

УДК 629.198.22

## **Моделирование поперечного силового набора 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 некоторой гипотетической каркасной конструкции. Показано, что продольные элементы рассматриваемой 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 жесткостных свойств рассматриваемого шпангоута могут быть получены при использовании стержневой модели. Выработаны рекомендации по целесообразному использованию возможных моделей шпангоута на различных этапах проектирования.

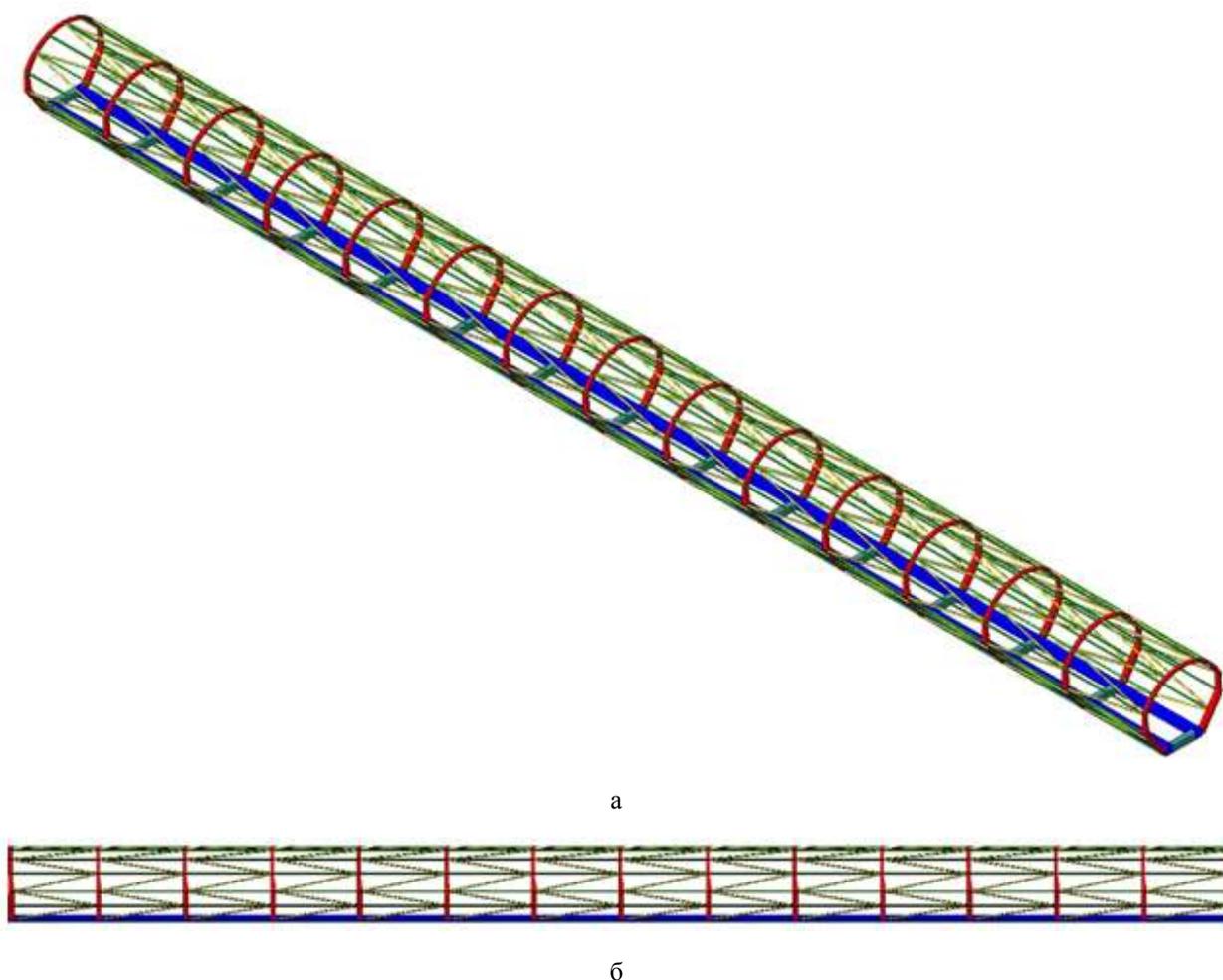
**Ключевые слова:** расчёт, расчётный анализ, балка, МКЭ, шпангоут, стержень

---

Каркасные конструкции широко применяются в качестве несущих сооружений в различных областях техники. Это связано с тем, что такие сооружения способны выполнять большое количество функций, отличаются быстротой и простотой сборки, а также эффективны и надежны в работе. Такие конструкции используются и в ракетной технике [1...4].

Пример такой каркасной конструкции приведен на рисунке 1. Как видно на рисунке, она состоит из нескольких типовых секций. Конструктивная схема такой секции приведена на рисунке 2. Каждая секция состоит из элементов продольного силового набора в виде стрингеров и лонжеронов, шпангоутов, обеспечивающих жесткость конструкции в радиальном и поперечном направлениях, а также подкосов.

Как известно [5, 6], исследование любой несущей конструкции возможно при помощи различных расчетных моделей в зависимости от целей проводимого исследования. Моделирование напряженно-деформированного состояния представленной конструкции имеет некоторые особенности. Это связано с тем, что некоторые ее элементы (стрингера, лонжероны и подкосы) представляют собой трубы, продольные размеры которых существенно превышают их поперечные размеры и, следовательно, они хорошо подходят для балочной идеализации. В тоже время, шпангоуты (см. рисунок 3) представляют собой сварную листовую конструкцию, имеющую форму изогнутой арки переменного сечения с отверстиями. Отверстия в листах подкреплены вваренными 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 напряжений.



**Рисунок 1.** Пространственная каркасная конструкция: а - изометрическая проекция; б –профильная проекция

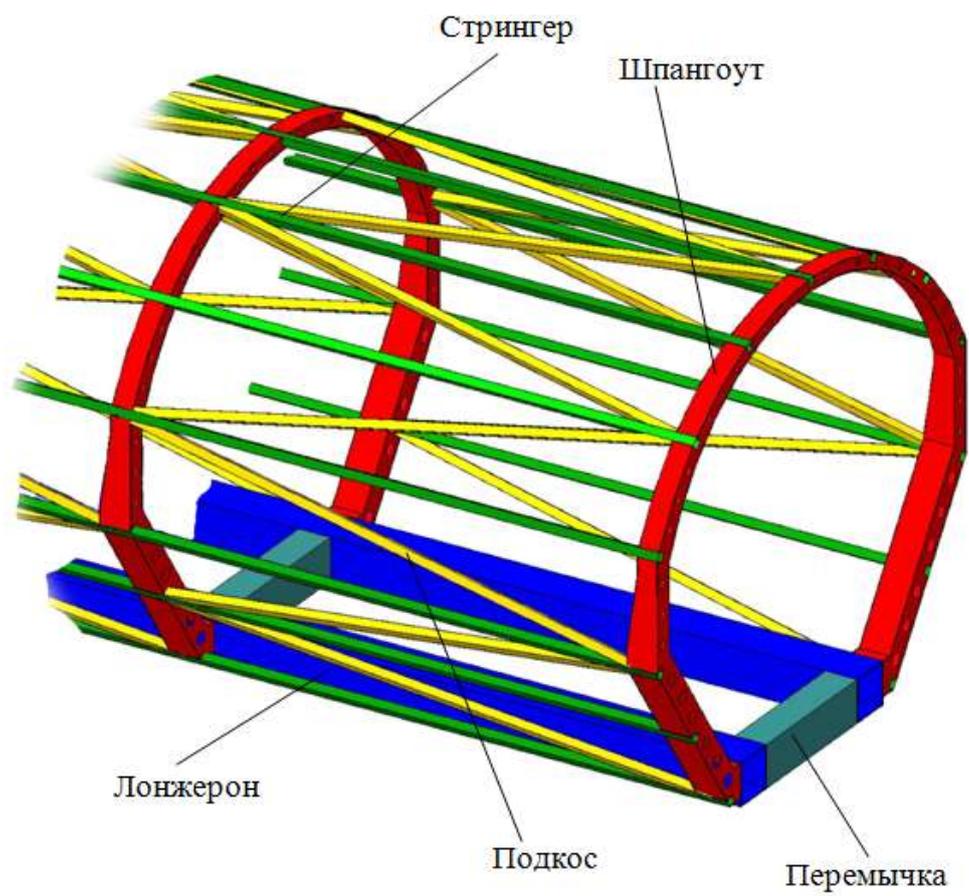
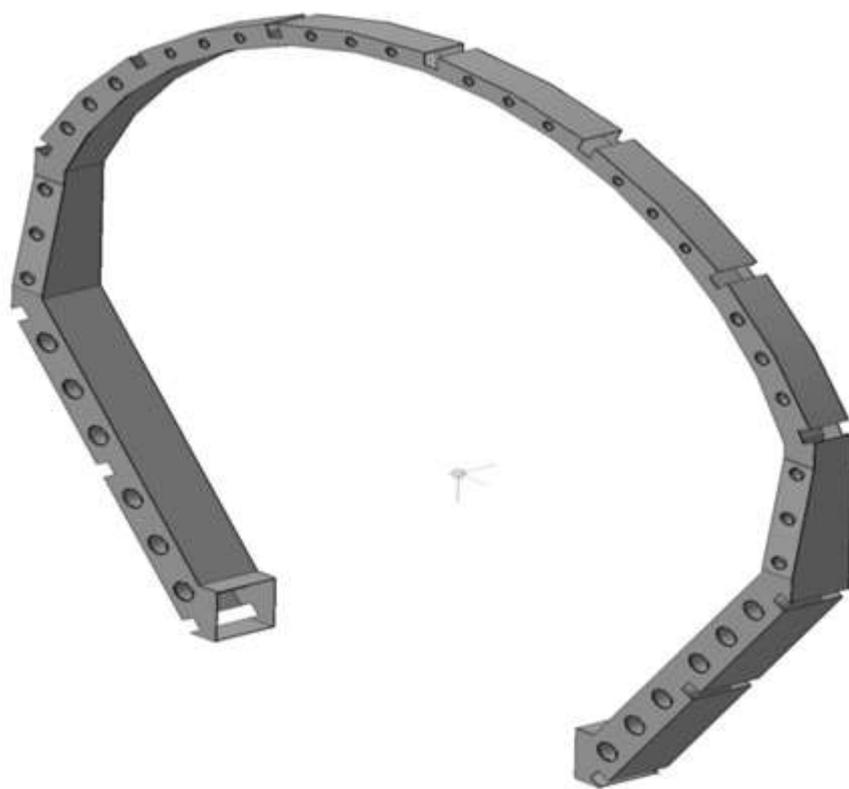
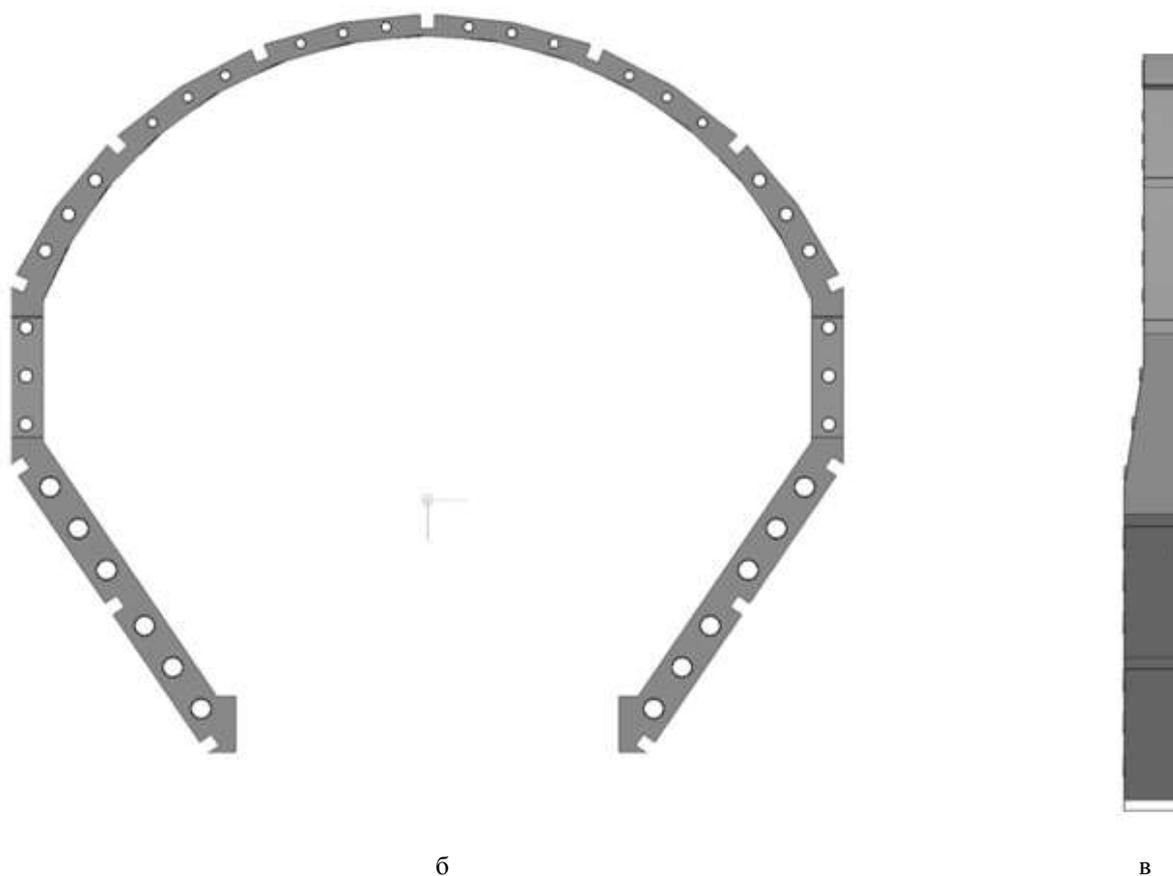


Рисунок 2. Конструктивная схема сечения



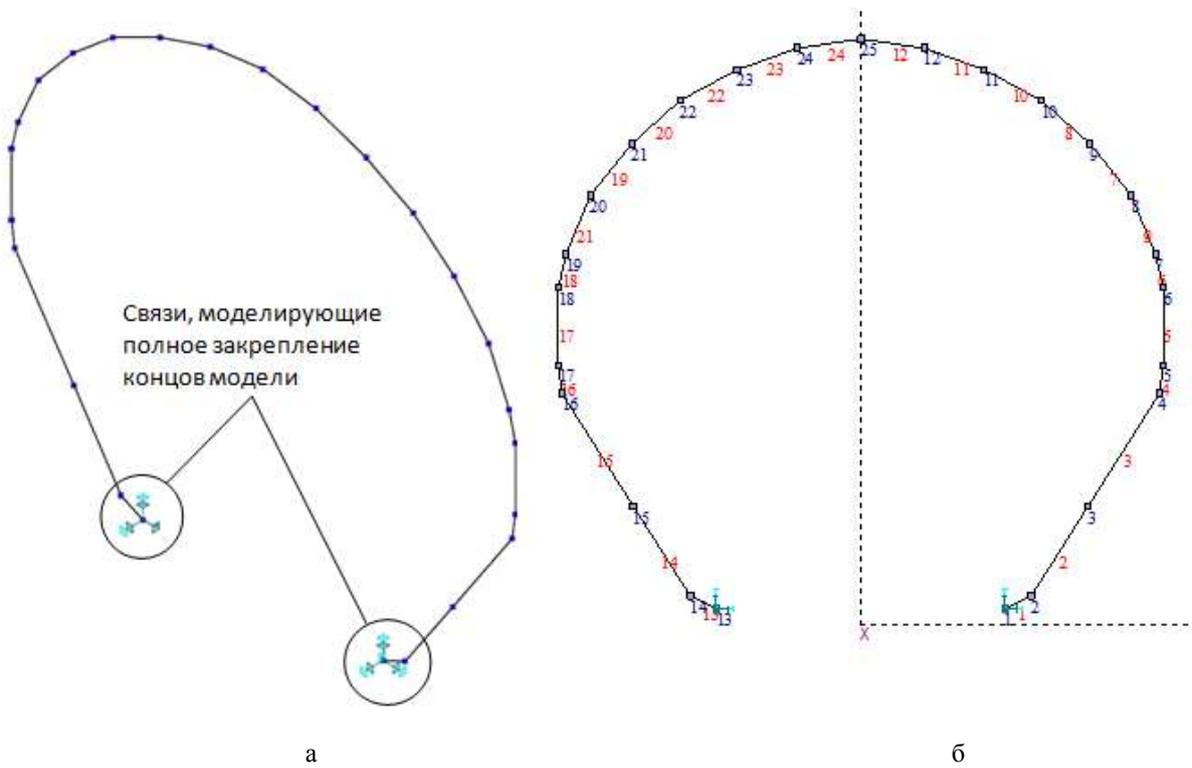
а



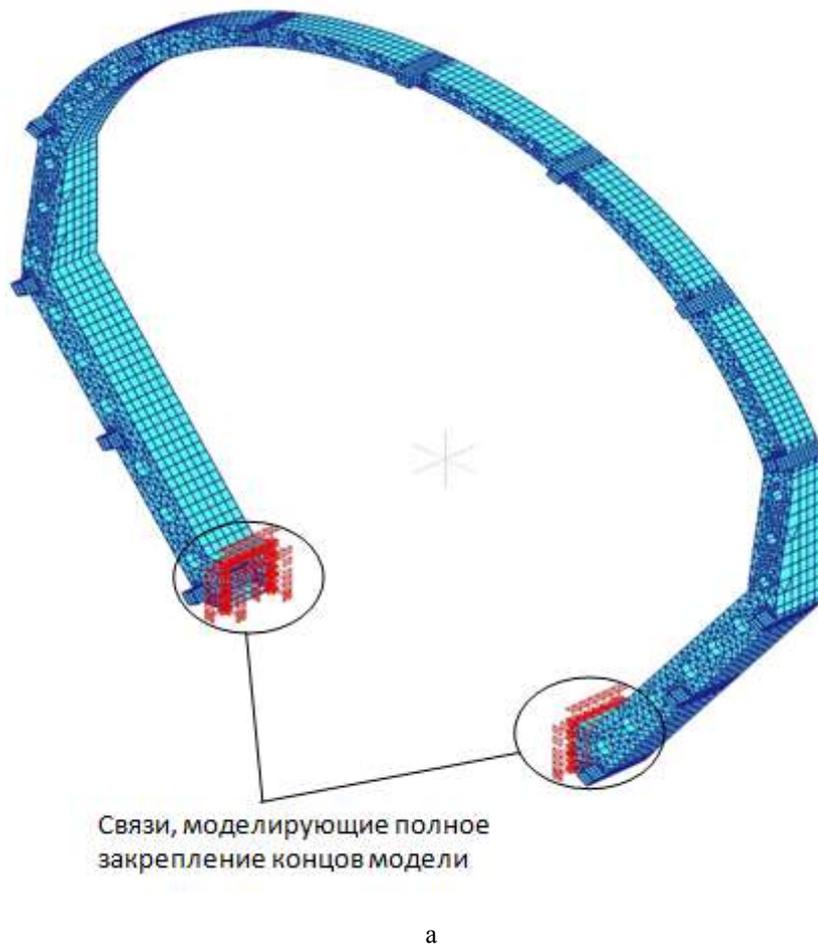
**Рисунок 3.** Конструктивная схема шпангоута: а - изометрическая проекция; б - фронтальная проекция; в - профильная проекция

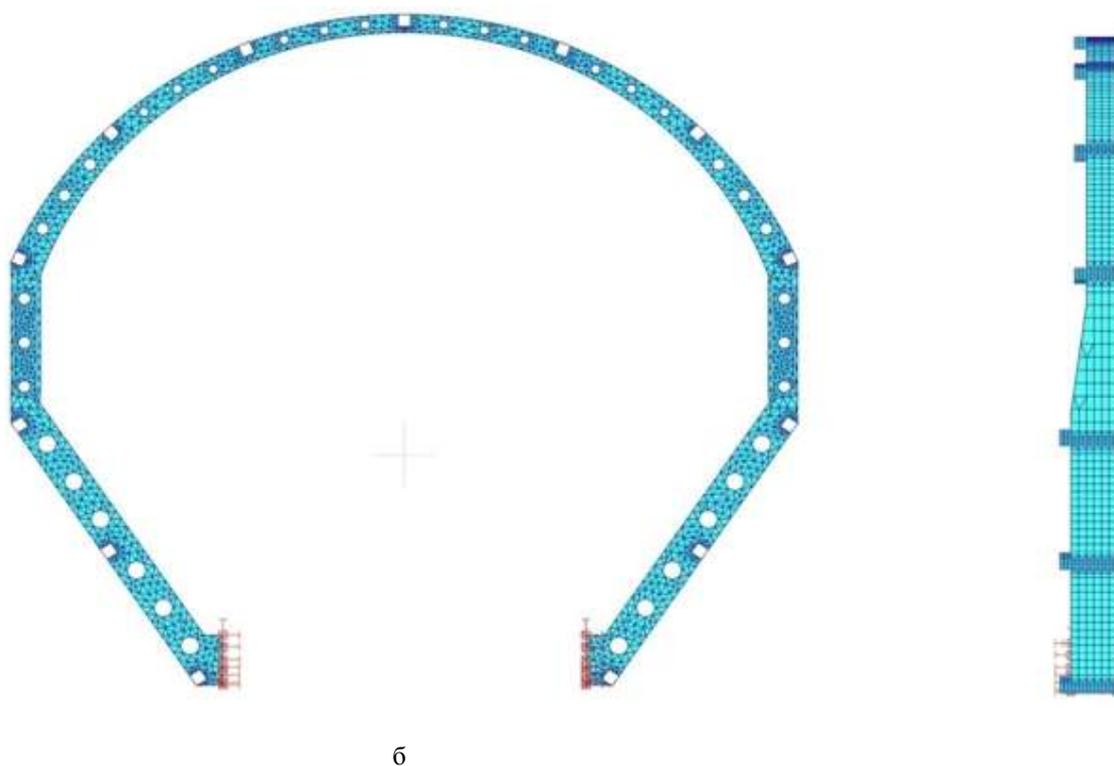
При формировании модели рассматриваемой каркасной конструкции возникает естественное желание и поперечный набор (шпангоуты) представить стержневыми конечными элементами. Тем более что такая расчетная схема всей конструкции получилась бы достаточно простой и удобной для ее исследования. Однако указанные особенности конструкции шпангоута невозможно в полной мере учесть в стержневой идеализации. Поэтому более правильным представляется для моделирования шпангоутов использовать пластинчатые конечные элементы. Пластинчатая модель шпангоута позволяет более точно учесть все особенности реальной конструкции. Понятно, что использование пластинчатого представления шпангоутов в рассматриваемой конструкции приведет к существенно большим временным затратам по ее созданию, отладке и собственно исследованию.

Настоящая работа посвящена исследованию жесткостных свойств двух возможных моделей шпангоута (стержневой и пластинчатой). С этой целью обе модели шпангоутов были рассчитаны на воздействие тестовых нагрузок в местах присоединения стрингеров в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В качестве исследуемых параметров рассмотрим перемещения узлов моделей. На рисунках 4 и 5 приведены расчетные схемы стержневой и пластинчатой моделей шпангоута соответственно.



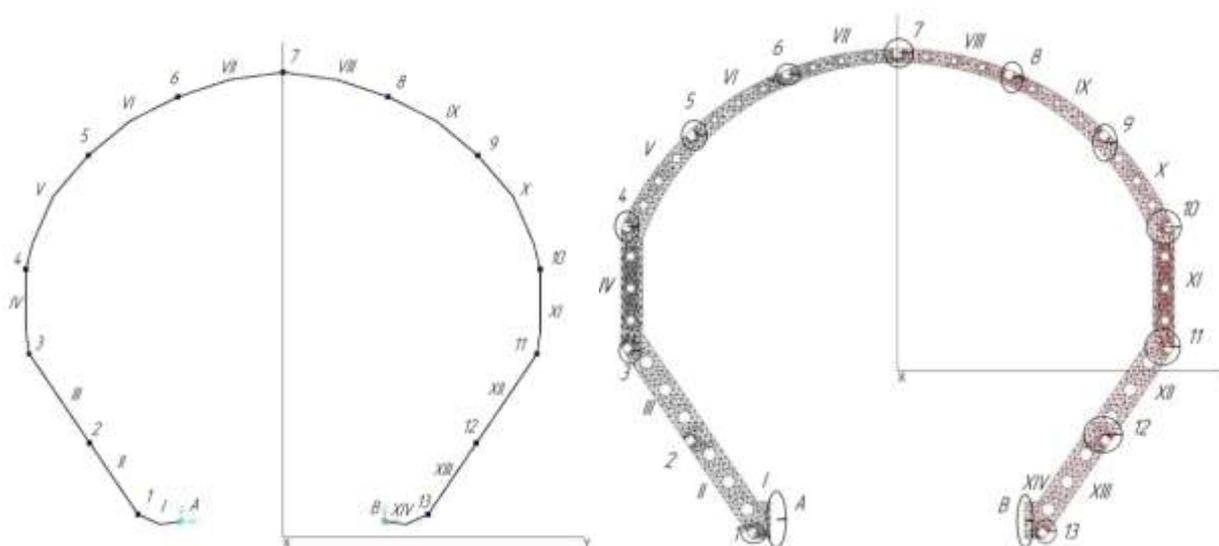
**Рисунок 4.** Стержневая модель шпангоута: а – изометрическая проекция; б – фронтальная проекция.





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

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 отверстий, подкреплений и вырезов. 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.



**Рисунок 6.** Контрольные узлы моделей шпангоута

Для сравнения результатов тестовых расчетов модели условно разделены на 14 участков, в которых элементы конструкции можно считать условно прямолинейными. В ходе тестовых расчетов контролировалось соответствие перемещений контрольных узлов, которые расположены на границах этих участков (см. рисунок 6).

### 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 деформированное состояние – на рисунке 8

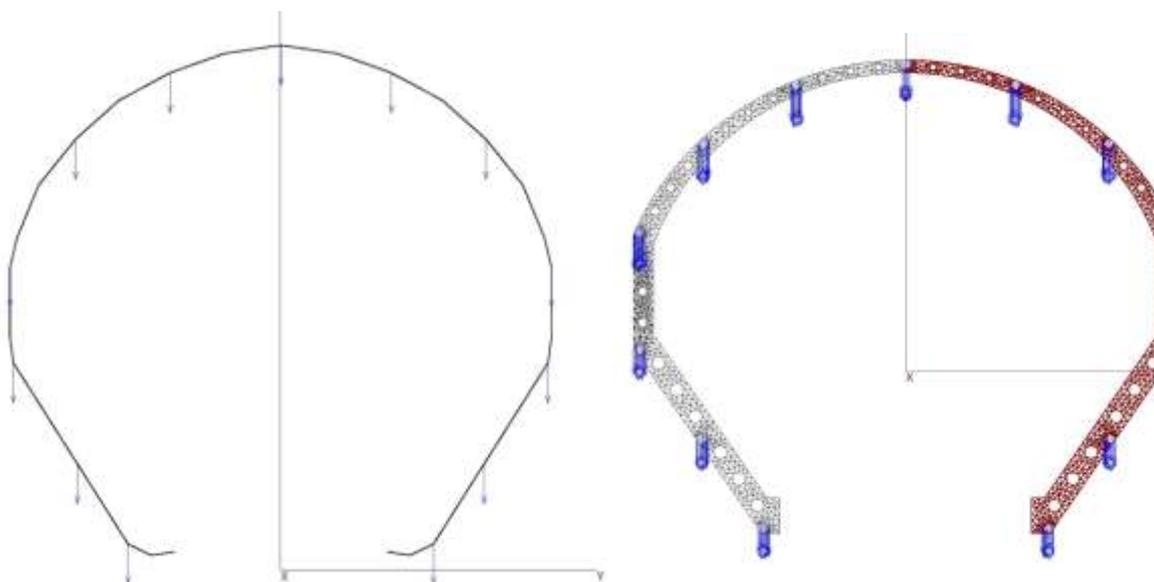


Рисунок 7. Вид нагружения для тестового расчёта №1

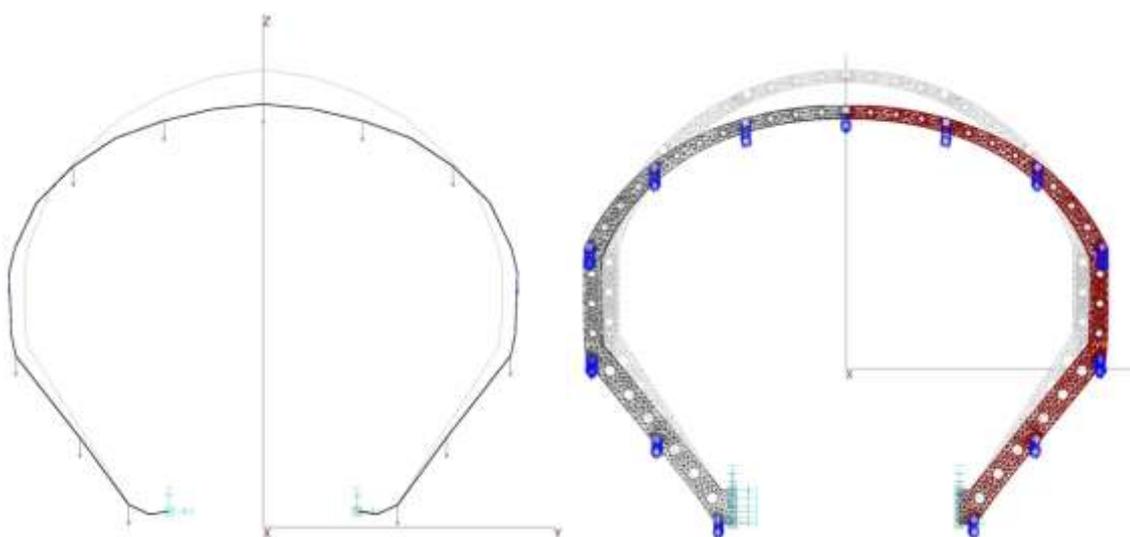


Рисунок 8. Вид деформированного состояния моделей для тестового расчёта №1 (деформации пропорционально увеличены)

Сравнительные данные по деформациям исследуемых моделей в тестовом расчете №1 приведены в таблице 1. В силу симметрии моделей, в указанной таблице приведены данные по деформациям узлов 1...7 моделей. Как можно видеть на рисунке 7, картина деформирования в обеих моделях одинакова. Анализ данных таблицы 1 позволяет сделать вывод, что пластинчатая модель является более податливой, что было ожидаемо. Максимальное относительное расхождение в деформациях узлов моделей составляет примерно 32%. В то же время, максимальные деформации моделей шпангоута (узел 7) различаются на 23%.

**Таблица 1.** Деформации моделей шпангоута в тестовом расчете №1

Номер контрольного узла	Деформации по направлению приложенной нагрузки, м.		Абсолютное расхождение, м	Относительное расхождение, %
	Стержневая. модель	Пластинчатая модель		
1	$-1,528 \cdot 10^{-4}$	$-1,459 \cdot 10^{-4}$	$6,90 \cdot 10^{-6}$	4,7
2	$-1,131 \cdot 10^{-3}$	$-1,652 \cdot 10^{-3}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$	31,5
3	$-3,022 \cdot 10^{-3}$	$-4,161 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	27,4
4	$-3,138 \cdot 10^{-3}$	$-4,578 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	31,5
5	$-4,74 \cdot 10^{-3}$	$-6,831 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	30,5
6	$-8,669 \cdot 10^{-3}$	$-1,167 \cdot 10^{-2}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	25,7
7	$-1,108 \cdot 10^{-2}$	$-1,430 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$	22,5

**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 деформированное состояние – на рисунке 10.

Сравнительные данные по деформациям исследуемых моделей в тестовом расчете №2 приведены в таблице 2. В силу симметрии моделей, в указанной таблице приведены данные по деформациям узлов 1...7 моделей.

Как можно видеть на рисунке 10, картина деформирования в обеих моделях одинакова. Анализ данных таблицы 2 показывает, что в нижней части моделей (узлы 1...3) имеются значительные отличия. Это можно объяснить тем, что сказывается различие в способе представления граничных условий. Следует также отметить, что величины деформаций в нижних узлах малы. В верхней части моделей (узлы 4...7) получены весьма близкие значения. А максимальные деформации моделей (узел 7) различаются только на 1%.

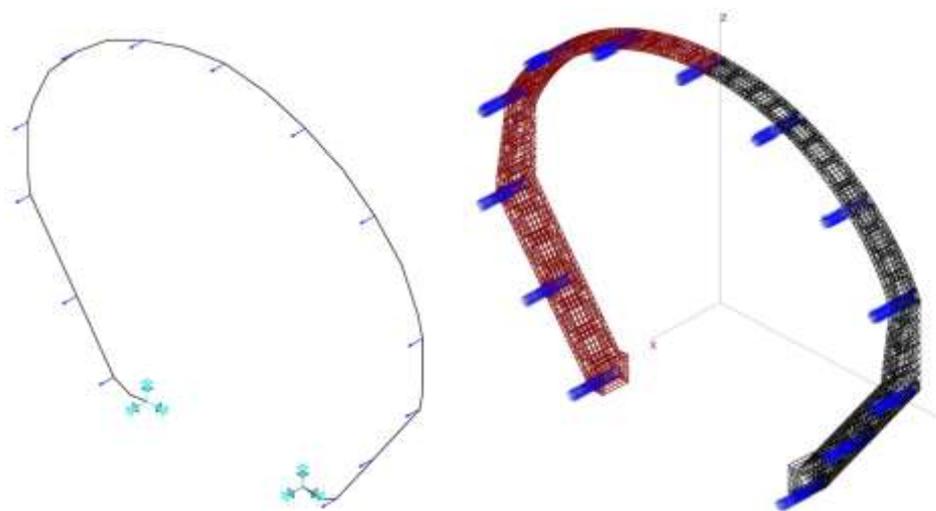


Рисунок 9. Вид нагружения для тестового расчёта №2

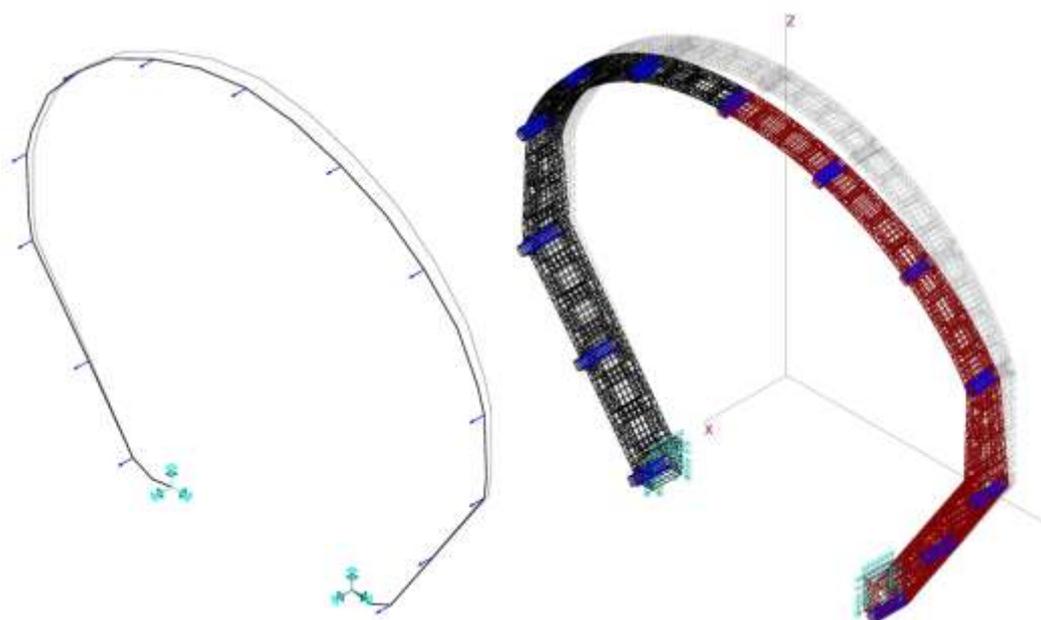


Рисунок 10. Вид деформированного состояния моделей для тестового расчёта №2 (деформации пропорционально увеличены)

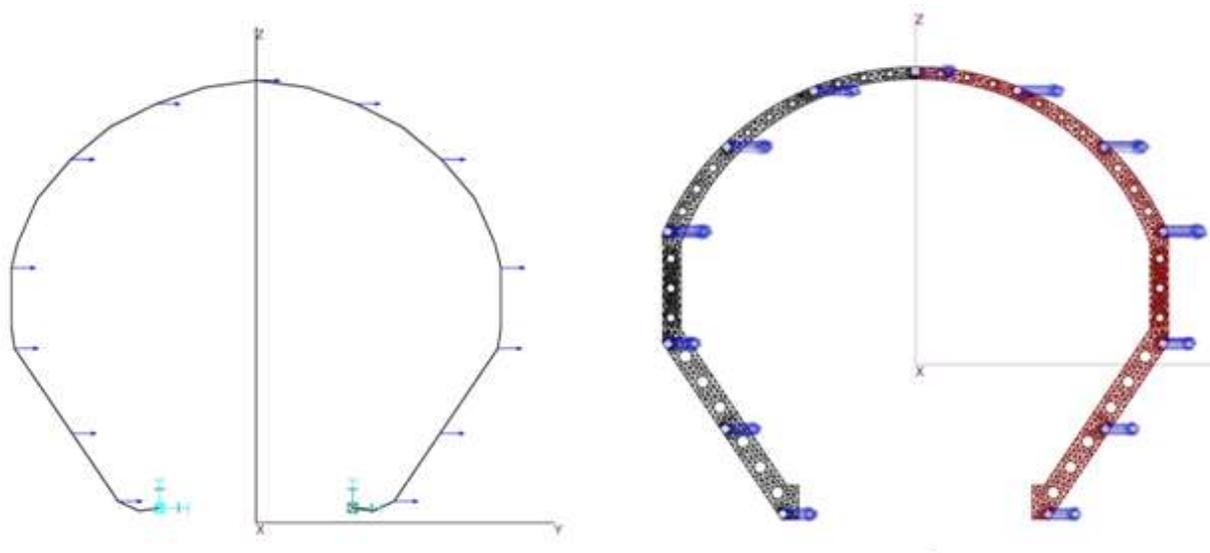
Таблица 2. Деформации моделей шпангоута в тестовом расчёте №2

Номер контрольного узла	Деформации по направлению приложенной нагрузки, м.		Абсолютное расхождение, м.	Относительное расхождение, %
	Стержневая модель	Пластинчатая модель		
1*	$1,922 \cdot 10^{-4}$	$1,533 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	1100
2	$1,641 \cdot 10^{-3}$	$7,358 \cdot 10^{-4}$	$9,03 \cdot 10^{-4}$	122
3	$4,104 \cdot 10^{-3}$	$2,560 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	60,3
4	$6,837 \cdot 10^{-3}$	$6,159 \cdot 10^{-3}$	$6,78 \cdot 10^{-4}$	11,0
5	$1,141 \cdot 10^{-2}$	$1,079 \cdot 10^{-2}$	$6,20 \cdot 10^{-4}$	5,7
6	$1,429 \cdot 10^{-2}$	$1,410 \cdot 10^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$	1,3
7	$1,557 \cdot 10^{-2}$	$1,544 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	0,8

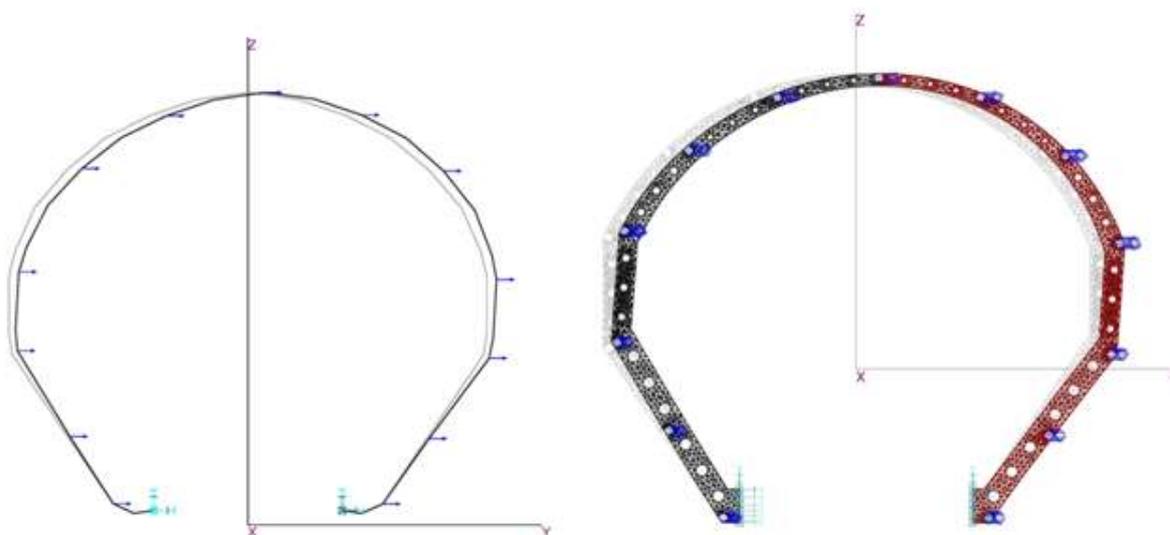
**Тест №3.** В этом расчетном случае рассматривалось нагружение исследуемых моделей горизонтальными силами в плоскости шпангоута, приложенными в местах их соединения со стрингерами. Величина силовой нагрузки в каждом месте приложения принята равной  $1 \cdot 10^3$  Н. Суммарная нагрузка на шпангоут, 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 деформированное состояние – на рисунке 12.

Как можно видеть на рисунке 12, картина деформирования в обеих моделях одинакова. Сравнительные данные по деформациям исследуемых моделей в тестовом расчёте №3 приведены в таблице 3. В силу симметрии моделей, в указанной таблице приведены данные по деформациям узлов 1...7 моделей.



**Рисунок 11.** Вид нагружения для тестового расчёта №3



**Рисунок 12.** Вид деформированного состояния моделей для тестового расчёта №3 (деформации пропорционально увеличены)

**Таблица 3.** Деформации моделей шпангоута в тестовом расчете №3

Номер контрольного узла	Деформации по направлению приложенной нагрузки, м.		Абсолютное расхождение, м.	Относительное расхождение, %
	Стержневая модель	Пластинчатая модель		
1	$1,173 \cdot 10^{-5}$	$1,260 \cdot 10^{-5}$	$8,70 \cdot 10^{-7}$	6,9
2	$4,249 \cdot 10^{-4}$	$6,484 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	34,5
3	$1,516 \cdot 10^{-3}$	$2,297 \cdot 10^{-3}$	$7,81 \cdot 10^{-4}$	34,0
4	$2,779 \cdot 10^{-3}$	$4,549 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	38,9
5	$4,231 \cdot 10^{-3}$	$5,553 \cdot 10^{-3}$	$6,20 \cdot 10^{-4}$	5,7
6	$4,565 \cdot 10^{-3}$	$6,335 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	20,9
7	$4,553 \cdot 10^{-3}$	$6,404 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	28,9

Анализ данных таблицы 3 показывает, деформации узлов пластинчатой модели выше деформаций стержневой модели, что говорит о бóльшей податливости пластинчатой модели. Максимальное относительное расхождение в деформациях узлов моделей составляет примерно 39%. При этом максимальные деформации моделей (узел 7) различаются на 29%

### Заключение

В работе рассмотрены две модели шпангоута для представления их жесткостных свойств: стержневая и пластинчатая. Каждая из этих моделей имеет свои достоинства и недостатки. А именно:

- стержневая модель является более простой для формирования и исследования по сравнению с пластинчатой, а также она наиболее удобно вписывается в общую расчетную схему каркасной конструкции;

- пластинчатая модель шпангоута наиболее точно идеализирует все конструктивные особенности рассматриваемого шпангоута, но ее описание требует больше времени на формирование и отладку исходных данных. Также нужно учесть, что ее встраивание в общую расчетную схему каркасной конструкции имеет известные трудности, связанные с тем, что продольные элементы (стрингера) идеализируются стержневыми конечными элементами.

Проведенные тестовые расчеты моделей шпангоута позволяют сделать следующие основные выводы:

1. При нагружении силами в плоскости шпангоута (тесты №1 и №3) максимальное относительное различие в деформациях узлов моделей составляет 30...40%. Однако максимальные деформации моделей различаются на 20...30%. Причем деформации узлов пластинчатой модели, всегда выше деформаций стержневой модели. Это объясняется тем, что в пластинчатой модели более точно описаны конструктивные особенности конструкции шпангоута (вырезы, отверстия и т.д.), которые в стержневой модели учесть затруднительно.

2. При нагружении силами из плоскости шпангоута (тест №2) существенное различие в деформациях моделей наблюдается только в нижней части моделей, но они составляют малые величины в абсолютном выражении. Этот факт объясняется различием в способах моделировании граничных условий в моделях. Максимальные деформации моделей различаются только на 1%.

3. Стержневая модель шпангоутов в рассматриваемой конструкции, учитывая ее простоту в создании и исследования, может быть использована для расчетов, в которых не требуется повышенная точность. А именно, на ранних стадиях проектирования конструкции, когда исходные данные по конструкции весьма неточные.

4. Пластинчатая модель шпангоута хорошо представляет его жесткостные свойства и, ввиду своей относительной сложности, ее целесообразно использовать на завершающих стадиях проектирования.

### 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: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.С. Фадеева, А.В. Торпачева. М.: Рестарт. 2012. 600 с.
5. Феодосьев В.И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. М.: Наука. 1975. 174 с.
6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: ИАСВ, SCAD Soft, 2011. 709 с.

## Simulation of Cross Set in 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:** calculation, settlement analysis, beam, finite element method (FEM), frame, rod

---

The paper deals with modeling methods of frame structures, used in rocket technology. To estimate their inertia, stiffness and strength properties there is a need to create its calculation model. For this purpose now a finite element method is generally used. These models may use various finite elements and combinations thereof. It is obvious that the calculation has found that parameters of the structure under study depend on the selected calculation model.

The paper discusses some issues concerning the idealization of elements of the hypothetical frame structure. To simulate the element properties of a longitudinal set (stringers and longerons) and struts as well is offered idealization of beam, because their crosswise dimensions are substantially smaller than the longitudinal ones. Elements of a crosswise force set (frames) represent a welded plate structure that has arch-curved shape of variable cross-section with holes. Welded tubes of different diameter reinforce holes in plates. In vertical plates there are cutouts to mount stringers. To take in full into consideration these features in the rod idealization of frames is impossible. Therefore it seems more appropriate to use plate finite elements to simulate frames.

The paper considers two possible frame models to show their stiffness properties, namely a rod model and a plate one. It shows the advantages and disadvantages of given design schemes of the frame. Based on the test calculations the paper shows which errors in calculating the stiffness properties of the frame under consideration can be obtained using the rod model. Recommendations for judicious use of possible models of the frame at different designing stages are made.

To create the studied frame models and their test calculations and analyze the results of calculation was used a SADAS software package developed at the SM8 Department of BMSTU.

## References

1. Barmin I.V. ed. *Tekhnologicheskie ob"ekty nazemnoi infrastruktury raketno-kosmicheskoi tekhniki. Kn.1* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Book 1]. Moscow, Poligrafiks RPK Publ., 2005. 416 p. (in Russian).

2. Barmin I.V. ed. *Tekhnologicheskie ob"ekty nazemnoi infrastruktury raketno-kosmicheskoi tekhniki. Kn.2* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Book 2]. Moscow, Poligrafiks RPK Publ., 2005. 375 p. (in Russian).
3. Barmin I.V. ed. *Tekhnologicheskie ob"ekty nazemnoi infrastruktury raketno-kosmicheskoi tekhniki. Kn.3* [Technological ground infrastructure rocket and space technology. Book 3]. Moscow, Poligrafiks RPK Publ., 2005. 251 p. (in Russian).
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 Publ., 2012. 600 p. (in Russian).
5. Feodos'ev V.I. *Desyat' leksii-besed po soprotivleniyu materialov*. [Ten lectures and discussions on strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 174 p. (in Russian).
6. Perel'muter A.V., Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza*. [Design models of structures and possibility of their analysis]. Moscow, IASV, SCAD Soft, 2011. 709 p.