происходит симметрично.

3. Анализ максимальных напряжений в ребрах конструкций показал, что предел прочности в 750 МПа при кручении конструкции не достигнут. А в спиральных ребрах наблюдается тенденция к снижению значений максимальных напряжений. Максимальные продольные напряжения в ребрах нелинейно зависят от угла наклона α . С увеличением плотности сетчатой структуры поверхность отклика максимальных продольных напряжений в спиральных ребрах оболочек становится гладкой, а в кольцевых ребрах – криволинейной поверхностью.

По полученным значениям критических моментов конструкций можно определить сетчатые структуры, которые способны выдерживать нагрузку большую, чем исходная конструкция. Также наблюдается нелинейность значений кри-

тических моментов с увеличением плотности реберной структуры.

Анализ полученных значений при расчете коэффициентов жесткости поверхностей позволяет выделить следующее: с увеличением плотности реберной структуры поверхности коэффициента жесткости становятся криволинейными. Нелинейность в значения коэффициента жесткости оболочки вносит угол наклона спирального ребра к образующей.

Поверхности отклика коэффициента жесткости оболочки в первом и втором подходах практически идентичны по форме. Таким образом, можно говорить об идентичности первого и второго подходов к расчету коэффициента жесткости сетчатых цилиндрических оболочек.

По результатам исследования полученных конструкций с различной плотностью реберной структуры отбирается самая прочная, жесткая и устойчивая конструкция относительно исходной анизотридной оболочки.

4. Оценивая прочность, жесткость и устойчивость реберных структур относительно исходной анизотридной оболочки, выделяются две самые прочные, жесткие и устойчивые конструкции. В выделенные конструкции вносятся изменения в конструктив оболочек, добавляются вертикальные вырезы. В дальнейшем планируется исследование трансформируемых конструкций в безвоздушном пространстве.

Список литературы

- [1] Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
- [2] Васильев В. В., Разин А. Ф., Азаров А. В. Композитные сетчатые конструкции – проектирование, расчет и изготовление. М: Инновационное машиностроение, 2023. 488 с.: ил. ISBN 978–5–907523–57–9.
- [3] Жгутов В. М. Компьютерное моделирование прочности и устойчивости упругих ребристых оболочек // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Международная конференция (RELMAS'2008): Труды международной конференции. Санкт-Петербург, 17–20 июля 2008 года, СПбГПУ. СПб., 2008. С. 122–128.
- [4] Васильев В. В., Разин А. Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 2006.
- [5] Карпов Владимир Васильевич, Семенов Алексей Александрович, Холод Дарина Вячеславовна. Исследование прочности пологих ортотропных оболочек из углепластика // Труды МАИ. 2014. № 76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie>
- [6] Ковальчук Л. М. О подходах к построению параметрической дискретной модели сетчатой цилиндрической оболочки в конечно-элементном пакете ANSYS / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. Текст: электронный // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст. Новокузнецк: Изд-во КГПИ КемГУ, 2023. С. 52–57. 8 CD-ROMs.
- [7] Петров Г. И., Смирнов А. Н., Халилов С. И. Численное исследование анизотропных конструкций методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. № 12(2). С. 128–137.
- [8] Белов В. В., Горбунов А. А., Красильников Н. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций // Вестник Московского авиационного института. 2018. № 25(2). С. 103–111.
- [9] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной конструкции при статическом нагружении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. DOI 10.1134/S 1063784223700081 // Техническая физика. 2023. № 68(10). С. 328–335.
- [10] Лопатин А. В., Барыльникова Е. А. Конечно-элементное моделирование сетчатых цилиндрических оболочек // Решетневские чтения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 22.
- [11] Логинов М. А., Бендиков А. С., Коваленко И. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций в условиях динамических нагрузок // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение, 2017. № 2. С. 112–123.
- [12] Белов В. В., Горбунов А. А., Красильников Н. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций // Вестник Московского авиационного института. 2018. № 25(2). С. 103–111.
- [13] Ковальчук Л. М. Влияние реберной структуры на устойчивость сетчатой цилиндрической оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева. // Интеллектуальный потенциал Сибири: сб. науч. тр. 30 регион. науч. студен. конф, Новосибирск, 23–27 мая 2022 г. в 4 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Ч. 4. С. 396–400. ISBN 978–5–7782–4756–7.
- [14] Петров Г. И., Смирнов А. Н., Халилов С. И. Численное исследование анизотропных конструкций методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. № 12(2). С. 128–137.
- [15] Логинов М. А., Бендиков А. С., Коваленко И. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных конструкций в условиях динамических нагрузок // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение, 2017. № 2. С. 112–123.
- [16] Лопатин А. В., Буров А. А., Хахленкова А. А. Анализ деформирования цилиндрического решетчатого корпуса космического аппарата в зоне крепления бака высокого давления // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. Красноярск: Физический институт и издательство IOP Publishing Limited, 2021. С. 1–5.
- [17] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния сетчатой композитной оболочки без обшивки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 7–10 сент. 2022 г. Новосибирск: СибНИИ им. С. А. Чаплыгина, 2022. С. 37–39. ISBN 978–5–6043216–4–5.
- [18] Ковальчук Л. М. Анализ деформирования ребер сетчатых цилиндрических оболочек при кручении = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 23 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию основания конструкторского бюро «Туполев», Новосибирск, 20–22 апр. 2022 г. в 4 т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Т. 1. С. 43–47. 25 экз. ISBN 978–5–7782–4693–5.

- [19] Ковальчук Л. М. Исследование напряженного состояния и оценка устойчивости анизогридной цилиндрической оболочки при изменении параметров реберной структуры при кручении = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева, С. В. Шайдуров. // Решетневские чтения: материалы 26 междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-косм. систем М. Ф. Решетнева, Красноярск, 9–12 нояб. 2022 г. в 2 ч. Красноярск: Изд-во СибГУ, 2022. Ч. 1. С. 104–106. ISBN 978–5–86433–924–4. 1 CD-ROM.
- [20] Ковальчук Л. М. Конечно-элементный расчёт на прочность и устойчивость анизогридной оболочки при кручении / Л. М. Ковальчук, Т. В. Бурнышева; науч. рук. Т. В. Бурнышева // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. 16 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г. в 11 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. Ч. 11. С. 30–34. 100 экз. ISBN 978–5–7782–4872–4

INVESTIGATION OF ANISOGRID CYLINDRICAL SHELLS FOR STRENGTH, STABILITY AND TORSIONAL RIGIDITY

L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva

*Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, The Russian Federation*

The article discusses anisogrid mesh shell structures made of composite materials. The purpose of the work is to investigate anisogrid shells for strength, stability and torsional stiffness. Based on the developed parametric finite element model of the initial design, a multifactorial computational experiment was conducted. The models were built in the ANSYS software package. Two approaches to modeling were considered: the construction of a shell by sequentially specifying families of edges and the allocation of a structural element of the shell with subsequent copying along the circumference. The least time-consuming and resource-intensive approach for a personal computer has been chosen. The analysis of the stress state of the initial mesh structure during torsion showed: spiral ribs with a slope to the left are compressed, with a slope to the right they stretch, annular ribs work for tension and compression. According to the results of the computational experiment, the dependences of the maximum longitudinal stresses in the ribs on the change in the angle of inclination of the spiral rib to the generatrix, the number of pairs of spiral ribs and the thickness of the rib structure were determined. The strength, stability and rigidity of structures under torsion were studied, taking into account changes in the parameters of the rib structure. As a result of the study, two of the most rigid, durable and stable structures were selected, in which two vertical structural elements were excluded. Thus, a new type of anisogrid cylindrical structure containing vertical sections was studied for strength, stability and rigidity.

Keywords: anisogrid structures, strength, stability and rigidity, ANSYS, multifactorial computational experiment.

References

- [1] Vasiliev V. V. Mechanics of structures made of composite materials [Text] / V. V. Vasiliev. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 272 p.
- [2] Vasiliev V. V., Razin A. F., Azarov A. V. Composite mesh structures – design, calculation and manufacture. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2023. 488 p.: ill. ISBN 978–5–907523–57–9.
- [3] Zhgutov V. M. Computer modeling of strength and stability of elastic ribbed shells // “Scientific and technical problems of forecasting reliability and durability of structures and methods of their solution”: International Conference

- (RELMAS'2008): Proceedings of the international conference. St. Petersburg, July 17–20, 2008, SPbGPU. SPb., 2008. pp. 122–128.
- [4] Vasiliev V. V., Razin A. F. Composite mesh beam elements for aircraft structures // Issues of defense technology. Ser. 15. Composite non-metallic materials in mechanical engineering. 2006.
 - [5] Karpov Vladimir Vasilyevich, Semenov Alexey Alexandrovich, Kholod Darina Vyacheslavovna A study of the strength of flat orthotropic shells made of carbon fiber // Proceedings of MAI. 2014. No.76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie> –
 - [6] Kovalchuk L. M. On approaches to the construction of a parametric discrete model of a mesh cylindrical shell in a finite element package ANSYS / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Boundary value problems and mathematical modeling: topic. collection of scientific articles. Novokuznetsk: Publishing house of KSPI KemGU, 2023. pp. 52–57. 8 CD-ROMs.
 - [7] Petrov G. I., Smirnov A. N., Khalilov S. I. Numerical investigation of anisogrid structures by the finite element method // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2016. № 12(2). pp. 128–137.
 - [8] Belov V. V., Gorbunov A. A., Krasilnikov N. I. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2018. № 25(2). pp. 103–111.
 - [9] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva. DOI 10.1134/S 1063784223700081 // Technical Physics. 2023. Vol. 68, iss. 10. pp. 328–335.
 - [10] Lopatin A. V., Barylnikova E. A. Finite element modeling of mesh cylindrical shells // Reshetnev readings: materials of the International Scientific and Practical Conference / Sib. gos. aerospace. un-T. Krasnoyarsk, 2010. p. 22.
 - [11] Loginov M. A., Bendikov A. S., Kovalenko I. A. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures under dynamic loads // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2017. № 2. pp. 112–123.
 - [12] Belov V. V., Gorbunov A. A., Krasilnikov N. I. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2018. № 25(2). pp. 103–111.
 - [13] Kovalchuk L. M. The influence of the rib structure on the stability of the reticulated cylindrical shell during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Intellectual potential of Siberia: collection of scientific tr. 30 region. scientific student. Conf, Novosibirsk, May 23–27, 2022: at 4 a.m. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2022. Part 4. pp. 396–400. ISBN 978–5–7782–4756–7.
 - [14] Petrov G. I., Smirnov A. N., Khalilov S. I. Numerical investigation of anisogrid structures by the finite element method // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2016. № 12(2). pp. 128–137.
 - [15] Loginov M. A., Bendikov A. S., Kovalenko I. A. Numerical modeling of the stress-strain state of anisogrid structures under dynamic loads // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering. 2017. № 2. pp. 112–123.
 - [16] Lopatin A. V., Burov A. A., Khakhlenkova A. A. Deformation analysis of cylindrical lattice body of spacecraft in zone of high-pressure tank attachment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2021. pp. 1–5.
 - [17] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state of a mesh composite shell without sheathing during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Problems of strength of aircraft structures and materials: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, September 7–10, 2022 Novosibirsk: SibNIA named after S. A. Chaplygin, 2022. pp. 37–39. ISBN 978–5–6043216–4–5.
 - [18] Kovalchuk L. M. Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion = Analysis of deformation of the edges of mesh cylindrical shells during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva // Science. Industry. Defense: tr. 23 All-Russian scientific and Technical conf., dedicated. to the 100th anniversary of the foundation of the Tupolev Design Bureau, Novosibirsk, April 20–22, 2022: in 4 volumes. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2022. Vol. 1. pp. 43–47. 25 copies. ISBN 978–5–7782–4693–5.
 - [19] Kovalchuk L. M. Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion = Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when the parameters of the rib structure change during torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva, S. V. Shaidurov // Reshetnev readings: materials of 26 international scientific and practical conferences, dedicated to the memory of the general designer of rocket-space. M. F. Reshetnev's Systems, Krasnoyarsk, November 9–12, 2022: at 2 a.m. Krasnoyarsk: SibGU Publishing House, 2022. Part 1. pp. 104–106. ISBN 978–5–86433–924–4. 1 CD-ROM.
 - [20] Kovalchuk L. M. Finite element calculation for the strength and stability of an anisogrid shell under torsion / L. M. Kovalchuk, T. V. Burnysheva; scientific hand of T. V. Burnysheva // Science. Technologies. Innovations: sat. scientific tr. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5–8 Dec. 2022: at 11 a.m. Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2022. Part 11. pp. 30–34. 100 copies. ISBN 978–5–7782–4872–4.

Сведения об авторах

Ковальчук Лидия Максимовна – ассистент, лаборант кафедры «Прочность летательных аппаратов», аспирант второго года обучения по специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», ФЛА, НГТУ. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела. Окончила факультет летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета в 2023 году, направление «Прикладная механика», профиль «Динамика и прочность машин», магистр.

Бурнышева Татьяна Витальевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов», ФЛА, НГТУ. Окончила математический факультет Кемеровского государственного университета в 1995 году. Область научных интересов: космическая и авиационная техника, механика деформируемого твёрдого тела, численное моделирование, математическое моделирование, расчеты конструкций на прочность.