

*Макарецев Е.Д.,  
студент 5 курса кафедры "Стартовые ракетные комплексы"*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Россия, г. Москва*

*Языков А.В.,  
старший преподаватель кафедры "Стартовые ракетные комплексы"*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Россия, г. Москва*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ СВЕРХТЯЖЁЛОГО КЛАССА**

*Аннотация:* в статье рассмотрены вопросы проектирования транспортно-установочных агрегатов для перспективных ракет космического назначения сверхтяжёлого класса. На основе проведённых расчётов, сделан вывод о том, что подобный агрегат может быть разработан на основе известных, хорошо зарекомендовавших себя технических решений, что должно уменьшить время и материальные затраты на создание агрегата.

*Ключевые слова:* ракета космического назначения, ракета-носитель, РКН, РН, транспортно-установочный агрегат, ТУА, проектирование.

## **FORMATION OF THE DESIGN OF THE CONSTRUCTION OF THE TRANSPORT-INSTALLATION UNIT FOR A PERSPECTIVE SPACE LAUNCHERS OF THE SUPERHEAVY CLASS**

*Abstract:* the article deals with the design of transport-installation units for advanced launchers of the superheavy class. On the basis of the calculations carried out, it is concluded that such an aggregate can be developed on the basis of well-known, well-proven technical solutions, which should reduce the time and material costs of creating the unit.

**Key words:** *space rocket, launch vehicle, LV, launcher, transport-installation unit, design.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России, как и других ведущих странах мира (КНР, США, Индия и др.), снова стали актуальными проекты создания ракет-носителей сверхтяжёлого класса. В частности, РКК «Энергия» ведёт разработку проекта создания, унифицированного с проектом «Союз-5», семейства ракет космического назначения (РКН) тяжёлого и сверхтяжёлого класса «Энергия-5»[1]. Под новый носитель потребуются разработка и создание новых агрегатов и сооружений стартового и технического комплексов.

В данной статье рассматриваются вопросы формирования конструктивного облика и определения массо-габаритных характеристик транспортно-установочного агрегата (ТУА). ТУА предназначен для транспортировки ракеты в горизонтальном положении из монтажно-испытательного корпуса (МИКа) к пусковой установке (ПУ), перевода ракеты в вертикальное положение, совмещения осей ракеты и ПУ, передачи веса ракеты на опоры ПУ.

Разработка ТУА для РКН сверхтяжёлого класса – сложная техническая задача, не решавшаяся в нашей стране несколько десятков лет. Поэтому, представляется полезным, не осуществлять проектирование полностью оригинального агрегата, а использовать элементы технических решений, хорошо себя зарекомендовавших в аналогичных проектах.

В качестве исходных данных взяты предположительные габаритные размеры ракеты-носителя «Энергия-5К» с «лунной» модификацией космического корабля «Федерация» в качестве головной части (оценочная длина – 90м, оценочная сухая масса – 354т.)

За конструктивную основу для ТУА РН Энергия-5К возможно принять ТУА Энергия-Буран. Вид платформы ТУА, по сравнению с ТУА Энергия-

Буран не будет претерпевать сильных изменений конструкции, за исключением габаритных размеров. Стрела ТУА будет видоизменена в силу того, что длина РН Энергия-5К имеет значительно большую длину, в связи с чем, имеет смысл две силовые ветви свести к одной, вследствие чего будет происходить уменьшение веса ТУА. Систему подъема также имеет смысл двурусной, так как сухой вес ракеты вместе с ССБ достаточно высокий.

Основной решаемой задачей является подбор расчётным методом геометрических характеристик элементов силовой конструкции ТУА с целью обеспечения прочности т.е. исключения возможности появления повреждений в металлоконструкциях и возникновения пластических деформаций в элементах конструкции при любых сочетаниях эксплуатационных нагрузок, т. е. в обеспечении необходимых значений коэффициентов запаса по прочности (обычно не менее 1,5 относительно предела текучести материала) и обеспечения жёсткости, т.е. прогибов конструкции не выше допустимых.. При отсутствии дополнительных данных максимальный прогиб на конце консольной балки не должен превышать 0,005...0,01 ее длины.

Для проведения необходимых расчётов использовался программный комплекс «Sadas», разработанный на кафедре «Стартовые ракетные комплексы МГТУ им. Н.Э. Баумана» [2].

#### МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА

Основу силовой конструкции ТУА (рис. 1, 2) составляют платформа и стрела, шарнирно соединённая с платформой. Рама ТУА через систему балансиров опирается на ходовые железнодорожные тележки. Ракета фиксируется на стреле двумя ложементами задней опоры и передней опорой.

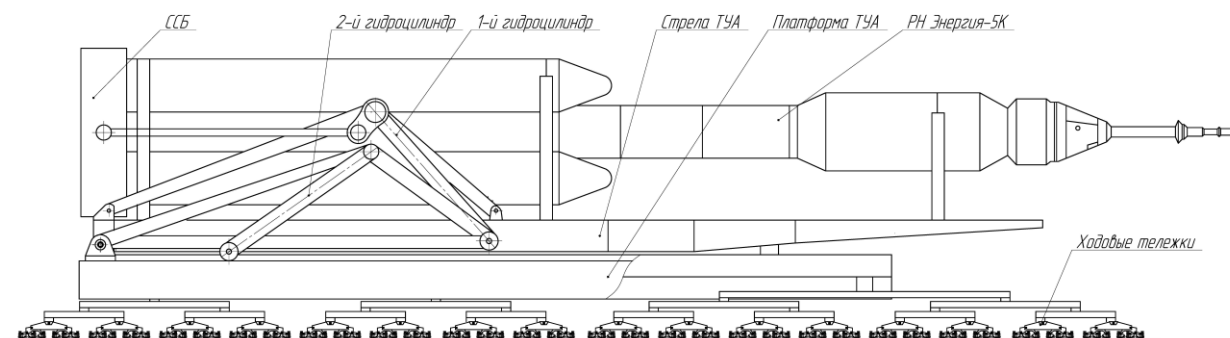


Рис. 1. Конструктивная схема ТУА с РН. Вид сбоку.

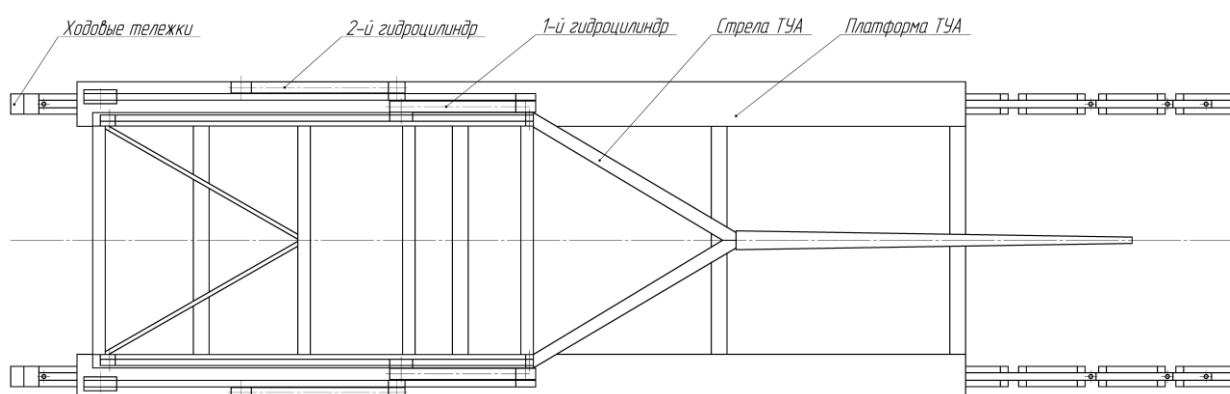


Рис. 2. Конструктивная схема ТУА. Вид сверху.

Для подъёма стрелы с ракетой используется двухъярусная параллельная система подъема. Каждый ярус состоит из двух гидроцилиндров и силовой конструкции. На первом этапе подъема работают два гидроцилиндра, имеющие большее плечо относительно оси вращения. Все гидроцилиндры одинаковые, имеют диаметр 1,5 м. Длины гидроцилиндров подбирались путем кинематического анализа при условии, что длина гидроцилиндров первого яруса должны быть равна длине гидроцилиндров второго яруса (рис.3.). Длина гидроцилиндров составляет 12 м.

Работа первого яруса обеспечивает подъем РН на  $27^\circ$ , а второй на  $90^\circ$ .

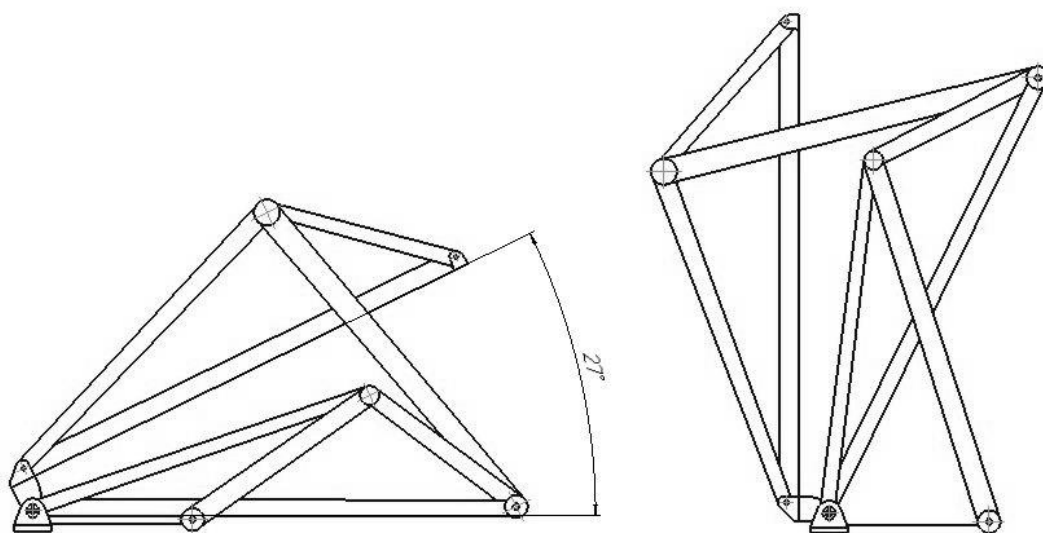


Рис. 3. Схема работы двухъярусной системы подъёма

Расчётная схема (РС) агрегата (рис. 4) представляет собой пространственную стержневую систему. Все узлы схемы, за исключением шарнирных, являются жесткими телами, соединенными между собой конечными элементами -призматическими стержнями.

Для того, чтобы смоделировать закрепление агрегата, на нижние узлы стержней, моделирующих узлы крепления балансиров ходовой части, накладываются линейные связи.

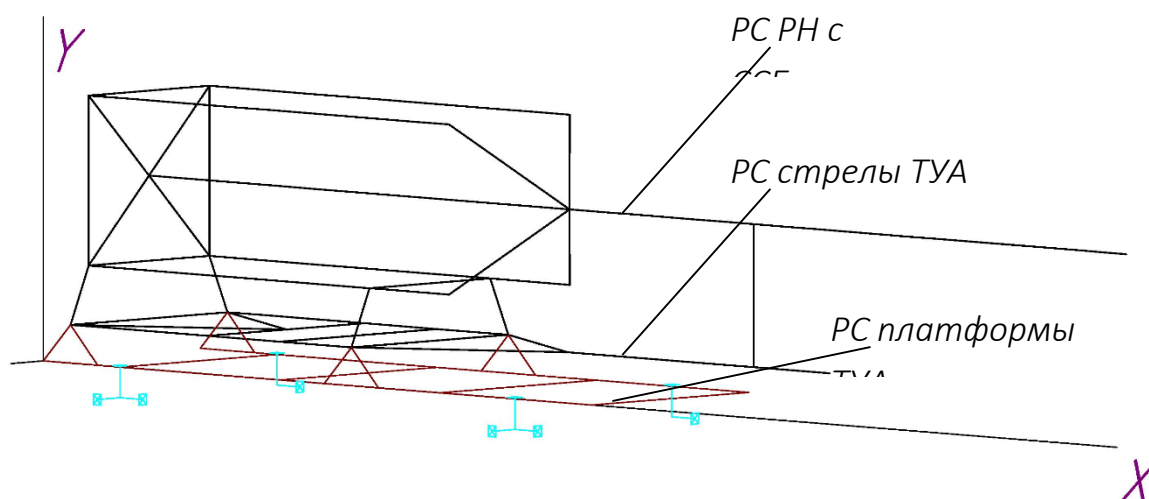


Рис. 4. Расчетная схема ТУА

## Расчётная схема РКН Энергия-5К

Поскольку ракета-носитель в рассматриваемой системе не является несущей конструкцией, была принята упрощённая расчётная схема РКН (рис. 5), в целом отражающая её массо-габаритные характеристики. При моделировании ракеты-носителя основной задачей было верное распределение масс по длине стержней, чтобы наилучшим образом отобразить реальную конструкцию ракеты. Для этого были созданы сечения тонкостенных колец наружными диаметрами 4,1 м.

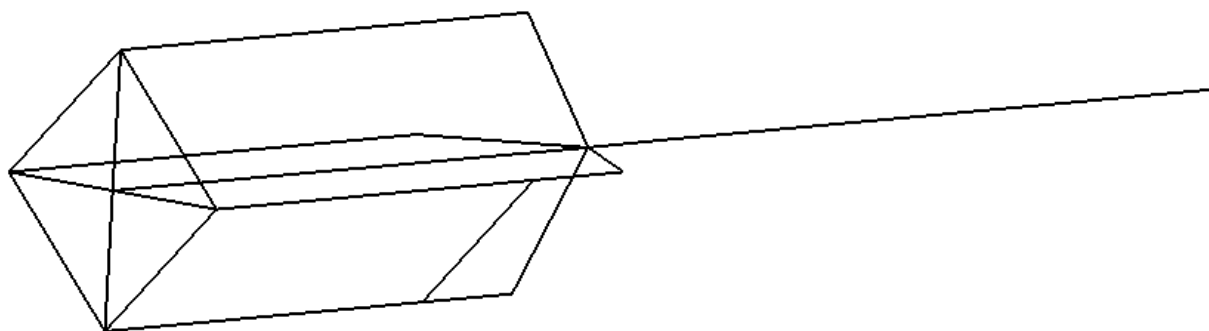


Рис. 5. Расчетная схема РН с ССБ

В качестве базового материала был выбран алюминиевый сплав АМг-5, который широко применяется в ракетно-космической технике. Для моделирования распределения массы по блокам ракеты создавались дополнительные массы, распределяя вес ракеты по стержням модели

Блоки ступеней оснащены двигательными установками (ДУ) массой 10 т каждая при сухой массе всей ракеты с полезным грузом в 285 тонн. Поэтому двигательные установки моделировались добавлением точечных масс в узлы соединения модели РН и моделью ТПП.

Полезная нагрузка задавалась стержнем со сплошным круглым сечением диаметром 4,1 м, а его масса в 79 т задавалась тем же способом, что и остальные стержни модели РН.

### *Расчётная схема платформы ТУА*

В первом приближении, платформа ТУА рассмотрена как рамная конструкция, состоящая из балок заданного сечения, представленных в расчётной схеме в виде стержней (рис. 6, 7).

Материалом для всех стержней платформы была выбрана низколегированная сталь 10ХСНД. Из данной марки стали выполняются элементы сварных металлоконструкций, к которым предъявляются требования повышенной прочности и коррозионной стойкости и работающие при температурах от  $-70$  до  $+450^{\circ}\text{C}$ .

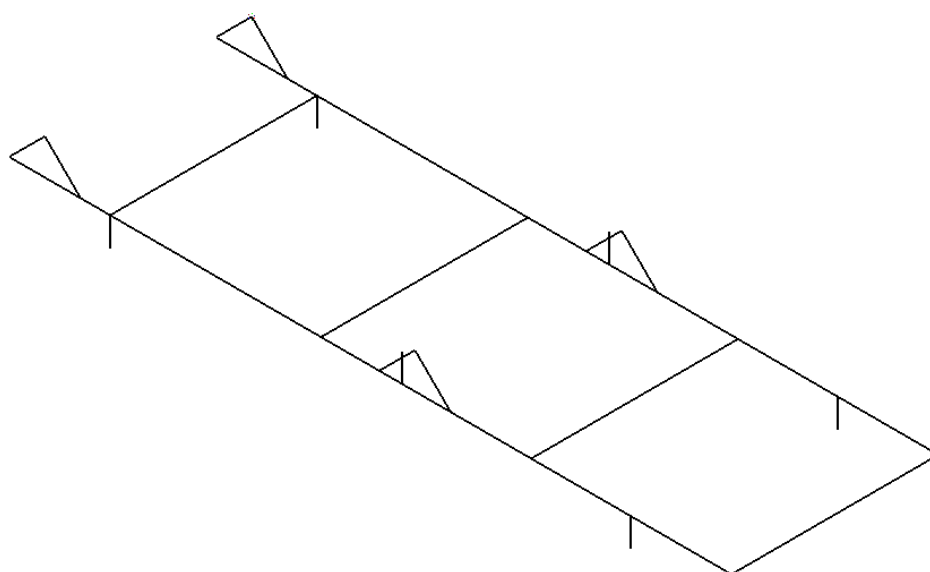
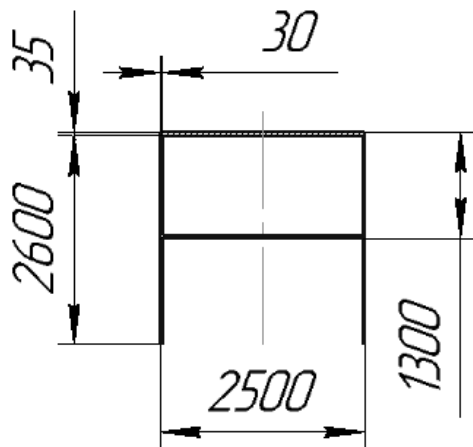


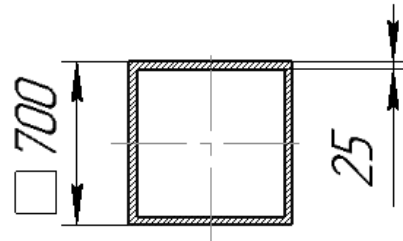
Рис. 6. Расчетная схема платформы

Рис. 7. Сечения стержневых КЭ платформы

*Направляющие платформы*

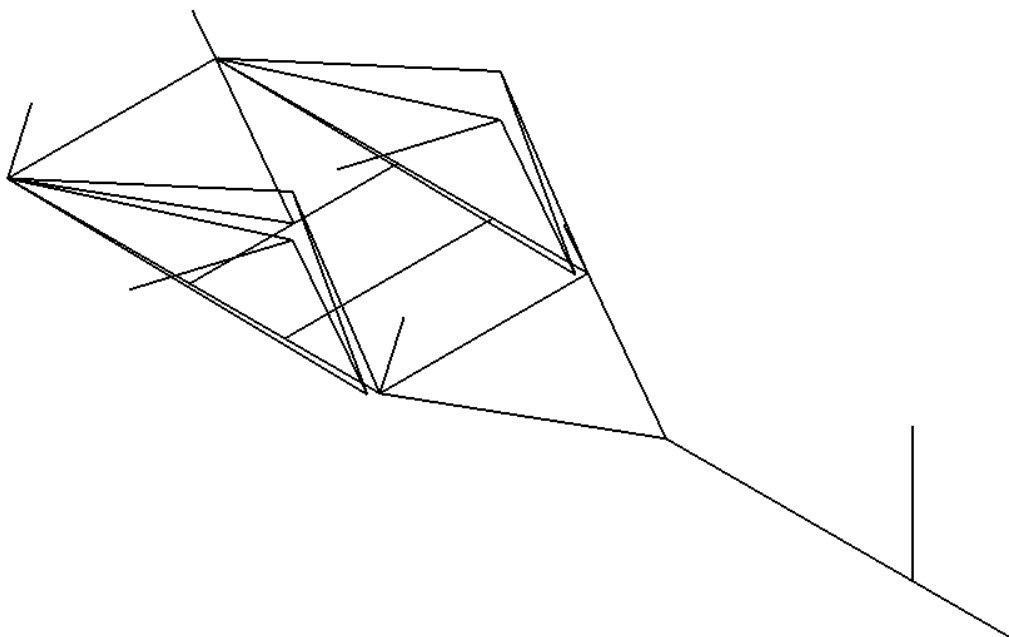


*Поперечные стержни*



*Расчётная схема стрелы ТУА*

Стрела состоит из двух параллельных ветвей – «направляющих» одного сечения, соединенные ферменными конструкциями, представленные в первом приближении в виде стержней характерного сечения (рис. 8, 9). Далее параллельные направляющие сводятся к одному стержню, сечение которого меняется по длине (при расчете разделен на 5 частей постоянного сечения).



Стержни, сводящие параллельные стержни к одному, имеют сечение параллельных стержней. Стержень переменного сечения, удерживающий верхнюю часть ракеты, имеет квадратное сечение для того, чтобы обеспечить жесткость стрелы в перпендикулярном направлении. Направляющие стрелы ТУА соединены с задним поперечным стержнем двумя раскосами для обеспечения жесткости задней части стрелы в вертикальном положении. Материал для всех стержней - сталь 10ХСНД. Силовая конструкция системы подъема сделана из стали 10ХСНД. Гидроцилиндры подъема представлены в виде стержней. Плотность материала гидроцилиндров (сталь 30ХГСА) уменьшена в 10 раз (так как рабочей средой является несжимаемая жидкость), обнулена изгибная жесткость (так как гидроцилиндр не работает на изгиб) (рис. 10).

Рис. 8. Расчетная схема стрелы ТУА с системой подъема

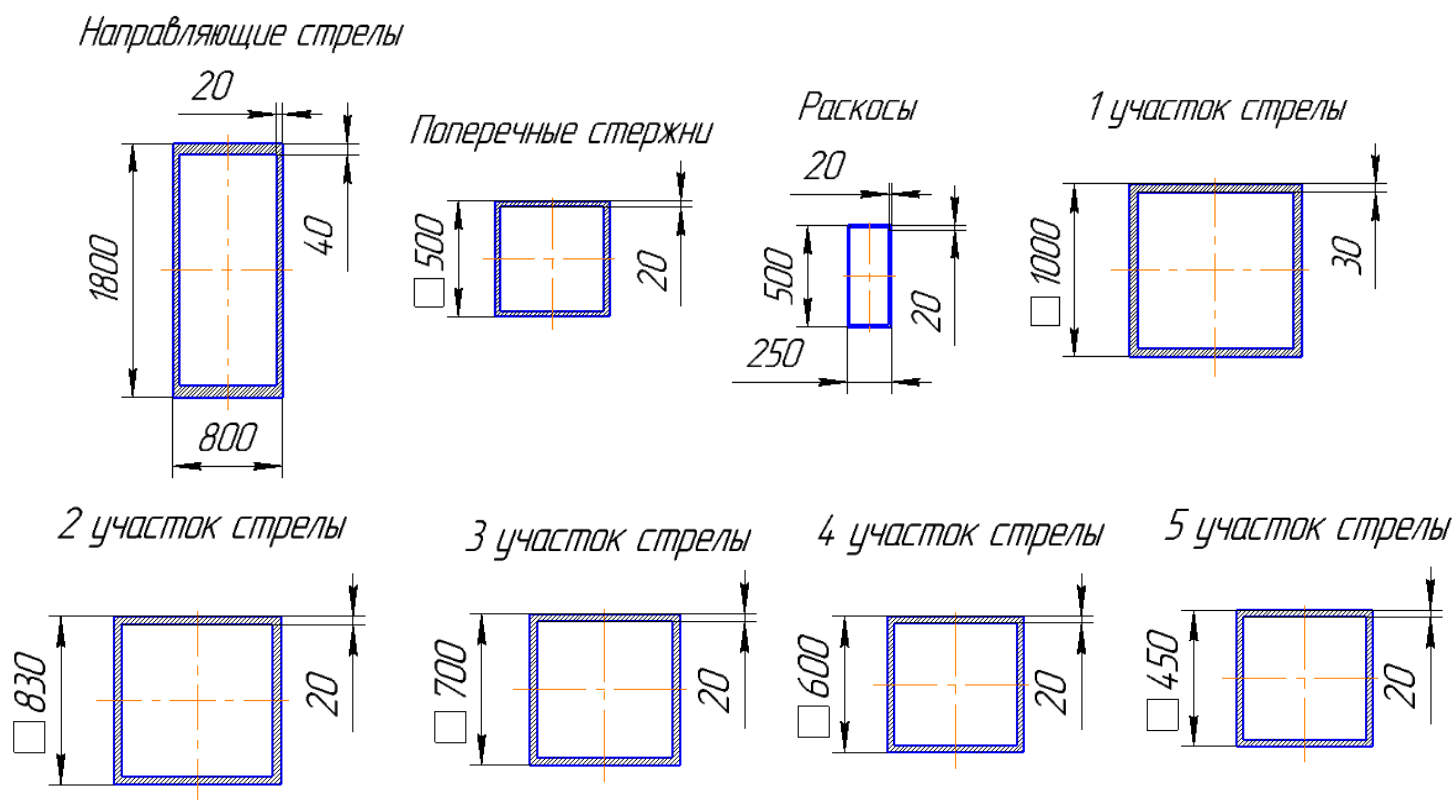


Рис. 9. Сечения стержневых КЭ стрелы

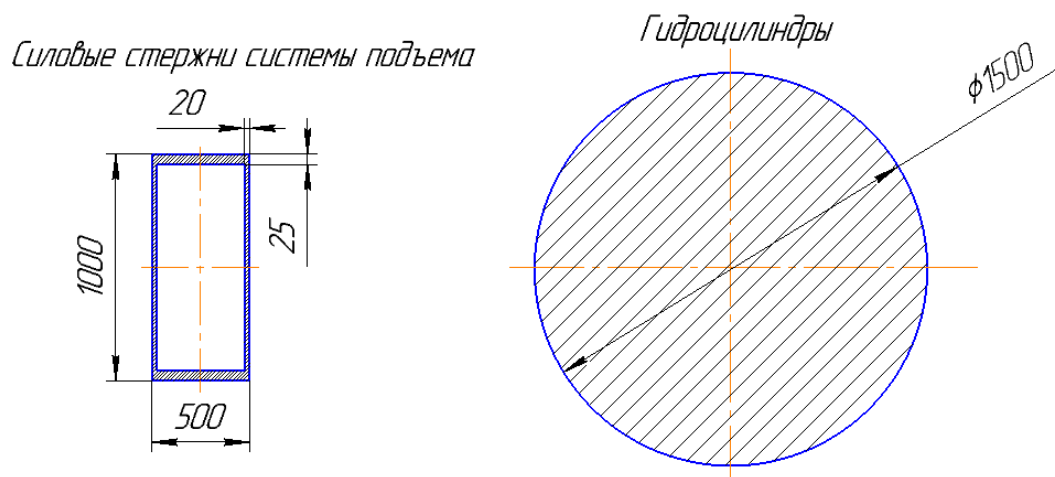


Рис. 10. Сечения стержневых КЭ системы подъема

## РАСЧЁТНЫЕ СЛУЧАИ

Для рассмотрения были выбраны несколько наиболее характерных режимов работы ТУА, в которых его металлоконструкция испытывает наибольшие нагрузки:

*Расчётный случай 1: транспортировка.*

Стрела с РКН находится в горизонтальном положении и лежит на упорах на платформы (рис. 11). Основным нагружением является весовое. Для учёта перегрузок, возникающих при транспортировке, при задании «весовых» сил было принято несколько завышенное значение ускорения свободного падения:  $11 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

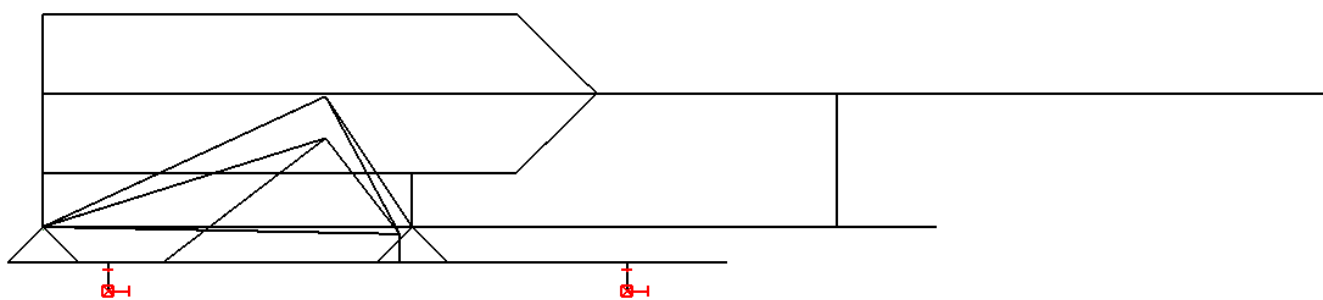


Рис. 11. Расчетный случай 1

*Расчётный случай 2: начальный момент подъема РКН.*

Расчётная схема аналогична первому случаю, за исключением отсутствия передних опор стрелы. Вес стелы перенесён на систему подъёма. При учёте весовых сил учтена перегрузка, связанная с наличием ускорения стелы. Для этого ускорение свободного падения для модели стрелы было условно принято равным  $13 \frac{m}{c^2}$ .

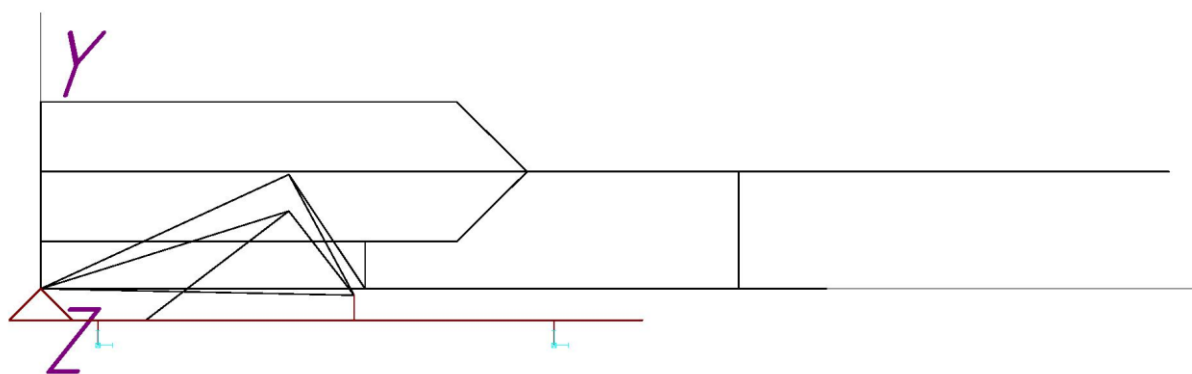


Рис. 12. Расчетный случай 2

*Расчётный случай 3: окончание работа первого яруса – начало работы второго яруса.*

Угол подъема ракеты от горизонтали в данном положении составляет  $27^0$  (рис. 12). Действуют весовые и инерционные нагрузки, а также встречный (случай 3.1) или боковой (случай 3.2) ветры

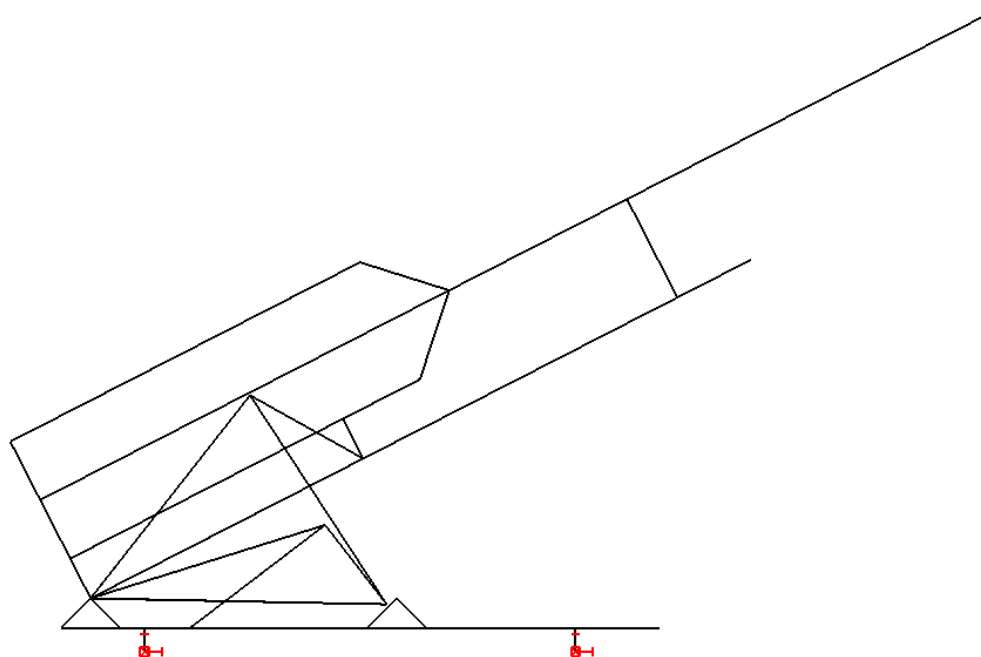
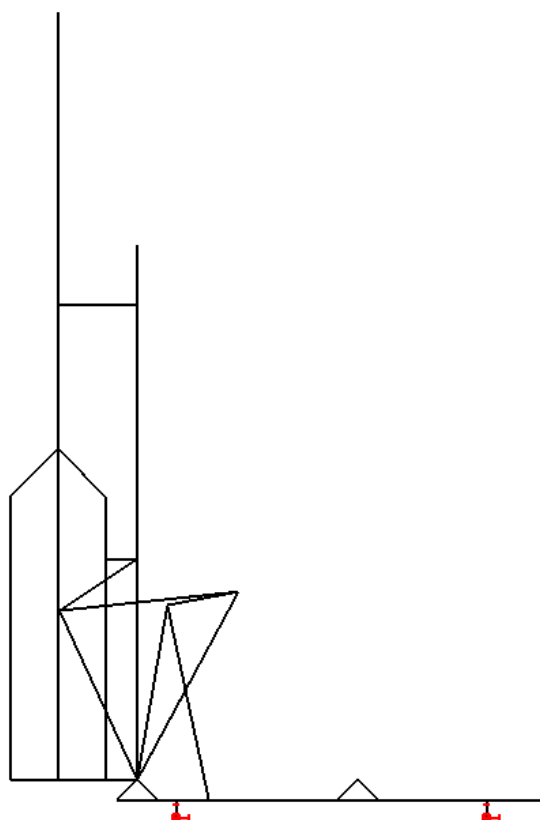


Рис. 13. Расчетный случай 3

*Расчётный случай 4: вертикальное положение.*

Угол подъема ракеты в данном положении составляет  $90^\circ$ . (рис. 12).

Действуют весовые и инерционные нагрузки, а также встречный (случай 4.1)



или боковой (случай 4.2) ветры

Рис. 14. Расчетный случай 4

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

По окончании расчета было получено напряженно-деформированное состояние для двух случаев нагружения. Определены коэффициенты запаса для всех элементов системы, внутренние силовые факторы в КЭ, перемещения узлов, а также проведен частотный анализ конструкции. Получены сечения стержней, на основе которых можно создать конструктивную схему ТУА.

Оценка конструкции производилась по двум критериям: прочности (коэффициент запаса стержней должен быть больше допустимого) и жесткости (максимальные прогибы должны быть меньше  $0,01 \cdot L$ ).

Допустимый коэффициент запаса для ТУА - 1,5; допустимые прогибы для стрелы ТУА – 0,62м, а для РН – 0,9м.

Вес РН с ССБ – 354т., стрелы ТУА – 193,2т., платформы ТУА – 263,8т.

### *Расчетный случай 1*

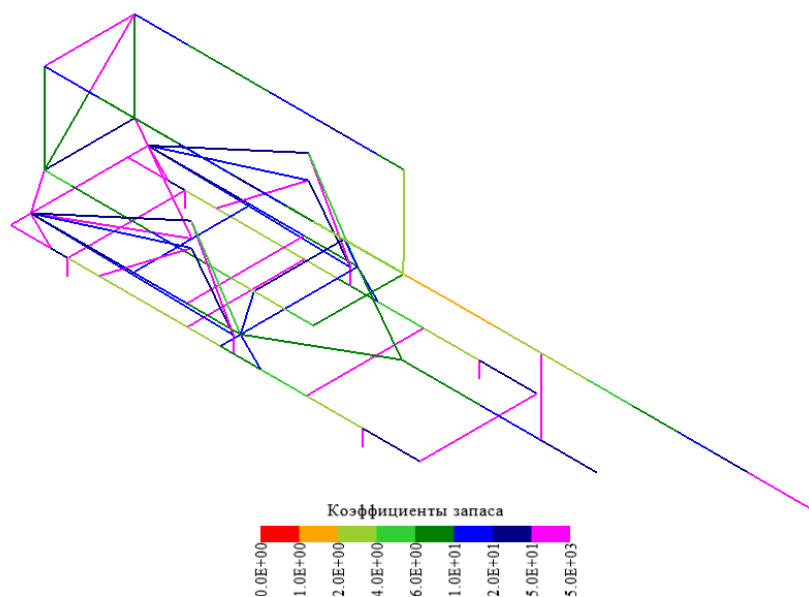


Рис. 15. Распределение коэффициентов запаса расчетного случая 1

В данном положении ТУА при действии критических нагрузок имеет высокий коэффициент запаса по прочности, высокую жесткость. Отображённые коэффициенты запаса модели РКН не являются

информативными ввиду того, что она не отражает особенности конструкции изделия и служит лишь для распределения весовых нагрузок на модель стрелы.

### *Расчетный случай 2*

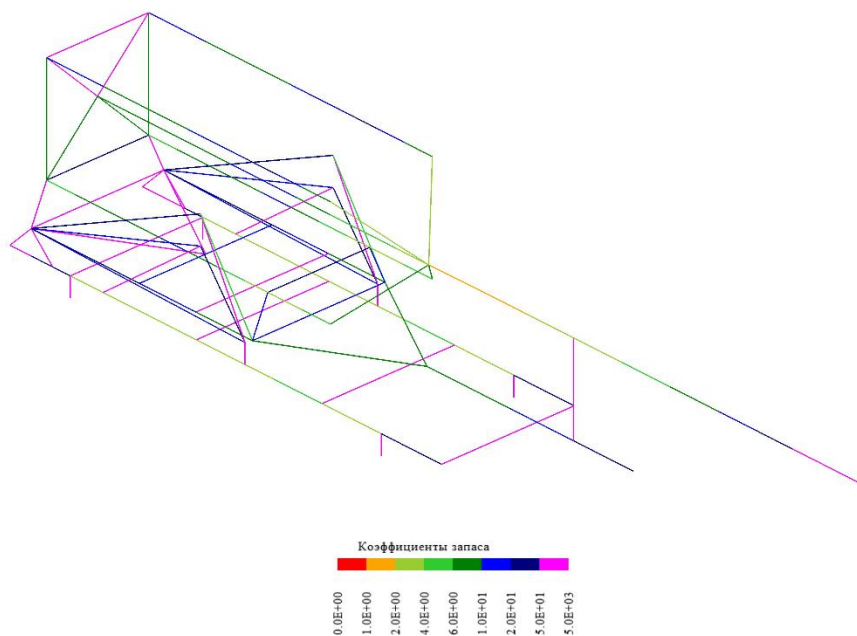


Рис. 16. Распределение коэффициентов запаса расчетного случая 2

Результаты практически идентичны, полученным для варианта 1, что объясняется близостью опор стрелы и мест крепления системы подъема, а также несущественностью различия в приложенных нагрузках.

### Расчетный случай 3.1

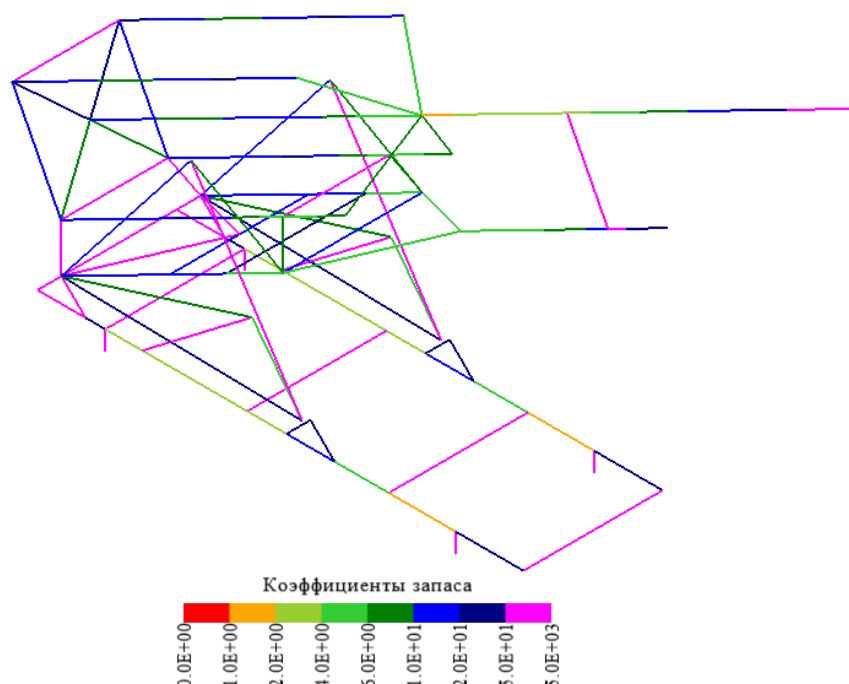


Рис. 17. Распределение коэффициентов запаса расчетного случая 3.1

Расчетный случай 3.1 является наиболее опасным по критерию прочности. Минимальный коэффициент запаса всей конструкции на всех расчетных случаях – 1,895. Высокий коэффициент запаса стрелы получается в результате обеспечения жесткости конструкции.

### Расчетный случай 3.2

Расчетный случай 3.2 является наиболее опасным по критерию жесткости. Максимальный прогиб стрелы составляет 0,6м, а ракеты – 0,85м. Также в расчетном случае 3.2 получен коэффициент запаса близкий к минимальному (1,925). Высокий коэффициент запаса стрелы получается в результате обеспечения жесткости конструкции.

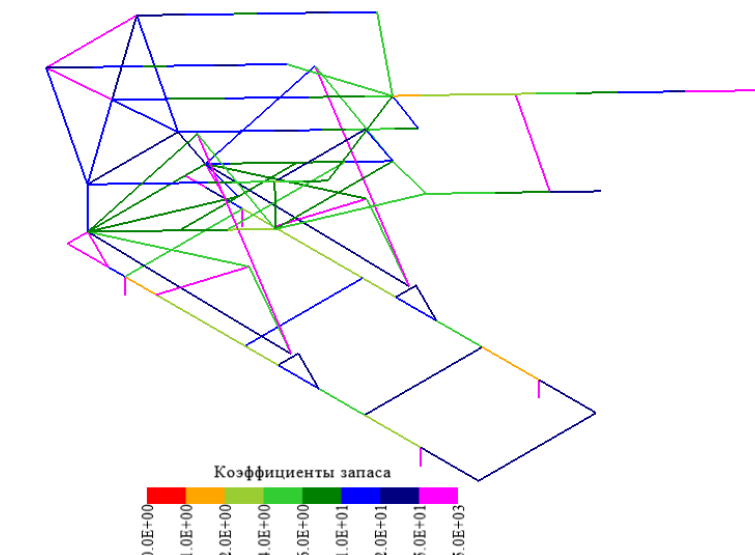


Рис. 18. Распределение коэффициентов запаса расчетного случая 3.2

#### Расчетные случаи 4.1 и 4.2

В вертикальном положении при продольном и поперечном направлениях ветра ТУА имеет высокий коэффициент запаса, прогибы стрелы и РН соответствует допустимым прогибам.

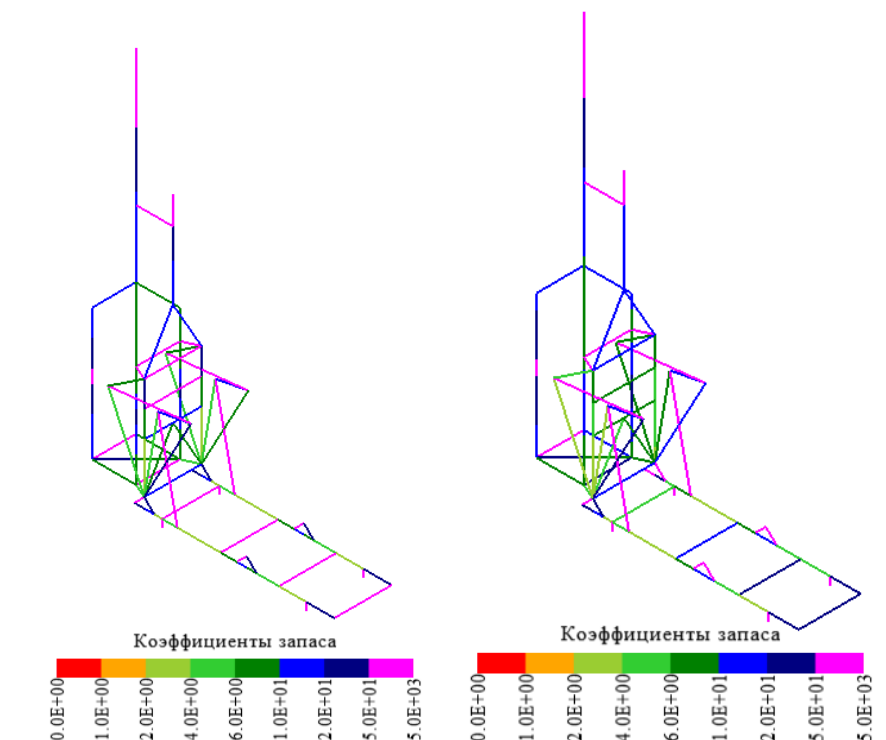


Рис. 19. Распределение коэффициентов запаса расчетных случаев 4.1 (слева) и 4.2 (справа)

## ВЫВОДЫ

На основе результатов расчета были получены: схема ТУА, сечения и материалы стержней. Модели полностью соответствуют критериям прочности и жёсткости при критических нагрузках. Полученные данные позволяют создать конструктивную схему ТУА в первом приближении и тем самым подтвердить предположение о том, что агрегат может быть создан на основе известных хорошо зарекомендовавших себя технических решений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основные требования к маршевым двигателям перспективных ракет-носителей сверхтяжелого класса с жидкостными ракетными двигателями. Солнцев В.Л., Радугин И.С., Задеба В.А. Космическая техника и технологии. 2015. № 2 (9). С. 25-38.
2. Методический аппарат для расчетного анализа прочности конструкций стартового комплекса ракет-носителей серии «Союз». Абакумов В.С., Зверев В.А., Ломакин В.В., Чугунков В.В., Языков А.В. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2008. № С. С. 124.