

УДК 539.3

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481

Для цитирования: Нестеров В. А., Габидулин С. В. Исследование жесткости композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 464–481. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481.

For citation: Nesterov V. A., Gabidulin S. V. [Design of a flexible spoke for a spacecraft umbrella antenna]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 464–481. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-464-481.

Исследование жесткости композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата

В. А. Нестеров*, С. В. Габидулин

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

Антенны зонтичного типа часто применяются в современных космических аппаратах. Их преимущество состоит в возможности компактного размещения во время вывода на орбиту. При этом они должны обеспечивать необходимую стабильность в развернутом виде в космосе. Жесткость антенны главным образом зависит от жесткости спиц, проектирование которых выливается в комплексную задачу научного поиска. Антенны космических аппаратов должны обеспечивать функциональную работоспособность и в то же время обладать минимальной массой. Кардинальное направление совершенствования космических антенн состоит в применении новых конструкционных материалов. Композиты отличаются высокими удельными механическими свойствами, что позволяют создавать конструкции с высокой степенью весового совершенства. Проблема связана с наличием большого количества проектных параметров, сложным образом влияющих на работоспособность композитных конструкций. Определение оптимального сочетания этих параметров для каждой конструкции и конкретного расчетного случая приводит к необходимости проведения комплексного численного эксперимента, базирующегося на специализированных алгоритмах, методиках и программах.

Целью исследования является проектирование композитной спицы зонтичной антенны космического аппарата, обеспечивающей требуемую несущую способность и максимальную жесткость при заданном ограничении массы конструкции. Оно предполагает разработку конечно-элементных моделей композитной спицы различного исполнения, в которых была бы заложена возможность оптимизации проектных параметров по критериям прочности, несущей способности и жесткости. В результате численного эксперимента определяются способы повышения несущей способности и жесткости разворачиваемой антенны космического аппарата.

Ключевые слова: спица зонтичной антенны, композиционные материалы, МКЭ.

Design of a flexible spoke for a spacecraft umbrella antenna

V. A. Nesterov*, S. V. Gabidulin

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

*E-mail: nesterov@mail.sibsau.ru

Umbrella type antennas are often used in modern spacecraft. Their advantage is the possibility of compact placement during orbital insertion. At the same time, they must provide the necessary stability when

deployed in space. Antenna stiffness mainly depends on the stiffness of the spokes, the design of which is a complex task of scientific research. Spacecraft antennas must provide functional performance and, at the same time, have a minimum mass. The cardinal direction of improvement of space antennas consists in application of new structural materials. Composites are characterized by high specific mechanical properties, which allow to create structures with a high degree of weight perfection. The problem is related to the presence of a large number of design parameters that affect the performance of composite structures in a complex way. Determining the optimal combination of these parameters for each structure and a particular design case leads to the need for a complex numerical experiment based on specialized algorithms, methods and programs.

The aim of the study is to design a composite spoke for the umbrella antenna of a spacecraft, providing the required load-bearing capacity and maximum stiffness at a given mass limit of the structure. It involves the development of finite element models of the composite spoke of various designs, which would include the possibility of optimizing the design parameters by the criteria of strength, load-bearing capacity and stiffness. As a result of numerical experiment, the ways of increasing the bearing capacity and stiffness of the deployed spacecraft antenna are determined.

Keywords: Umbrella antenna spoke, composite materials, FEM.

Введение

Для обеспечения качественной спутниковой связи требуется задействовать антенны большого диаметра. Ввиду пространственных ограничений ракетносителя такие антенны могут быть исполнены только в виде трансформируемых конструкций, одним из вариантов которых является антенна зонтичного типа. Главными требованиями к зонтичным антеннам выступают надежность системы раскрытия и обеспечение высокой точности формы отражающей поверхности рефлектора, которая теоретически должна представлять собой идеальный параболоид вращения. Практическая точность формы рефлектора определяется системой радиальных спиц, которые в развернутом состоянии должны обеспечивать требуемую жесткость, а на этапе вывода на орбиту – устойчивость и прочность конструкции. Вместе с этим должно выполняться и базовое требование, предъявляемое к элементам РКТ, – высокие функциональные возможности при минимуме их массы. Последнее обстоятельство, с одной стороны, обусловило широкое использование композиционных материалов, обладающих высокими удельными механическими характеристиками, с другой – значительно усложнило процедуру оптимального проектирования композитных конструкций из-за возросшего количества варьируемых проектных параметров, влияющих на функционирование этих конструкций, и из-за особенностей поведения самого композита.

При анализе сложных композитных конструкций, таких как спутниковые антенны и антенны космических аппаратов, следует иметь в виду и теоретические изыскания о способах моделирования композита [1–3], и накопленный опыт при проектировании и производстве непосредственно трансформируемых антенн зонтичного типа [4–15].

Проектирование спицы зонтичной антенны – сама по себе сложная многоэтапная задача. В нашей работе сконцентрировано внимание на обеспечении максимально возможной жесткости антенны в развернутом состоянии на орбите.

Работа носит теоретический характер прикладного назначения. В ее основе – численное исследование влияния разнообразных факторов на жесткостные параметры композитной спицы зонтичной антенны. Исследование предполагает выполнение многочисленных расчетов в среде интегрированного пакета КЭ программ COSMOS/M, качество анализа в котором зависит от точности выполнения геометрического и КЭ моделирования спицы с возможностью учета в них реальных особенностей конструкции и свойств объекта.

Исследование спицы эллиптического сечения

В настоящей работе будем иметь в виду результаты предыдущего исследования, выполненного авторами для гибкой спицы зонтичной антенны. В нем получены значения (табл. 1) частот

собственных колебаний для двух первых мод, соответствующих консольным изгибным колебаниям спицы относительно вертикальной (Y) и горизонтальной (Z) осей (рис. 1). Данные соответствуют моделям со ступенчато переменной толщиной элементов (табл. 1). Они свидетельствуют о том, что усиление элементов, прилегающих к закрепленному концу, заметно повышает жесткость спицы.

Выполним модальный расчет сплошной композитной спицы эллиптического сечения (рис. 1) высотой 200 мм и шириной 90 мм с учетом веса сектора полотна (рис. 2). Результаты соответствуют моделям (без утяжеления) с различными значениями толщин оболочечных элементов (табл. 2). По ним видно, что из моделей двух видов с постоянной толщиной элементов сопоставимых масс (№ 1 из табл. 1 и № 2 из табл. 2) преимущество имеет спица эллиптического сечения, причем по первой частоте почти в 2 раза.

Таблица 1

Значения первых собственных частот в модели с переменной толщиной элементов

Вариант	Толщина h_s , мм	Первая частота, f_1 , Гц	Вторая частота, f_2 , Гц	Масса, кг
1	0,60	2,11	7,05	1,658
2	0,48	2,41	7,88	1,650
3	0,36	2,76	8,83	1,642
4	0,24	3,19	9,96	1,634
5	0,12	3,75	11,39	1,627
6	0,00	4,56	13,31	1,619

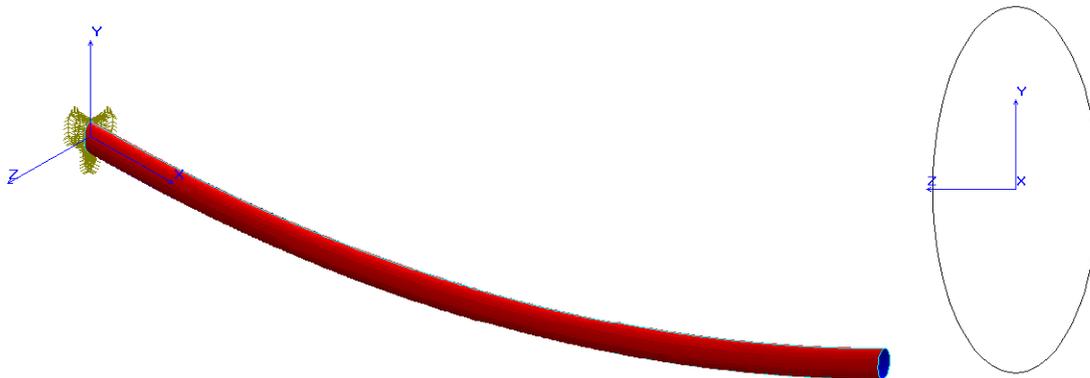


Рис. 1. Спица с эллиптическим поперечным сечением

Fig. 1. Spoke with elliptical cross section

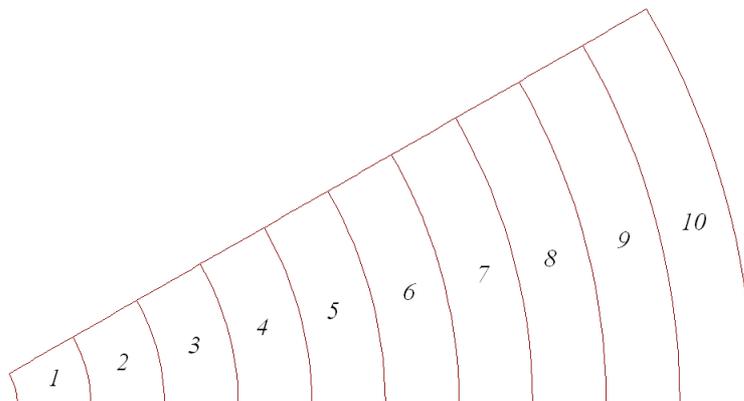


Рис. 2. Сектор полотна в 30°

Fig. 2. Sector of the canvas at 30°

Таблица 2

Значения первых частот колебаний спицы эллиптического сечения без учета массы полотна

№	Толщина элементов, мм	Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	0,24	1,026	3,767	6,960
2	0,36	1,540	3,898	7,117
3	0,48	2,053	3,953	7,180

Добавим элементы сосредоточенной массы MASS вдоль верхней образующей спицы (рис. 3).

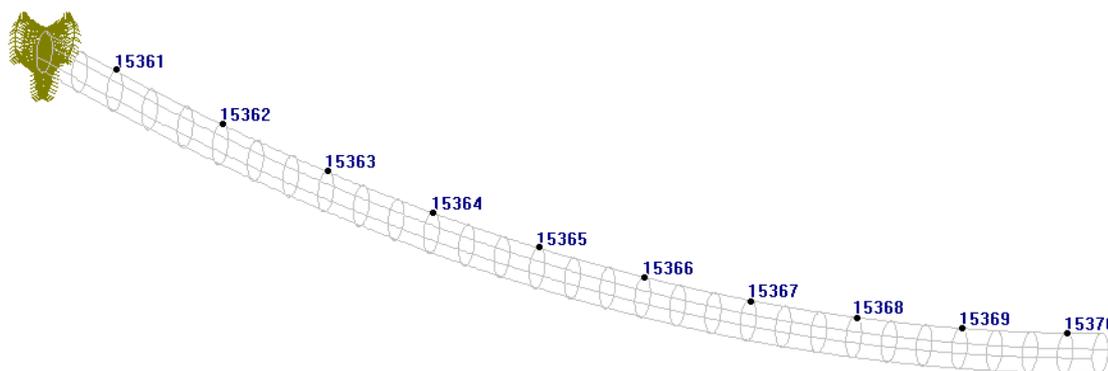


Рис. 3. Местоположение элементов сосредоточенной массы, имитирующих полотно

Fig. 3. Location of concentrated mass elements simulating canvas

Значения инерционных параметров в этих элементах (табл. 3) равны массам полос полотна соответствующих зон сектора (см. рис. 2).

Таблица 3

Массы секторов полотна

Номер сектора	Площадь сектора, м ²	Масса сектора, г	Номер сектора	Площадь сектора, м ²	Масса сектора, г
1	0,2514	68,48	6	1,2383	337,31
2	0,4411	120,16	7	1,4537	395,99
3	0,6333	172,51	8	1,6779	457,06
4	0,8294	225,93	9	1,9119	520,80
5	1,0306	280,74	10	2,1566	587,46

Величины частот собственных колебаний спицы уменьшаются (табл. 4) за счет инерционного влияния массы полотна. Отметим, что частота первой моды (рис. 4) заметно выше, чем в аналогичном случае для базовой модели (1,065 Гц). Частота вертикального колебания (рис. 5) для толщин оболочечных элементов от 0,36 до 0,48 мм почти такая же, как в базовой модели (3,602 Гц).

Таблица 4

Значения первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с учетом массы полотна

№	Толщина элементов, мм	Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	0,24	1,026	1,527	2,789
2	0,36	1,540	1,861	3,358
3	0,48	2,053	2,102	3,774

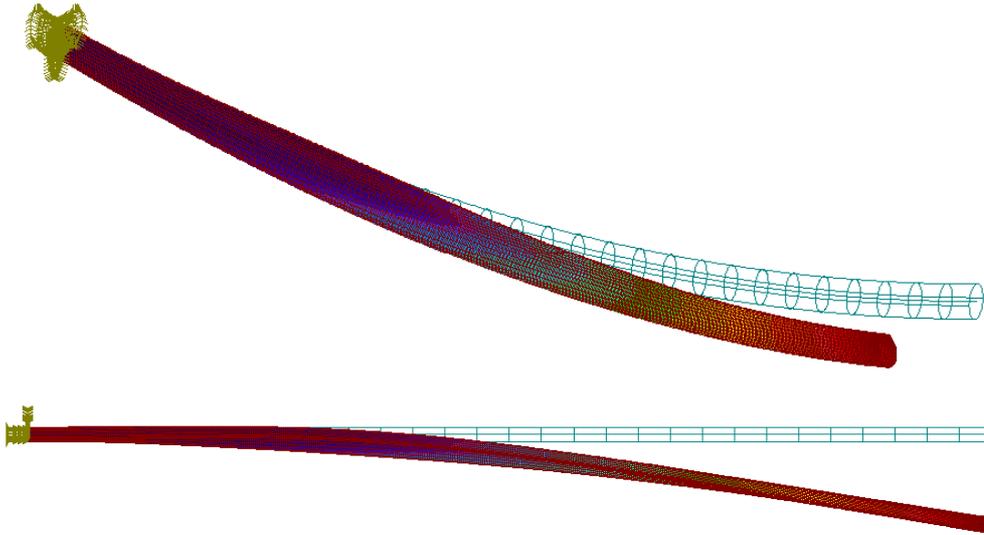


Рис. 4. Первая форма колебаний (внизу – вид сверху)

Fig. 4. First vibration mode (below – top view)

Эти значения собственных колебаний (см. табл. 4) соответствуют квазиизотропной модели с углом ориентации волокон в композите $\varphi = 45^\circ$. При изменении угла армирования исследуемые частоты можно увеличить. Об этом свидетельствуют результаты численного эксперимента (табл. 5), выполненного для спицы эллиптического сечения с толщиной стенки 0,36 мм. Отметим, что на интервале изменения угла φ от 45° и ниже имеются максимумы значений частот колебаний по двум первым модам, которые при необходимости можно уточнить. Однако и по имеющимся данным заметно, что частота первой моды примерно в 2,2 раза выше, чем у исходного варианта базовой модели (рис. 6).

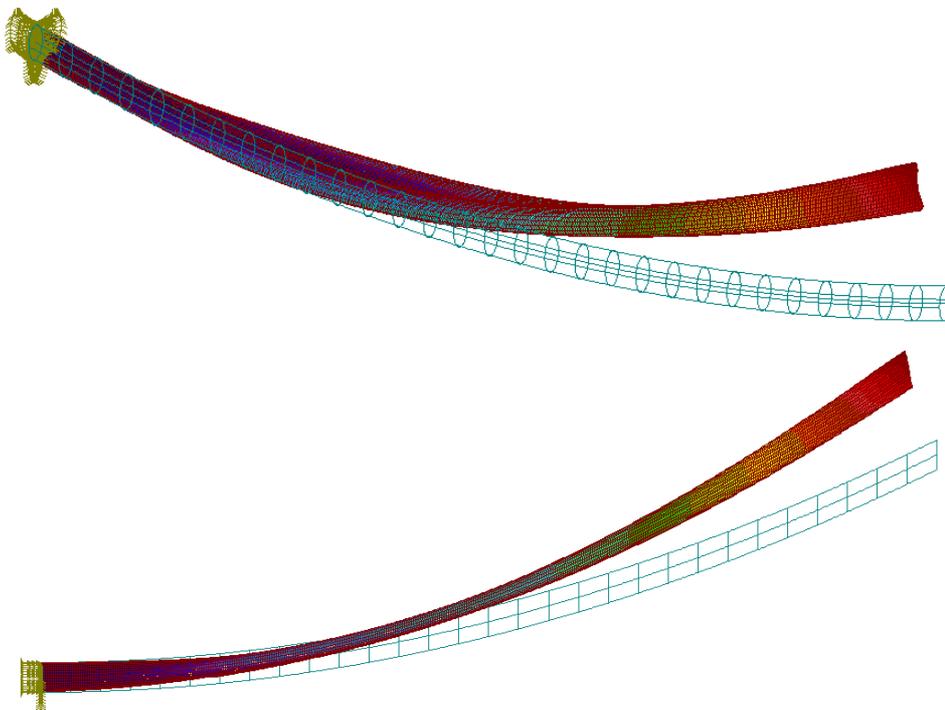


Рис. 5. Вторая форма колебаний (внизу – вид сбоку)

Fig. 5. Second vibration mode (below - side view)

Таблица 5

Величины первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с различными значениями углов намотки композитного волокна

№	Толщина элементов, мм	Угол армирования φ , град	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	0,36	45	1,861	3,358
2		35	2,253	4,177
3		25	2,183	4,292
4		15	1,778	3,697

Еще большего увеличения жесткости консольно закрепленной спицы можно добиться, перераспределяя толщины оболочечных элементов и усиливая сечения, близкие к комелю. Это показано в следующем эксперименте, результаты которого представлены в табл. 6. Данные соответствуют модели с углом армирования волокон $\varphi = 25^\circ$. В ней выделены три зоны (рис. 7) с различной толщиной стенки. Из данных табл. 6 видно, что утолщение элементов первой зоны приводит к повышению изгибной жесткости. Толщина стенки в третьей зоне при этом пропорционально уменьшается, чтобы общая масса спицы оставалась неизменной.

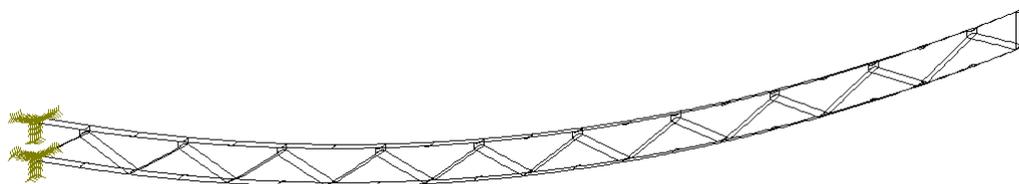


Рис. 6. Спица с десятью типовыми секторами

Fig. 6. Spoke with ten standard sectors

Таблица 6

Величины первых частот колебаний спицы эллиптического сечения с зонами различной толщины стенки (угол армирования $\varphi = 25^\circ$)

№	Толщины элементов по зонам, мм			Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
	1	2	3		
1	0,36	0,36	0,36	2,183	4,292
2	0,48	0,36	0,24	2,652	4,843
3	0,60	0,36	0,12	2,964	5,142

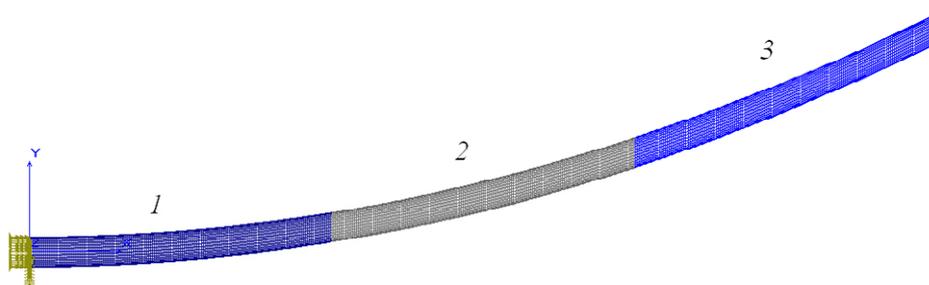


Рис. 7. Три зоны спицы с различной толщиной стенки

Fig. 7. Three spoke zones with different wall thicknesses

Исследование сетчатой спицы эллиптического сечения

Рассмотрим сетчатую спицу эллиптического сечения (величины осей 200 и 90 мм), выполненную методом непрерывной намотки композитного волокна (рис. 8). Конструкция представляет собой три семейства ребер: спиральных и кольцевых (рис. 9). Первые два образуются намоткой композитных волокон по геодезическим линиям поверхности под углами $\pm\varphi$ к продоль-

ной оси спицы. Третьи (кольцевые) располагаются в сечениях, отстоящих по оси на равные расстояния от точек пересечения спиральных ребер.

Основными проектными параметрами при построении сетчатой конструкции конкретной спицы являются:

- число спиральных ребер каждого семейства;
- угол намотки спиральных ребер φ ;
- высота и ширина ребер спиральной и кольцевой групп.

Отметим, что сечения в обеих группах спиральных ребер должны быть одинаковы, а сечения кольцевых ребер могут быть отличными.

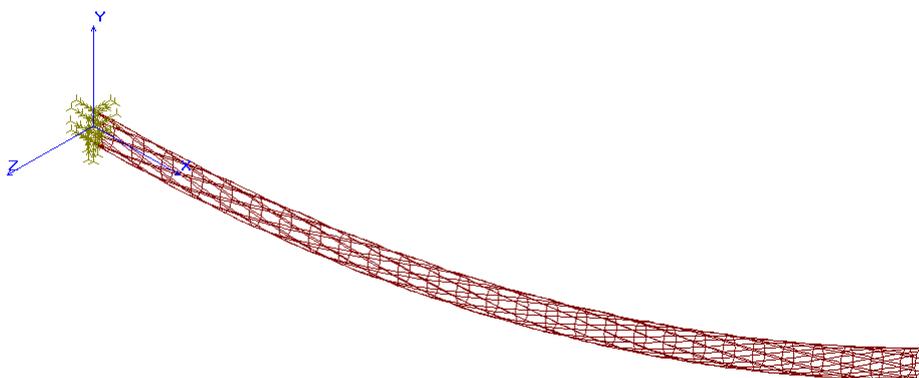


Рис. 8. Сетчатая спица с эллиптическим поперечным сечением

Fig. 8. Mesh spoke with elliptical cross section

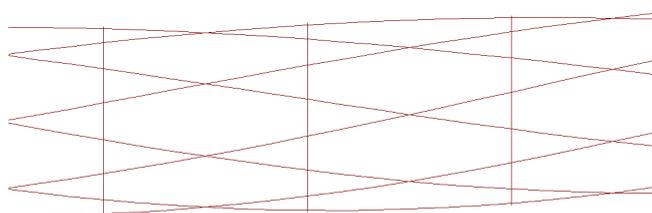


Рис. 9. Два семейства ребер анизогридной спицы

Fig. 9. Two families of anisogrid spoke ribs

Выполним сначала модальный расчет анизогридной спицы эллиптического сечения (рис. 8) высотой 200 мм и шириной 90 мм без учета веса полотна. В исходной модели зададим 8 пар спиральных ребер с углом их намотки $\varphi = \pm 10^\circ$. Исследуем зависимость изгибной жесткости спиц от значений угла ориентации спиральных ребер φ . Следует отметить, что при увеличении этого параметра, во-первых, увеличивается длина спиральных ребер и, во-вторых, – количество кольцевых ребер. Можно сказать, что сгущается сетка (рис. 10). Поэтому, чтобы сохранялась общая масса конструкции (при увеличении φ), необходимо корректировать размеры поперечных сечений ребер (немного уменьшать).

Результаты численного эксперимента для ряда значений угла ориентации спиральных ребер φ представлены в табл. 7. При анализе этих данных можно сделать вывод о том, что угол намотки спиральных ребер имеет решающее влияние на изгибную жесткость анизогридной конструкции. Частоты собственных колебаний выше у моделей с малыми значениями угла φ , поскольку при них выше величина приведенного модуля упругости материала конструкции, однозначно влияющего на частоты собственных колебаний. Учитывая выявленную зависимость в дальнейшем исследовании, будем использовать модель с наименьшим из технологически допустимых значений угла намотки спиральных ребер, а именно $\varphi = \pm 10^\circ$.

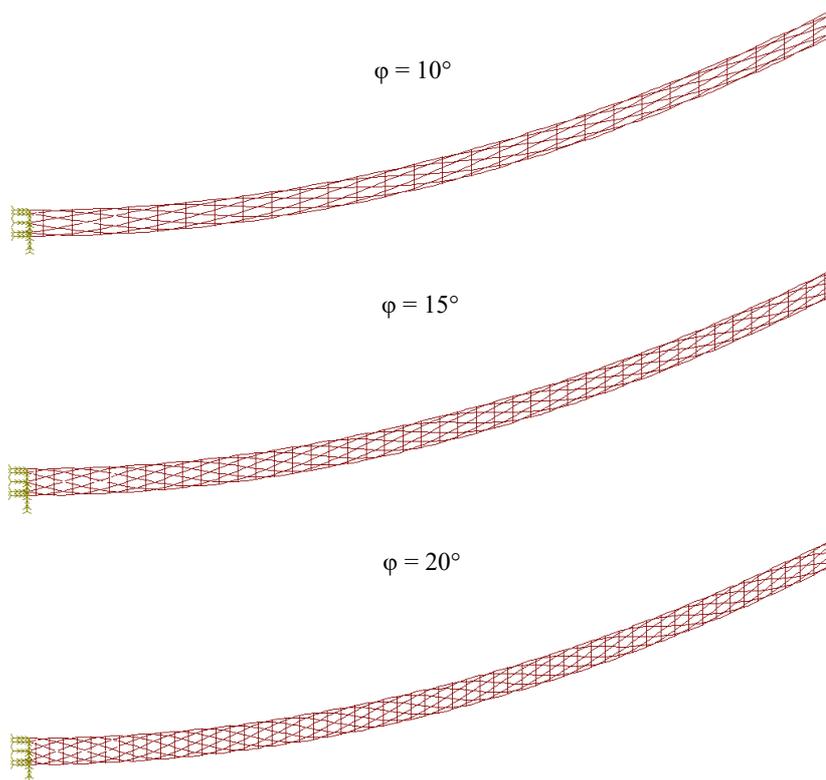


Рис. 10. Сетчатая спица с эллиптическим поперечным сечением с различными значениями угла намотки спиральных ребер

Fig. 10. Mesh spoke with elliptical cross-section with different winding angles of spiral ribs

Таблица 7

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения

№	Угол намотки спиральных ребер, φ , град.	Сечение ребер, $h \times h$, мм \times мм	Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	10	3,3	1,856	4,507	10,437
2	15	3,2	1,880	4,403	9,674
3	20	3,1	1,881	4,12	8,961

В следующем эксперименте проанализируем влияние числа спиральных ребер в двух первых группах на изгибную жесткость. Фактически здесь будем рассматривать модели с различной плотностью сетки (рис. 11–14).

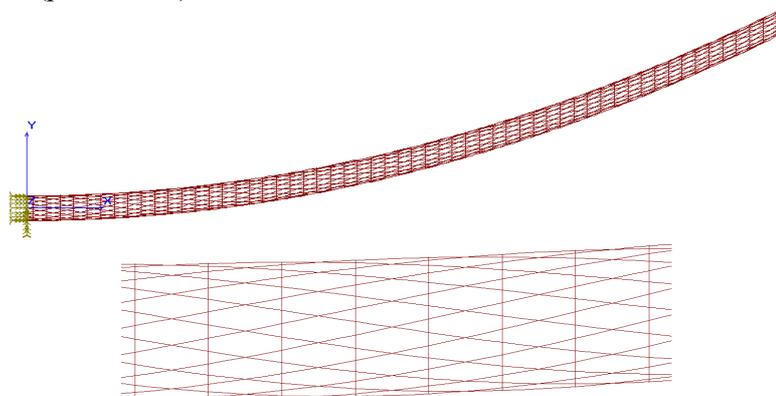


Рис. 11. Сетчатая спица с 16 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 11. Mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family

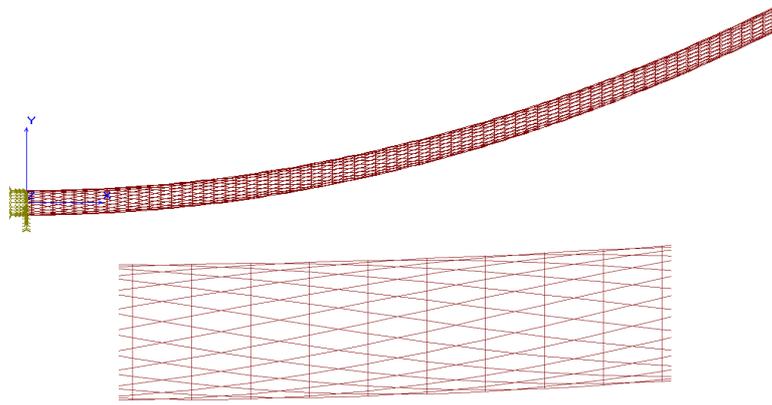


Рис. 12. Сетчатая спица с 20 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 12. Mesh spoke with 20 spiral ribs of the same family

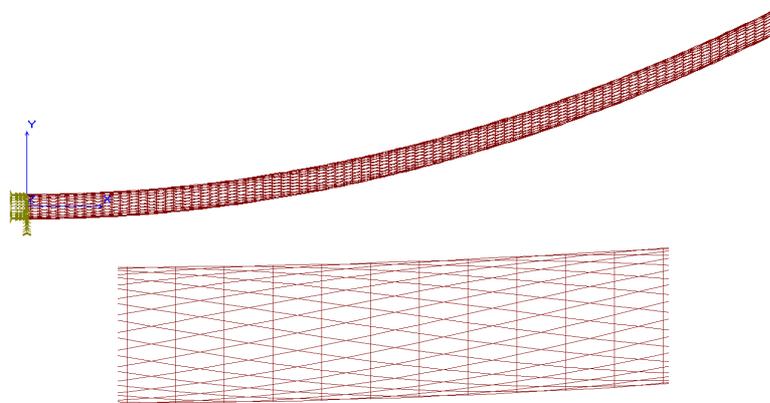


Рис. 13. Сетчатая спица с 24 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 13. Mesh spoke with 24 spiral ribs of the same family

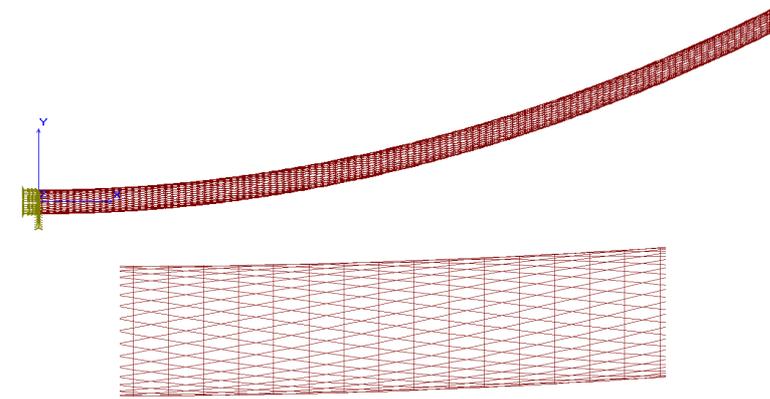


Рис. 14. Сетчатая спица с 32 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 14. Mesh spoke with 32 spiral ribs of the same family

Результаты модальных расчетов для спиц с различным числом спиральных ребер представлены в табл. 8. Сечения ребер варьируются, чтобы общая масса спицы оставалась в заданных пределах (не более 2 кг). Эти данные свидетельствуют о том, что спицы равной массы с различной и равномерной густотой сетки имеют примерно одинаковую изгибную жесткость.

Таблица 8

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер

№	Количество спиральных ребер одного семейства	Сечение ребер, $h \times h$, мм×мм	Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	16	2,3	1,80	5,003	12,487
2	20	2,0	1,702	5,021	12,606
3	24	2,0	2,04	5,057	12,735
4	32	1,5	1,53	4,994	12,547
5	32	спиральных – 1,7 кольцевых – 1,5	1,914	5,024	12,588

Добавление массы полотна

При добавлении массы сектора полотна (рис. 2) частоты собственных колебаний уменьшаются (табл. 9), однако для всех исследованных моделей с различной густотой сетки они примерно в 2,5 раза выше (по первой частоте), чем у базовой модели.

Таблица 9

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер с учетом массы полотна

№	Количество спиральных ребер одного семейства	Сечение ребер, $h \times h$, мм×мм	Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
1	16	2,3	1,80	2,492	6,422
2	20	2,0	1,702	2,479	6,415
3	24	2,0	2,04	2,695	6,990
4	32	1,5	1,53	2,368	6,142
5	32	спиральных – 1,7 кольцевых – 1,5	1,914	2,595	6,699
6	32	1,7	1,965	2,626	6,809

Заметим, что масса полотна учтена добавлением в КЭ модель элементов сосредоточенной массы MASS. На рис. 15 показаны номера в месте расположения этих элементов в сетчатой спице с 16 спиральными ребрами одного семейства.

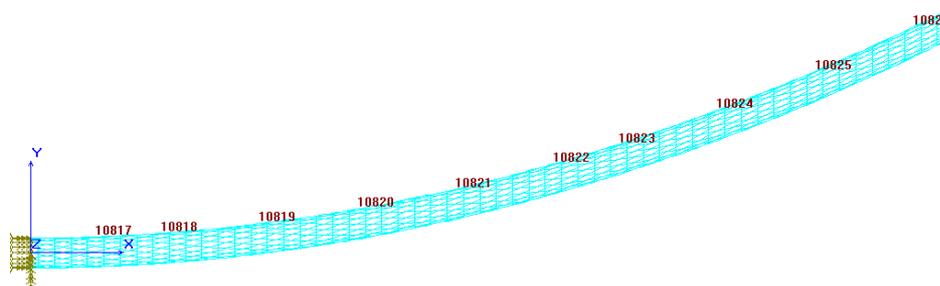


Рис. 15. Элементы сосредоточенной массы MASS в сетчатой спице с 16 спиральными ребрами одного семейства

Fig. 15. Mass elements MASS in a mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family

Устойчивость

Исследованные модели равной массы с различным числом спиральных ребер обеспечивают практически одинаковую жесткость (см. табл. 9). Однако они обнаружили разное поведение в экспериментах на устойчивость под действием собственного веса в исходном и перевернутом положениях. Результаты этих расчетов приведены в табл. 10. Они показывают, что по мере

сгущения сетки увеличиваются критические нагрузки. Это обусловлено тем обстоятельством, что укорачивается длина отрезков ребер в типовом сегменте, что и приводит к повышению коэффициентов запаса устойчивости, т. е. увеличивается несущая способность.

Зоны потери устойчивости во всех случаях локализованы у комеля (рис. 16): выгибаются отрезки отдельных ребер тех сегментов, которые ближе к закрепленному концу. Однако общая картина анизотридной конструкции с регулярной густой сеткой соответствует оболочечной форме потери устойчивости.

Отметим, что критическая нагрузка сетчатой спицы существенно выше, чем в исходной базовой модели (см. рис. 6).



Рис. 16. Формы потери устойчивости сетчатой спицы с 16 спиральными ребрами одного семейства под действием собственного веса в исходном (вверху) и перевернутом положениях

Fig. 16. Buckling modes of a mesh spoke with 16 spiral ribs of the same family under its own weight in the original (top) and inverted positions

Таблица 10

Коэффициенты запаса устойчивости сетчатой спицы эллиптического сечения с различным числом спиральных ребер

№	Количество спиральных ребер одного семейства	Сечение ребер, $h \times h$, мм×мм	Масса спицы, кг	Коэффициент запаса устойчивости	
				Исходное положение	Перевернутое положение
1	16	2,3	1,80	9,458	9,702
2	20	2,0	1,702	9,906	9,921
3	24	2,0	2,04	15,065	15,308
4	32	1,7	1,965	17,691	16,61

Модель с зонами различных сечений элементов

Учитывая результаты предыдущих исследований спицы базовой модели и сплошной мотанной эллиптического сечения, можно предположить, что усиление сечений, прилегающих к закрепленному концу (комелю), будет повышать изгибную жесткость конструкции. Усиливать эти сечения можно двумя способами: сгущением сетки за счет увеличения числа спиральных ребер и за счет «утолщения» самих ребер.

Поскольку в рассматриваемых нами анизотридных моделях сетка балочных элементов достаточно густая и конструкция работает во многом как оболочка (это было продемонстрировано при анализе несущей способности), то указанные выше два способа усиления сечений равнозначны.

В следующем эксперименте выполним модальный расчет спицы с различными сечениями балочных элементов в трех зонах (рис. 17).

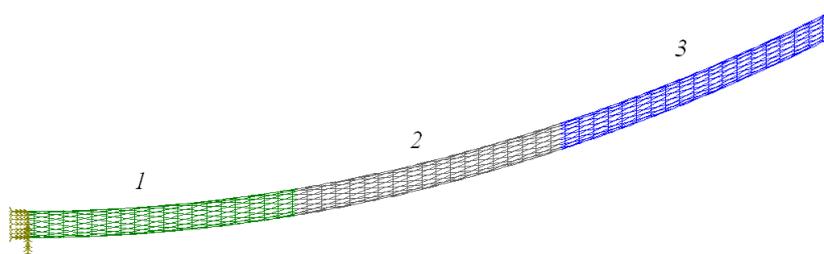


Рис. 17. Три отрезка спицы с различными размерами поперечного сечения балочных элементов

Fig. 17. Three spoke lengths with different cross-sectional dimensions of the beam elements

В качестве исходной возьмем сетчатую спицу с 16 спиральными ребрами в каждом из двух семейств с углом их намотки под углами $\varphi = \pm 10^\circ$.

Будем последовательно уменьшать размер квадратного сечения балочных элементов в третьей зоне (рис. 17), расположенной ближе к свободному концу и пропорционально увеличивать сечения ребер в первой зоне, прилегающей к комелю. Здесь для сохранения неизменной массы всей конструкции выбран линейный закон изменения площадей сечения в трех зонах. Результаты расчетов интересующих нас частот собственных колебаний сведены в табл. 11 – для «голой» спицы и табл. 12 – для спицы, воспринимающей инерционное воздействие массы полотна, которое, как и прежде, имитируется элементами сосредоточенной массы MASS (см. рис. 15).

Анализ полученных данных показывает, что за счет перераспределения масс можно повысить изгибную жесткость на 26 % (по первой частоте).

Для повышения эффективности этого способа необходимо провести дополнительное исследование, в котором должны быть учтены технологические особенности изготовления анизотропных конструкций.

Таблица 11

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различными размерами поперечных сечений ребер в отдельных зонах (без учета массы полотна)

№	Сечение ребер, $h \times h$, мм×мм по зонам			Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
	1	2	3			
1	2,3	2,3	2,3	1,80	5,003	12,487
2	2,57	2,3	2,0	1,792	6,169	15,311
3	2,89	2,3	1,5	1,778	8,429	20,652

Таблица 12

Величины первых частот колебаний сетчатой спицы эллиптического сечения с различными размерами поперечных сечений ребер в отдельных зонах (с учетом массы полотна)

№	Сечение ребер, $h \times h$, мм×мм по зонам			Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
	1	2	3			
1	2,3	2,3	2,3	1,80	2,492	6,422
2	2,57	2,3	2,0	1,792	2,780	7,176
3	2,89	2,3	1,5	1,778	3,144	7,867

Сплошная композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля

Одним из существенных недостатков рассмотренных выше моделей спиц является низкая частота горизонтальных собственных колебаний, которая примерно в 2,5 раза ниже, чем частота вертикальных колебаний. Это обусловлено формой поперечного сечения спицы, вытянутой в вертикальном направлении. Очевидно, что спица круглого сечения свободна от этого недос-

татка. Однако ширина сечения спицы у комеля ограничена конструктивными особенностями и не может превышать 90 мм. Смоделируем спицу сплошного сечения, учитывающую это ограничение (рис. 18). Большая часть спицы имеет постоянное круглое кольцевое сечение, а в зоне (длиной 800 мм), прилегающей к комелю, сечение переменного вида: переходящее от круглой формы к эллиптической (по направлению к закрепленному концу).

Модальный расчет для этой модели (с учетом массы полотна) дал следующие значения для двух первых частот (рис. 19 и 20) собственных колебаний 3,083 и 3,346 Гц соответственно. Это значительно лучше, чем у базовой модели (см. рис. 6).

Представленное выше решение выполнено для модели с одинаковой по всей длине толщиной стенки 0,36 мм. Общая масса «голой» спицы 2,04 кг. Угол армирования продольных волокон $\varphi = \pm 45^\circ$.

Если выполнить перераспределение толщин по зонам (как на рис. 17), то можно на треть (по первой частоте) повысить изгибную жесткость. Это хорошо видно по данным табл. 13.

Данную модель можно считать оптимальной по жесткости, так как частоты колебаний горизонтального (рис. 19) и вертикального (рис. 20) направлений почти совпадают.

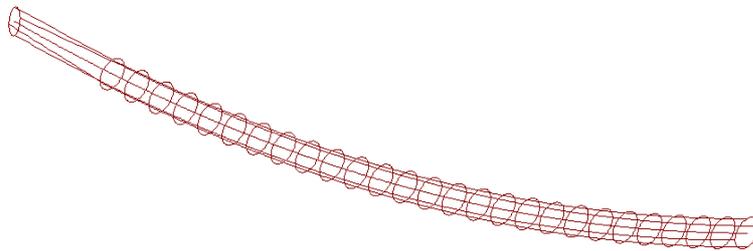


Рис. 18. Сечения спицы с сужением у комеля

Fig. 18. Cross-sections of a spoke with a narrowing at the butt

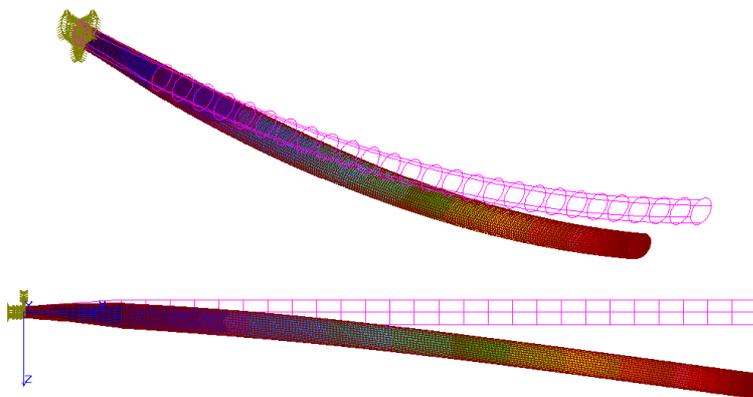


Рис. 19. Первая форма колебаний спицы с сужением (внизу – вид сверху)

Fig. 19. The first vibration mode of a spoke with a narrowing (below – top view)

Таблица 13

Величины первых частот колебаний сплошной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля и зонами различной толщины стенки

№	Толщина стенки, h , мм по зонам			Масса спицы, кг	Первая частота, Гц	Вторая частота, Гц
	1	2	3			
1	0,36	0,36	0,36	2,04	3,083	3,346
2	0,48	0,36	0,24	2,02	3,654	3,959
3	0,60	0,36	0,12	2,00	4,160	4,166

Таблица 14

Величины первых частот колебаний сплошной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля и зонами различной толщины стенки в моделях с различными углами намотки волокон

№	Толщины по зонам, мм	Угол армирования, φ , град	Частоты собственных колебаний, Гц	
			Первая мода	Вторая мода
1	0,60-0,36-0,12	45	4,160	4,166
2		35	4,701	4,296
3		25	4,270	3,626
4		15	3,379	2,782

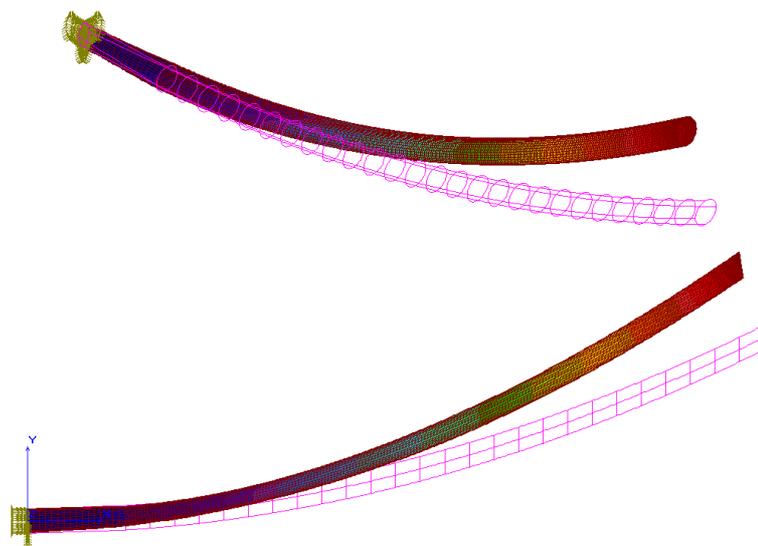


Рис. 20. Вторая форма колебаний спицы с сужением (внизу – вид сбоку)

Fig. 20. The second vibration mode of the spoke with a narrowing (below – side view)

При необходимости с целью повышения значений исследуемых частот собственных колебаний можно оптимизировать ориентацию продольных волокон. Так, например, для модели № 3 (см. табл. 13) некоторое уменьшение угла армирования продольных волокон φ в пределах от 45 до 35 градусов приводит к заметному увеличению жесткости горизонтального изгиба и к слабому увеличению жесткости вертикального направления (см. табл. 14).

Сетчатая композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля

Рассмотрим модель сетчатой композитной спицы кольцевого сечения с сужением у комеля (рис. 21).

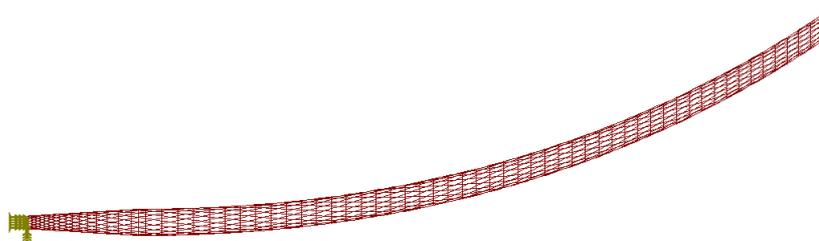


Рис. 21. Сетчатая композитная спица кольцевого сечения с сужением у комеля

Fig. 21. Mesh composite spoke of circular cross-section with a narrowing at the butt

На отрезке длиной 0,8 м, непосредственно прилегающем к закрепленному концу, сетчатая конструкция имеет линейно переменное сечение. На остальной части спицы сечение постоянное – кольцевое, диаметром 200 мм. Число спиральных ребер на обоих участках спицы равно 16. На отрезке постоянного сечения угол ориентации спиральных ребер также постоянный $\varphi = \pm 10^\circ$. В зоне переменного сечения (на отрезке у комеля) величина угла армирования изменяется вдоль оси спицы согласно закону Клеро. Она равна $\varphi = \pm 10^\circ$ у сечения стыковки зон с переменным и постоянным сечениями и увеличивается в направлении к закрепленному концу (рис. 22).

«Голая» спица имеет массу 1,961 кг (сечения всех ребер одинаковы 2,3 x 2,3 мм). В модальном расчете получены частоты собственных колебаний: 7,859 и 8,523 Гц для первой (рис. 23) и второй (рис. 24) моды соответственно.

С учетом массы сектора полотна (см. рис. 2) получены следующие значения: 4,171 и 4,643 Гц для первой (рис. 23) и второй (рис. 24) моды соответственно. Это даже лучше, чем у сплошной мотанной спицы (с сужением у комеля) с оптимизированными в зонах толщинами (см. табл. 13 и 14).

Если увеличить мощность ребер конической части (прилегающей к комелю), то можно еще более увеличить жесткость конструкции. Так, например, если задать здесь сечение ребер 3,5x3,5 мм, а в остальной (цилиндрической) части спицы – 2,0x2,0 мм (при этом общая масса останется неизменной), то частоты первой и второй мод собственных колебаний увеличатся до 4,564 и 5,181 Гц соответственно.

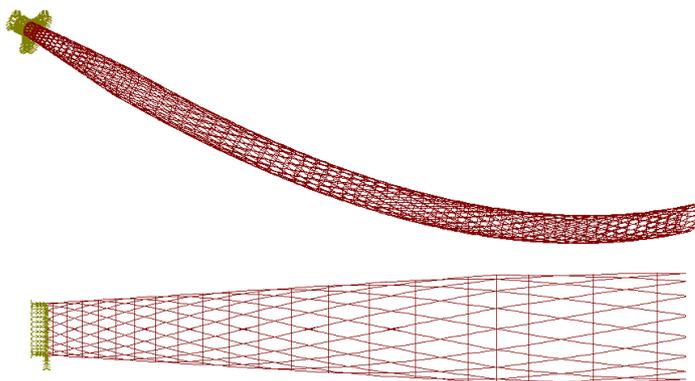


Рис. 22. Место стыковки зон с переменным и постоянным сечениями

Fig. 22. The junction of zones with variable and constant sections

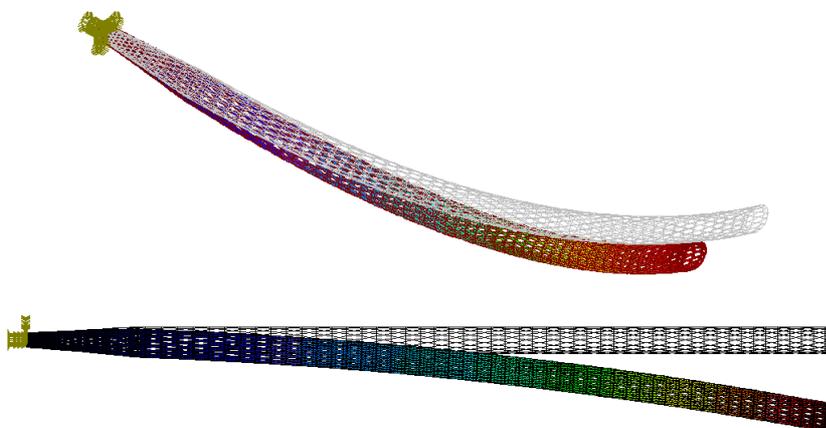


Рис. 23. Первая форма колебаний сетчатой спицы с сужением (внизу – вид сверху)

Fig. 23. The first mode of vibration of a mesh spoke with a narrowing (below – top view)



Рис. 24. Вторая форма колебаний сетчатой спицы с сужением (внизу – вид сбоку).

Fig. 24. The second mode of vibration of a mesh spoke with a narrowing (below – side view)

Заключение

Точность профиля отражающей поверхности рефлектора главным образом достигается обеспечением стабильного положения радиальных спиц в развернутом состоянии. Эта стабильность зависит от жесткости консольно закрепленных спиц. На основе численного эксперимента в работе показаны возможности повышения жесткости спиц с сохранением регламентируемой массы. Этого можно добиться, во-первых, изменяя кольцевое поперечное сечение сплошной композитной спицы, изготавливаемой способом непрерывной намотки волокон, в частности, задавая ей эллиптическую форму с вертикальной ориентацией большой полуоси, во-вторых, оптимизируя углы армирования волокон в слоистой структуре композиционного материала спицы и, в-третьих, рационально перераспределяя толщины элементов вдоль образующей поверхности таким образом, чтобы усилить сечения, прилегающие к закрепленному концу спицы. Повысить массовую эффективность спицы также можно, используя сетчатую структуру ее стенок. Возможна оптимизация анизотридной модели при рациональном выборе углов ориентации спиральных ребер. Указанные способы повышения жесткости и устойчивости спицы подтверждены в расчетах с учетом массы сетеполотна антенны и верифицированы в анализе несущей способности спицы в исходном и перевернутом положениях.

Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V. *Mechanics of Composite Structures*. Taylor & Francis, 1993.
2. Kassapoglou C. *Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures*. 2013, John Wiley & Sons Ltd. 402 p. DOI: 10.1002/9781118536933.
3. Decolon C. *Analysis of Composite Structures*. Butterworth-Heinemann. 2004. 336 p.
4. Терлецкий Г. С., Зыков А. О., Тайгин В. Б. Анализ конструкций мембранных трансформируемых антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2022. Т. 6, № 3. С. 149–162. DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. *Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения*. Красноярск, 2011. 488 с.
6. Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Оптимальное раскрытие спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора по иерархии критериев // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 4. С. 191–197. DOI: 10.26732/j.st.2021.4.02.

7. Иванов А. В., Зоммер С. А. Анализ процесса раскрытия зонтичного рефлектора на стенде с активной системой обезвешивания // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 4. С. 208–216. DOI: 10.26732/j.st.2021.4.04.
8. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн. Ч. 1 // *Вестник СибГАУ*. 2007. № 2. С. 51–57.
9. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4 (30). С. 200–208.
10. Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems // Theory and Design of Reflectors*. 2013. Vol. 1. P. 350.
11. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Обзор конструкций зеркальных антенн космических аппаратов с твердотельными прецизионными размеростабильными рефлекторами // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5, № 1. С. 14–26. DOI: 10.26732/j.st.2021.1.02.
12. Тайгин В. Б., Лопатин А. В. Метод обеспечения высокой точности формы рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2019. Т. 3, № 4. С. 200–208. DOI: 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208.
13. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Выбор оптимальных параметров спицы зонтичной антенны для обеспечения максимальной изгибной жесткости // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2018. Т. 19, № 3. С. 504–509. DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-504-509.
14. Imbriale W. *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*. NJ. John Wiley and Sons. 2006, 592 p.
15. Akira M. In-orbit deployment performance of large satellite antennas // *J. Spacecraft and Rockets*. 1996. Vol. 33, No. 2. P. 222–227.

References

1. Vasiliev V. V. *Mechanics of Composite Structures*. Taylor & Francis, 1993.
2. Kassapoglou C. *Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures*. 2013, John Wiley & Sons Ltd. 402 p. DOI: 10.1002/9781118536933.
3. Decolon C. *Analysis of Composite Structures*. Butterworth-Heinemann. 2004. 336 p.
4. Terletsky G. S., Zykov A. O., Taigin V. B. [Analysis of the designs of membrane transformable antennas of cable devices]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2022, Vol. 6, No. 3, P. 149–162 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01.
5. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proyektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatzionnogo obespecheniya* [Fundamentals of designing spacecraft for information support]. Krasnoyarsk, 2011, 488 p.
6. Kabanov S. A., Kabanov D. S. [Optimal opening of the spokes of a large-sized transformable reflector according to the hierarchy of criteria]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 4, P. 191–197 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.4.02.
7. Ivanov A. V., Sommer S. A. [Analysis of the process of opening an umbrella reflector on a stand with an active weight-neutralization system]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 4, P. 208–216 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.4.04.
8. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Review of the designs of modern transformable space antennas (part 1)]. *Vestnik SibSAU*. 2007, No. 2, P. 51–57 (In Russ.).
9. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Method for ensuring high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2019, Vol. 3, No. 4 (30), P. 200–208 (In Russ.).
10. Satish K. Sh., Sudhakar R., Lotfollah Sh. *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. Theory and Design of Reflectors*. 2013, Vol. 1, P. 350.
11. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Review of the designs of mirror antennas for spacecraft with solid-state precision size-stable reflectors]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2021, Vol. 5, No. 1, P. 14–26 (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.1.02.

12. Taigin V. B., Lopatin A. V. [Method for ensuring high accuracy of the shape of reflectors of mirror antennas of spacecraft]. *Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii*. 2019, Vol. 3, No. 4, P. 200–208 (In Russ.). DOI: 10.26732/2618-7957-2019-4-200-208.
13. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Selection of optimal parameters of the umbrella antenna spoke to ensure maximum bending rigidity]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, Vol. 19, No. 3, P. 504–509 (In Russ.). DOI: 10.31772/2587-6066-2018-19-3-504-509.
14. Imbriale W. *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*. NJ. John Wiley and Sons. 2006, 592 p.
15. Akira M. In-orbit deployment performance of large satellite antennas. *J. Spacecraft and Rockets*. 1996, Vol. 33, No. 2, P. 222–227.

© Нестеров В. А., Габидулин С. В., 2024

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>

Габидулин Сергей Владимирович – доцент кафедры инженерной графики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gabidulin@sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-1072-9436>

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>

Gabidulin Sergey Vladimirovich – Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: gabidulin@sibsau.ru. <https://orcid.org/0009-0003-1072-9436>

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; принята к публикации 25.11.2024; опубликована 26.12.2024
The article was submitted 14.11.2024; accepted for publication 25.11.2024; published 26.12.2024