

УДК 629.198.22

## Моделирование прочностных свойств силовых шпангоутов в каркасных конструкциях

Драгун Д. К.<sup>1</sup>, Ульяновков А. В.<sup>1</sup>,  
Языков А. В.<sup>1,\*</sup>

\* [andr-yaz@yandex.ru](mailto:andr-yaz@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Каркасные модели, применяемые в ракетной технике, состоят из продольного и поперечного силового набора. В работе рассмотрены проблемы моделирования элементов каркасной конструкции. Показано, что продольные элементы такой конструкции хорошо моделируются стержневыми конечными элементами. В то время как поперечные элементы (шпангоуты) возможно представлять как в стержневой идеализации, так и с использованием пластинчатых конечных элементов. В работе показаны преимущества и недостатки указанных представлений расчетных схем шпангоута. На основании проведенных тестовых расчетов показано, какие погрешности в вычислении прочностных свойств рассматриваемого шпангоута могут быть получены при использовании стержневой модели. Выработаны рекомендации по целесообразному использованию возможных моделей для оценки общей и местной прочности конструкции шпангоута.

**Ключевые слова:** моделирование, метод конечных элементов, МКЭ, каркасные конструкции, шпангоут, Sadas

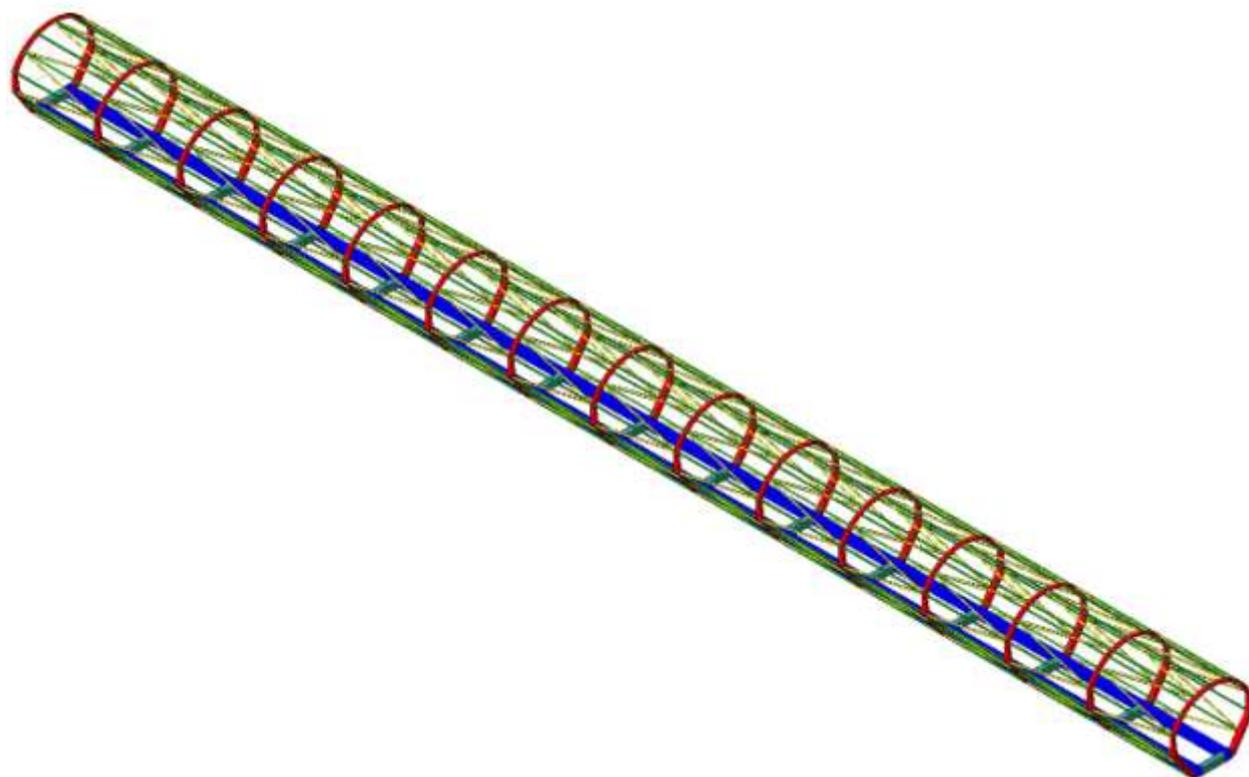
---

Каркасные конструкции широко используются в ракетной технике [1-4]. Как известно, такие конструкции состоят из продольного силового набора в виде стрингеров и лонжеронов, подкосов, а также поперечного набора в виде шпангоутов. В статье /5/ рассмотрена проблема моделирования жесткостных свойств некоторой регулярной каркасной конструкции, состоящей из нескольких типовых секций. Конструктивная схема рассматриваемой каркасной конструкции приведена на рисунке 1, а ее типовая секция на рисунке 2.

Моделирование стрингеров, лонжеронов и подкосов этой конструкции не представляет проблем, т.к. их продольные размеры существенно превышают их поперечные размеры и, следовательно, хорошо подходят для балочной идеализации. Однако, шпангоуты (см. рисунок 3) представляют собой сварную листовую конструкцию, имеющую форму изогнутой арки переменного сечения с отверстиями. Отверстия в листах подкреплены

сваренными трубами различного диаметра. В вертикальных листах имеются вырезы для крепления стрингеров. Как можно видеть, в конструкции шпангоута имеются места резкого изменения геометрии, которые являются концентраторами напряжения. Указанные особенности невозможно в полной мере учесть в стержневой идеализации шпангоутов. Поэтому более правильным представляется для моделирования шпангоутов использовать пластинчатые конечные элементы. Пластинчатая модель шпангоута позволяет более точно учесть все имеющиеся особенности его реальной конструкции.

В статье [5] рассмотрены два варианта представления жесткостных свойств шпангоута в виде стержневой модели и с использованием пластинчатых конечных элементов. На основании проведенных тестовых расчетов отмечено, что стержневая модель может быть использована для предварительной оценки жесткостных свойств конструкции, а пластинчатую модель шпангоута целесообразно использовать на заключительных этапах проектирования. В настоящей статье исследуется влияние принятой модели шпангоута (стержневой или пластинчатой) на оценку его прочностных свойств.



а



б

**Рисунок 1.** Конструктивная схема каркасной конструкции а -изометрическая проекция; б –профильная проекция

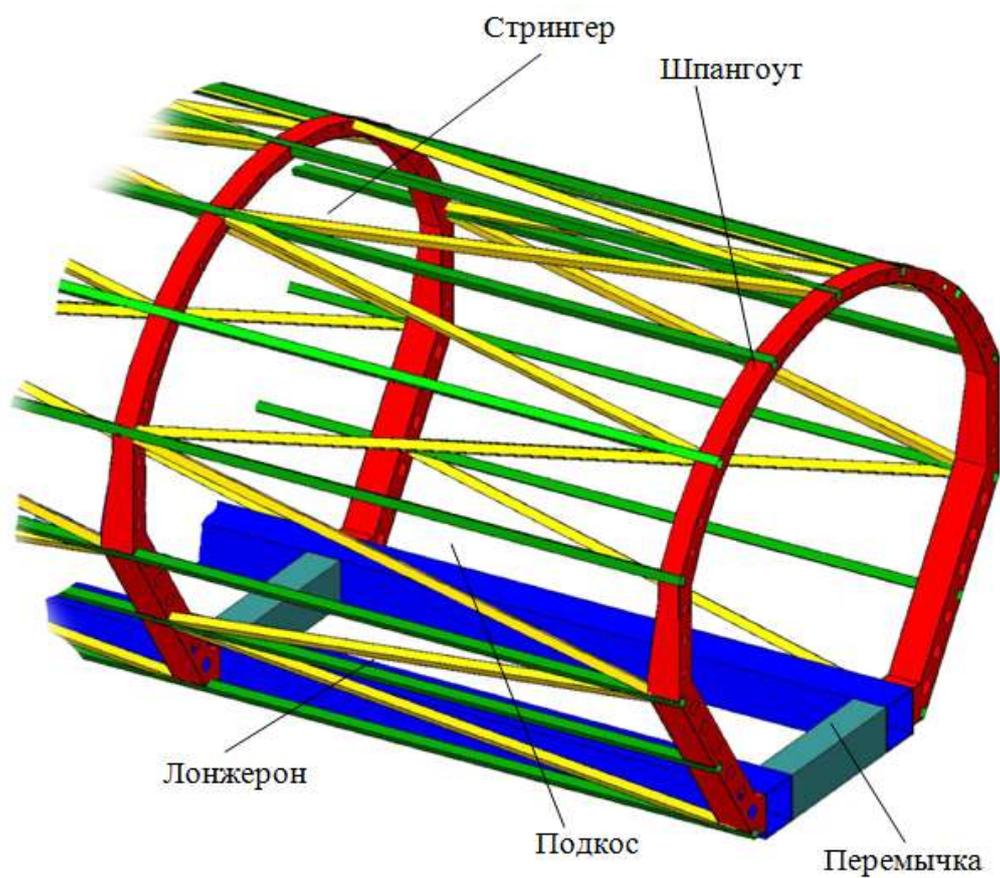
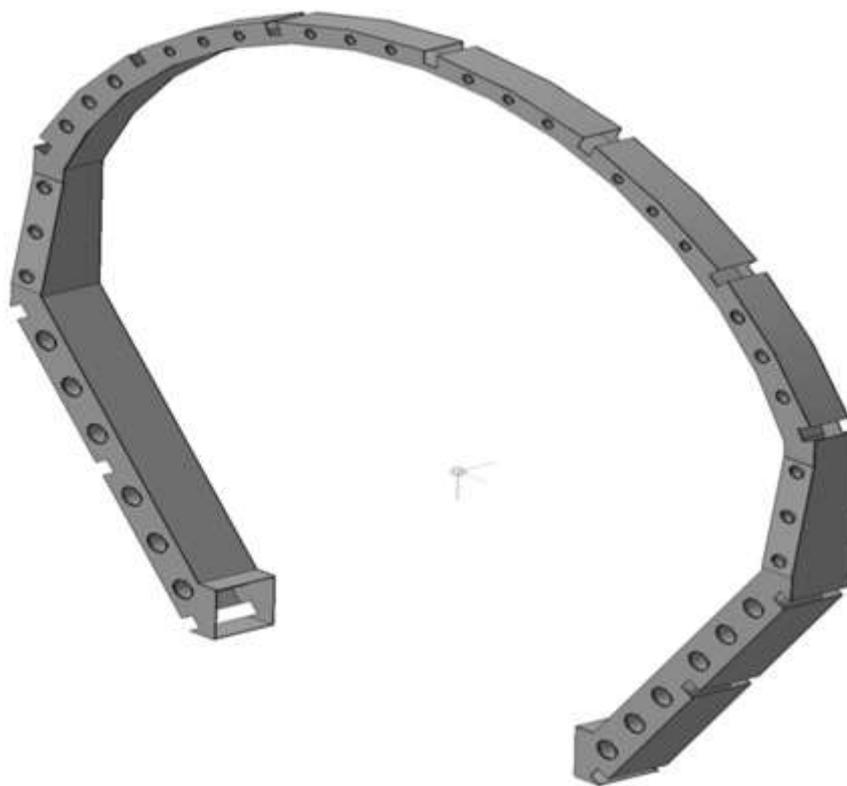
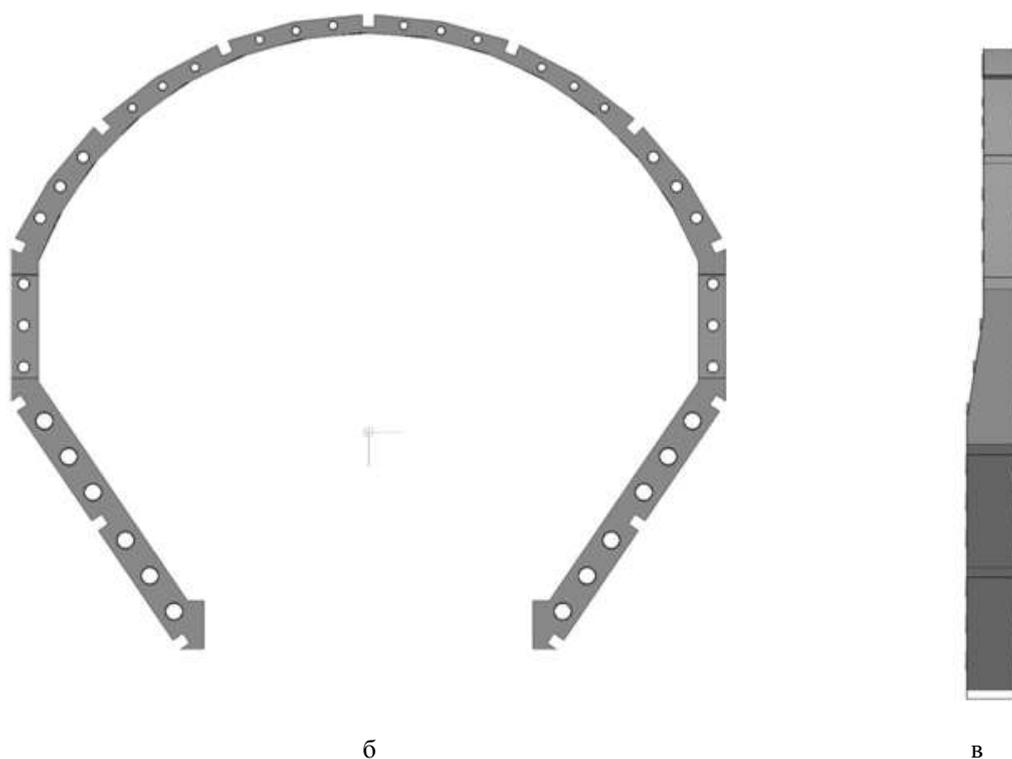


Рисунок 2. Конструктивная схема типовой секции



а



**Рисунок 3.** Конструктивная схема шпангоута: а - изометрическая проекция; б - фронтальная проекция; в - профильная проекция

На рисунках 4 и 5 приведены расчетные схемы стержневой и пластинчатой моделей шпангоута соответственно.

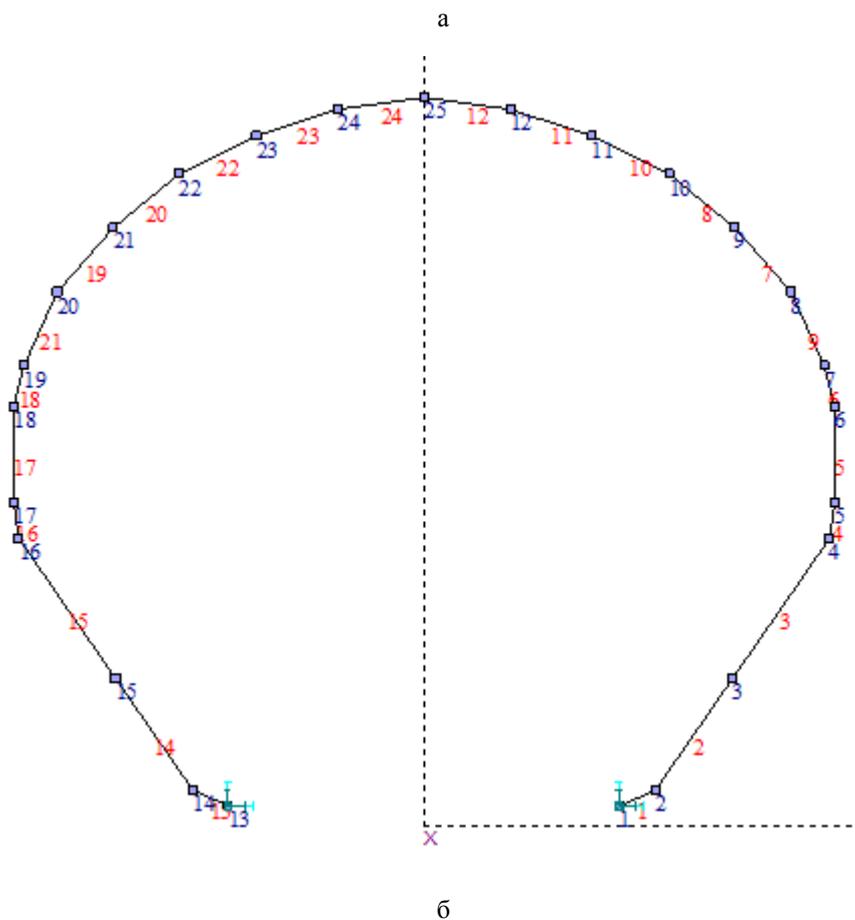
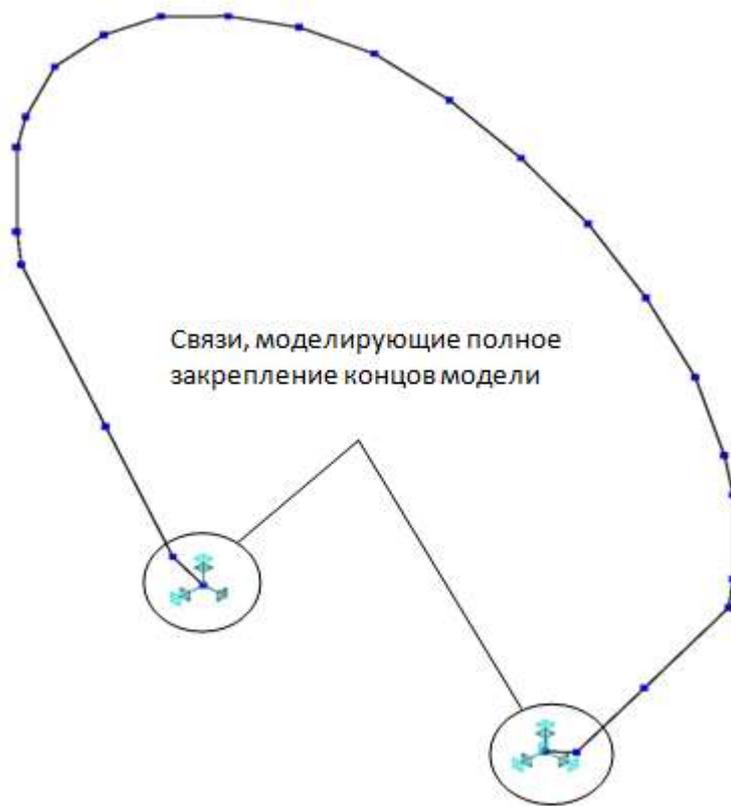
В стержневой модели конечные элементы испытывают сложное напряженное состояние общего вида. Сечения в стержневой модели были выбраны по размерам внешнего контура сечений элементов шпангоута без учёта подкреплений и отверстий. В пластинчатой модели конечные элементы работают как в своей плоскости, так и из плоскости. Вертикальные пластины модели имеют толщину 4 мм, а перпендикулярные к ним – 6 мм. Как видно на указанных рисунках, крайние узлы моделей считаются жестко закрепленными.

Для оценки погрешности расчета напряжений в элементах конструкции рассматриваемого шпангоута обе модели нагружались тестовыми нагрузками в местах присоединения стрингеров в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Для сравнения результатов расчета напряжений в исследуемых моделях шпангоута они условно разделены на 14 участков, обозначенных на рисунке 6 римскими цифрами.

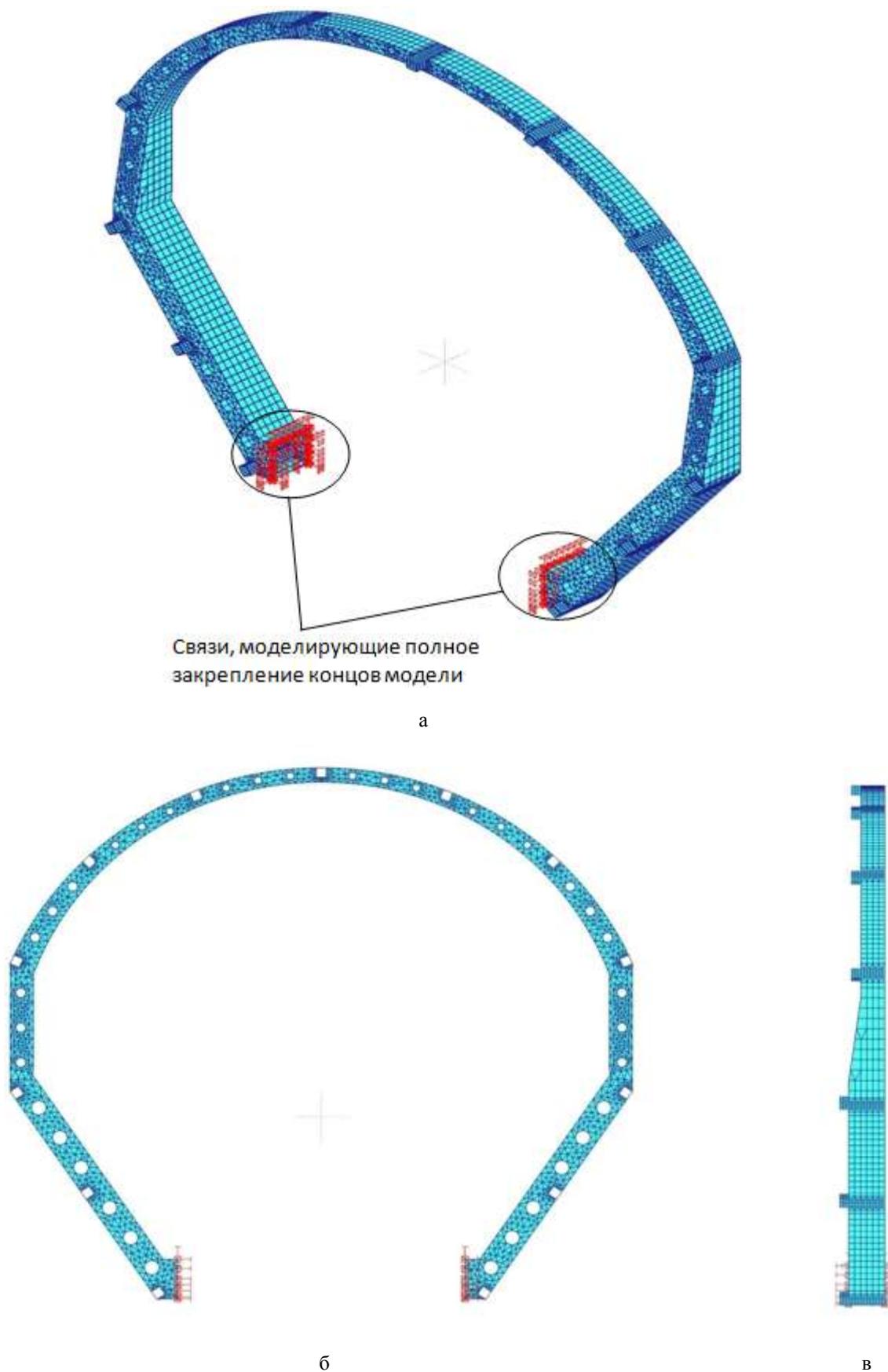
### **Тестовые расчёты моделей шпангоута**

*Тест №1.* В этом расчетном случае рассматривалось нагружение исследуемых моделей вертикальными силами в плоскости шпангоута, приложенными в местах их соединения со стрингерами. Величина силовой нагрузки в каждом месте приложения принята равной  $1 \cdot 10^4$  Н. Суммарная нагрузка на шпангоут, соответственно, равна  $1.3 \cdot 10^5$  Н.

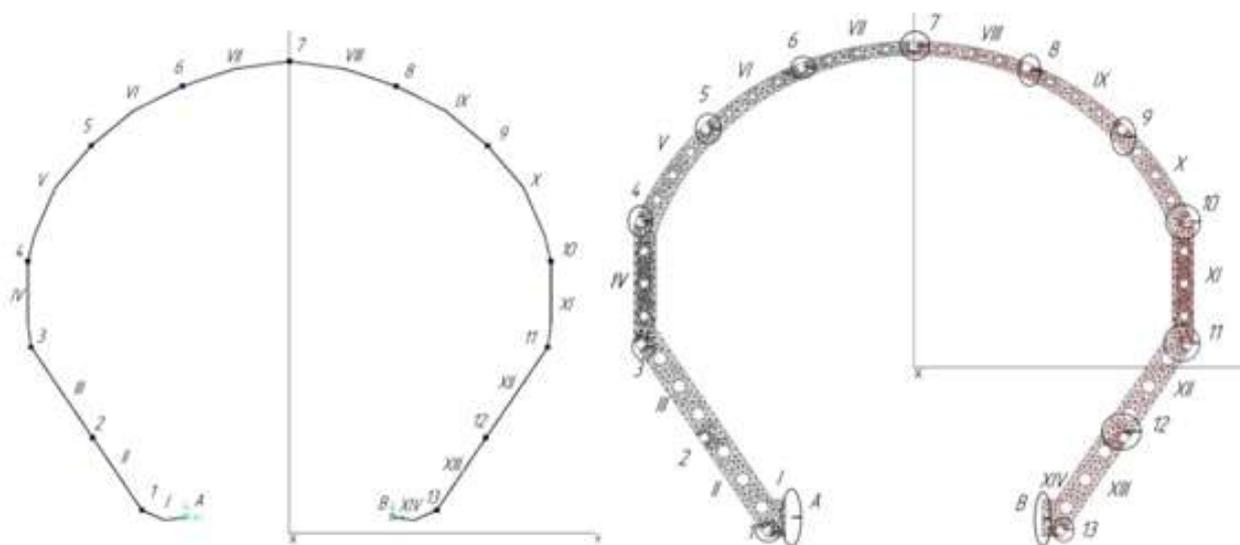
Расчётные модели с указанием действующих сил и наложенных связей для этого расчётного случая приведены на рисунке 7, а вид напряженного состояния – на рисунке 8.



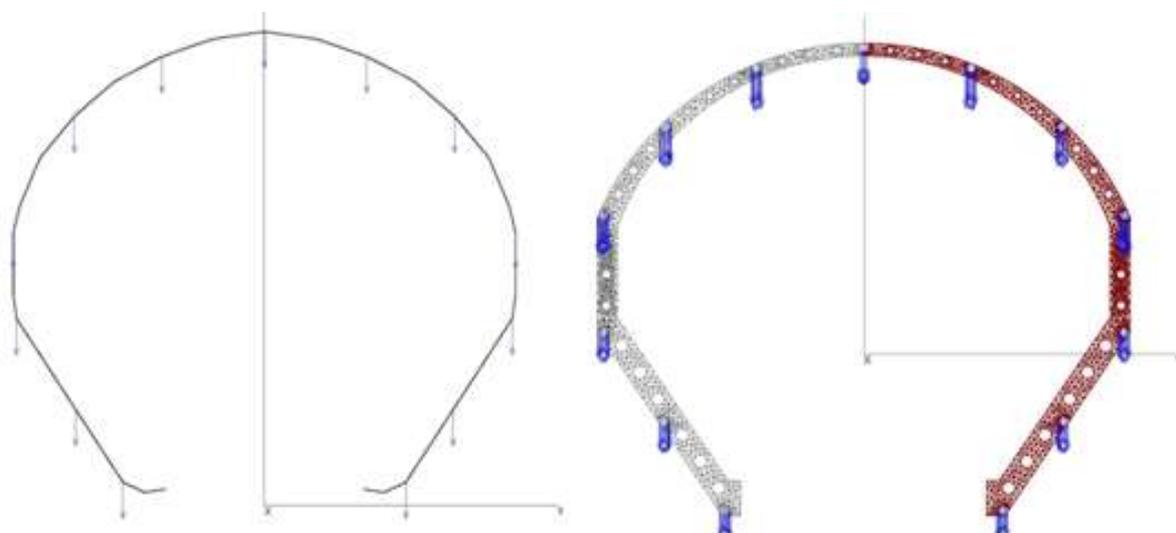
**Рисунок 4.** Стержневая модель шпангоута: а – изометрическая проекция; б – фронтальная проекция



**Рисунок 5.** Пластинчатая модель шпангоута: а – изометрическая проекция; б – фронтальная проекция; в – профильная проекция



**Рисунок 6.** Контрольные узлы и участки моделей шпангоута



**Рисунок 7.** Вид нагружения моделей шпангоута для тестового расчёта №1

Как можно видеть на рисунке 8, в обеих моделях наблюдается симметричный вид нагруженного состояния. Однако в пластинчатой модели, естественно, можно видеть более подробное представление возникающих напряжений. Особенно это заметно в местах резкого изменения геометрии модели, где наблюдаются области концентраторов напряжений, а также в местах близких к закреплению концов модели. Местные напряжения в пластических материалах допускается не учитывать [6], т.к. они не влияют на общую прочность конструкции. Области повышенных напряжений в концах моделей мы рассматривать не будем, т.к. в рассматриваемой каркасной конструкции этих закреплений нет. Учитывая изложенное, а также симметрию моделей в таблице №1 приведены значения максимальных основных напряжений на II ...VII участках моделей в тестовом расчетном случае №1.

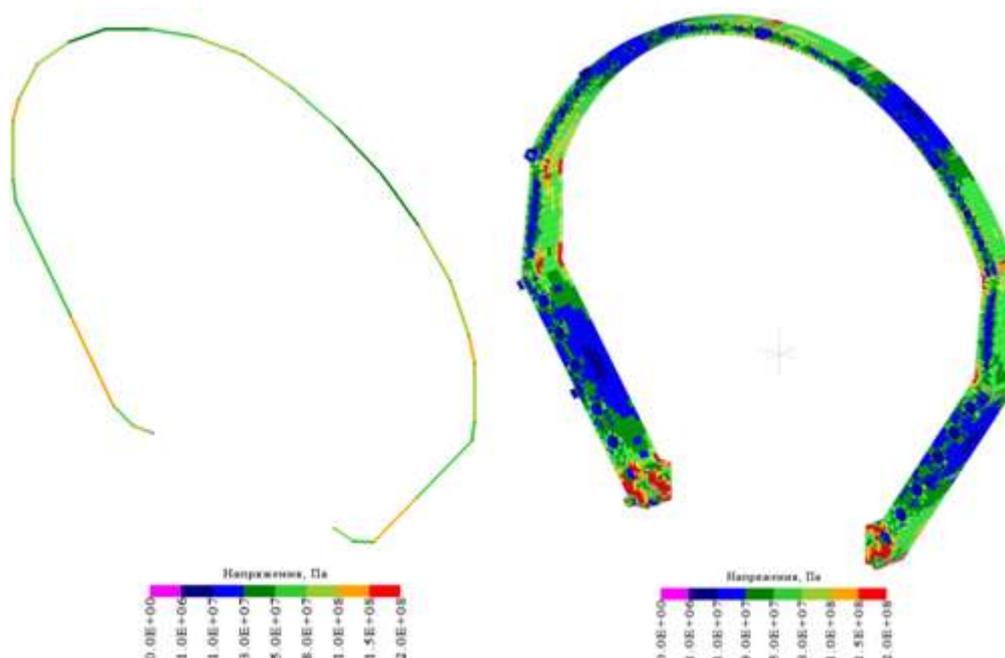


Рисунок 8. Вид напряженного состояния моделей шпангоута для тестового расчёта №1

Таблица 1. Напряжения в элементах моделей шпангоута в тестовом расчёте №1

Номер контрольного участка	Максимальное напряжение на участке, Па.		Абсолютное расхождение, Па.	Относительное расхождение, %
	Стержневая модель	Пластинчатая модель		
II	$1.10 \cdot 10^8$	$1.05 \cdot 10^8$	$5.00 \cdot 10^6$	4.8
III	$4.65 \cdot 10^7$	$4.17 \cdot 10^7$	$4.80 \cdot 10^6$	11.5
IV	$9.17 \cdot 10^7$	$8.08 \cdot 10^7$	$1.09 \cdot 10^7$	13.5
V	$5.86 \cdot 10^7$	$5.11 \cdot 10^7$	$7.80 \cdot 10^6$	14.7
VI	$3.07 \cdot 10^7$	$3.47 \cdot 10^7$	$4.00 \cdot 10^6$	11.5
VII	$6.54 \cdot 10^7$	$7.79 \cdot 10^7$	$1.25 \cdot 10^7$	16.0

Анализ данных приведенной таблицы показывает, что максимальное отличие в напряжениях элементов моделей составляет 16%. При этом напряжения в наиболее нагруженном II участке различаются только на 4.8%, причем в стержневой модели величина максимального напряжения выше соответствующей величины в пластинчатой модели, т.е. расчет по стержневой модели дает результат, идущий в запас. Таким образом, можно сделать вывод о допустимости использования стержневой идеализации шпангоута при рассматриваемом виде нагружения.

*Тест №2.* В этом расчетном случае рассматривалось нагружение исследуемых моделей горизонтальными силами из плоскости шпангоута, приложенными в местах их соединения со стрингерами. Величина силовой нагрузки в каждом месте приложения принята равной  $1 \cdot 10^3$  Н. Суммарная нагрузка на шпангоут, соответственно, равна  $1.3 \cdot 10^4$  Н. Величины прикладываемых нагрузок выбраны на порядок меньше, чем в тесте №1 ввиду того,

что конструкция имеет в направлении нагрузок в тесте №2 значительно меньшую жёсткость.

Расчётные модели с указанием действующих сил и наложенных связей для этого расчётного случая приведены на рисунке 9, а вид напряженного состояния – на рисунке 10.

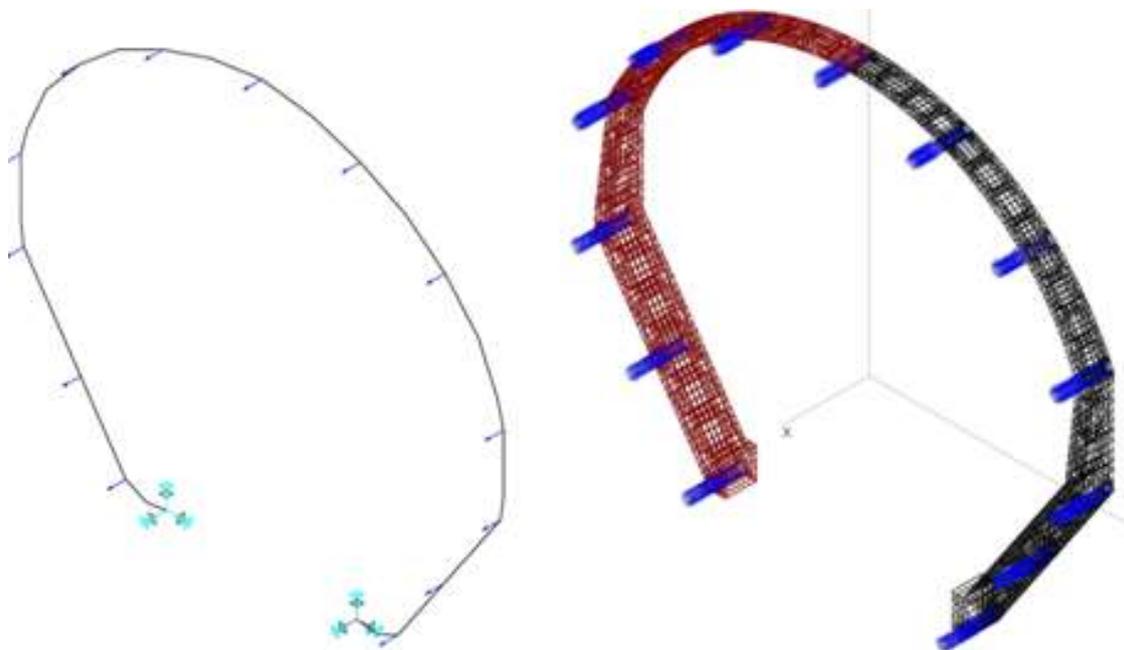


Рисунок 9. Вид нагружения для тестового расчёта №2

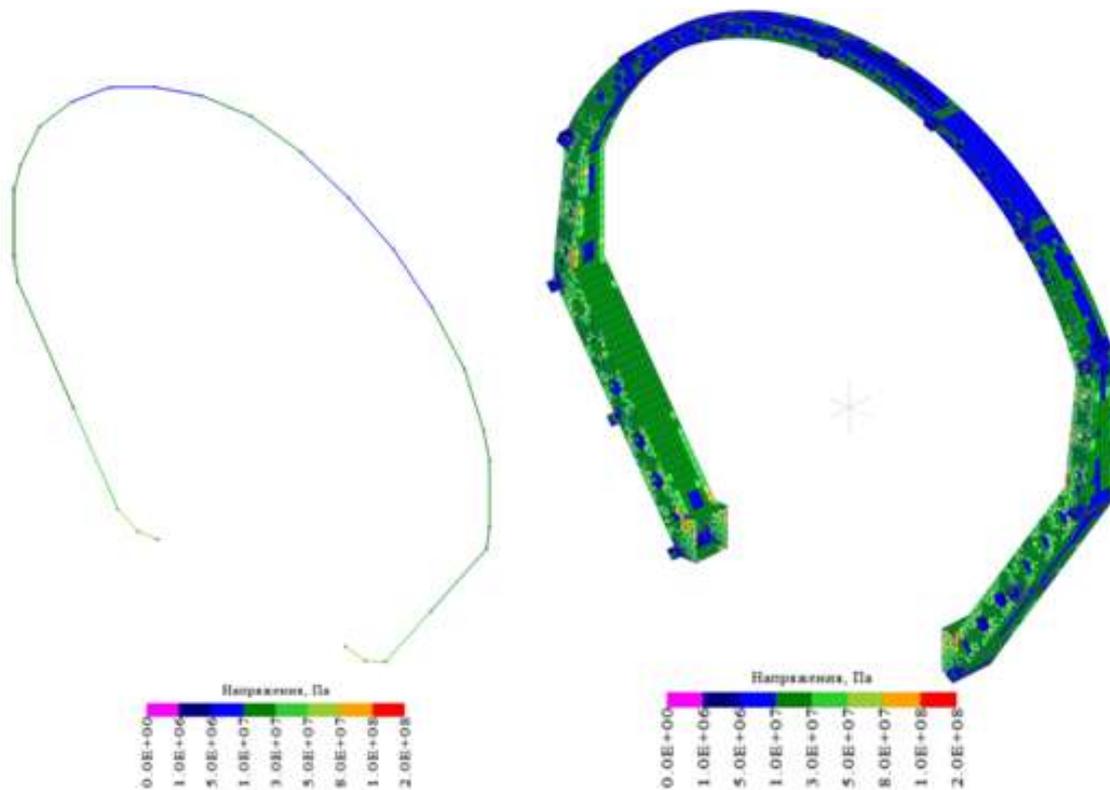


Рисунок 10. Вид напряженного состояния моделей для тестового расчёта №2

Как можно видеть на рисунке 10, в обеих моделях наблюдается симметричный вид напряженного состояния. Учитывая изложенные выше соображения по представлению данных по напряжениям на участках моделей, в таблице 2 приведены значения максимальных основных напряжений на II ...VII участках моделей в тестовом расчетном случае №2.

**Таблица 2.** Напряжения в элементах моделей шпангоута в тестовом расчетном случае №2

Номер контрольного участка	Максимальное напряжение на участке, Па.		Абсолютное расхождение, Па	Относительное расхождение, %
	Стержневая модель	Пластинчатая модель		
II	$4.22 \cdot 10^7$	$4.13 \cdot 10^7$	$9.00 \cdot 10^5$	2.2
III	$3.03 \cdot 10^7$	$2.74 \cdot 10^7$	$2.90 \cdot 10^6$	10.5
IV	$2.46 \cdot 10^7$	$2.53 \cdot 10^7$	$7.00 \cdot 10^5$	2.8
V	$1.45 \cdot 10^7$	$1.67 \cdot 10^7$	$2.20 \cdot 10^6$	13.2
VI	$7.68 \cdot 10^6$	$7.70 \cdot 10^6$	$2.00 \cdot 10^4$	2.6
VII	$1.08 \cdot 10^7$	$9.93 \cdot 10^6$	$8.76 \cdot 10^4$	8.8

Анализ данных приведенной таблицы показывает, что максимальное отличие в напряжениях элементов моделей составляет 13,2%. При этом напряжения в наиболее нагруженном II участке различаются только на 2,2%, причем в стержневой модели величина максимального напряжения выше соответствующей величины в пластинчатой модели, т.е. расчет по стержневой модели дает результат, идущий в запас. Таким образом, можно сделать вывод о допустимости использования стержневой идеализации шпангоута при рассматриваемом виде нагружения.

*Тест №3.* В этом расчетном случае рассматривалось нагружение исследуемых моделей горизонтальными силами в плоскости шпангоута, приложенными в местах их соединения со стрингерами. Величина силовой нагрузки в каждом месте приложения принята равной  $1 \cdot 10^3$  Н. Суммарная нагрузка на шпангоут, соответственно, равна  $1.3 \cdot 10^4$  Н.

Расчётные модели с указанием действующих сил и наложенных связей для этого расчётного случая приведены на рисунке 11, а вид напряженного состояния – на рисунке 12.

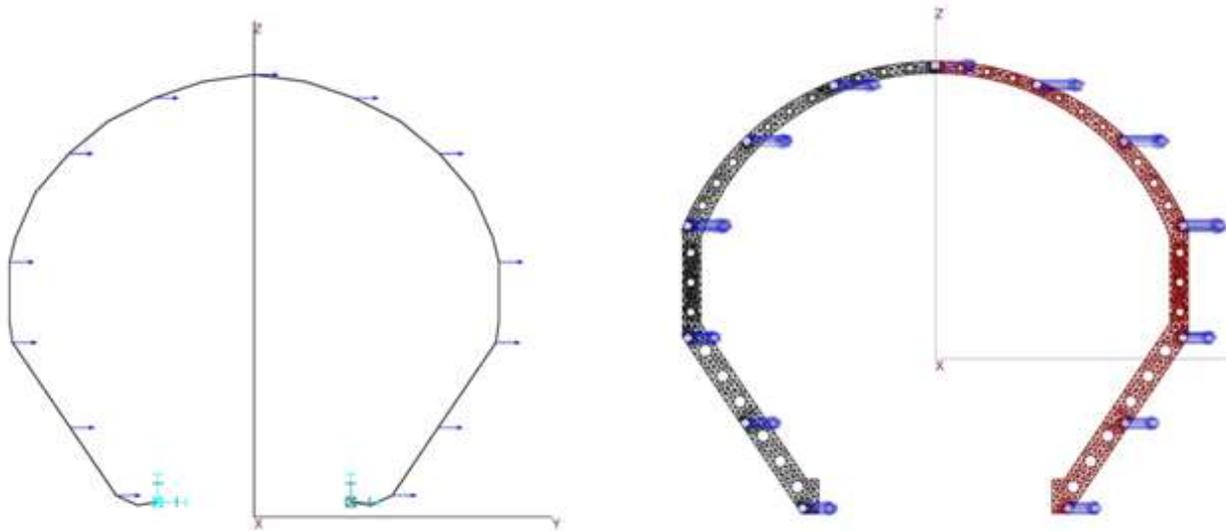


Рисунок 11. Вид нагружения для тестового расчёта №3

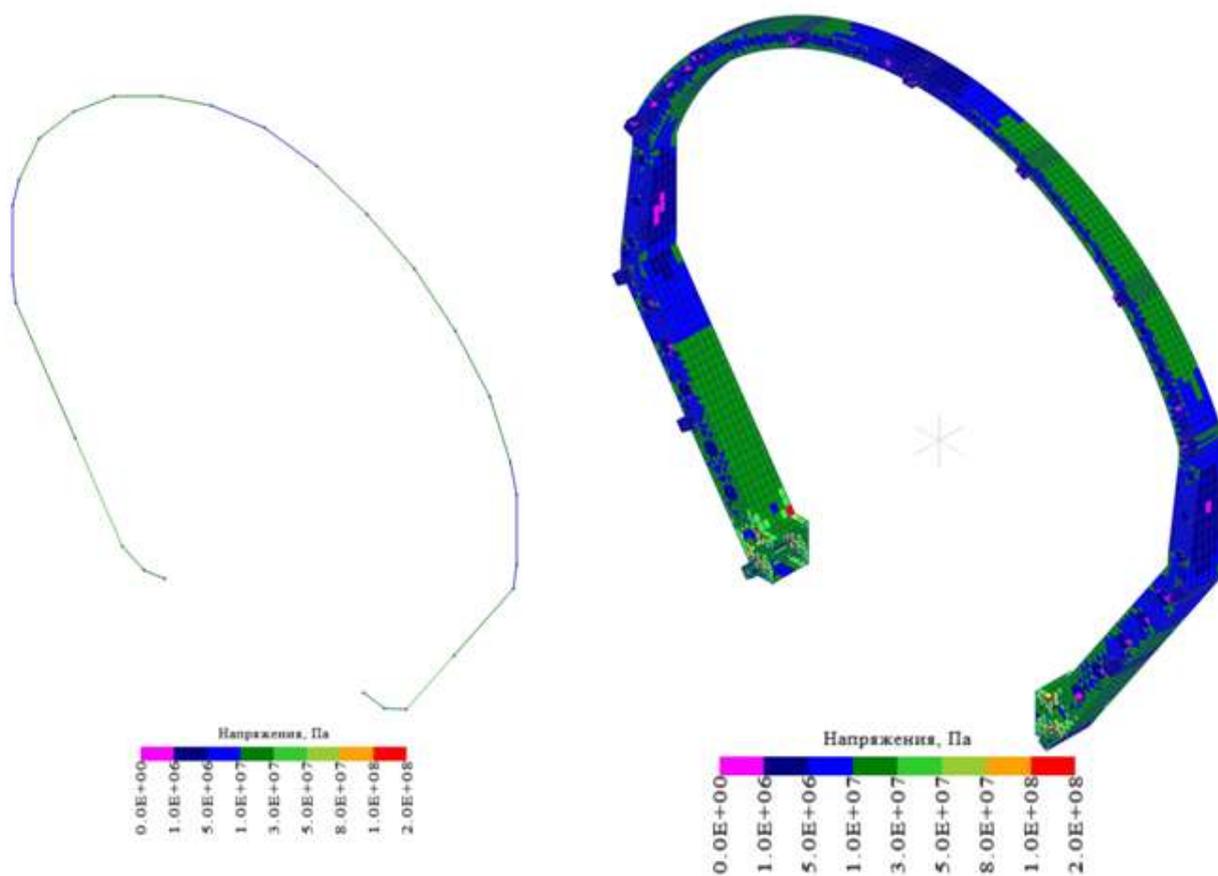


Рисунок 12. Вид напряженного состояния моделей для тестового расчёта №3

Как можно видеть на рисунке 12, картина деформирования в обеих моделях одинакова. Учитывая изложенные выше соображения по представлению данных по напряжениям на участках моделей, в таблице 3 приведены значения максимальных основных напряжений на II ... VII участках моделей в тестовом расчетном случае №3.

**Таблица 3.** Напряжения в элементах моделей шпангоута в тестовом расчетном случае №3

Номер контрольного участка	Максимальное напряжение на участке, Па.		Абсолютное расхождение, Па	Относительное расхождение, %
	Стержневая модель	Пластинчатая модель		
II	$2.942 \cdot 10^7$	$2.664 \cdot 10^7$	$2.78 \cdot 10^6$	10.4
III	$1.733 \cdot 10^7$	$1.574 \cdot 10^7$	$1.59 \cdot 10^6$	10.1
IV	$5.826 \cdot 10^6$	$5.970 \cdot 10^6$	$1.44 \cdot 10^5$	2.4
V	$1.200 \cdot 10^6$	$1.274 \cdot 10^7$	$7.40 \cdot 10^5$	5.9
VI	$1.135 \cdot 10^7$	$1.240 \cdot 10^7$	$1.05 \cdot 10^6$	8.5
VII	$6.042 \cdot 10^6$	$6.312 \cdot 10^6$	$2.70 \cdot 10^6$	4.2

Анализ данных приведенной таблицы показывает, что максимальное отличие в напряжениях элементов моделей составляет 10,4%. Причем в стержневой модели величина максимального напряжения выше соответствующей величины в пластинчатой модели, т.е. расчет по стержневой модели дает результат, идущий в запас. Таким образом, можно сделать вывод о допустимости использования стержневой идеализации шпангоута при рассматриваемом виде нагружения.

Как было указано выше, стержневая модель не может дать оценку напряжений в местах концентраторов напряжений. С помощью подробной пластинчатой модели это сделать можно. В таблице 4 приведены значения напряжений в местах резкого изменения геометрии шпангоута, а именно в узлах 3 и 4 (см. рисунок 6) для всех тестовых вариантов нагружения. В указанной таблице также представлены отношения напряжения в концентраторе пластинчатой модели к расчетному напряжению в соответствующем элементе стержневой модели.

Данные приведенной таблицы показывают, что местные напряжения в местах изменения геометрии конструкции шпангоута могут существенно превышать напряжения полученные с помощью стержневой идеализации. Однако, как видно из общих картин распределения напряжений в элементах пластинчатой модели (см. рисунки 8, 10, 12), указанные области высоких напряжений носят локальный характер и потому напряжения в них не влияют на прочность конструкции шпангоута в целом и их допускается не учитывать.

**Таблица 4.** Напряжения в моделях шпангоута в местах резкого изменения его геометрии

Номер узла	Номер участка	Напряжение в стержневой модели, Па	Напряжение в концентраторе, Па	Отношение напряжений
Тестовый расчет №1				
3	III	$4.65 \cdot 10^7$	$2.41 \cdot 10^8$	5.18
3	IV	$6.88 \cdot 10^7$	$2.13 \cdot 10^8$	3.09
4	IV	$9.17 \cdot 10^7$	$1.87 \cdot 10^8$	2.04
4	V	$1.02 \cdot 10^8$	$1.56 \cdot 10^8$	1.53
Тестовый расчет №2				
3	III	$1.97 \cdot 10^7$	$8.21 \cdot 10^7$	4.17
3	IV	$2.09 \cdot 10^7$	$5.78 \cdot 10^7$	2.76
4	IV	$1.62 \cdot 10^7$	$4.85 \cdot 10^7$	2.99
4	V	$1.96 \cdot 10^7$	$5.10 \cdot 10^7$	2.60
Тестовый расчет №3				
3	III	$4.63 \cdot 10^6$	$9.15 \cdot 10^6$	1.98
3	IV	$7.16 \cdot 10^6$	$1.75 \cdot 10^7$	2.15
4	IV	$5.83 \cdot 10^6$	$1.33 \cdot 10^7$	2.28
4	V	$6.90 \cdot 10^6$	$1.44 \cdot 10^7$	2.09

Проведенные тестовые расчеты моделей шпангоута позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Максимальное различие в напряжениях участков моделей при всех тестовых расчетах составляет 10...16 % .

2. Расчет по стержневой модели во всех тестовых расчетах дает результат, идущий в запас. При этом различие в максимальных напряжениях составляет 10.4%. Это дает основание рекомендовать стержневую модель для оценки общей прочности конструкции шпангоута.

3. Пластинчатая модель шпангоута позволяет оценить местную прочность его конструкции. Значения напряжений в местах изменения конструкции может в 2...5 раз превышать основные напряжения

### Список литературы

1. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 1. / Под ред. И.В. Бармина. М.: Полиграфикс РПК, 2005. 416 с.
2. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 2. / Под ред. И.В. Бармина. М.: Полиграфикс РПК, 2006. 375 с.
3. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. Кн. 3. / Под ред. И.В. Бармина. М.: Полиграфикс РПК, 2012. 251 с.
4. Бирюков Г.П., Манаенков Е.Н., Левин Б.К. Технологическое оборудование отечественных ракетно-космических комплексов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.С. Фадеева, А.В. Торпачева. М.: Рестарт, 2012. 600 с.

5. Драгун Д. К., Ульяненок А. В., Языков А. В. Моделирование поперечного силового набора в каркасных конструкциях // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 3. Режим доступа: <http://maplantsjournal.ru/doc/843865.html>. DOI: [10.7463/aplts.0316.0843865](https://doi.org/10.7463/aplts.0316.0843865)
6. ГОСТ Р 51282-99. Оборудование технологическое стартовых и технических комплексов ракетно-космических комплексов. Нормы проектирования и испытаний. Введ. 2000-01-01. М.: Госстандарт России, 1999. 24 с.

## Modeling the Strength Properties of Power Bulkheads in the Frame Structures

D.K. Dragun<sup>1</sup>, A.V. Ul'yanenkov<sup>1</sup>,  
A.V. Yazykov<sup>1,\*</sup>

\* [andr-yaz@yandex.ru](mailto:andr-yaz@yandex.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** frame construction, finite element method, FEM, strength analysis

---

The work deals with modeling methods of frame structures, used in rocket technology. To estimate their inertia, stiffness and strength properties it is necessary to create its calculation model. Currently, a finite element method is generally used. Various finite elements and combinations thereof may constitute such models. It is obvious that parameters of design under consideration, resulting from calculation, depend on the selected calculation model.

To simulate the properties of a longitudinal set of elements (stringers and longerons), as well as braces a girder (beam) idealization is offered, because their transverse dimensions are substantially smaller than the longitudinal ones. The elements of a transverse power set (frames) is a plated arch-shaped construction of variable sections with holes. Weld tubes of different diameters reinforce the holes in plates. There are cutouts in the vertical plates to mount the stringers. It is impossible to take completely into consideration the mentioned features in the frame idealization of bulkheads. Therefore, it seems more appropriate to use plate-frames for modeling the bulkheads.

. The paper discusses two possible models of the bulkhead to show their stiffness properties, namely frame and plate. Describes strengths and shortcomings of represented bulkhead design schemes. Based on the test calculations shows which errors may be possible in calculating the strength properties of the bulkhead under consideration when using a frame model. Gives recommendations on the proper use of potential bulkhead models to estimate a general and local strength of the bulkhead structure.

The SADAS software package developed at the Department SM8 in BMSTU was used to create the bulkhead models under study, perform their test calculations and analyze calculation results.

## References

1. *Tekhnologicheskie ob'ekty nazemnoj infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Kn.1* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Pt.1]. Moscow: Poligrafics RPK, 2005. 416 p.
2. *Tekhnologicheskie ob'ekty nazemnoj infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Kn.2* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Pt.2]. Moscow: Poligrafics RPK, 2006. 375 p.
3. *Tekhnologicheskie ob'ekty nazemnoj infrastruktury raketno-kosmicheskoy tekhniki. Kn.3* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Pt.3]. Moscow: Poligrafics RPK, 2012. 251 p.
4. Biryukov G.P., Manaenkov E.N., Levin B.K. *Tekhnologicheskoe oborudovanie otechestvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Technological equipment of Russian rocket and space complexes]. Moscow: Restart, 2012. 600 p.
5. Dragun D.K., Ul'ianenkov A.V., Iazykov A.V. Modeling the strength properties of power bulkheads in the frame structures. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiia* [Machines & Plants: Design & Exploiting], 2016, no. 5. Available at: <http://maplantsjournal.ru/doc/843865.html>.
6. *GOST R 51282-99. Oborudovanie tekhnologicheskoe startovykh i tekhnicheskikh kompleksov raketno-kosmicheskikh kompleksov. Normy proektirovaniia i ispytanij* [Launching and technical complexes technological equipment for rocket-space complexes. Design and test norms]. Moscow: Russia Gosstandard, 1999. 24 p.