

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
Высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра Стартовые и технические ракетные комплексы  
Специальность 24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет  
и ракетно-космических комплексов  
Специализация – Эксплуатация стартовых и технических комплексов и систем  
жизнеобеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ В.В. Соловьев  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

на тему: Проектирование математической модели динамического нагружения  
стрелы транспортно-установочного агрегата.

Исполнитель  
студент группы 9111-ос

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

В.М. Остафуров

Руководитель  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант: по БЖД  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.А. Арёвков

Рецензент

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.З. Брызгалов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
Высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьев  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Остафурова Владислава Михайловича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование математической модели динамического нагружения стрелы транспортно-установочного агрегата.

(утверждена приказом от 02.12.2024 № 3236-уч)

2. Сроки сдачи студентом законченного проекта: 07.02.2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: время подъема от 0° до 20° – 115 с., скорость штока при подъеме от 0° до 20° – 1 см/с., время подъема от 20° до 42° – 112 с., скорость штока при подъеме от 0° до 20° – 1,34 см/с., время подъема от 42° до 65° – 109 с., время подъема от 65° до 78° – 47 с., время подъема от 65° до 78° – 57 с., скорость штока при подъеме от 42° до 88° – 1,3 см/с., время подъема от 88° до 91,5° – 141 с., скорость штока при подъеме от 88° до 91,5° – 0,11 см/с., время опускания от 91,5° до 88° – 110 с., скорость втягивания штока от 91,5° до 88° – 0,156 см/с., время опускания от 88° до 42° – 169 с., скорость втягивания штока от 88° до 42° – 1,5 см/с., время опускания от 42° до 2° – 187 с., скорость втягивания штока от 42° до 2° – 1,34 см/с., время опускания от 2° до 0° – 39 с., скорость втягивания штока от 2° до 0° – 0,26 см/с.

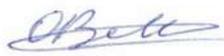
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): проектирование системы двухступенчатого гидравлического цилиндра, определение напряженного состояния стрелы транспортно-установочного агрегата, раздел безопасности жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: принципиальная схема двухступенчатого гидроцилиндра, принципиальная схема модели гидропривода ТУА.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: консультант по БЖД Козырь А. В., доцент, канд. техн. наук.

7. Дата выдачи задания: 20.01.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев Владислав Викторович, доцент, кандидат техн. наук.

Задание принял к исполнению (дата): 20.01.2025 

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа содержит 81 с., 61 рисунок, 2 таблицы, 14 источников.

### ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЙ ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ ГИДРОЦИЛИНДР, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Транспортно-установочный агрегат представляет собой оборудование, основное предназначение которого заключается в транспортировании ракеты космического назначения с монтажно-испытательного корпуса до стартового стола и вертикализация РКН на месте старта. Последняя операция осуществляется за счет работы гидравлической системы, представляющей собой две гидравлические опоры и телескопический гидравлический цилиндр.

Конструктивно транспортно-установочный агрегат исполнен в виде металлоконструкции, названной платформой, которая установлена на железнодорожные тележки, и шарнирно прикрепленной к ней стрелы, на опорах которой производится стыковка нижней и верхней частей РКН, и которая удерживает РКН во время транспортировки и вертикализации.

Во время вертикализации РКН данная металлоконструкция подвергается различными нагрузкам, как от собственных весов и веса изделия на нем, так и от усилия гидроцилиндра при подъеме. При проектном расчете невозможно просчитать нагрузки в любой момент времени, ввиду сложности получения данных, поэтому прибегают к компьютерным симуляциям.

Цель работы – создание параметрической математической модели динамического нагружения стрелы агрегата 373УН34 для прогнозирования напряженно-деформированного состояния стрелы при работе агрегата.

В рамках данной работы были сформулированы следующие задачи:

– создание системы двухступенчатого гидравлического цилиндра;

- моделирование стрелы и платформы транспортно-установочного агрегата;
- создание модели нагруженного состояния стрелы;
- сравнение результатов компьютерного расчета с проектными расчетами.

Для работы математической модели динамического нагружения стрелы транспортно-установочного агрегата с учетом специфики работы источников питания и распределительной аппаратуры гидравлической системы, используемой на рассматриваемом агрегате, используется модель этой гидравлической системы, разработанная Дудником И. В. в дипломной работе на тему: «Имитационное моделирование схемы гидропривода транспортно-установочного агрегата».

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Общие сведения о транспортно-установочном оборудовании	10
1.1 Устройство транспортно-установочного агрегата	13
1.2 Назначение стрелы транспортно-установочного агрегата и ее состав	15
1.2.1 Основание стрелы	15
1.2.2 Консоль	16
1.2.3 Удлинитель	18
1.3 Назначение гидропривода транспортно-установочного агрегата и его состав	19
1.3.1 Назначение гидроцилиндра и его состав	21
2 Проектирование системы двухступенчатого гидравлического цилиндра	24
2.1 Моделирование динамических многотельных систем	24
2.2 Гидромеханика в среде MATLAB	27
2.3 Модель двухступенчатого гидроцилиндра	28
2.3.1 Отображение физических элементов	28
2.3.2 Соединение основания и стрелы	29
2.3.3 Реализация двухступенчатого гидроцилиндра	32
2.4 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата	34
2.4.1 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при подъеме от $0^\circ$ до $42^\circ$	35
2.4.2 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при подъеме от $42^\circ$ до $88^\circ$	39
2.4.3 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при подъеме от $88^\circ$ до $91,5^\circ$	43
2.4.4 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от $91,5^\circ$ до $88^\circ$	44

2.4.5 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 88° до 42°	46
2.4.6 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 42° до 2°	48
2.4.7 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 2° до 0°	50
3 Определение напряженного состояния стрелы транспортно-установочного агрегата	53
3.1 Обобщенная процедура конечно-элементного анализа	54
3.2 Метод триангуляции Делоне	55
3.3 Метод конечных элементов в КОМПАС-3D	59
3.4 Расчет и отображение напряженного состояния стрелы	59
3.4.1 Задание закреплений и приложение нагрузки	59
3.4.2 Генерация КЭ сетки	65
3.4.3 Выполнение расчета	67
3.4.4 Просмотр результатов в виде карт напряжений, перемещений	68
4 Раздел безопасности жизнедеятельности	71
4.1 Общие правила по мерам безопасности	71
4.2 Требования, предъявляемые к обслуживающему персоналу	72
5 Экономическая часть	74
Заключение	79
Библиографический список	80

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ТУА – транспортно-установочный агрегат;

РКН – ракета космического назначения;

СК – стартовый комплекс;

МИК – монтажно-испытательный корпус;

КГЧ – космическая головная часть;

САПР – система автоматического проектирования;

МКР – метод конечных разностей;

МКЭ – метод конечных элементов;

НИР – научно-исследовательская работа.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование и моделирование систем все более важным аспектом различных отраслей промышленности. Особое внимание уделяется разработке систем динамического нагружения, так как это позволяет повысить эффективность и надежность работы технических устройств, при относительно небольшом увеличении срока разработки и значительном уменьшении натурных испытаний и тестов.

Одним из таких устройств является транспортно-установочный агрегат, используемый для перемещения различных грузов и оборудования. Одним из основных компонентов данного устройства является стрела, которая подвергается различным динамическим нагрузкам в процессе работы.

Для обеспечения надежности и безопасности работы транспортно-установочного агрегата необходимо провести тщательное проектирование с проведением физических симуляций. Для этой цели часто используется специализированное программное обеспечение, которое позволяет создавать и анализировать сложные математические модели.

В данной работе рассматривается процесс проектирования системы динамического нагружения стрелы транспортно-установочного агрегата с использованием среды MATLAB. Будут рассмотрены основные принципы работы системы, методы моделирования, а также способы оптимизации работы устройства.

Данное проектирование проводится для упрощения и удешевления процесса проектирования как транспортно-установочных агрегатов, так и различного подъемно-перегрузочного оборудования. Результатом этого проектирования также является снижение риска возникновения различных аварийных ситуаций, методом предварительного прогнозирования поведения металлоконструкции в любой момент времени.

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Транспортно-установочное оборудование возможно рассмотреть, как комбинацию:

- транспортного оборудования, предназначенного для транспортирования ракет и их составных частей от завода изготовителя этих изделий до монтажно-испытательных сооружений поблизости от стартовых площадок или для перемещения РКН с КА по территории стартовых и технических комплексов;
- установочного оборудования, необходимого для установки РКН на стартовые устройства;
- иногда еще и монтажно-стыковочного оборудования.

Перед операцией транспортирования, рассматриваемый транспортно-установочный агрегат используется в качестве платформы стыковки нижней и верхней частей РКН внутри монтажно-испытательного корпуса.

Ввиду многообразия операций при монтаже и стыковке для разных операций используется множество различного по своему типу и назначению оборудования. Оно классифицируется как:

- 1) оборудование для транспортировки ступеней ракеты внутри МИК:
  - a) ангаро-складские тележки;
  - b) монтажно-стыковочные тележки;
  - c) транспортные агрегаты;
- 2) оборудование для сборки, соединения ступеней и пристыковки полезной нагрузки:
  - a) монтажные стенды;
  - b) сборочные стапели;
  - c) стыковочные агрегаты;
- 3) подъемно-перегрузочное оборудование:
  - a) подъемные траверсы;
  - b) подъемники;

- с) кантователи;
- d) тельферы;
- 4) средства обслуживания:
  - a) площадки обслуживания;
  - b) фермы обслуживания;
  - с) лестницы и подставки.

После стыковки верхней и нижней частей РКН на агрегате, происходит его транспортирование до места пуска. В данном случае, рассматриваемый транспортно-установочный агрегат не может быть рассматриваться как отдельный транспортный агрегат, поскольку функция транспортировки в его конструкции предусмотрена как дополнительная функция.

Для классификации ТУА как установочного агрегата используются следующие критерии:

- 1) по типу стартового комплекса, для которого предназначен установщик:
  - a) наземные стартовые комплексы;
  - b) стартовые комплексы шахтного базирования;
  - с) подводные стартовые комплексы;
- 2) по подвижности всего агрегата:
  - a) подвижные;
    - i) железнодорожные;
    - ii) автодорожные;
  - b) неподвижные;
- 3) по типу связи с ракетой в процессе установки:
  - a) с жесткими связями;
  - b) с гибкими связями;
- 4) по методу вертикализации изделия:
  - a) метод «вывешивания» ракеты, позволяющий использовать универсальное подъемно-перегрузочное оборудование;
  - b) метод «опрокидывания» ракеты.

Кроме перечисленной классификации, транспортно-установочные агрегаты принято делить еще по конструкции силового элемента:

- порталные установщики с гибкой связью с РКН, опорно-мачтовая стрела которых выполнена в форме буквы П;
- лафетные установщики с жесткой связью, опорно-мачтовая стрела которых представлена в виде рамной или балочно-ферменной конструкции;
- с подъемно-направляющей стрелой;
- с подъемно-транспортной стрелой.

Рассматриваемый транспортно-установочный агрегат относится к агрегатам наземного типа, подвижный на рельсовом ходу, с жесткой связью с ракетой во время работы и лафетного типа. Такая конструкция ТУА имеет следующие преимущества и недостатки в сравнении с другими ТУА по классификации:

1. По типу базирования СК транспортно-установочные агрегаты не сравниваются напрямую, поскольку они не могут заменять друг друга, но можно заключить, что ТУА наземного типа являются более простыми в своей конструкции и менее зависимы от массогабаритных ограничений.

2. Передвижные установщики позволяют избавиться от промежуточных операций по перегрузке ракет и КА, но требуют большего операционного времени для установки каждой РКН, из-за необходимости точного подхода установщика к пусковой установке при движении задним ходом. Ввиду большой стоимости и сложности конструкции современных РКН сокращение технологической карты операций по запуску РКН может быть предпочтительнее, чем более быстрая установка на место старта. Кроме этого, если это изначально заложено в наземно-космическую инфраструктуру конкретного космодрома, то один подвижный транспортно-установочный агрегат может обеспечивать несколько однотипных стартовых комплексов, что исключает необходимость постройки персонального установщика для каждого СК и может уменьшить стоимость каждого пуска.

3. Использование рельсовых ТУА принято более предпочтительным, поскольку рельсовый путь может выдерживать большие нагрузки, соответственно позволяют эксплуатировать РКН более тяжелого класса. Иное преимущество рельсовых путей перед автодорожными – направление движения ограничено рельсами, что увеличивает точность установки РКН на пусковую установку.

4. Рассматриваемый установщик имеет жесткие связи с РКН во время его эксплуатации и использует метод «опрокидывания» РКН при ее вертикализации, что сохраняет изделие от соударения с самим ТУА или стартовой площадкой вследствие действия ветровых и весовых нагрузок. Однако такие связи являются более дорогостоящими, в сравнении с гибкими связями, зачастую представленными привычными канатно-полиспастными системами.

### **1.1 Устройство транспортно-установочного агрегата**

Транспортно-установочной агрегат, использующийся на космодроме «Восточный» для транспортирования, вертикализации и установки на стартовый стол РКН «Союз-2.1б» в своей конструкции имеет:

- платформу на железнодорожных тележках;
- стрелу с откидной консолью;
- опоры: нижняя, средняя и верхняя;
- гидравлический телескопический цилиндр, в качестве основного привода подъема;
- две гидравлические опоры, выполняющие вспомогательные функции при выставлении РКН на стартовый стол.

Более подробно конструкция представлена на рисунке 1.1.

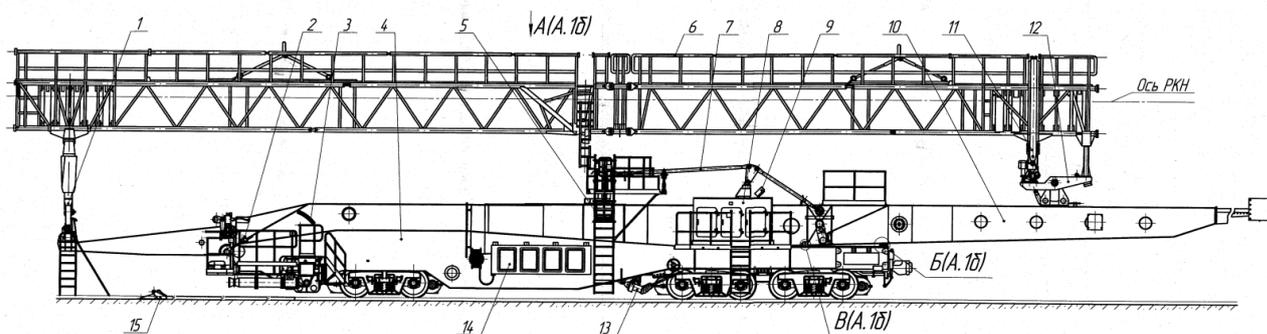


Рисунок 1.1 – Транспортно-установочный агрегат

Технически ТУА представляет собой сложное оборудование с габаритными размерами 46 метров в длину, 6,5 метров в ширину, 7,2 метров в высоту при горизонтальном положении установленной РКН, а при процессе вертикализации высота увеличивается до 37,5 метров. Номинальный вес всей конструкции принимается за 216 тонн. Перемещение конструкции обеспечивается платформой с двумя железнодорожными самоходными тележками, передняя из которых двухосная, а задняя – четырехосная. Вся гидравлическая система питается гидравлическим маслом типа АМГ-10, соответствующей ГОСТ 6794-75. Общий объем гидравлической жидкости, необходимой для работы всего транспортно-установочного агрегата составляет 1500 литров. Данный объем жидкости прокачивается по всей системе благодаря двум насосным установкам, состоящих из четырех радиально-поршневых насосов типа Н403А. Жидкость используется для работы одного телескопического двухцилиндрового гидроцилиндра с камерой противодействия и двух одноцилиндровых гидроопор со следящим механизмом стопорения.

Данная конструкция транспортно-установочного агрегата обеспечивает:

- возможность укладки (съема) на ТУА с помощью грузоподъемных средств монтажно-испытательного комплекса собранной в пакет ракета-носителя;
- возможность стыковки к ракета-носителю и отстыковки от нее блока «И» и космической головной части с помощью монтажно-стыковочных средств МИК;

- фиксацию РКН «Союз-2.1б» для транспортирования на СК и установки (снятия) на стартовый стол;
- перемещение всего транспортно-установочного агрегата вместе с изделием, закрепленным на нем от МИК до СК и обратно со скоростью до 10 км/ч с помощью электровоза;
- передвижение с использованием тяги самоходных тележек;
- подъем РКН в вертикальное положение и вывешивание ее в центре стартового стола, причем существует возможность длительного вывешивания РКН.

## 1.2 Назначение стрелы транспортно-установочного агрегата и ее состав

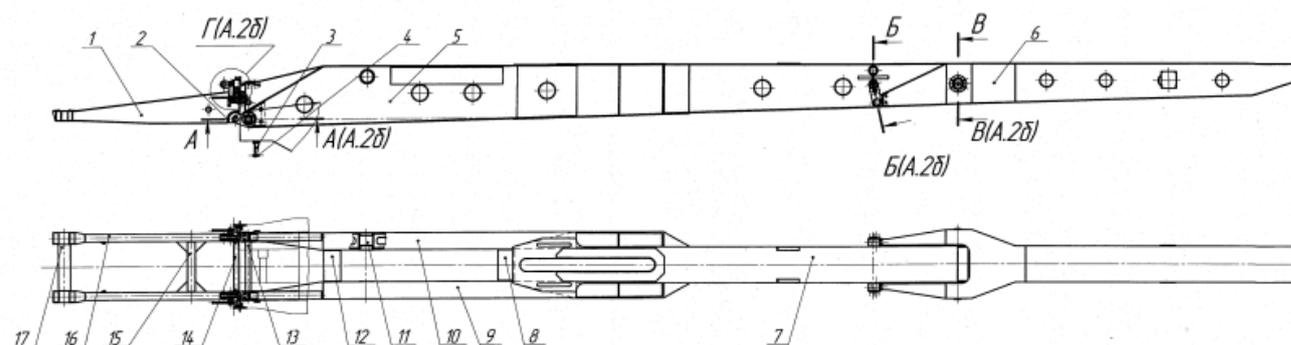


Рисунок 1.2 – Стрела

РКН закрепляется на стреле ТУА при помощи нижней, средней и верхней опор и механизма подвески при транспортировании, вертикализации РКН и установке ее на пусковой агрегат.

Стрела конструктивно состоит из трех основных частей:

- консоли;
- основания;
- удлинителя.

### 1.2.1 Основание стрелы

Основание стрелы транспортно-установочного агрегата, обозначенное условно как элемент 5, представляет собой сварную металлоконструкцию

сложной конфигурации из стальных листов, обеспечивающую шарнирное крепление стрелы к платформе. Конструкция основания включает в себя: две продольные боковые балки 9,10, обеспечивающие основную несущую способность, и одну центральную балку 7, которая служит для распределения нагрузок и служит для обеспечения геометрической устойчивости всей конструкции. Боковые балки соединены между собой поперечными балками 8, 12, которые повышают жесткость всей конструкции, предотвращая скручивание и прогиб под нагрузкой. Дополнительно, для усиления жесткости и пространственной стабильности, боковые балки соединены между собой трубой 13.

Основание стрелы шарнирно соединяется с платформой ТУА посредством пальцевых шарниров. Это позволяет стреле совершать вращательные движения относительно платформы и осуществлять процесс вертикализации РКН. Для предотвращения продольных смещений пальцевых шарниров, используются скобы, закрепленные на платформе с помощью болтов. Для обеспечения бесперебойной работы шарнирного соединения и уменьшения износа, предусмотрены специальные масленки и трубка, обеспечивающая подачу смазки в зону трения.

В продольных боковых балках 9, 10 находятся специально вваренные втулки 11, предназначенные для крепления траверсы гидроцилиндра механизма подъема стрелы. Это решение обеспечивает точную установку и жесткое крепление гидроцилиндра, гарантируя его надежную работу и предотвращая люфты. Аналогичным образом, в центральной балке 7 предусмотрены втулки для надежного крепления механизма подвески стрелы. В этой же балке также расположены втулки для крепления удлинителя стрелы.

### **1.2.2 Консоль**

Консоль 1 является сварной металлоконструкцией из стальных листов, ключевым элементом которой являются две продольные балки 16, обеспечивающие прочность и жесткость всей конструкции. Эти балки соединяются между собой двумя поперечными балками 15, 17, формируя

жесткий пространственный каркас, способный выдерживать значительные нагрузки.

Консоль соединена с основанием стрелы через два шарнирных пальца, а для фиксации консоли в рабочем состоянии предусмотрены два замка.

Такие замки установлены по обе стороны транспортно-установочного агрегата и упрощают процесс запирания или открытия консоли, так как они реализованы как ручной привод, в конструкции которого использован одноступенчатый конический редуктор, позволяющий надежно закреплять консоль используя усилие только одного человека.

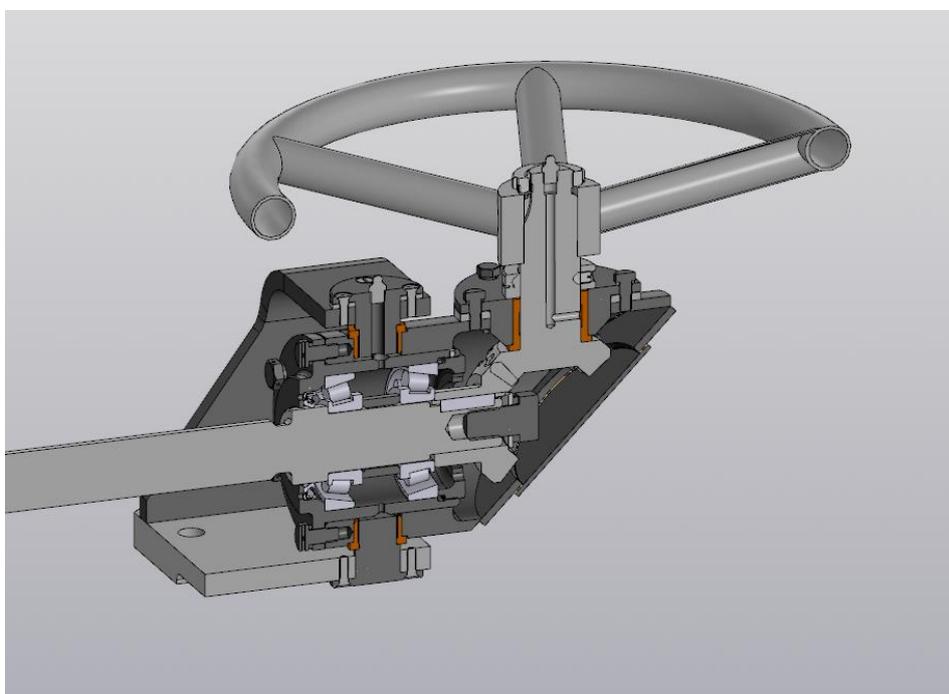


Рисунок 1.3 – Привод замка консоли в разрезе

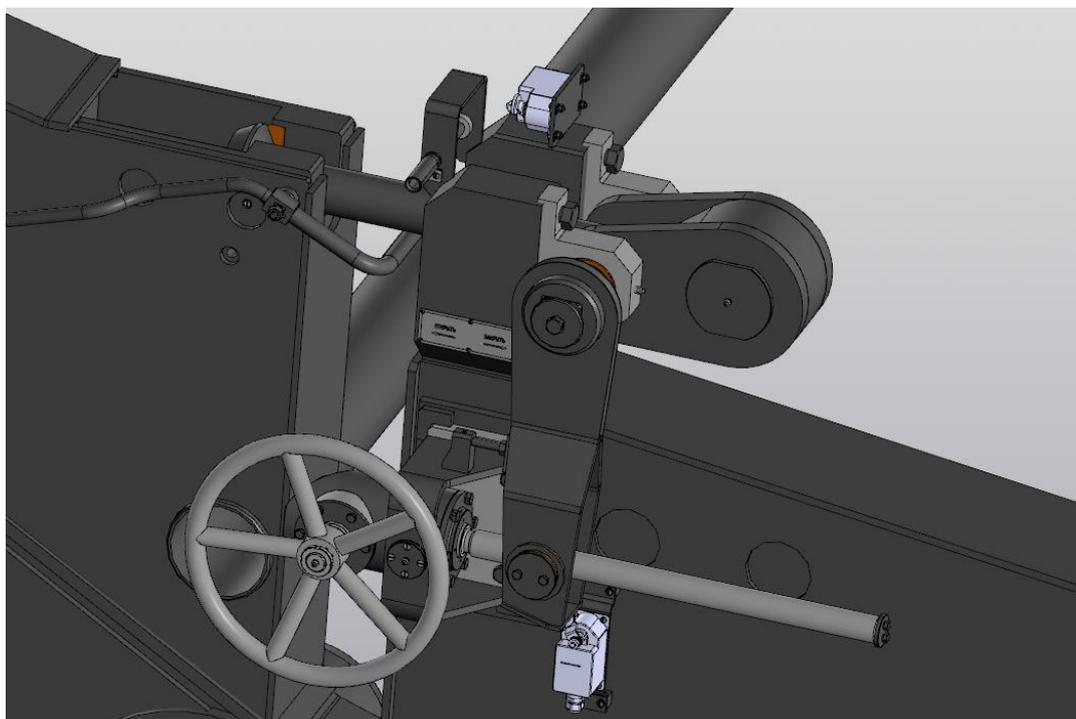


Рисунок 1.4 – Привод замка консоли, установленный на консоль в закрытом положении

### 1.2.3 Удлинитель

Длины только основания и консоли недостаточно для надежного закрепления РКН «Союз-2.1б», а также невозможно произвести и доставить до космодрома более длинное основание, поэтому частью стрелы является удлинитель, который предназначен для крепления на нем верхней опоры. Данная конструкция также имеет вид сварной балки из стальных листов, что обеспечивает ей высокую прочность и устойчивость к внешним нагрузкам. В процессе производства удлинителя в его конструкцию вварены специальные проушины и втулки, которые предназначены для крепления к основанию стрелы. Крепление удлинителя к основанию стрелы осуществляется с помощью пальцев, оси и серёг.

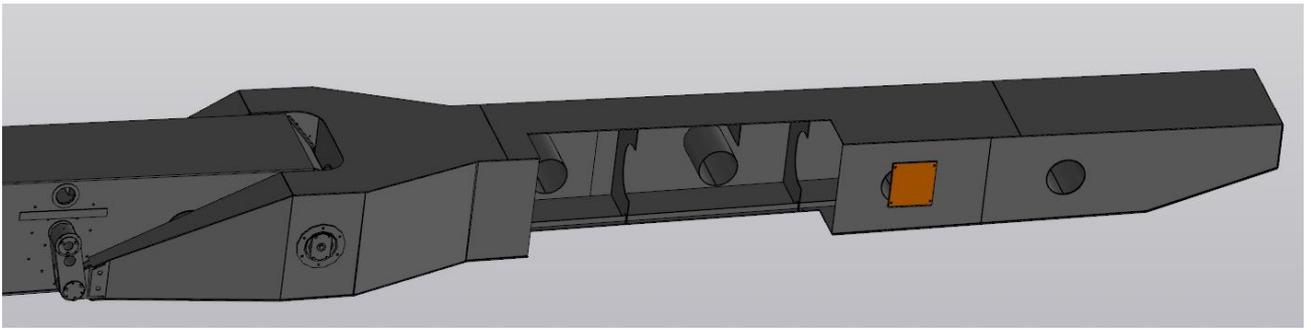


Рисунок 1.5 – Удлинитель с частичным вырезом

### 1.3 Назначение гидропривода транспортно-установочного агрегата и его состав

Гидросистема ТУА включает в себя систему привода подъема/опускания стрелы и систему привода гидравлических опор агрегата.

Основные технические характеристики сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики гидропривода [2]

Наименование показателя	Тип и (или) значение показателя
Рабочая жидкости	АМГ-10А
Количество рабочей жидкости на заполнение гидропривода, л.	1500
Давление настройки предохранительных клапанов, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ).	28 (280) и 22 (220)
Давление настройки предохранительных клапанов, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ).	28 (280) и 22 (220)
Максимальная температура рабочей жидкости, °С.	70
Количество насосных станций, шт.	2
Количество гидробаков в насосной станции, шт.	1
Вместимость гидробака, л.	480
Максимальный угол подъема стрелы	91°30'
Время подъема (опускания) стрелы в вертикальное положение, мин.	10
Количество гидроцилиндров, шт.	1

Тип гидроцилиндра	Телескопический двухцилиндровый с полостью противодавления
Диаметр штока, мм.	240
Диаметр 1 цилиндра, мм.	440
Диаметр 2 цилиндра, мм.	500

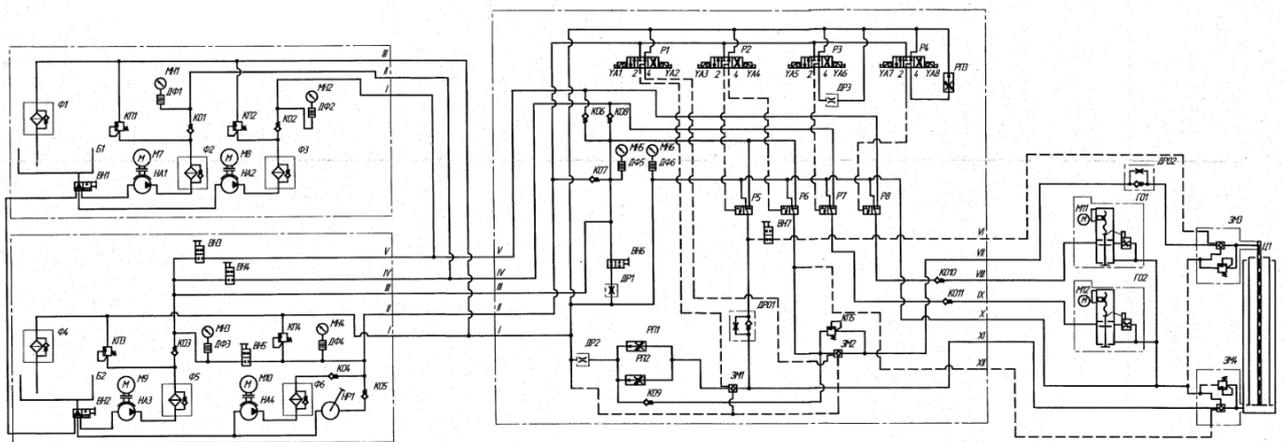


Рисунок 1.6 – Принципиальная гидравлическая схема [1]

В данной системе для питания системы используются насосы НА1 – НА4, а также ручной насос НР1, который используется в качестве резервного источника давления. Гидробаки Б1 и Б2 служат для хранения рабочей жидкости, которая очищается фильтрами Ф1 – Ф6.

Аппаратура управления и регулирования необходима для обеспечения точного и безопасного функционирования исполнительных механизмов. Она предотвращает перегрузки и обеспечивает правильное распределение потока рабочей жидкости. В состав этой аппаратуры входят распределители Р1 – Р8, которые управляют направлением и объемом потока жидкости. Предохранительные клапаны КП1 – КП4 обеспечивают защиту системы от избыточного давления, а регуляторы расхода РП1 – РП3 позволяют точно

настраивать поток жидкости в зависимости от потребностей системы. Кроме того, в системе присутствуют подпорный клапан КП5, гидрозамки ЗМ1 – ЗМ4 и обратные клапаны КО1 – КО11, которые обеспечивают надежное управление 21 потоком жидкости и предотвращают его обратное движение. Односторонние дроссели ДРО1 и ДРО2, а также дроссельные шайбы ДР1 – ДР3 помогают регулировать скорость движения жидкости, что позволяет точно контролировать работу исполнительных механизмов.

Для операций подъема, опускания, горизонтирования транспортно-установочного агрегата в системе существуют исполнительные механизмы, к которым относятся:

- две гидроопоры: левая гидроопора ГО1 и правая гидроопора ГО2;
- гидроцилиндр Ц1.

Вентили ВН1 – ВН7 регулируют поток жидкости в различных участках системы, а демпферы ДФ1 – ДФ6 помогают гасить колебания и обеспечивать плавность работы механизмов, что относит эти элементы к вспомогательной аппаратуре.

Арматура, такая как трубопроводы, тройники, крестовины, угольники и поворотные сальники, соединяет все элементы гидропривода, обеспечивая бесперебойную и герметичную подачу рабочей жидкости.

### **1.3.1 Назначение гидроцилиндра и его состав**

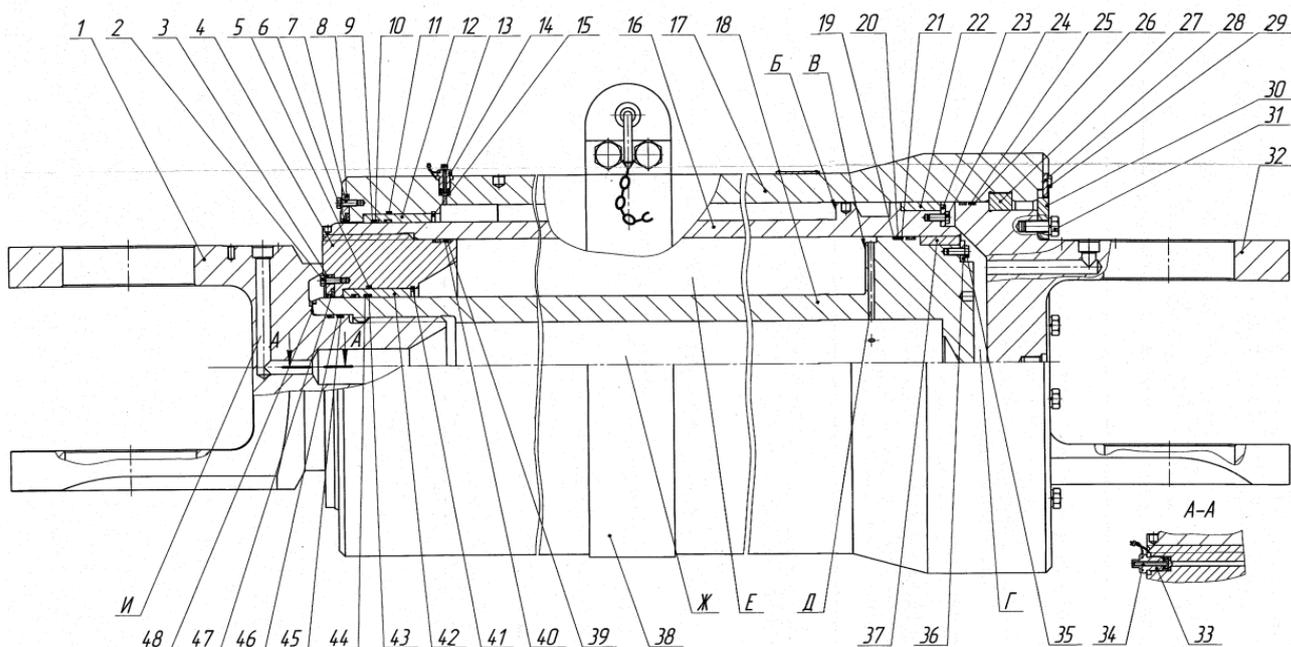


Рисунок 1.7 – Гидроцилиндр: 1 – проушина; 2,7,24,29,31,35 – болт; 3,8 – фланец; 4,30 – крышка; 5,10,11,20,25,39,43,45 – резиновое кольцо; 6, 47 – грязесъемник; 9,19,21,26,40,44,46 – фторопластовая шайба; 12,22,37,42 – втулка; 13,34 – клапан; 14,33 – штуцер; 15,41 – упорное кольцо; 16 – цилиндр; 17 – корпус; 18 – шток; 23,36 – шайба; 27 – сухарь; 28 – стопор; 32 – пята; 38 – хомут; 48 – стопорная шайба [2]

Гидроцилиндр состоит из корпуса 17, цилиндра 16., штока 18, крышки 4, хомута 38, проушины 1 и пяты 32.

Пята 32 крепится в корпусе 17 при помощи сухаря 27, крышки 30 и болтов 31.

От проворачивания относительно корпуса 17 пята 32 удерживается стопором 28, который крепится к корпусу 17 двумя болтами 29. С левой стороны в штоке 18 ввинчена проушина 1, которая контрится стопорной шайбой 48.

Втулка 22, напрессованная на цилиндр 16, и втулка 122, запрессованная в корпус 17, служат направляющим для цилиндра.

Втулку 22 удерживает от перемещений шайба 23, которая крепится к цилиндру 16 болтами 24.

Втулку 12 удерживает от перемещения упорное кольцо 15.

Втулка 37, напрессованная на шток 18, и втулка 42, запрессованная в крышку 4, служат направляющими для штока 18.

Втулку 37 удерживает от перемещений шайба 36, которая крепится к штоку 18 болтами 35.

Втулку 42 удерживает от перемещений упорное кольцо 41.

Очистка от грязи наружной поверхности цилиндра 16 осуществляется грязесъемником 47, закрепленным в корпусе 17 фланцем 8 и болтами 7.

Очистка от грязи наружной поверхности штока 18 осуществляется грязесъемником 47, закрепленным в крышке 4 фланцем 3 и болтами 2.

Уплотнение полостей гидроцилиндра обеспечивается резиновыми кольцами 5, 10, 11, 20, 25, 39, 43, 45 и фторопластовыми шайбами 9, 19, 21, 26, 40, 44, 46.

Штуцер 33 с клапаном 34, ввернутый в крышку 4, и штуцер 14 с клапаном 13, ввернутый в корпус 17, служат для выпуска воздуха из полостей гидроцилиндра.

Хомут 38, установленный на корпусе 17, предназначен для удобства монтажа гидроцилиндра на ТУА.

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА

### 2.1 Моделирование динамических многотельных систем

При конструировании и прототипировании различных систем, состоящих из нескольких взаимодействующих элементов при повышении количества данных элементов, в значительной степени возрастает стоимость разработки и проверки по различным критериям этих систем. Если для таких систем проводятся натурные испытания, то при выявлении каких-либо конструкторских ошибок требуется переработка и новое изготовление отдельных компонентов этих систем. Данный процесс можно значительно ускорить, если заменять физические испытания компьютерными симуляции, которые при некоторых заранее принятых допущениях и упрощениях могут спрогнозировать работу системы, выявить слабые места оборудования и увеличивает гибкость при последующей настройке и модернизации.

Среди различного рода инструментов инженерного анализа, большим потенциалом обладают системы моделирования многотельной динамики, которые описывают поведение механической системы, состоящей из жестких и гибких тел, связь между которыми определяется при помощи наложенных на них соединений. Движение в этих системах появляется в результате прикладывания к звеньям каких-либо нагрузок, например, усилия от собственных весов или приложение ветровых нагрузок.

Для рассматриваемого транспортно-установочного агрегата будет рассматриваться система, где основными усилиями являются вес изделия, собственный вес стрелы и усилия, действующие при работе гидросистемы.

В современном машиностроении гидросистемы подразделяются на два основных типа:

- гидросистемы для подачи жидкости;
- гидравлические приводы.

Гидросистемы для подачи жидкости предназначены для транспортировки и распределения рабочей жидкости к различным потребителям. В таких системах отсутствуют устройства, которые преобразуют энергию движения жидкости в механическую работу. И эти гидросистемы, как правило, относятся к классу разомкнутых систем. В таких системах движение жидкости обеспечивается с помощью насосов, которые перекачивают жидкость из одного резервуара в другой. К ним относятся системы жидкостного охлаждения, которые обеспечивают эффективное отведение тепла от двигателей и других агрегатов, системы пожаротушения, а также системы подачи топлива и смазки, которые необходимы для нормального функционирования двигателей и механизмов.

Гидравлические приводы представляют собой более сложные системы, основное предназначение которых заключается в преобразовании энергии жидкости в механическую энергию движения. Эти системы, относятся к замкнутым гидросистемам, где жидкость циркулирует в замкнутом контуре, то есть рабочая жидкость не расходуется, а возвращается в бак после выполнения своей функции, после чего может быть использован повторно.

В литературе также используется термин «гидропередача», который обозначает силовую часть гидропривода.

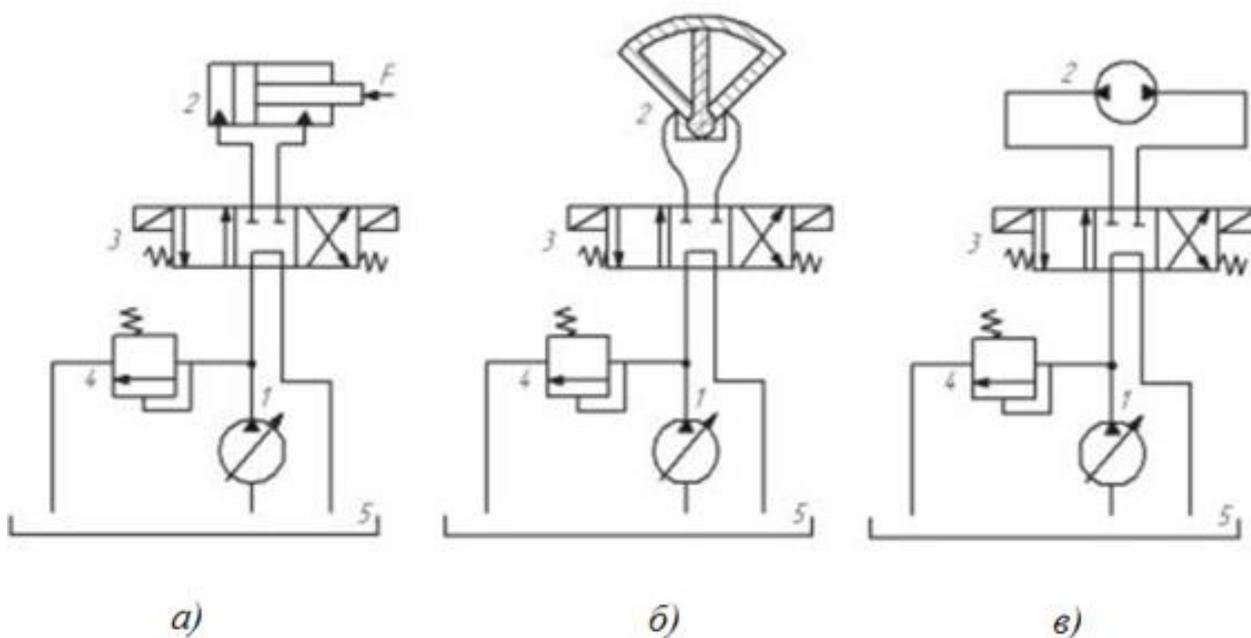


Рисунок 2.1 – Принципиальные схемы гидроприводов: а) возвратно-поступательного движения; б) поворотного движения; в) вращательного движения [10]

На рисунке 2.1 представлены три принципиальные схемы, которые иллюстрируют основные классы гидроприводов. Эти классы различаются по характеру движения выходного звена. В схемах используются следующие обозначения:

- 1) регулируемый насос;
- 2) гидродвигатель;
- 3) гидрораспределитель;
- 4) предохранительный клапан;
- 5) гидробак.

В первой схеме под гидродвигателем подразумевается гидроцилиндр, во второй – поворотный гидродвигатель, в третьей – гидромотор.

Насосы всасывают жидкость из гидробака и подают ее в гидродвигатель через распределитель. Распределитель позволяет менять подключение гидродвигателя без остановки работы и ручного соединения гидролиний.

Предохранительный клапан, настроенный на определенное допустимое давление, защищает гидросистему от перегрузок.

Изменение направления движения выходного звена гидродвигателя, известное как реверсирование, осуществляется путем изменения положения гидрораспределителя.

В рассматриваемом транспортно-установочном агрегате подъем стрелы происходит за счет поступательного движения гидроцилиндра, закрепленного шарнирно между основанием и стрелой, что определяет гидросистему ТУА как систему первого класса гидроприводов.

## **2.2 Гидромеханика в среде MATLAB**

Математическая модель транспортно-установочного агрегата как динамическая многотельная система создана в среде MATLAB с применением библиотек Simscape Fluids и Simscape Multibody пакета Simulink. Данный пакет вместе с библиотеками представляют собой набор готовых логических блоков, описывающих тела, суставы, ограничения, элементы силы и датчики.

Отдельно Simscape Multibody формулирует и решает уравнения движения для всей механической системы. Кроме использования готовых блоков, возможна их модификация, а также написание своих собственных блоков.

Simscape Fluids же включает в себя модели гидравлических насосов, клапанов, приводов, трубопроводов и теплообменников.

Среда MATLAB выбрана для проектирования динамической многотельной системы из-за ее ключевых особенностей:

- для моделирования различных по своей природе систем возможно использование единого пространства, что позволяет исследовать влияние одних подсистем на другие;
- использование стандартных инструментов создания геометрий деталей, включая стандартную геометрию, выдавливания, определенные в файлах MATLAB и STEP, а кроме этого – возможность импорта сложной геометрии из различных САПР;

- возможность использования механических соединений и ограничений, охватывающие стандартные и пользовательские кинематические и динамические взаимосвязи;
- доступность режимов моделирования для анализа движения и расчета сил;
- возможна 3D анимация многотельной системной динамики;
- существование утилиты Simscape Multibody Link, для взаимодействия с PTC Creo, SolidWorks и Autodesk Inventor;
- поддержка генерации С-кода, что позволяет проводить глубокую настройку различных блоков.

### 2.3 Модель двухступенчатого гидроцилиндра

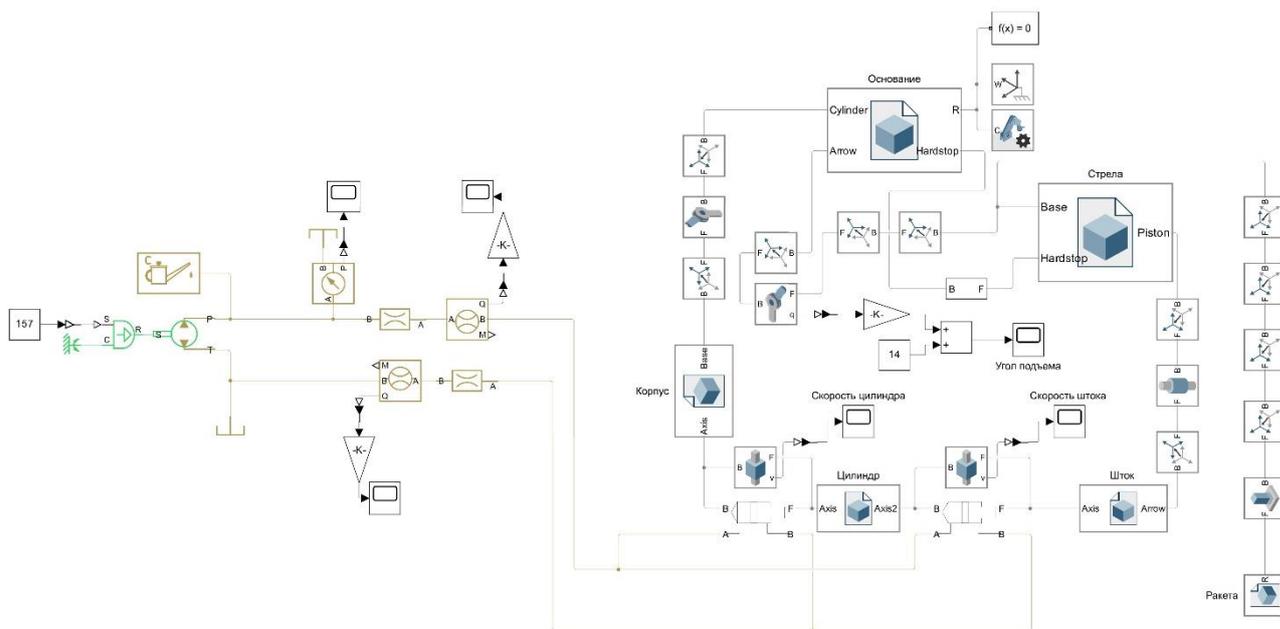


Рисунок 2.2 – Схема двухступенчатого гидроцилиндра

На рис 2.2 изображена упрощенная модель двухступенчатого цилиндра в среде Simulink. Она отображает основные взаимосвязи между стрелой, основанием и ступенями гидроцилиндра.

#### 2.3.1 Отображение физических элементов

Все физические элементы в схеме (стрела, основание, части гидроцилиндра) представлены при помощи блоков «File Solid», которые позволяют импортировать геометрию, построенную в любой САПР.

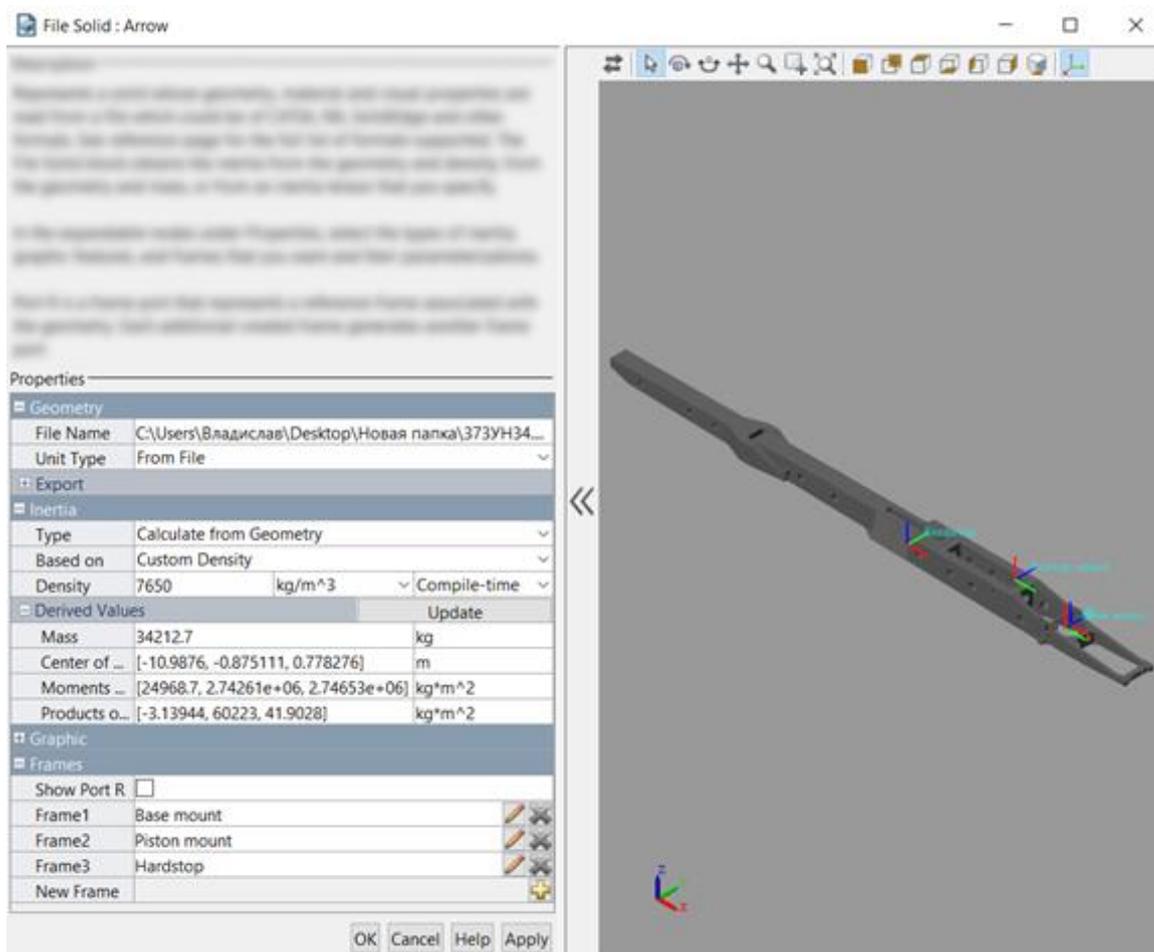


Рисунок 2.3 – Блок «File Solid»

Блок на основании созданной геометрии и введённой плотности материала рассчитывает массу модели, центр масс и моменты инерции.

Следующим шагом на модель добавляются необходимые оси координат. В случае стрелы это оси крепления для основания, для проушины гидроцилиндра и любая из плоскостей на которой стрела лежит на основании.

### 2.3.2 Соединение основания и стрелы

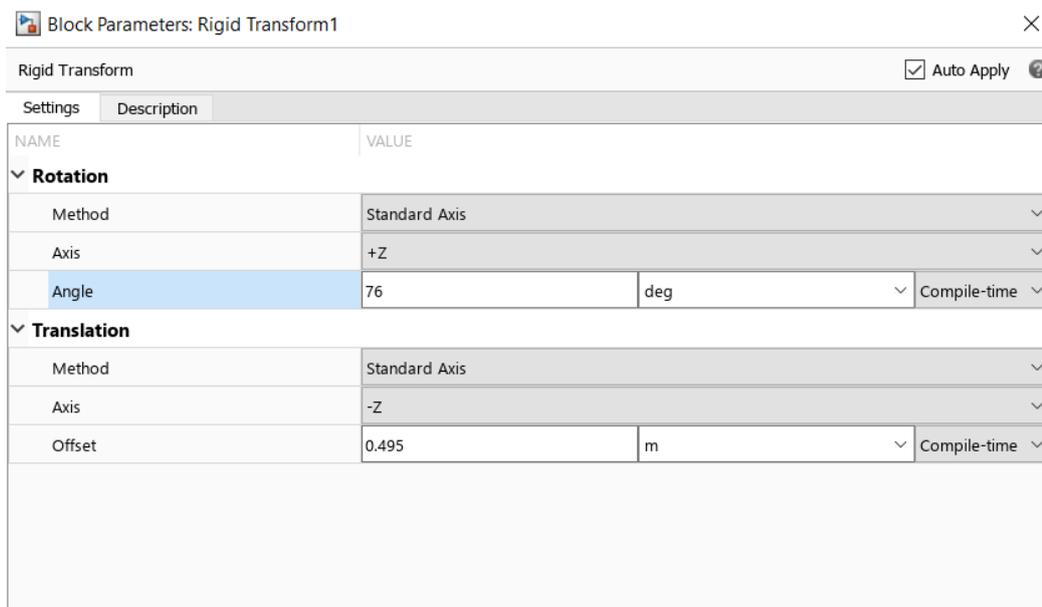


Рисунок 2.4 – Блок «Rigid Transform»

«Rigid Transform» позволяет перемещать и вращать оси координат физических моделей для правильного их отображения и сборки.

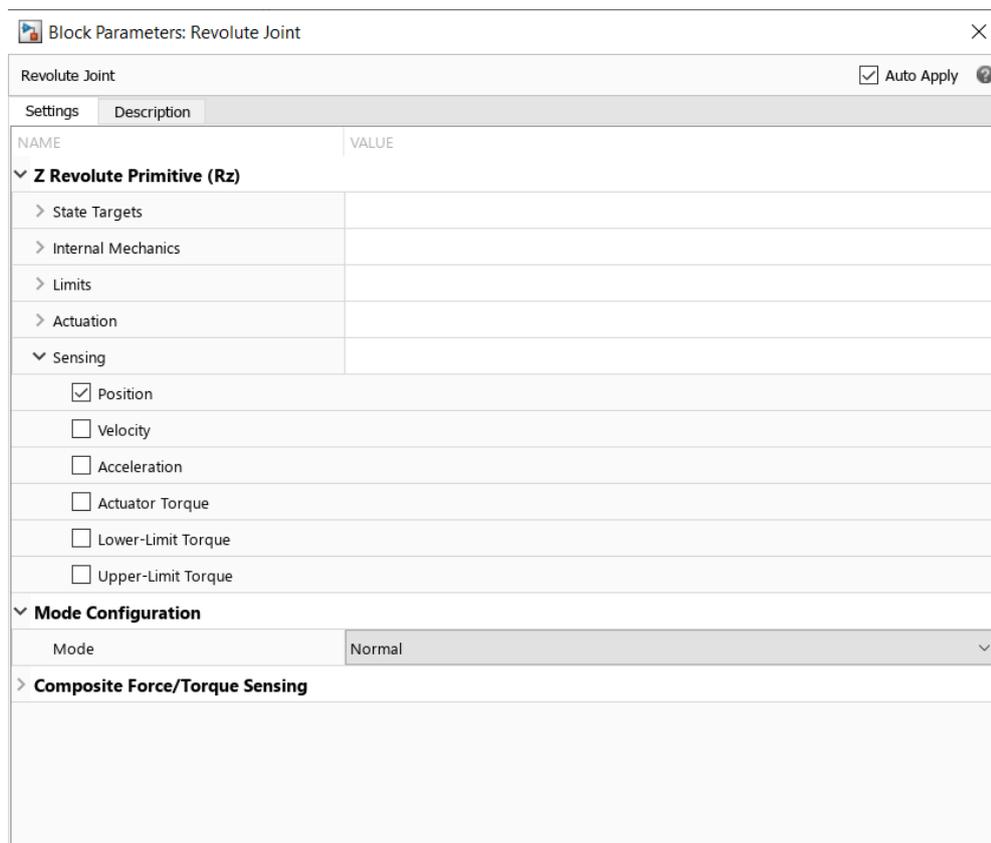


Рисунок 2.5 – Блок «Revolute Joint»

Блок «Revolute Joint» работает следующим образом: ось вращения совмещена с осью z базовой системы координат сочленения. Базовая и ведомая оси координат имеют общее начало и ось z, а ведомая система координат вращается вокруг оси z, как показано на изображении 2.6.

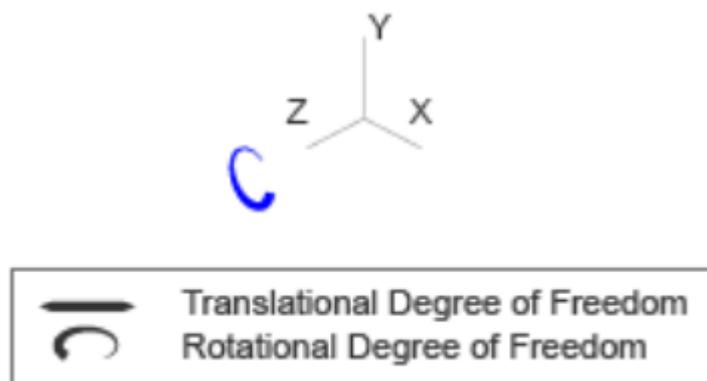


Рисунок 2.6 – Степени свободы «Revolute Joint»

Для добавления каких-либо ограничений или граничных условий используются вкладки:

- **state targets** – определяет начальные условия данного соединения. Например, на каком расстоянии должны находиться друг от друга оси координат, базовая и ведомая, в начале симуляции;
- **internal mechanics** – отвечает за настройку поведения соединения, такое как инертность и демпфирование;
- **limits** – подобно настройке **state targets**, но определяет максимальные граничные условия во время симуляции, такие как максимальное и минимальное расстояние между связанными этим соединением осями координат;
- **actuation** – связано с параметрами «Force», «Torque» и «Motion», которые нужны для настройки поведения соединения.

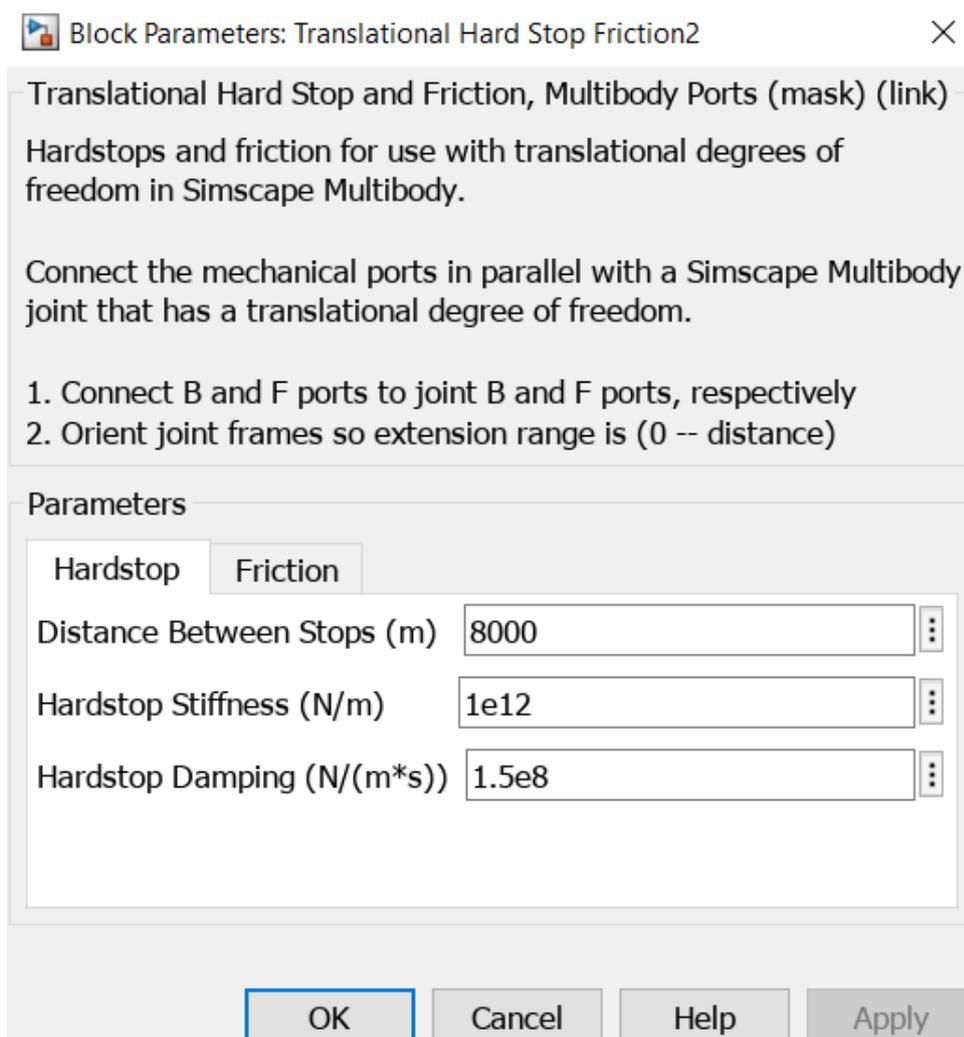


Рисунок 2.7 – Блок «Translational Hard Stop Friction»

Блок «Translational Hard Stop Friction» представляет собой двухсторонний жесткий упор, ограничивающий движение тела между верхней и нижней границами, на которые накладывается это соединение.

### 2.3.3 Реализация двухступенчатого гидроцилиндра

Цилиндр, шток и корпус отображены с помощью блоков «File Solid», а взаимосвязи между ними представлены как блоки «Prismatic Joint» и «Hydraulic Actuator Multibody».

Блок «Prismatic Joint» моделирует соединение с одной поступательной степенью свободы.

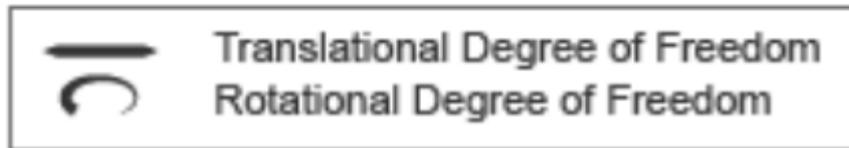
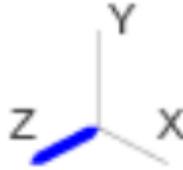


Рисунок 2.8 – Степени свободы «Prismatic Joint»

По своим настройкам блок «Prismatic Joint» аналогичен блоку «Revolute Joint».

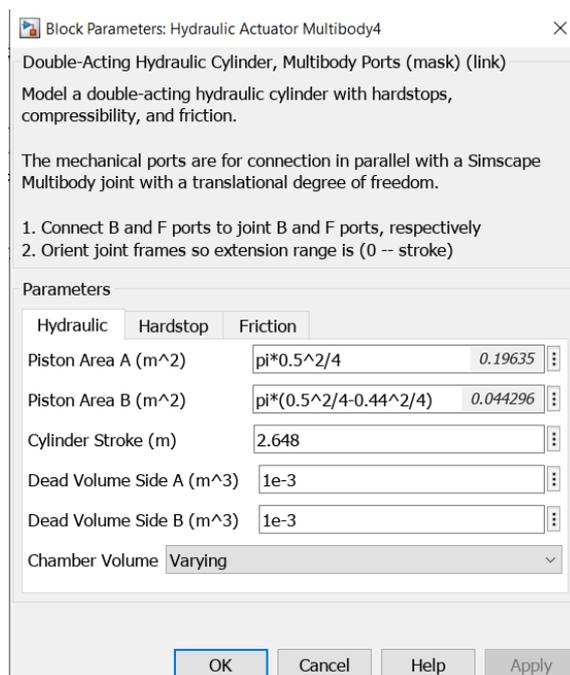


Рисунок 2.9 – Настройки блока «Hydraulic Actuator Multibody»

Блок «Hydraulic Actuator Multibody» имитирует устройство, предназначенное для преобразования гидравлической энергии в механическое поступательное движение. Данный блок принимает данные по давлению или расходу из подведенных к нему гидравлических линий и на основании

конфигурации подключения, а также от параметров самого блока создает усилие, передаваемое на шток цилиндра, что приводит его в движение.

Для остановки штока такого гидроцилиндра в компьютерной модели при достижении границы, обозначенной как полный вылет гидроцилиндра или при попытке движения штока в область отрицательных значений хода гидроцилиндра, против хода цилиндра создается усилие на шток, как будто материал цилиндра препятствует смятию внешнего корпуса пропорционально жесткости материала. Эта жесткость настраивается в отдельных настройках блока и подбирается исходя из назначенного для корпуса гидроцилиндра материала.

Настройки «Piston Area A» и «Piston Area B» определяют площади поршня и штока соответственно. Данные размеры влияют на те усилия, которые будут созданы при симуляции работы гидросистемы и назначаются на основании технической документации на конкретный гидроцилиндр, что позволяет точно настроить устройство под конкретные условия эксплуатации. Для первого блока, отвечающего за первую ступень гидравлического цилиндра параметры равняются  $1963,5 \text{ см}^2$  и  $443 \text{ см}^2$ , во втором блоке назначены значения  $1520 \text{ см}^2$  и  $1068 \text{ см}^2$ .

Для ограничения хода такого гидроцилиндра существует Параметр «Cylinder Stroke», который начинает отсчет хода от назначенных поверхностей или осей координат. Из технической документации рассматриваемого транспортно-установочного агрегата: для первого блока ход цилиндра составляет 2,648 метра, для второго – 2,672 метра.

#### **2.4 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата**

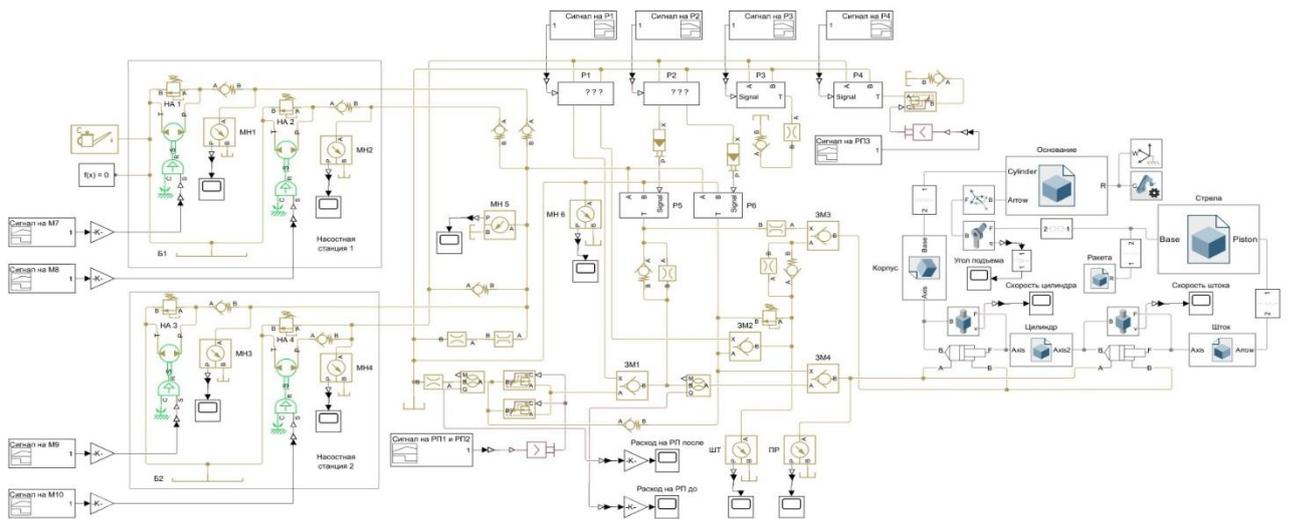


Рисунок 2.10 – Схема гидропривода транспортно-установочного агрегата

Данная гидравлическая схема предназначена для компьютерного повторения работы электродвигателей, питающих насосы всей системы и распределителей, которые задают режимы работы транспортно-установочного агрегата.

Вся работа гидропривода условно делится на несколько этапов в зависимости от угла подъема стрелы и характеризуется собственными усилиями, действующими на гидроцилиндр. По этим режимам будет проверяться адекватность созданной модели и ее пригодность для дальнейшего применения.

#### 2.4.1 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при подъеме от $0^\circ$ до $42^\circ$

Таблица 2.1 – График включений электродвигателей и распределителей [1]

Операция	Двигатель насосной станции				Электромагнит трехпозиционного крана							
	M7	M8	M9	M10	P1		P2		P4		P4	
					YA1	YA2	YA3	YA4	YA5	YA6	YA7	YA8
Подъем стрелы на угле от 0° до 40°	+	+	+	+		+						
Подъем стрелы на угле от 40° до 88°	+	+		+		+						
Подъем стрелы на угле от 88° до 91,5°				+			+					+
Опускание стрелы на угле от 91,5° до 88°				+				+				+
Опускание стрелы на угле от 88° до 40°			+	+								
Опускание стрелы на угле от 40° до 2°				+		+		+				
Опускание стрелы на угле от 2° до 0°				+				+		+		

Согласно гидравлическому расчету транспортно-установочного агрегата, при подъеме стрелы от 0 до 42 градусов принимается расчетная схема, приведённая на рисунке 2.11.

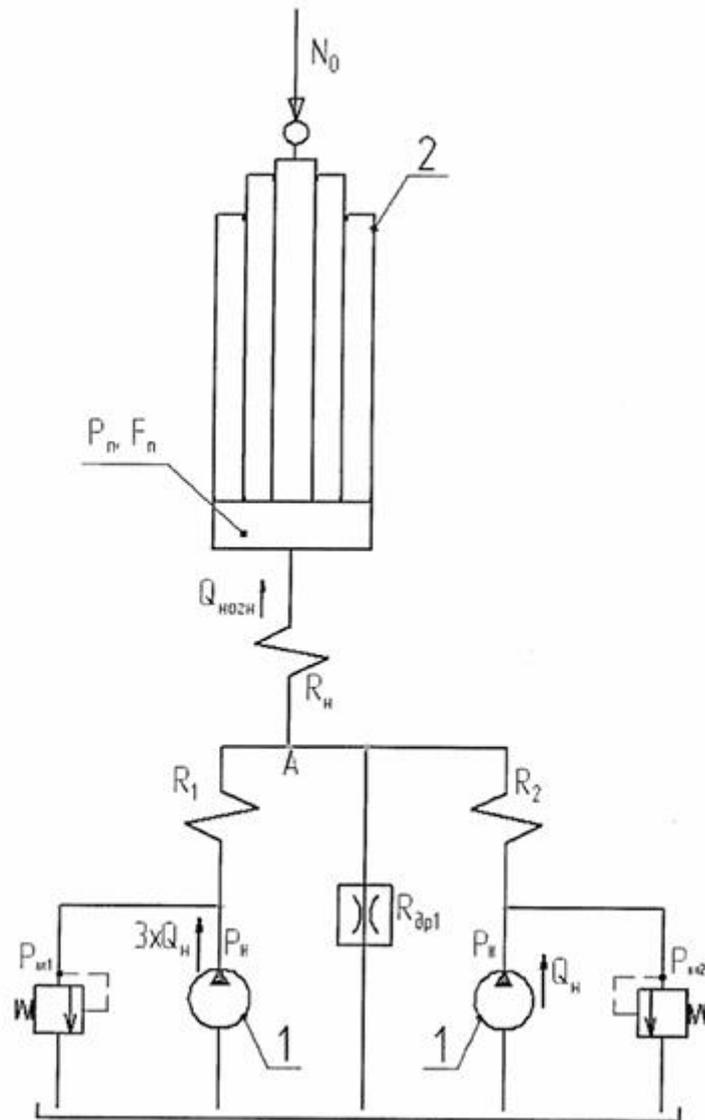


Рисунок 2.11 – Расчетная схема, соответствующая режиму подъема стрелы от  $0^\circ$  до  $42^\circ$  [12]

По проектному расчету: скорость выдвижения цилиндра при подъеме стрелы на угол от  $0^\circ$  до  $20^\circ$  достигает среднего значения в 1 см/с, а время выдвижения цилиндра – 115с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	114.105	2.004e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	114.105 s	$\Delta Y$	1.988e+01
1 / $\Delta T$		8.764 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		174.189 (/ks)	

Рисунок 2.12 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	114.562	11.236 mm/s	
2	0.000e+00	0 m/s	
$\Delta T$	114.562 s	$\Delta Y$	11.236 mm/s
1 / $\Delta T$		8.729 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		98.080 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.13 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

По проектному расчету скорость цилиндра при подъеме от 20° до 42° в среднем равна 1,34 см/с, а суммарное время выдвигения цилиндра – 227 с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	226.154	4.203e+01	
2	0.000e+00	--	
$\Delta T$	226.154 s	$\Delta Y$	--
$1 / \Delta T$		4.422 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		--	

Рисунок 2.14 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	226.154	12.229 mm/s	
2	0.000e+00	0 m/s	
$\Delta T$	226.154 s	$\Delta Y$	12.229 mm/s
$1 / \Delta T$		4.807 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		58.781 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.15 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

В первом и втором случае отклонение по времени составляет 1 с или 0,7%. Отклонение по скорости в обоих случаях около 1мм/с, что приблизительно 12%. Данные отклонения объясняются идеальностью модели параметров рабочей жидкости и отсутствием в гидравлической схеме гидропор и каких-либо гидравлических сопротивлений.

#### 2.4.2 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при подъеме от 42° до 88°

Отличие данного рабочего режима гидропривода от предыдущего кроме другого включения распределителей и насосов заключается в выдвигании штока гидроцилиндра, в то время как цилиндр вышел на всю свою длину.

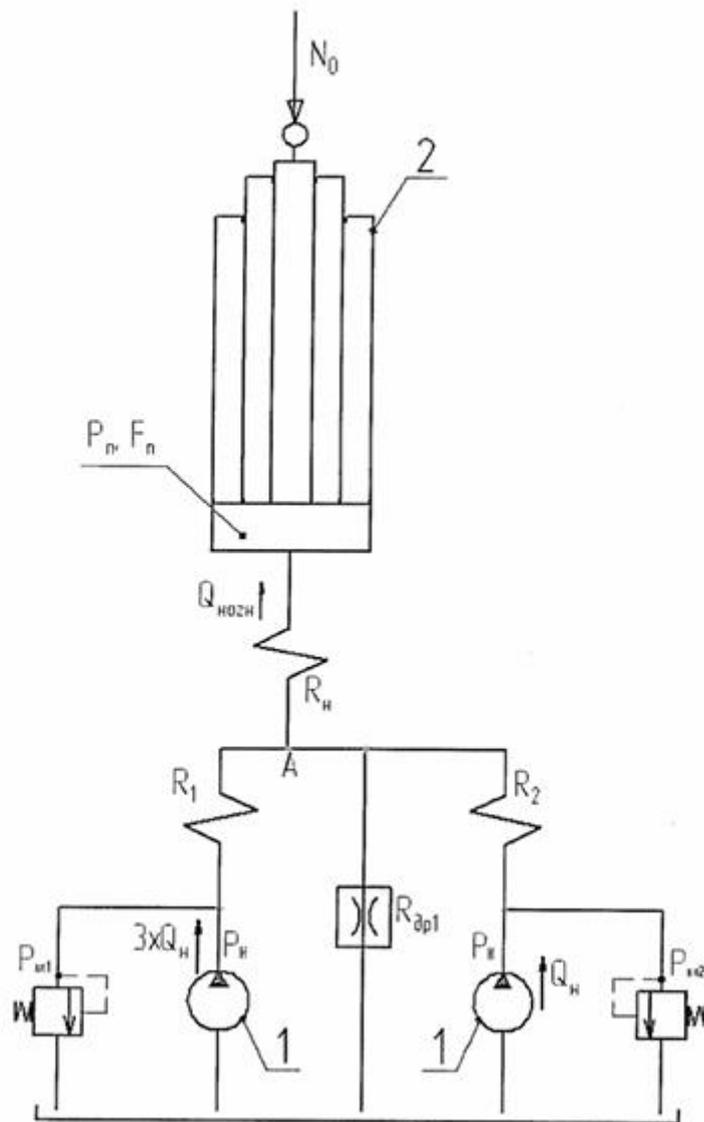


Рисунок 2.16 – Расчетная схема, соответствующая режиму подъема стрелы от  $42^\circ$  до  $88^\circ$  [12]

По расчету скорость выдвигания цилиндра при подъеме стрелы на угол от  $42^\circ$  до  $65^\circ$  достигает среднего значения в  $1,3$  см/с, а время выдвигания цилиндра –  $109$  с. Суммарное время в таком случае достигает  $336$  с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	339.465	6.496e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	339.465 s	$\Delta Y$	6.480e+01
$1 / \Delta T$		2.946 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		190.889 (/ks)	

Рисунок 2.17 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	338.879	12.829 mm/s	
2	1054.555	-607.773 nm/s	
$\Delta T$	715.677 s	$\Delta Y$	12.829 mm/s
$1 / \Delta T$		1.397 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		17.926 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.18 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

До  $78^\circ$  средняя скорость выдвигания гидроцилиндра по расчету остается прежней и данный угол достигается через еще 47 с. Суммарное время составляет 383 с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	383.478	7.817e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	383.478 s	$\Delta Y$	7.801e+01
$1 / \Delta T$		2.608 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		203.418 (/ks)	

Рисунок 2.19 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

При прохождении стрелой угла  $78^\circ$  нагрузка на гидроцилиндр меняется с сжимающей на растягивающую, что влияет на режим его работы. По расчету скорость выдвижения гидроцилиндра в данном режиме составляет 1,3 см/с, а время выдвижения с  $78^\circ$  до  $88^\circ$  – 57 с. Суммарное время равняется 440 с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	444.348	8.821e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	444.348 s	$\Delta Y$	8.805e+01
$1 / \Delta T$		2.250 mHz	
$\Delta Y / \Delta T$		198.162 (/ks)	

Рисунок 2.20 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Между значениями времени в расчетах и в модели накапливается погрешность из-за влияния переходных процессов, которые характеризуются большими и моментальными изменениями скорости, возникшими из-за ошибок расчета.



Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)		Value
1	574.515		9.187e+01
2	0.000e+00		--
$\Delta T$	574.515 s	$\Delta Y$	--
<hr/>			
	$1 / \Delta T$		1.741 mHz
	$\Delta Y / \Delta T$		--

Рисунок 2.22 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)		Value
1	574.795		904.508 $\mu\text{m/s}$
2	1054.555		-685.708 $\text{nm/s}$
$\Delta T$	479.760 s	$\Delta Y$	905.194 $\mu\text{m/s}$
<hr/>			
	$1 / \Delta T$		2.084 mHz
	$\Delta Y / \Delta T$		1.887 $\mu\text{m/s}^2$

Рисунок 2.23 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

В данном режиме общая погрешность по времени составляет 7 с, а по скорости 0,2мм/с.

#### 2.4.4 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 91,5° до 88°

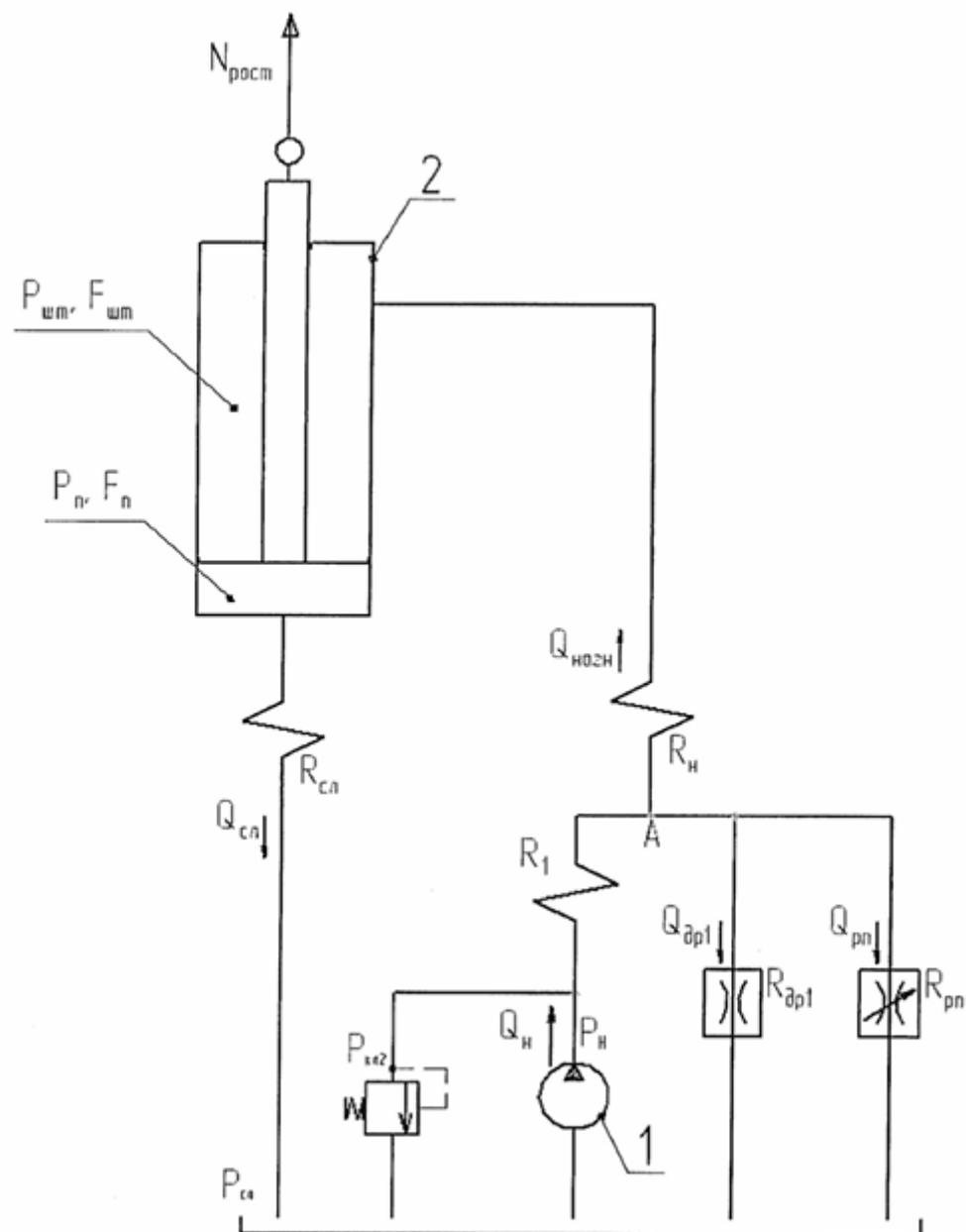


Рисунок 2.24 – Расчетная схема, соответствующая режиму опускания стрелы от  $91,5^\circ$  до  $88^\circ$  [12]

В данном случае, весь расход направляется в штоковую полость и происходит втягивание второй ступени гидроцилиндра на микроскорости.

По расчету скорость движения штока составляет  $0,156$  см/с, а время втягивания –  $110$  с. В модели переключение с режимов подъема в режимы опускания реализовано с  $700$  секунды, поэтому в данных модели будет дополнительное время.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	814.247	8.876e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	814.247 s	$\Delta Y$	8.860e+01
<hr/>			
	1 / $\Delta T$	1.228 mHz	
	$\Delta Y / \Delta T$	108.813 (/ks)	

Рисунок 2.25 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	811.867	-1.256 mm/s	
2	1054.555	-685.708 nm/s	
$\Delta T$	242.688 s	$\Delta Y$	1.255 mm/s
<hr/>			
	1 / $\Delta T$	4.121 mHz	
	$\Delta Y / \Delta T$	5.171 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.26 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

#### 2.4.5 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 88° до 42°

По проектному расчету: средняя скорость движения штока равна 1,5 см/с при общем времени втягивания – 169 с. Суммарное время составляет 279 с.

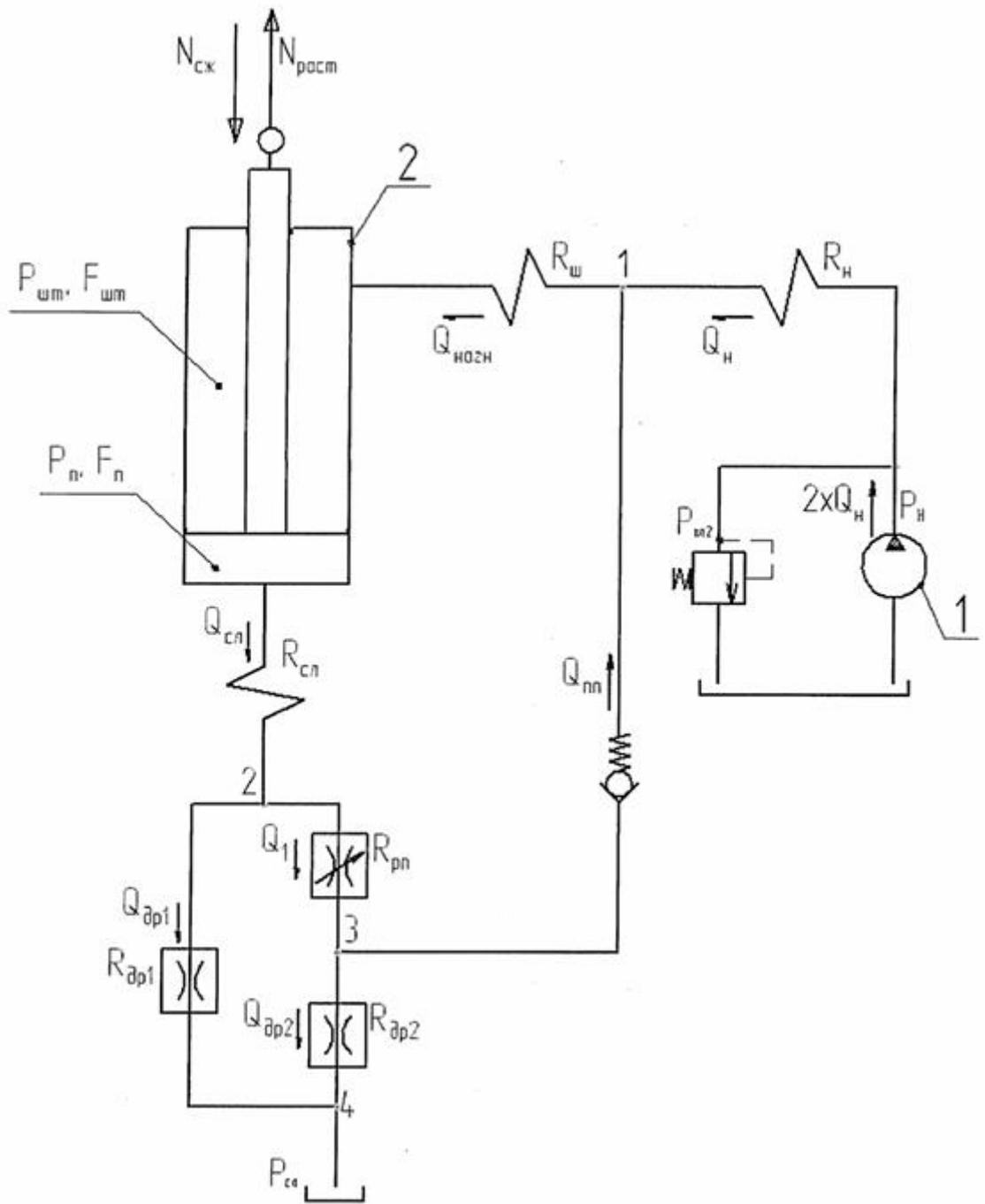


Рисунок 2.27 – Расчетная схема, соответствующая режиму опускания стрелы от  $88^\circ$  до  $42^\circ$  [12]

Cursor Measurements			
▶ Settings			
▼ Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1035.251	4.204e+01	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	1.035 ks	$\Delta Y$	4.188e+01
<hr/>			
	1 / $\Delta T$	965.949 $\mu$ Hz	
	$\Delta Y / \Delta T$	40.449 (/ks)	

Рисунок 2.28 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
▶ Settings			
▼ Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1035.251	-13.122 mm/s	
2	0.000e+00	0 m/s	
$\Delta T$	1.035 ks	$\Delta Y$	13.122 mm/s
<hr/>			
	1 / $\Delta T$	1.033 mHz	
	$\Delta Y / \Delta T$	13.550 $\mu$ m/s <sup>2</sup>	

Рисунок 2.29 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

В данном случае появляется большое расхождение по времени из-за погрешности в скорости, составляющей 2 мм/с, но характер изменения угла и скоростей аналогичен расчетным.

#### 2.4.6 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 42° до 2°

В данном режиме наблюдается отсутствие подачи давления гидравлической жидкости в штоковые полости гидроцилиндра, а само опускание

стрелы происходит только под усилием от собственного веса стрелы с РКН или без нее.

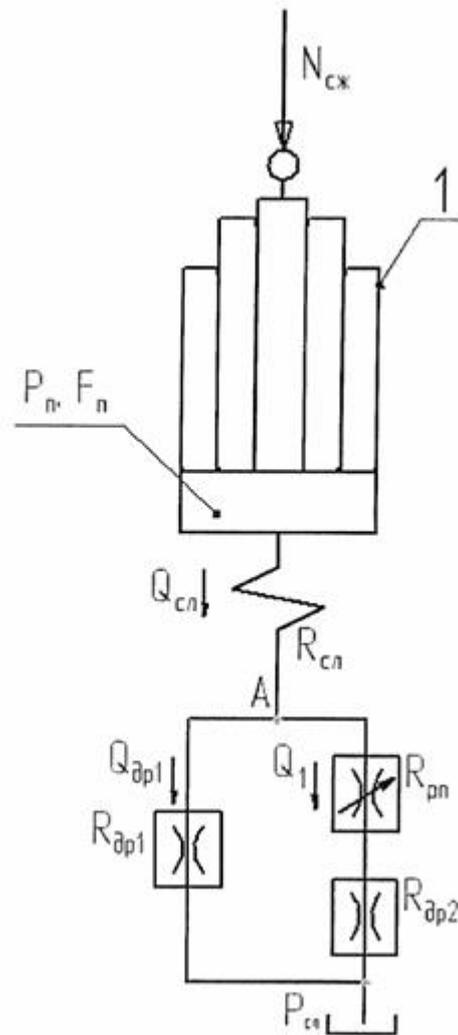


Рисунок 2.30 – Расчетная схема, соответствующая режиму опускания стрелы от 42° до 2° [12]

По расчету скорость движения штока равняется 1,34 см/с, а время втягивания – 187 с. Суммарное время – 466 с.

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1265.619	2.200e+00	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	1.266 ks	$\Delta Y$	2.039e+00
1 / $\Delta T$		790.127 $\mu\text{Hz}$	
$\Delta Y / \Delta T$		1.611 (/ks)	

Рисунок 2.31 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1265.641	-13.651 mm/s	
2	0.000e+00	0 m/s	
$\Delta T$	1.266 ks	$\Delta Y$	13.651 mm/s
1 / $\Delta T$		797.677 $\mu\text{Hz}$	
$\Delta Y / \Delta T$		10.889 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.32 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

Ошибка по времени сохраняется с предыдущих режимов работы, в то время как скорости выдвигения в пределах погрешности.

#### 2.4.7 Проверка модели гидропривода транспортно-установочного агрегата при опускании от 2° до 0°

Данный режим рассматривается отдельно, поскольку стрела опускается под собственным весом с очень малой скоростью, поскольку слив жидкости из поршневой полости ограничивается для предотвращения резкого соударения

стрелы с платформой. Скорость штока при этом равной 0,26 см/с на протяжении 39 с. Суммарное время достигает 505 с.

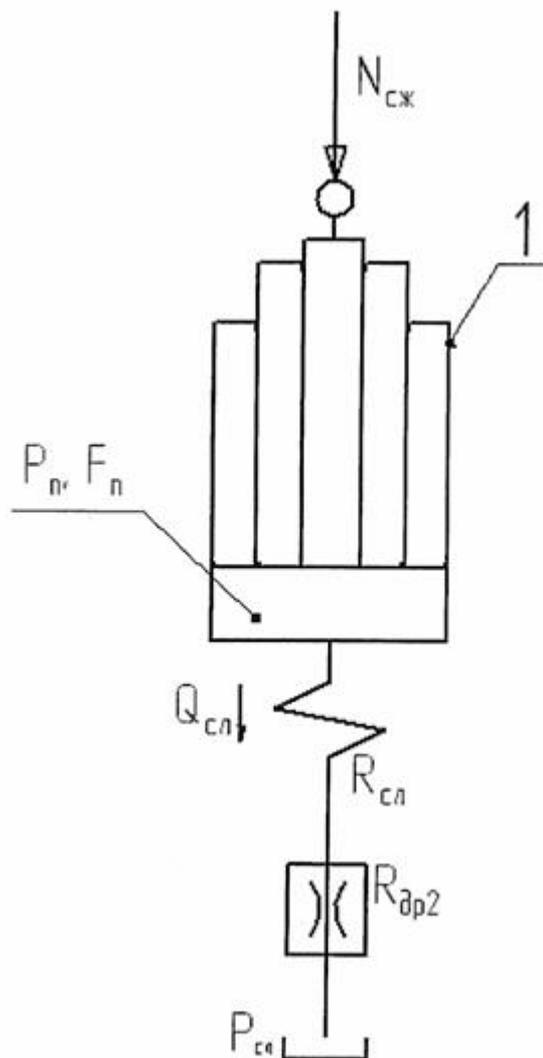


Рисунок 2.33 – Расчетная схема, соответствующая режиму опускания стрелы от  $42^\circ$  до  $2^\circ$  [12]

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1314.314	3.297e-02	
2	0.000e+00	1.606e-01	
$\Delta T$	1.314 ks	$\Delta Y$	1.277e-01
$1 / \Delta T$		760.853 $\mu\text{Hz}$	
$\Delta Y / \Delta T$		97.123 (/Ms)	

Рисунок 2.34 – Значения угла подъема стрелы от времени согласно модели

Cursor Measurements			
Settings			
Measurements			
	Time (seconds)	Value	
1	1314.429	-2.262 mm/s	
2	0.000e+00	0 m/s	
$\Delta T$	1.314 ks	$\Delta Y$	2.262 mm/s
$1 / \Delta T$		760.787 $\mu\text{Hz}$	
$\Delta Y / \Delta T$		1.721 $\mu\text{m/s}^2$	

Рисунок 2.35 – Значения скорости гидроцилиндра от времени согласно модели

При сравнении расчетных режимов работы транспортно-установочного агрегата и режимов, полученных при моделировании, можно заключить:

- Процесс поднятия стрелы совпадает с расчетными режимами в пределах 5% погрешности;
- Процесс опускания имеет расхождение с расчетными данными до 15%, но имеет аналогичный характер изменений.

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТРЕЛЫ ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА

Для решения различных прикладных задач используются соответствующие математические модели, которые разработаны для конкретных типов таких задач. В общем виде, данные математические модели представляются системой дифференциальных уравнений с некоторыми граничными и начальными условиями. Однако получение точного аналитического решения этих уравнений занимает много времени из-за их высокой нелинейности. Решением этой проблемы является использование численных методов, которые позволяют находить приближенные решения с некоторой допустимой погрешностью.

Численные методы имеют свои особенности и применяются в различных областях науки и техники. В отличие от аналитических методов, которые могут дать точное решение в каждой точке пространства, численные методы работают с дискретными значениями. Для этого необходимо предварительно провести дискретизацию пространства, что делается с помощью специальных алгоритмов. Основная задача при этом — выбрать оптимальный метод создания сетки, которая обеспечит необходимую точность расчетов, но не потребует чрезмерных вычислительных ресурсов.

Существующие численные методы классифицированы на два основных класса:

- метод конечных разностей (МКР);
- метод конечных элементов (МКЭ).

Общей идеей МКР является сведение решения краевой задачи для дифференциального уравнения к решению системы алгебраических уравнений относительно значений искомой функции на заданном множестве точек. Этот подход достаточно прост и эффективен для решения задач с регулярной геометрией и простыми граничными условиями, но неприменимо для более сложных систем.

Метод конечных элементов иногда называют конечно-элементным анализом. Его суть заключается в разбиении области на конечное число элементов, каждый из которых описывается простыми функциями, например, полиномами. Затем для каждого элемента составляется соответствующая СЛАУ. Из этого получается общая система, которая может быть решена с использованием различных численных алгоритмов.

### **3.1 Обобщенная процедура конечно-элементного анализа**

Основные этапы можно разделить на три категории:

- 1) препроцессирование;
- 2) решение;
- 3) постпроцессирование.

Этап препроцессирования является основополагающим и критически важным для успешного завершения анализа, поскольку ошибки на данном этапе могут привести к неправильным результатам, даже если последующий анализ выполнен с высокой точностью.

Он включает в себя несколько ключевых шагов:

- определение геометрической области задачи – создается геометрическую модель, которая будет использоваться в анализе. Это может быть простая фигура, как куб или цилиндр, или сложная конструкция, состоящая из множества компонентов, а также проводится назначение размеров;
- определение типа элементов – в зависимости от природы задачи выбираются различные типы конечных элементов. Для механических задач могут использоваться стержневые, плиточные или объемные элементы, в то время как для тепловых задач необходимы элементы, учитывающие теплопередачу;
- определение свойств материала – это может включать в себя модуль Юнга, коэффициенты теплопроводности и другие характеристики;
- определение связности элементов – генерацию сеточной модели, что связано с выбором конкретного метода создания сетки на основании имеющихся данных для расчета;

- определение нагрузок, накладываемых на модели – это могут быть механические нагрузки, как силы и моменты, или тепловые нагрузки – температура.

После завершения препроцессирования начинается этап решения, во время которого программное обеспечение формирует системы алгебраических уравнений. Для удобства они представляются в матричной форме, что позволяет использовать эффективные численные методы для их решения.

Анализ и оценка результатов, полученных в ходе решения задач называются постпроцессированием. В процессе постпроцессирования возможно выполнение различных операций, различающихся по графическому представлению:

- сортировка результатов по возрастанию или убыванию определённых величин, например, для нахождения максимальной температуры в расчетной области;

- вычисление коэффициентов запаса прочности по различным показателям, таким как напряжение или перемещение, что применяется для прочностных расчетов, где напряжение относится к толщинам материала;

- отображение деформированного состояния конструкции. Данная операция необходима, когда нужно выявить потенциальные точки разрушения или области, где могут возникнуть значительные деформации;

- анимация динамического поведения модели. Она позволяет наблюдать за изменениями в конструкции во времени;

- отображение различных величин на плоскости или в объеме.

### **3.2 Метод триангуляции Делоне**

При препроцессировании выбор метода генерации сеточной структуры во многом определяет будущий результат расчета. Методы генерации сетки можно разделить на:

- 1) ручные и полуавтоматические, применяемые к областям с простой геометрией и методы декомпозиции. Поскольку стрела транспортно-

установочного агрегата имеет сложную геометрию, то ручные методы и методы декомпозиции не рассматриваются в данном случае;

2) конструктивные методы, которые включают:

а. метод создания элементов – метод продвигаемого фронта;

б. метод вставки точки – метод триангуляции Делоне.

Метод продвигаемого фронта представляет собой алгоритм, в котором сетка строится, начиная от некоторой границы, пока не будет триангулирована вся геометрия. Метод характеризуется высоким качеством сетки с переменной плотностью и оптимизированным потреблением операционной мощности. Однако в сетке не гарантировано отсутствие плохих элементов, по типу плоских тетраэдров.

Метод, в котором отсутствуют недостатки метода продвигаемого фронта, называется метод триангуляции Делоне, который характеризуется способностью создавать качественные сетки, то есть с минимальным наличием "плохих" элементов.

Суть триангуляции Делоне заключается: любой узел сетки не должен находиться внутри описанной окружности для треугольника или описанной сферы для тетраэдра.

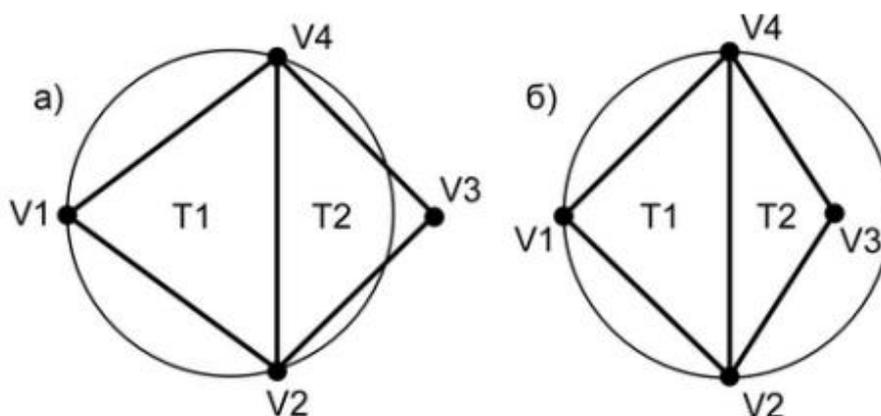


Рисунок 3.1 – Иллюстрация критерия Делоне:

а) критерий выполняется, б) критерий не выполняется [11]

Известные алгоритмы триангуляции Делоне разделены на отдельные категории: итеративные алгоритмы, алгоритмы слияния, двухпроходные алгоритмы и алгоритмы прямого построения.

Для определения алгоритмов метода триангуляции Делоне необходимо использование понятия диаграммы Вороного – одной из базовых структур вычислительной геометрии.

Диаграммой Вороного заданного множества точек называется совокупность всех многоугольников Вороного этих точек.

Многоугольником (ячейкой) Вороного называется геометрическое место точек на плоскости, которые находятся ближе к одной заданной точке, чем к любой другой заданной точке.

В общем случае, триангуляция Делоне осуществляется на основе набора точек, благодаря одному из свойств данного метода: триангуляция Делоне взаимно однозначно соответствует диаграмме Вороного для того же множества точек. Это означает, что, соединив отрезками те исходные точки, чьи многоугольники Вороного соприкасаются хотя бы углами, получается триангуляция Делоне.

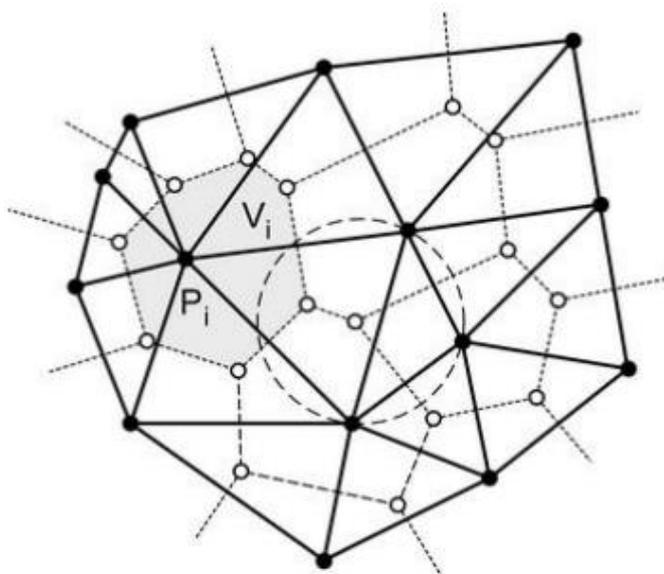


Рисунок 3.2 – Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне на плоскости [11]

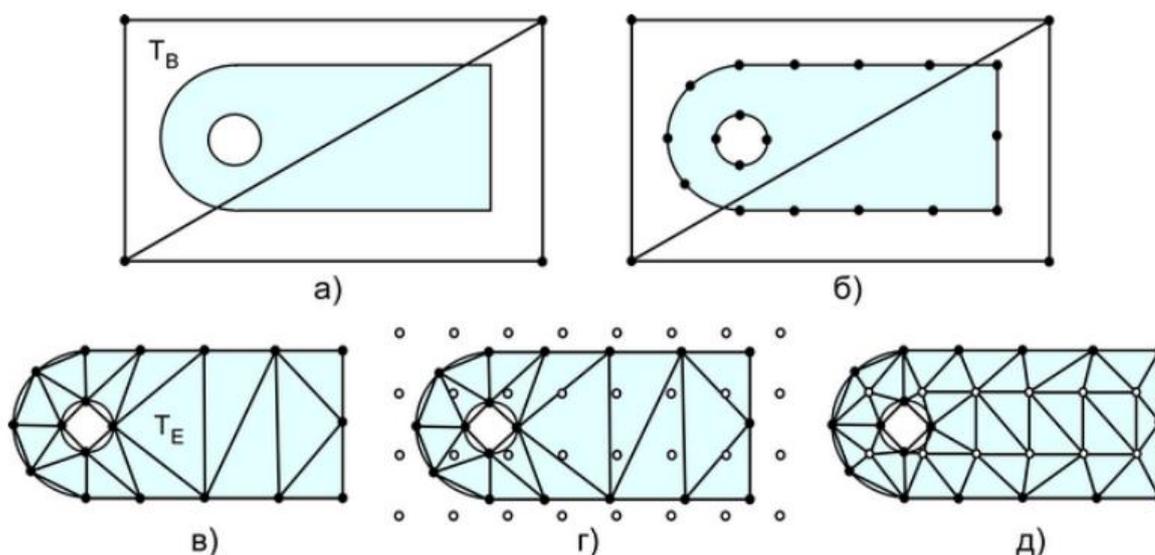


Рисунок 3.3 – Этапы триангуляции Делоне [11]

Метод триангуляции Делоне имеет множество достоинств:

- он основан на хорошо развитой математической теории, что обеспечивает его надежность и предсказуемость в различных приложениях;
- высокое качество получаемой сетки, которая может иметь элементы с плавно изменяющимися размерами, что необходимо при триангуляции сложной геометрической формы;
- высокая скорость построения сеток;
- гарантированная сходимость сетки, что означает, что при увеличении разрешения сетки результаты приближаются к истинным значениям;
- невысокая вычислительная сложность.

Метод триангуляции Делоне имеет следующие недостатки:

- отсутствие гарантии правильности сетки, но данный недостаток компенсируется дополнительной процедурой восстановления границ;
- отсутствие инвариантности по отношению к поворотам области в пространстве;
- необходимость дискретизации границ ограничивает применение метода в случаях сложных границ;
- несогласованность с заданной граничной дискретизацией.

### **3.3 Метод конечных элементов в КОМПАС-3D**

Для исследования напряжённого состояния стрелы выбран САПР Компас-3D, в котором для прочностных исследований реализована система АРМ FEM.

АРМ FEM представляет собой инструмент для подготовки и последующего конечно-элементного анализа трехмерной твердотельной модели в виде детали или сборки.

В результате расчетов, выполненных с помощью системы АРМ FEM, можно получить следующие данные:

Для успешного выполнения прочностного анализа необходимо корректно назначить модели свойства исследуемого материала. Это можно сделать с помощью библиотеки Материалов и Сортаментов, встроенной в систему Компас-3D, или через систему справочников ПОЛИНОМ:MDM. Таким образом, для модели назначаются предел текучести, модуль упругости нормальный, коэффициент Пуассона, плотность, температурный коэффициент линейного расширения, теплопроводность, предел прочности при сжатии, предел выносливости при растяжении, предел выносливости при кручении.

Основной материал, используемый при изготовлении стрелы транспортно-установочного агрегата, является сталь 10ХСНД, поэтому в исследовании она выбрана в качестве материала всей детали.

### **3.4 Расчет и отображение напряженного состояния стрелы**

#### **3.4.1 Задание закреплений и приложение нагрузки**

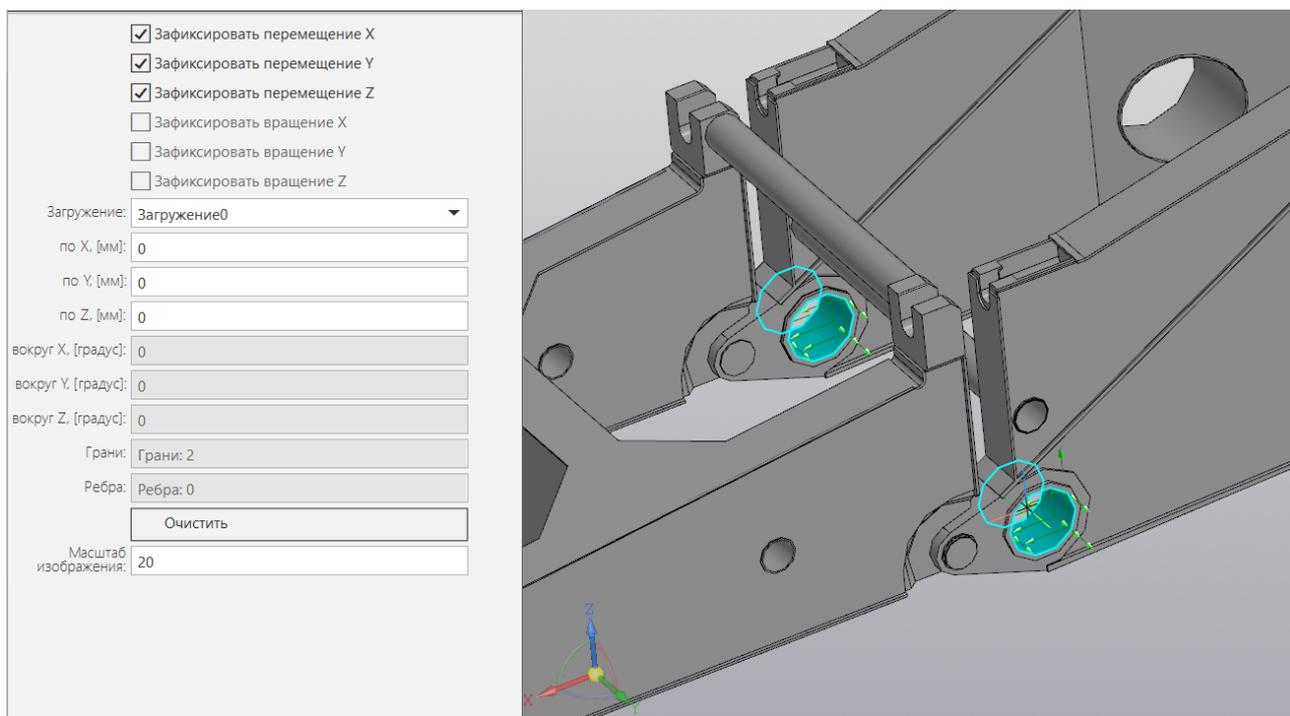


Рисунок 3.4 – Закрепление стрелы транспортно-установочного агрегата

Для упрощения расчета проводится анализ напряженно-деформированного состояния стрелы транспортно-установочного агрегата без учета других составляющих ТУА, заменяя их усилиями и реакциями.

Вследствие этого закрепление стрелы осуществляется в местах крепления стрелы к основанию транспортно-установочного агрегата.

Нагрузки, прикладываемые к стреле, можно разделить на 3 основные группы:

1. Нагрузки от собственного веса, определяемые плотностью материала конструкции и вектором гравитации;
2. Усилие от гидроцилиндра;
3. Нагрузки от веса изделия, поднимаемого стрелой, определяемые видом изделия и вектором гравитации. Места приложения этой нагрузки – в месте крепления опор.

Плотность стали 10ХСНД, выбранного в качестве материала для всей конструкции – 7850 кг/м<sup>3</sup>.

Вектор гравитации в Компас-3D всегда направлен против оси Z глобальной системы координат. Поэтому при расчете разных положений стрелы вся

конструкция будет поворачиваться на необходимый угол вокруг оси крепления стрелы к основанию согласно графику из модели двухступенчатого гидроцилиндра.

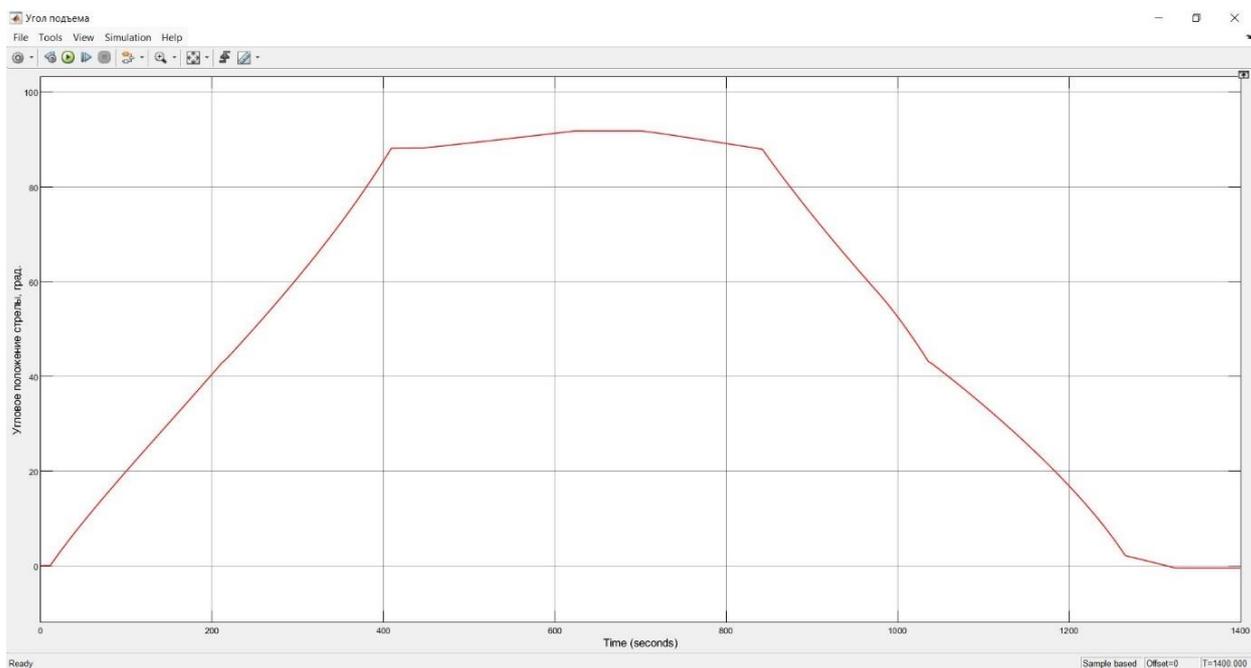


Рисунок 3.5 – Угловое положение стрелы транспортно-установочного агрегата

Применяемое усилие гидроцилиндра для каждого положения будет определяться из трех факторов:

1. По графикам скоростей определяется какой из штоков сейчас совершает движение;
2. По графикам давлений в поршневых и штоковых полостях определяется результирующее усилие гидроцилиндра;
3. По графику углового положения гидроцилиндра определяется угол наклона гидроцилиндра к горизонту и усилие раскладывается по осям  $X$  и  $Z$ .

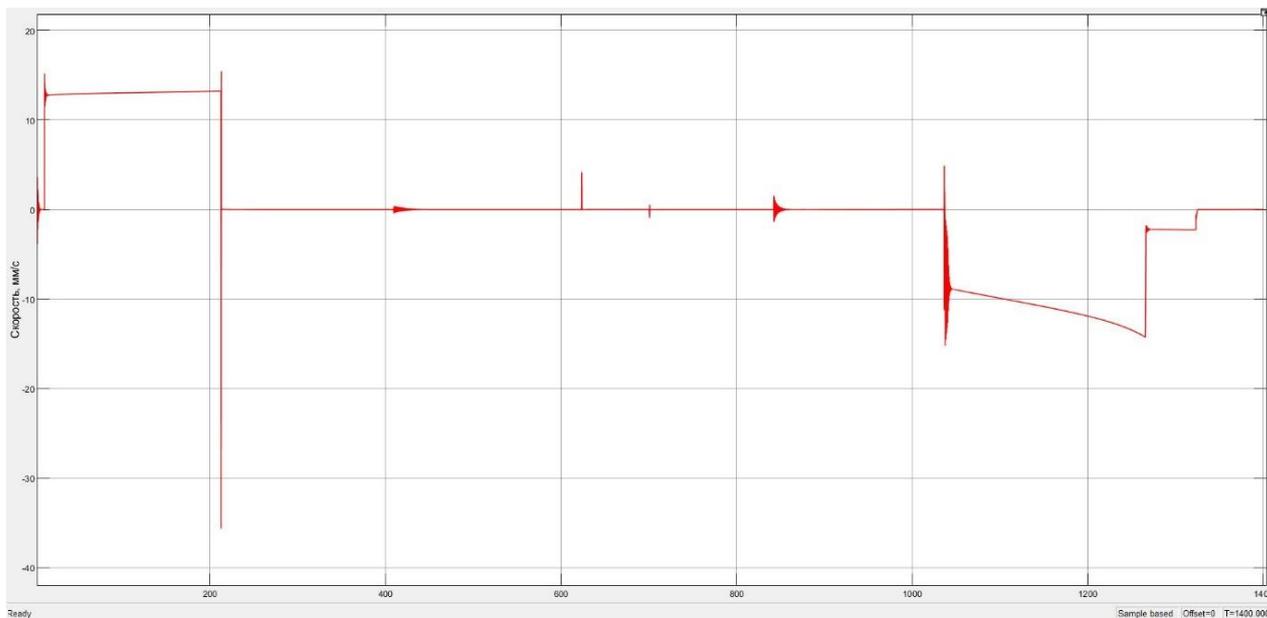


Рисунок 3.6 – Скорость 1 штока гидроцилиндра

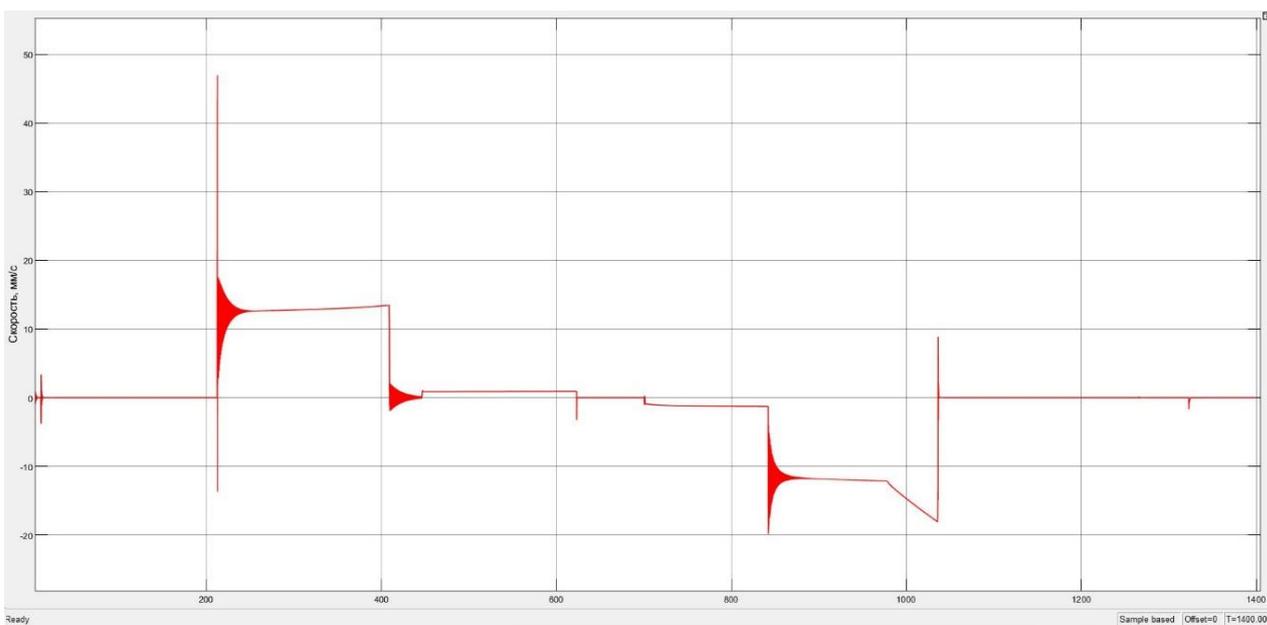


Рисунок 3.7 – Скорость 2 штока гидроцилиндра

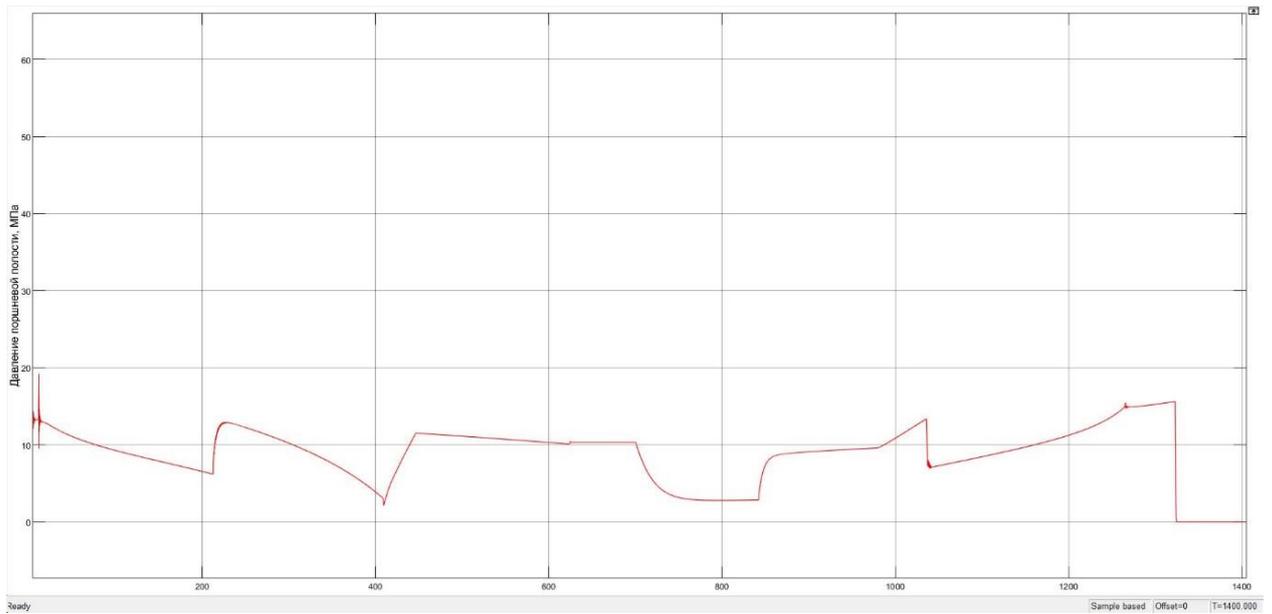


Рисунок 3.8 – Давление в поршневых полостях

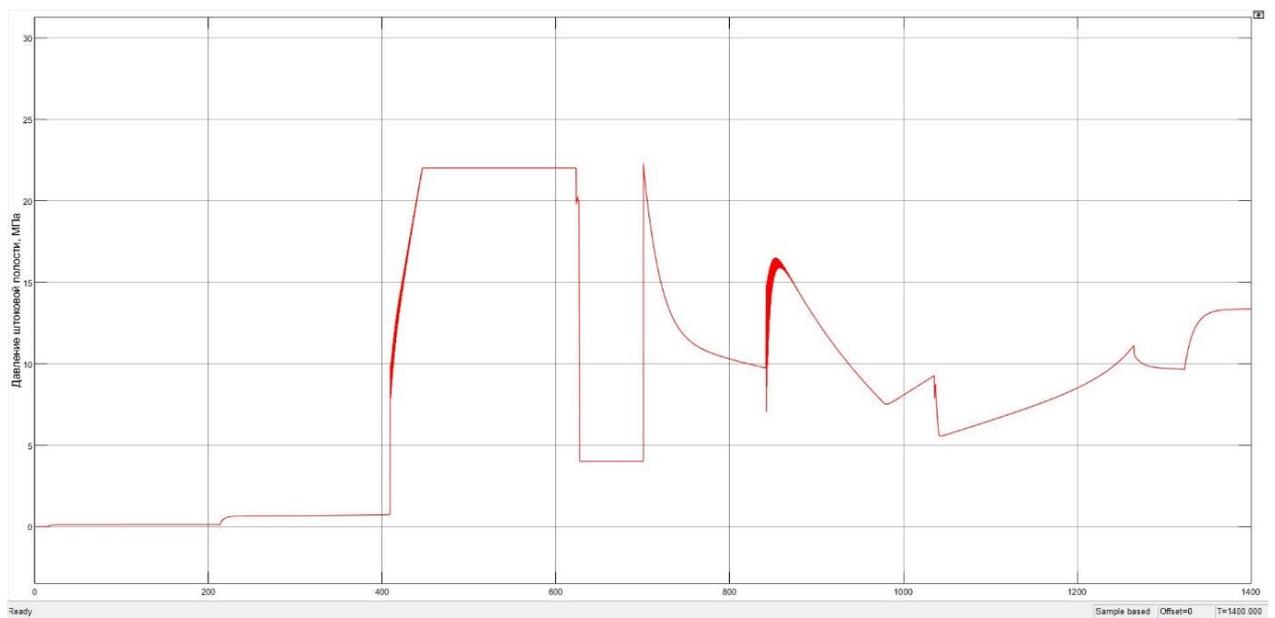


Рисунок 3.9 – Давление в штоковых полостях

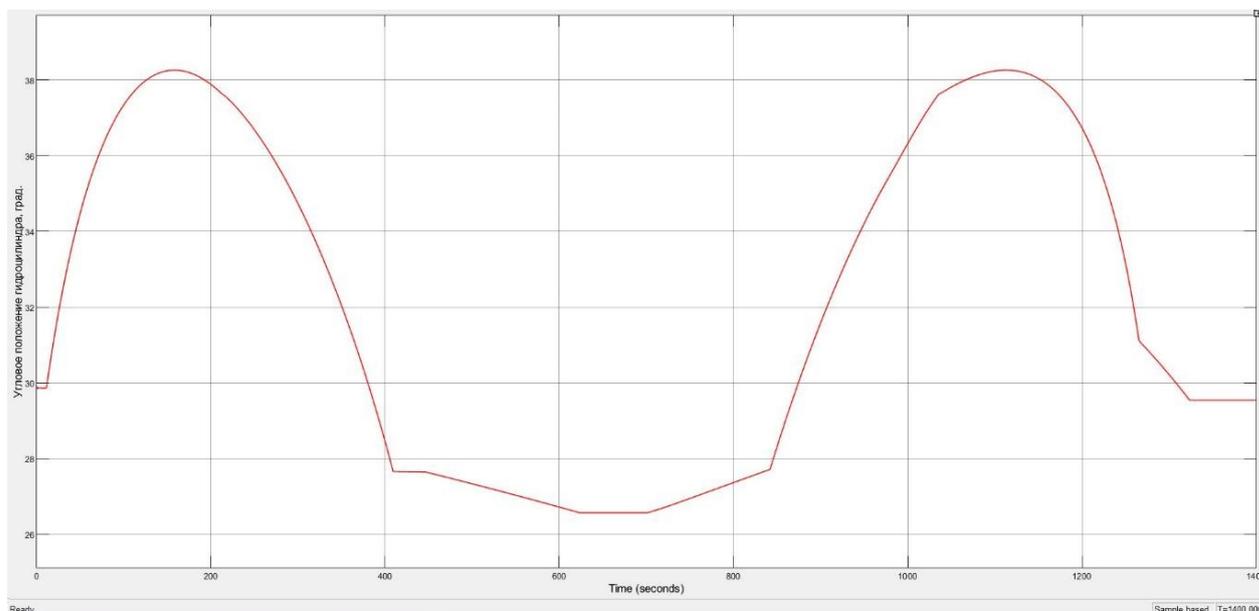


Рисунок 3.10 – Угловое положение гидроцилиндра

В качестве поднимаемого изделия принимается «Союз 2.1б» с весом 39200 кгс. Центр масс изделия будет также поворачиваться при повороте стрелы. Места приложения этой нагрузки определены из документации.

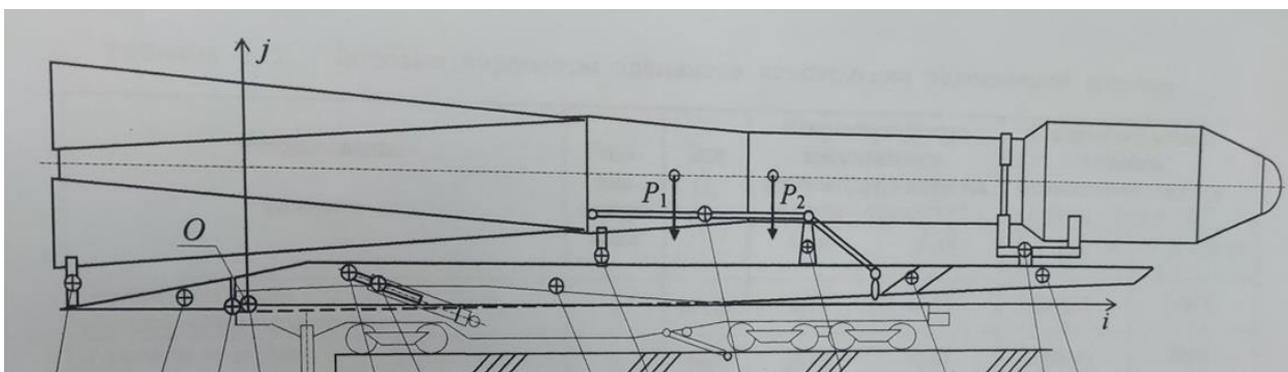


Рисунок 3.11 – Схема поднимаемой системы ТУА [9]

Для первого расчетного положения принимается  $0^\circ$  – угол подъема стрелы, тогда:

- $30^\circ$  – угол наклона гидроцилиндра;
- 39200 кгс – вес изделия на стреле;
- 412637 кгс – усилие гидроцилиндра;
- 3502070 Н – усилие гидроцилиндра по оси X;
- 2021921 Н – усилие гидроцилиндра по оси Z.

### 3.4.2 Генерация КЭ сетки

Для генерации конечно-элементной сетки задаются характеристики будущей сетки при помощи команды «Разбиение и расчет».

Максимальная длина стороны элемента: 200

Минимальная длина стороны элемента: 60

Максимальный коэффициент...: 1.2

Учёт кривизны

Угловой шаг, [градус]: 18

Игнорировать угловой шаг на малых г...

(Beta) Объединять близкорасположен...

Размер допуска на слияние, [мм]: 0.5

Проверять наличие материала у детал...

Обеспечить совместимость порядка КЭ

^ Параметры объемной сетки

4-узловые тетраэдры

10-узловые тетраэдры

Коэффициент разрежения в объеме: 1.5

Для топологической оптимизации

^ Параметры поверхностной сетки

3-х узловые пластины

4-узловые пластины

Четырехугольно-доминантная сетка

Рисунок 3.12 – Параметры команды генерации КЭ сетки

Ниже приведены краткие описания параметров из окна настроек сетки, которые были изменены:

**4- или 10-узловые тетраэдры** – настройка отвечает за будущий вид элементов сетки, определяя количество узлов в тетраэдрах.

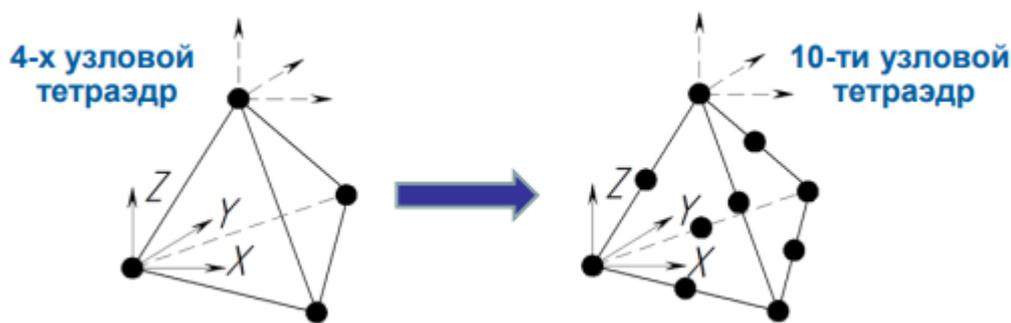


Рисунок 3.13 – Графическое отображение 4- и 10-узловых тетраэдров

Увеличение число узлов позволяет лучше триангулировать криволинейные поверхности и сложные геометрические формы, заодно уменьшая их общее количество.

**Максимальная длина стороны элемента** – настраивает максимальную длину будущих элементов. При уменьшении данной настройки триангуляция займет значительно больше операционной мощности и времени, однако будет создана более подробная сетка, которая может потребоваться при расчетах криволинейных поверхностей и сложных геометрических форм.

**Минимальная длина стороны элемента** – аналогичная настройка, что и максимальная длина. При уменьшении этого параметра минимальный размер элемента сетки становится меньше, что увеличивает качество будущего расчета, но значительно увеличивает сложность операции для оборудования. Разработчиком данного программного обеспечения рекомендуется ставить этот параметр в 5 раз меньше, чем значение максимальной длины стороны элемента.

**Коэффициент сгущения на поверхности** –настройка, регулирующая насколько каждый следующий соседний элемент сетки может быть больше или меньше в размере. При значении параметра равного 1 сетка будет создана из элементов примерно одного размера. Увеличение этого параметра позволяет сгенерировать более подробную сетку в узких местах расчетной геометрии без необходимости уменьшать размеры всех элементов сетки.

**Объединять близкорасположенные элементов модели** – при включении этой настройки и задании некоторого значения в поле «Размер допуска на слияние» перед триангуляцией будет проводится поиск граней, расстояние

между которыми меньше назначенного значения и их дальнейшее объединение. Такая оптимизация модели создана, чтобы улучшить качество конечно-элементной сетки и немного упростить расчет.

В результате перестроения получена конечно-элементная сетка стрелы транспортно-установочного агрегата, изображенная на рисунке 3.13.

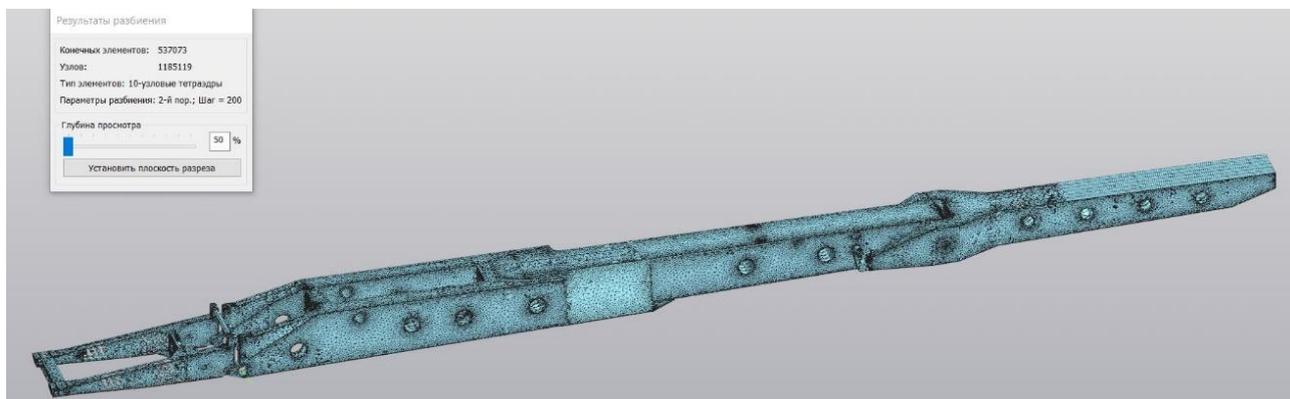


Рисунок 3.14 – КЭ сетка стрелы

### 3.4.3 Выполнение расчета

После этапа триангуляции, или же препроцессирования, следует этап решения, который запускается командой «Расчет». После этого открывается доступ к настройкам расчета (Рис. 3.14).

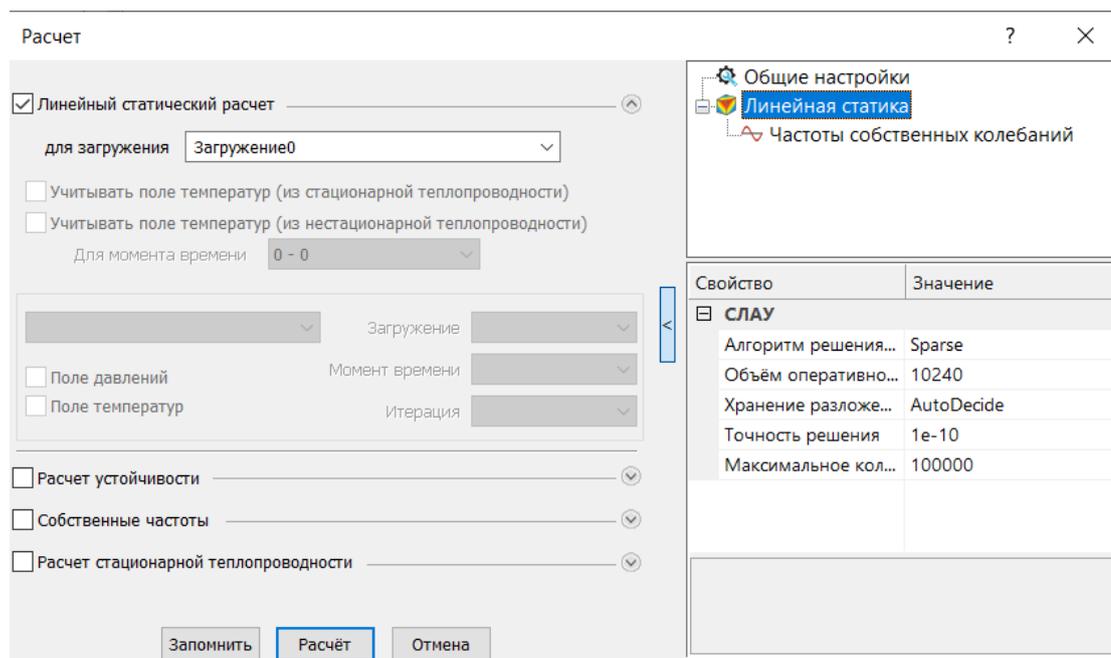


Рисунок 3.15 – Настройки программы

Поле "Алгоритм решения СЛАУ" предоставляет возможность выбрать решатель для проводимого расчета. Одним из наиболее популярных и эффективных решателей является Sparse, использование которого позволяет значительно оптимизировать вычислительные процессы, поскольку он хранит только ненулевые элементы матрицы, что экономит как память, так и время.

Метод Sparse является стандартным выбором по умолчанию в большинстве современных программных пакетов для численного моделирования и анализа, что связано с его высокой производительностью и способностью обрабатывать большие объемы данных.

#### 3.4.4 Просмотр результатов в виде карт напряжений, перемещений

Для просмотра полученных результатов необходимо выбрать желаемый параметр и вид его отображения. Для этого используется команда «Карта результатов». Благодаря ей возможно получить следующие результаты:

- распределение напряжений по модели, как по всем трем осям, так и по отдельности;
- распределение перемещений и деформаций конечно-элементной сетки от приложенных нагрузок;
- распределение коэффициентов запаса прочности по различным критериям;
- распределение температурных полей;
- реакции в опорах конструкций.

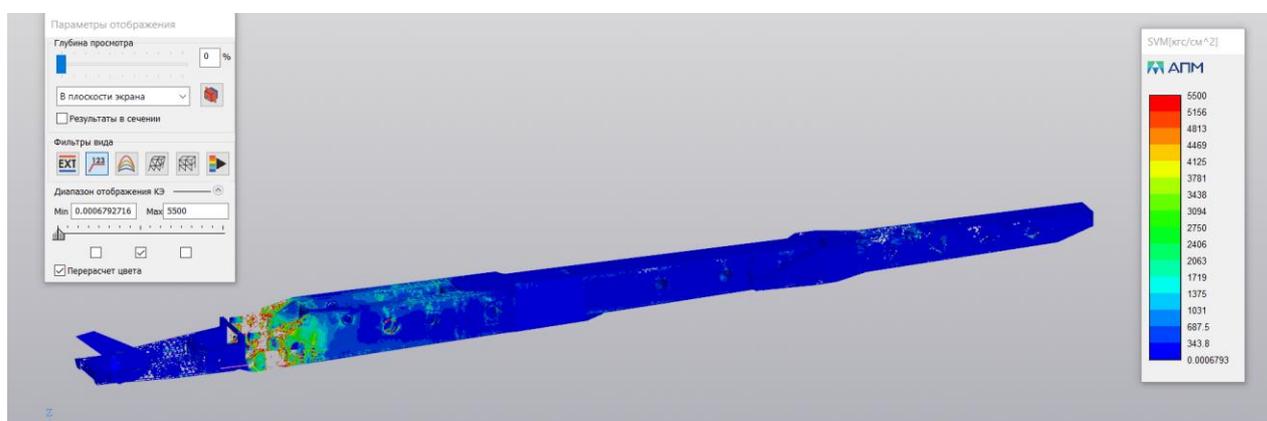


Рисунок 3.16 – Карта напряжений стрелы

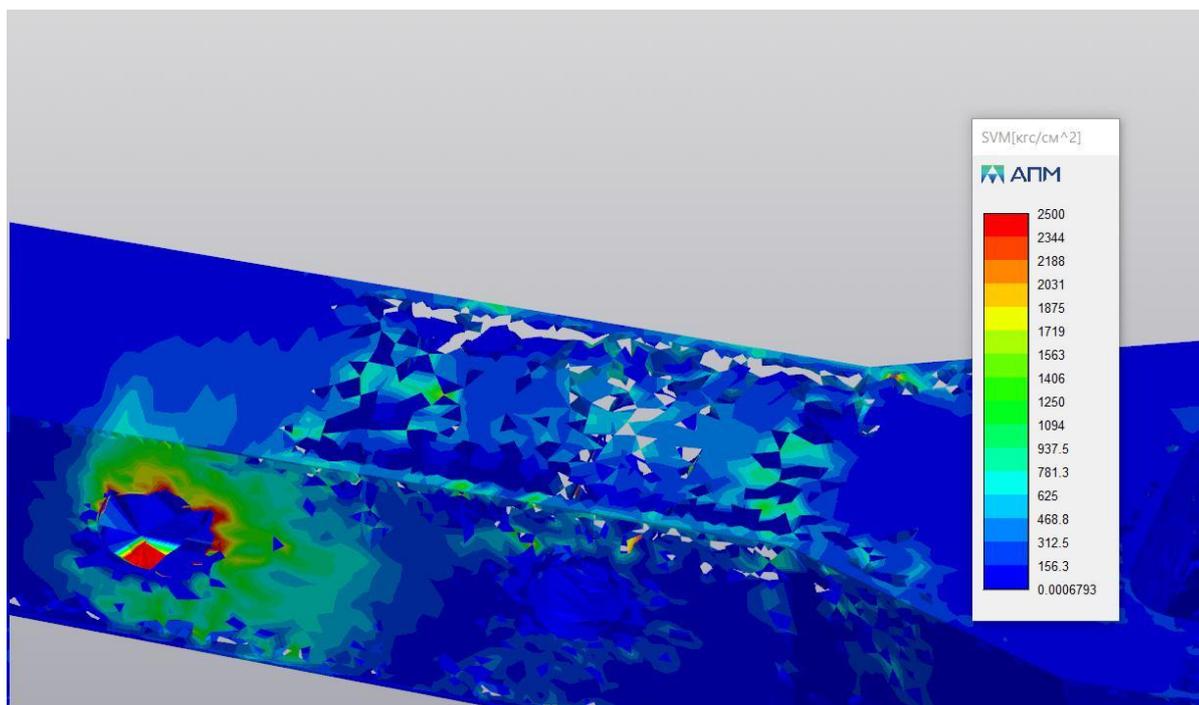


Рисунок 3.17 – Карта напряжений у верхней опоры

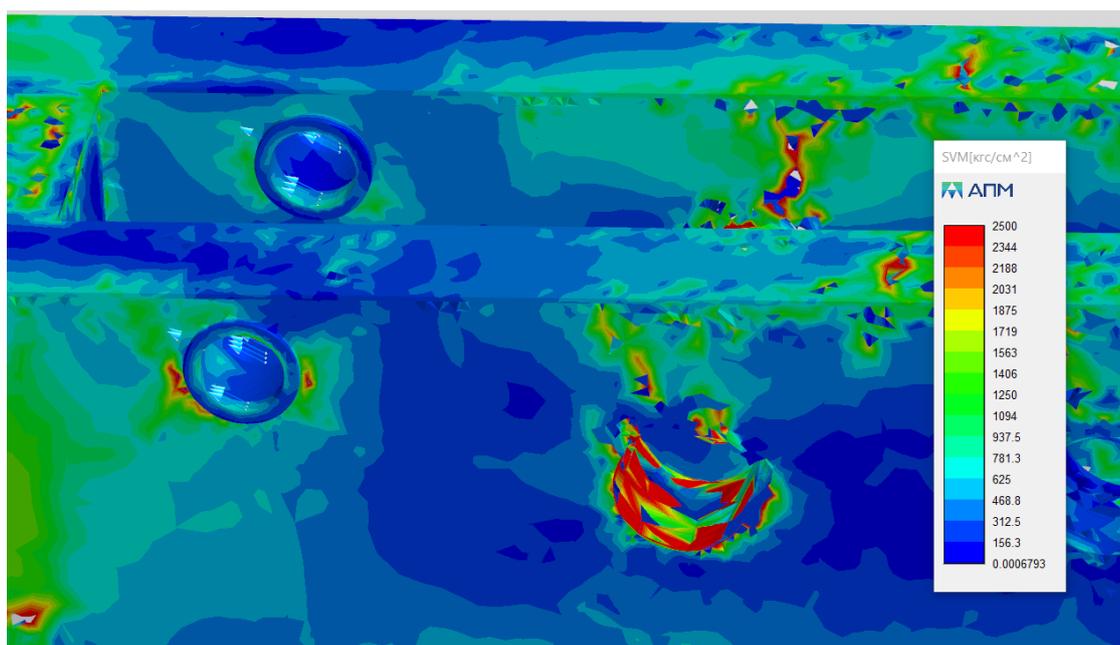


Рисунок 3.18 – Карта напряжений у крепления гидроцилиндра

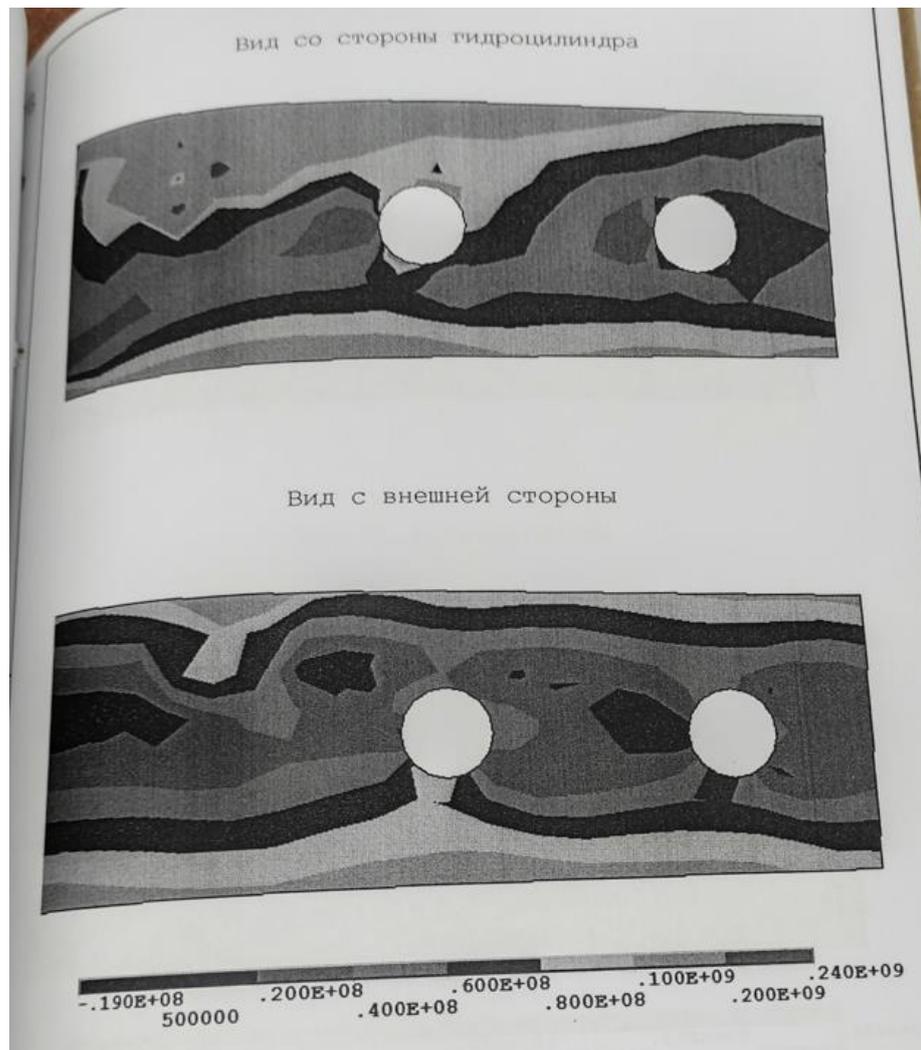


Рисунок 3.19 – Карта напряжений у крепления гидроцилиндра [9]

## 4 РАЗДЕЛ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 4.1 Общие правила по мерам безопасности

Эксплуатация транспортно-установочного агрегата связана с различными опасностями, для предотвращения которых разработаны нормативные документы и инструкции, соблюдение которых обеспечивает безопасную работу с данным оборудованием.

Эксплуатация транспортно-установочного агрегата запрещается при температуре окружающей среды вне диапазона от минус 40°С до плюс 40°С, а также при средней скорости ветра, превышающей 17 м/с.

Для обслуживания транспортно-установочного агрегата должен быть назначен расчет, состоящий, как минимум, из пяти человек, из которых один назначается руководителем персонала, ответственным за содержание ТУА в исправном состоянии и за выполнение требований инструкций по безопасности обслуживающим персоналом. Запрещено проводить любые работы без руководства руководителя работ.

Нормативные акты и инструкции по охране труда основаны на следующих документах:

- ФЗ № 69-ФЗ «О пожарной безопасности»;
- ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»;
- ГОСТ 12.4.011-89 (СТ СЭВ 1086-88) «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»;
- Приказ Минтруда и социальной защиты РФ от 27.11.2020 г. № 833н «Об утверждении Правил по охране труда при размещении, монтаже, техническом обслуживании и ремонте технологического оборудования»;
- Приказ Минтруда и социальной защиты РФ от 28.10.2020 г. № 753н «Об утверждении Правил по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах и размещении грузов»;

- Приказ Министерства энергетики РФ от 13 января 2003 г. № 6 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей»;

- Приказ Министерства обороны РФ от 26 июня 1995 г. № 214.

При эксплуатации и обслуживании транспортно-установочного агрегата на работников возможно воздействие следующих производственных факторов:

- движущийся железнодорожный состав;
- перемещаемые грузы и материалы;
- электрический ток, вызываемый разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работник, включая действие высоковольтного разряда в виде дуги и наведенного напряжения;

- падающие с высоты предметы, инструменты;
- недостаточная освещенность рабочей зоны в темное время суток;
- повышенная или пониженная температура, влажность воздуха рабочей зоны;

- повышенная и пониженная температура поверхностей оборудования.

#### **4.2 Требования, предъявляемые к обслуживающему персоналу**

Работники должны допускаться к выполнению работ только при подтверждении факта прохождения работником обучения по охране труда, безопасным методам и приемам выполнения работ и проверку знания требований охраны труда.

Работники, совмещающие профессии (должности), должны пройти обучение, инструктаж, стажировку и проверку знания требований охраны труда в полном объеме по основной и по совмещаемой профессии (должности).

Эксплуатацию электроустановок должен осуществлять подготовленный электротехнический персонал и те работники, которые допущены к техническому обслуживанию электрооборудования, должны иметь соответствующую группу по электробезопасности.

Персонал, обслуживающий транспортно-установочный агрегат должен знать места расположения медицинских аптек и средств индивидуальной

защиты, а также уметь оказать первую медицинскую помощь при травмах, ожогах, при поражении обслуживающего персонала электрическим током и токсичными веществами.

Для работ с повышенной опасностью в процессе размещения, монтажа, технического обслуживания и ремонта технологического оборудования должен выдаваться наряд-допуск на производство работ с повышенной опасностью, который должен быть оформлен уполномоченными должностными лицами по надлежащей форме.

В наряде-допуске должны быть перечислены и указаны:

- состав бригады;
- работники, ответственные за организацию и безопасное производство работ;
- содержание работ;
- место работ;
- время работ;
- условия производства работ;
- необходимые меры безопасности при выполнении работ.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для научно-исследовательских работ, в которых есть необходимость в разработке математических моделей на основе имеющегося программного обеспечения, либо же разработки собственного программного обеспечения затраты на данную НИР оцениваются:

$$C_{НИР} = t_p 3П_о + t_m C_{м-ч} + З_n + П_c, \quad (5.1)$$

где  $t_p$  – трудоемкость выполнения НИР, человеки-дни;

$3П_о$  – затраты на основную работу разработчиков НИР, усл. ед./дни;

$t_m$  – затраты машинного времени на выполнение НИР, час;

$C_{м-ч}$  – стоимость машино-часа работы ЭВМ, учитывающая амортизационные издержки, усл. ед;

$З_n$  – накладные расходы, усл. ед.;

$П_c$  – сметная прибыль, усл. ед.

Трудоёмкость научно-исследовательских работ (НИР) — это мера затрат рабочего времени на выполнение всех этапов исследования. Она включает в себя множество составляющих и может быть рассчитана различными методами, выбор которых зависит от наличия аналогов и специфики проекта.

Затраты рабочего времени включают:

- изучение литературы и патентов: Поиск и анализ существующих данных по теме исследования, выявление "белых пятен" и определение направления дальнейшей работы. Объем работы зависит от новизны темы и глубины исследования;

- разработка программного обеспечения: создание необходимого программного обеспечения, либо адаптация существующего. Эта часть может включать в себя проектирование, кодирование, тестирование и отладку. Трудоёмкость зависит от сложности программного обеспечения и опыта разработчиков;

- разработка моделей: создание математических или физических моделей исследуемых процессов или объектов. Это может включать в себя теоретические выкладки, компьютерное моделирование, создание прототипов и т.д;
- проведение расчетов: выполнение необходимых расчетов, симуляций и анализа данных, полученных в ходе экспериментальных или теоретических исследований;
- анализ результатов: обработка, интерпретация и анализ полученных данных. Это может включать в себя статистическую обработку, визуализацию данных и формулирование выводов;
- написание отчётов и публикаций: подготовка отчётов о проделанной работе, а также подготовка публикаций в научных журналах или на конференциях. Это включает в себя написание текста, оформление графиков и таблиц, редактирование и корректуру.

При проведении научно-исследовательских работ применение системы аналогов практически невозможно в виду новизны работ, поэтому для определения ожидаемого значения продолжительности работ  $t_p$  применяется вероятностный метод - метод двух оценок  $t_{min}$  и  $t_{max}$ .

$$t_p = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (5.2)$$

где  $t_{min}$  – минимальная трудоемкость работ, человеко-дни;

$t_{max}$  – максимальная трудоемкость работ, человеко-дни.

Сроки  $t_{min}$  и  $t_{max}$  устанавливает руководитель.

Затраты на основную работу разработчиков НИР складываются из самой заработной платы работников, с учетом дополнительной или премиальной части, из отчислений, идущих на внебюджетные социальные фонды и других затрат, относящихся на материальные расходники и др.

Размер основной заработной платы определяется из средней заработной платы, предлагаемой на рынке труда при такой должности и квалификации,

разделенной на количество рабочих дней. На размер основной заработной платы еще влияют районный коэффициент и северная надбавка, которые зависят от места проведения НИР.

$$ЗП = (1 \cdot K_p \cdot K_C) \cdot (1 \cdot K_{np}) \cdot \sum_{i=1}^n (З_{Ti} \cdot Ч_i \cdot T_i), \quad (5.3)$$

где  $K_p$  – районный коэффициент;

$K_C$  – коэффициент северной надбавки;

$K_{np}$  – коэффициент премий;

$З_{mi}$  – оклад  $i$ -го работника, включая доплаты и надбавки;

$Ч_i$  – численность работников, работающих по  $i$ -му окладу;

$T_i$  – время работы работников, работающих по  $i$ -му окладу.

Стимулирующие добавки, включенные в дополнительную заработную плату, определяются работодателем в собственных нормативных актах.

Все отчисления на социальные нужды в государственные фонды регулируются и определяются действующим законодательством и страховых тарифов. Чаще всего они выражаются в качестве процента от основной заработной платы.

К материалам при выполнении научно-исследовательских работ могут относиться как физические расходники, например, бумага, электронные носители информации, комплектующие для ЭВМ, картриджи, канцелярские товары, так и различные информационные материалы, отсутствующие в открытом доступе.

Прочие основные расходы ввиду невозможности прямой оценки принимаются в размере утвержденного процента к предыдущим статьям основных затрат (заработная плата основная и дополнительная, отчисления на социальные нужды, материальные затраты, амортизационные отчисления).

Накладные расходы  $З_n$  или расходы по управлению производством утверждаются на предприятии и применяются в расчетах в процентах к общей сумме основных расходов.

Сметная прибыль (плановые накопления) определяется умножением утвержденного норматива прибыли в процентах к сумме основных и накладных расходов:

$$P_c = (3P_o + 3_H) \cdot H_{nc} \cdot t_p, \quad (5.4)$$

где  $H_{nc}$  – норматив сметной прибыли.

Для выполнения вышеуказанных работ необходимы следующие специалисты:

- руководитель проекта НИР (составление отчёта);
- 2 научных сотрудника.

Для расчета приняты следующие нормативы:

- максимальная трудоемкость работ 90 человеко-дней;
- минимальная трудоемкость работ 60 человеко-дней;
- размер районного коэффициента – 1,2;
- размер северного коэффициента – 1;
- дополнительная заработная плата: 10% от основной заработной платы;
- отчисления на социальные нужды: 30% от суммы основной и дополнительной заработной платы;
- оклад руководителя проекта НИР – 900 усл.ед/час, согласно приказу Минтруда России от 3 июля 2014 г. № 434н;
- оклад научного работника – 300 усл.ед/час, согласно приказу Минтруда России от 03.07.2014 N 434н (ред. от 17.03.2017) "Об утверждении Примерного положения об оплате труда работников федеральных государственных бюджетных учреждений науки, подведомственных Министерству труда и социальной защиты Российской Федерации";
- поскольку невозможно прямо определить затраты на материалы, то они принимаются как 1% от основной заработной платы;
- прочие основные расходы в расчете принимаются нулю;

• затраты машинного времени на выполнение НИР принимаются 500 часов;

- накладные расходы: 20% от суммы основных расходов;
- сметная прибыль: 10% от основных и накладных расходов.

Трудоемкость выполнения НИР равняется:

$$t_p = \frac{3 \cdot 60 + 2 \cdot 90}{5} = 72 \text{ человеко-дня.}$$

Затраты на основную работу разработчиков НИР равны:

$$ЗП_o = (1 \cdot 1,2 \cdot 1) \cdot (1 \cdot 1,1) \cdot (900 \cdot 1 \cdot 8 + 300 \cdot 2 \cdot 8) = 15\,840 \text{ усл. ед./день.}$$

Отчисления на социальные нужды составляют 4 752 усл. ед./день.

Затраты на материалы составляют 158 усл. ед./день.

Таким образом:

$$ЗП_o = 15840 + 4752 + 158 = 20\,750 \text{ усл. ед./день.}$$

Стационарный персональный компьютер, подходящий для программ MATLAB и Компас-3D на базе Intel Core i5-13400F OEM и GeForce RTX 3050 с 16 гигабайт оперативной памяти со всей периферией имеет стоимость около 100 000 усл. ед. При сроке гарантии 5 лет его стоимость машино-часа работы составляет 9,5 усл.ед.

Накладные расходы составляют 4 150 усл. ед./день.

В таком случае, сметная прибыль равняется:

$$П_c = (20750 + 4150) \cdot 0,1 \cdot 72 = 179\,280 \text{ усл. ед.}$$

Затраты на НИР в итоге равны:

$$C_{НИР} = 72 \cdot 20750 + 500 \cdot 9,5 + 4150 + 179280 = 1\,682\,180 \text{ усл. ед.}$$

Рентабельность работ определяется по формуле:

$$P = П_c / C_{НИР} \cdot 100\% , \tag{5.5}$$

и равна:

$$P = 179280 / 1682180 \cdot 100\% = 10,6\% .$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнив карты напряжений у крепления гидроцилиндра с внутренней и внешней сторон с расчетными картами эквивалентных напряжений, подтверждена схожесть результатов, что признает математическую модель динамического нагружения стрелы транспортно-установочного агрегата адекватной и подтверждает возможность ее использования для расчета напряженно-деформируемого состояния в любом положении стрелы. Погрешность результатов в таком случае, будет большей частью зависеть от плотности и качества конечно-элементной сетки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Инструкция по техническому обслуживанию. Транспортно-установочный агрегат. 2014. – 113 с.
- 2 Техническое описание. Транспортно-установочный агрегат. 2014. – 147 с.
- 3 Маликов В. Г. Наземное оборудование ракет. / В. Г. Маликов, С. Ф. Комисарик, А. М. Коротков. – М. : Воениздат, 1971. – 304 с.
- 4 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. / Л. Сегерлинд. – М. : МИР, 1979. – 389 с.
- 5 Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : МИР, 1986. – 318 с.
- 6 Абрамов А. Н. Эксплуатационная надежность технических систем: учеб. пособие / А.Н. Абрамов. – М. : МАДИ, 2019. – 120 с.
- 7 Ляпин М. И. Транспортно-установочный агрегат. Расчет надежности / М. И. Ляпин, В. И. Сажин-Шаховской. – М. : 2014. – 45 с.
- 8 Кондаков В. И. Транспортно-установочный агрегат. Расчет на прочность / В. И. Кондаков. – М. : 2013 – 323 с.
- 9 Андреев А. В. Теоретические основы надежности технических систем: учебное пособие / А. В. Андреев, В. В. Яковлев, Т. Ю. Короткая. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 164 с.
- 10 Руппель А. А. Моделирование гидравлических систем в MATLAB: учебное пособие / А.А. Руппель, А.А. Сагандыков, М.С. Корятов. – Омск : СиБАДИ, 2009. – 171 с.
- 11 Ляпин М. И. Транспортно-установочный агрегат. Расчет гидравлический / М. И. Ляпин, В. И. Сажин-Шаховской. – М. : 2014. – 57 с.
- 12 Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 110 с.
- 13 Скворцов А. В. Алгоритмы построения и анализа триангуляции / А. В. Скворцов, Н. С. Мирза. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 168 с.

14 Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение / А. В. Скворцов.  
– Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.